

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie civil

**THESE DE DOCTORAT**

En Génie civil

**PATHOLOGIE ET QUALITE DU BETON DANS DES REGIONS DE  
BLIDA**

Par

**Ishak BOUALLAGA**

Devant le jury composé de :

ABDESSEMED Mouloud	Professeur, Saâd Dahleb, Blida1	Président
BOUKENDAKDJI Othmane	Professeur, Université, Médéa	Examineur
DEBIEB Farid	Professeur, Université, Médéa	Examineur
ALI-BENYAHIA Khodja	Professeur, Université, Khemis Meliana	Examineur
ABED Mohamed	Professeur, Université Saâd Dahleb, Blida1	Encadreur
KENAI Saïd	Professeur, Université Saâd Dahleb, Blida1	Co- Encadreur

**Blida, 2024**

## **Dédicaces**

C'est avec une profonde gratitude et un immense respect que je dédie cette thèse à vous, mes chers parents. Votre soutien inconditionnel, vos encouragements constants et votre amour indéfectible ont été les piliers sur lesquels j'ai pu m'appuyer tout au long de ce voyage académique. Sans votre sagesse, vos sacrifices et votre croyance en mes capacités, ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci de m'avoir donné les moyens et la force de poursuivre mes rêves. Ce succès est autant le vôtre que le mien.

À ma femme, je suis profondément reconnaissant pour son soutien indéfectible, son encouragement constant et sa patience infinie. Votre présence a été ma source de force tout au long de ce périple.

Enfin, j'aimerais dédier aussi une mention spéciale à mes chers enfants, Ranim, Safaa et Yakoub. Votre présence joyeuse et vos sourires constants ont illuminé chaque étape de ce voyage académique

## **Remerciements**

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma gratitude profonde et sincère à Dieu Tout-Puissant. C'est par Sa grâce et Sa bénédiction que j'ai eu la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Chaque étape de ce parcours a été guidée par Sa lumière et Sa sagesse. Merci, Seigneur, pour Votre protection constante, Votre inspiration et Votre soutien tout au long de ce voyage académique. Que Votre nom soit glorifié à jamais.

**Je** souhaite profondément exprimer ma gratitude envers les personnes qui ont joué un rôle essentiel dans la réussite de cette thèse de doctorat :

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers mon promoteur, M. ABED Mohamed, pour son orientation précieuse, son encadrement perspicace et son soutien constant tout au long de ce parcours. Ses conseils avisés et son dévouement ont été des éléments clés dans l'aboutissement de ce travail de recherche.

**Je** voudrais également adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon Co-promoteur, M. Said KENAI, pour sa contribution inestimable, ses recommandations judicieuses et son engagement actif dans l'enrichissement de cette thèse. Sa collaboration a véritablement enrichi la portée de mon travail.

**Je** tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner minutieusement mon travail et de fournir leurs commentaires constructifs. Leur expertise et leurs évaluations ont grandement enrichi ma thèse.

**Ma** reconnaissance s'étend également aux techniciens de la DEP (Direction des Equipements Publique de la Wilaya de Blida) ainsi qu'à l'équipe du CTC (Contrôle Technique de Construction), sous la direction éclairée de M. KABRI Mustapha. Votre expertise et votre engagement ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce projet.

En réunissant ces remerciements, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers chacune de ces personnes qui ont joué un rôle vital dans la concrétisation de cette thèse de doctorat. Votre soutien et votre collaboration ont été d'une importance inestimable, et je vous suis sincèrement reconnaissant.

## ملخص

يعترف معظم الخبراء في قطاع البناء في الجزائر، سواء كانوا مهندسين أو مهندسين معماريين أو متخصصين، بوجود تحد كبير يتعلق بنوعية الخرسانة في مشاريع البناء. يتجلى هذا التحدي من خلال عدم ملائمة مقاومة الخرسانة في معظم مواقع البناء في البلاد. في هذا السياق، ونظراً لعجز الدراسات الحالية عن تشخيص هذا التحدي بوضوح بسبب تركيزها على مشاريع محددة، يصبح من الضروري اعتماد نهج شامل ومتكامل لفهم وحل هذه المشكلة.

من بين الأساليب المقترحة لتحقيق هذا الهدف، نجد استخدام قاعدة بيانات واسعة ومتعددة الأبعاد تحتوي على المتغيرات التي تؤثر على قوة وهيكل الخرسانة. يتيح استخدام هذا النمط من جمع كمية كبيرة من البيانات لإجراء تحليل إحصائي عميق. في هذه الأطروحة، تم تحليل 276 مشروعاً وأكثر من 15,000 نتيجة لمقاومة الخرسانة بعد 7 و28 يوماً خلال الفترة من 2000 إلى 2014. يتميز النموذج المطور في هذه الدراسة بمرونته العالية في معالجة العديد من المتغيرات الموجودة في مواقع البناء، مع ضمان مطابقة نتائج اختبارات قوة الخرسانة لمعايير القبول. تم تحديد العديد من الاستعلامات ودمجها في قاعدة البيانات.

تطبيق الأساليب الإحصائية الحديثة في هذه الدراسة سمح لنا بفهم توزيع وتطور قوة الخرسانة على مدى فترات زمنية مختلفة، مثل عمر 7 أيام و 28 يوم. تمكنت النتائج من تسليط الضوء على تشتت النتائج في اختبار مقاومة الخرسانة، وخاصة عند عمر 28 يوم مقارنة بالعمر المبكر.

الدراسة المنجزة علي مدى توافق خصائص الخرسانة مع المعايير الوطنية والدولية كشفت عن عوامل تساهم في ضعف مقاومتها. على الرغم من أن تباين مقاومة الخرسانة لم يكن مرتفعاً، إلا أن أكثر من ثلث المشاريع التي تمت دراستها لم تلتزم بمعايير المطابقة. توصلت الدراسة أن إنتاج الخرسانة الغير الملائمة في مرحلة مبكرة من المشروع يعد مشكل بارز يجب تداركه. كما مكنت دراسة طريقة تأثير صب الخرسانة و انتاجها ، بالإضافة إلى عوامل المشروع نفسه، من تقديم مجموعة من الحلول والمقترحات التي من شأنها تحسين جودة الخرسانة وضمان سلامة المنشآت والبنية التحتية في المستقبل.

**كلمات مفتاحية:** جودة الخرسانة، مقاومة الضغط، دراسة إحصائية، قاعدة بيانات، المطابقة ، دراسة حالة.

## Résumé

La plupart des experts opérant dans le secteur de la construction en Algérie, qu'ils soient des ingénieurs, des architectes ou des spécialistes, concèdent l'existence d'un défi substantiel inhérent à la résistance du béton sur site. Cette problématique se traduit par une inadéquation flagrante de la résistance du béton dans la grande majorité des chantiers de construction du pays. Dans ce contexte et compte tenu de l'incapacité des études actuelles à diagnostiquer clairement ce défi en raison de leur focalisation sur des projets spécifiques, il est nécessaire d'adopter une approche globale et exhaustive pour comprendre et résoudre ce problème.

Parmi les méthodes proposées pour atteindre cet objectif, on trouve l'utilisation d'une base de données large et multidimensionnelle comprenant des variables qui influencent la résistance et la structuration du béton. Cela permet de recueillir une grande quantité de données pour effectuer une analyse statistique approfondie. Dans cette thèse 276 projets et plus de 15 000 résultats de  $f_c$  7 et 28 jours durant la période 2000 à 2014 ont été analysés. Le modèle de la base des données développé dans cette étude se distingue par sa grande flexibilité dans le traitement des multiples variables des sites de construction, tout en pouvant vérifier la conformité des résultats des tests de résistance du béton aux normes d'acceptation. De nombreuses requêtes sont définies et intégrées à la base de données.

Le recours aux méthodes statistiques modernes dans l'étude nous a permis de comprendre la distribution et l'évolution de la résistance du béton à différentes âges. Les résultats ont mis en évidence la dispersion des résultats dans les tests de résistance du béton, en particulier à 28 jours par rapport à jeune âge.

L'étude réalisée pour évaluer la conformité du béton selon les normes nationales et internationales a révélé des facteurs contribuant à sa faible résistance. Bien que la variabilité de la résistance à la compression n'ait pas été élevée, plus d'un tiers des projets étudiés n'ont pas respecté les critères de conformité. L'étude a également montré que la production de béton inadapté dans les premières phases du projet constitue un problème majeur qui doit être corrigé. L'analyse de l'impact de la méthode de coulage du béton et de sa composition, ainsi que des facteurs du projet lui-même, a conduit à la proposition de solutions visant à améliorer la qualité du béton et à garantir la sécurité des structures et des infrastructures à l'avenir.

**Mots clés :** Qualité du béton, résistance à la compression, étude statistique, base de données, conformité, étude de cas.

## Abstract

Most experts in the Algerian construction sector, whether they are engineers, architects, or specialists, acknowledge the existence of a substantial challenge inherent to concrete strength on site. This issue is manifested by a clear inadequacy in concrete strength in the vast majority of construction sites in the country. Given the current studies' incapacity to clearly diagnose this challenge due to their focus on specific projects, it becomes imperative to adopt a comprehensive and holistic approach to understand and address this problem.

Among the methods proposed to achieve this objective, one finds the utilization of a broad and multidimensional database comprising variables influencing concrete strength and structure. This allows for the collection of a substantial amount of data to conduct an in-depth statistical analysis. In this thesis, 276 projects and more than 15,000 results of compressive strength at 7 and 28 days were analyzed over the period from 2000 to 2014. The database developed in this study distinguishes itself through its high flexibility in handling the numerous variables present at construction sites while also ensuring the compliance of concrete strength test results with acceptance standards. Many requests are defined and integrated to the data base.

The application of modern statistical methods in this study has enabled us to comprehend the distribution and evolution of concrete strength at different ages. The results have underscored the dispersion of results in concrete strength tests, particularly at 28 days compared to early age.

The study undertaken to assess concrete conformity with national and international standards has revealed factors contributing to its low strength. Although the variability of compressive strength was not high, more than 1/3 of the projects studied did not meet the conformity criteria. Furthermore, the study has demonstrated that the production of inadequate concrete in the early stages of a project constitutes a major issue that must be rectified. Additionally, the analysis of the impact of concrete casting methods and its composition, as well as project-related factors, has led to the proposal of solutions aimed at enhancing concrete quality and ensuring the safety of structures and infrastructure in the future.

**Keywords:** Quality of concrete, Compressive strength, Statistical study, Database, conformity, Case study.

## TABLE DES MATIÈRES

Dédicase.....	2
Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Table des matières.....	7
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	14
Liste des abréviations.....	16
<b>INTRODUCTION GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE 1 : QUALITE DU BETON .....</b>	<b>24</b>
1.1 Introduction.....	24
1.2 La qualité de béton sur les chantiers Algériens.....	25
1.2.1 Définition de la qualité du béton.....	25
1.2.2 Paramètres de la qualité de béton.....	26
1.2.2.1 La résistance à la compression.....	26
1.2.2.2 La durabilité.....	26
1.2.2.3 Ouvrabilité.....	27
1.2.3 La qualité du béton en Algérie .....	28
1.3 Facteurs influant sur la qualité du béton. ....	30
1.3.1 Les constituants du béton .....	30
1.3.1.1 Ciment .....	30
1.3.1.2 Granulats .....	36
1.3.1.3 Eau de gâchage.....	46
1.3.1.4 Le rapport (eau/ciment).....	48
1.3.1.5 Adjuvants .....	51
1.3.2 Conditions de mise en œuvre .....	53
1.3.2.1 Le malaxage.....	53
1.3.2.2 Vibration (manque et excès).....	53
1.3.2.3 La cure .....	55
1.4 Normes pratiques de contrôle de la qualité du béton.....	60
1.4.1 Critère de conformité.....	61
1.4.1.1 Critère d'acceptation des résultats individuels.....	61

---

1.4.1.2	Critère d'acceptation de la moyenne des résultats.....	64
1.4.2	Classification du système de contrôle.....	66
1.5	Conclusion.....	68
<b>2</b>	<b>CHAPITRE 2 : NOTIONS DE STATISTIQUES</b> .....	<b>70</b>
2.1	Introduction.....	70
2.2	Terminologie et concepts fondamentaux.....	70
2.2.1	Population et individus .....	70
2.2.2	Echantillon.....	71
2.2.3	Caractère et variable statistique .....	71
2.2.4	Modalités.....	72
2.3	Analyse descriptive ou déductive.....	72
2.3.1	Type d'analyse descriptive .....	72
2.3.1.1	Paramètres de tendance centrale ou de position .....	73
2.3.1.2	Paramètres de dispersion ou variabilité.....	75
2.3.1.3	Paramètres de forme.....	76
2.4	Analyse mathématique inductive (inférentielle).....	79
2.4.1	Lois de probabilité .....	80
2.4.1.1	Fonction de densité et de répartition.....	80
2.4.1.2	Loi normale (Loi de Gauss).....	81
2.4.1.3	Loi de Student.....	82
2.4.2	Conditions générales de l'analyse inférentielle .....	84
2.5	Principes des tests statistiques .....	84
2.5.1	Généralités sur les tests .....	84
2.5.2	Construction et exploitation d'un test .....	85
2.5.3	La notion de p-valeur .....	86
2.6	Tests paramétriques et non paramétriques.....	87
2.7	Description de l'analyse de la variance .....	89
2.7.1	Principe de l'analyse.....	89
2.7.2	Formulation de l'hypothèse du test et conditions d'application de l'analyse. ...	89
2.8	Conclusion.....	91
<b>3</b>	<b>CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE LA BASE DES DONNEES</b> .....	<b>92</b>
3.1	Introduction.....	92
3.2	Etapes de la construction d'une base de données .....	93
3.3	Cadre Conceptuel de données et méthodologie de structuration.....	94
3.3.1	Le modèle conceptuel des données.....	94
3.3.2	Modèle logique.....	97
3.4	Phases de la modélisation sous ACCESS .....	97
3.4.1	L'accès à la base et menu principal .....	98



3.4.2	Formulaire de projet .....	99
3.4.3	Formulaire d'enregistrement pour le rapport d'essai d'écrasement.....	101
3.4.4	Formulaire d'enregistrement des résultats de résistance à la compression ....	101
3.4.5	Formulaire de tests destructifs et non destructifs.....	102
3.4.6	Formulaire d'analyse .....	103
3.5	Conclusion.....	105
<b>4</b>	<b>CHAPITRE 4 : ANALYSE STATISTIQUE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION....</b>	<b>106</b>
4.1	Introduction.....	106
4.2	Présentation des données.....	107
4.3	Répartition et classification des projets de l'étude .....	107
4.3.1	Volume des résultats de l'essai d'écrasement du béton .....	110
4.4	Analyse statistique des champs de résistance à 7 et 28 jours .....	110
4.4.1	Analyse descriptive.....	110
4.4.2	Analyse visuelle de la forme de distribution des résistances.....	111
4.4.3	Etude de paramètres de dispersion .....	116
4.4.4	Etude de paramètres de forme .....	119
4.5	Étude de la normalité de la distribution des résultats.....	123
4.5.1	Méthode des indices de forme.....	123
4.5.1.1	Asymétrie (skewness) .....	123
4.5.1.2	Aplatissement (Kurstosis) .....	126
4.5.1.3	Relation entre Skewness et Kurstosis .....	130
4.6	Tests d'adéquation de la normalité .....	133
4.6.1	L'impact de la taille de l'échantillonnage sur la normalité des résultats .....	137
4.6.2	Comparaison de la normalité des données pour les deux âges.....	138
4.7	Effet de l'association statistique sur la cinétique de la résistance à la compression 140	
4.8	Conclusion.....	145
<b>5</b>	<b>CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA CONFORMITE DU BETON.....</b>	<b>146</b>
5.1	Généralité .....	146
5.2	Etude de la variabilité des résultats .....	147
5.2.1	Macro-variation de la résistance à 28 jours .....	147
5.2.2	Micro-variation de la résistance à 28 jours .....	149
5.2.3	Analyse statistique inférentielle de la variation de la résistance .....	153
5.3	Analyse de la qualité du béton.....	156
5.3.1	Appréciation de la qualité du béton mis en œuvre.....	156
5.3.2	Analyse des critères de conformité du béton selon les normes.....	160
5.3.2.1	Critère du pourcentage maximal des résultats admis .....	160
5.3.2.2	Est-il possible d'évaluer la conformité du béton à jeune âge ? .....	166

---

5.3.2.3	Evaluation de la conformité des résultats individuels $f_{ci}$ .....	169
5.3.2.4	Evaluation de la conformité des résultats de la résistance moyenne $f_{cmi}$ .....	174
5.3.2.5	Comparaison de la conformité du béton entre les normes .....	177
5.4	Analyse de la variance (ANOVA) des résultats d'écrasement du béton .....	179
5.4.1	Facteurs liés à la mise en œuvre.....	179
5.4.1.1	Outils de mise en œuvre du béton .....	179
5.4.1.2	Mode de malaxage .....	181
5.4.2	Facteurs propre au projet .....	182
5.4.2.1	Variation par année .....	182
5.4.2.2	Variation par catégorie des entreprises .....	184
5.4.2.3	Variation par équipe de production.....	185
5.4.2.4	Variation par niveau d'avancement des travaux .....	185
5.4.2.5	Variation par type d'éléments .....	187
5.4.3	Facteurs liés à la formulation du béton.....	188
5.4.3.1	Le rapport E/C .....	188
5.4.3.2	Le dosage d'adjuvants.....	189
5.4.3.3	Systèmes ou squelette granulaire du béton.....	190
5.4.3.4	Qualité du sable .....	192
5.5	Conclusion.....	197
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>200</b>
Perspectives et recommandations .....		202
Référence.....		204
Annexe A : Paramètres de l'analyse descriptive (modèle 1).		
Annexe B : Résultats du test de corrélation de Spearman du modèle.		
Annexe C : Données du modèle 2 (conformité du béton).		

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Recensement des projets avec et sans essais NDT (2004-2014)-----	19
Figure 2 : Schéma décisionnel en cas de problème de qualité du béton sur site.-----	21
Figure 1. 1 : Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse du ciment .-----	31
Figure 1. 2 : Influence de la finesse du ciment sur la cinétique d'hydratation .-----	32
Figure 1. 3 : Taux de perte de poids et taux de rouille armatures en fonction du rapport E/C .-----	33
Figure 1. 4 : Effet du contenu en calcaire sur la résistance à la compression .-----	34
Figure 1. 5 : Effet du type de ciment sur la perméabilité des bétons au chlorure .-----	35
Figure 1. 6 : Absorption capillaire des mortiers en CEM I et III sous différentes conditions d'exposition. (Condition A : 20°C et 100 % HR, condition B : 15°C et 85 % HR, condition C : 20°C et 65 % HR, et condition D : 30°C et 40 % HR).-----	35
Figure 1. 7 : Développement de la résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires sans additifs chimiques.-----	38
Figure 1. 8 : Taux de perte poids et le taux de rouille en fonction du rapport (taille agrégat/enrobage).-----	39
Figure 1. 9 : Variation de la résistance en compression en fonction du pourcentage d'agrégats gros (P : adjuvant réducteur d'eau ; SP ; super plastifiant).-----	39
Figure 1. 10 : Evolution de la résistance en compression en fonction du rapport (s/g).-----	40
Figure 1. 11 : Résistance la compression des mélanges SCC.-----	42
Figure 1. 12 : Variations des résistances à la compression en fonction de l'équivalent de sable.-----	44
Figure 1. 13 : Effet de la teneur de sable des dunes sur la résistance en compression .-----	45
Figure 1. 14 : Variation du retrait par rapport au béton témoin à l'échéance de 6 mois.-----	46
Figure 1. 15 : Evolution du volume d'eau ressué en fonction du temps .-----	48
Figure 1. 16 : Variation de la résistance en compression en fonction du rapport E/C.-----	49
Figure 1. 17 : Variation de la résistance à la compression, l'affaissement, et le facteur du compactage en fonction du rapport E/C.-----	49
Figure 1. 18 : Effet du rapport E/C et du temps de durcissement sur la porosité du mortier en ciment.-----	50
Figure 1. 19 : Variation de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour différents rapport E/C.-----	51
Figure 1. 20 : Résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires avec 1 % de SP.-----	52

Figure 1. 21 : Résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires avec 2 % SP. ....	52
Figure 1. 22 : Effet de paroi au voisinage d'un coffrage. ....	54
Figure 1. 23 : Résistance en compression avec différentes conditions de cure. ....	56
Figure 1. 24 : Développement de la résistance du béton (a) CPA, (b) BC et (c) TC. ....	57
Figure 1. 25 : Influence de la durée de cure sur la résistance d'un béton (rapport E/C = 0,5) . ....	58
Figure 1. 26 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et type de cure . ....	59
Figure 2. 1 : Asymétrie d'une distribution [62]. ....	78
Figure 2. 2 : Aplatissement d'une distribution ....	79
Figure 2. 3 : Distribution de la loi normale (loi de Gauss). ....	82
Figure 2. 4 : Densité de la loi de Student. ....	84
Figure 2. 5 : Test unilatéral (a), et bilatéral (b) : zones d'acceptation et de rejet pour une distribution normale à un seuil de décision $\alpha = 0:05$ sous l'hypothèse nulle $H_0$ . ....	86
Figure 3. 1 : Modèle conceptuel des données. ....	96
Figure 3. 2 : Exemple d'une relation entre deux tables. ....	97
Figure 3. 3 : Interface d'accès à la base de données. ....	99
Figure 3. 4 : Menu principal de la base de données. ....	99
Figure 3. 5 : Interface de saisie des informations du projet. ....	100
Figure 3. 6 : Exemple d'un critère d'intégrité pour le dosage en ciment. ....	100
Figure 3. 7 : Exemple d'un enregistrement des informations du Procès-verbal d'écrasement du béton. ....	101
Figure 3. 8 : Interface de saisie des résultats de l'écrasement du béton. ....	102
Figure 3. 9 : Formulaire des essais destructif et non destructif. ....	103
Figure 3. 10 : Statistiques de la base des données. ....	104
Figure 3. 11 : Evaluation des critères de conformité du béton. ....	104
Figure 4. 1 : Fréquence des projets par année . ....	109
Figure 4. 2 : Comparaison des paramètres de dispersion du modèle à l'âge de 7 et 28 jours. ....	117
Figure 4. 3 : Corrélation entre les paramètres de dispersion du modèle (écart type et étendue). ....	118
Figure 4. 4 : Histogramme des paramètres de forme du modèle ....	120
Figure 4. 5 : Comparaison entre les résistances du béton (site/formulation). ....	122
Figure 4. 6 : Répartition des valeurs du coefficient d'asymétrie par rapport aux limites de fluctuation. ....	125

Figure 4. 7 : Corrélation entre les coefficients d'asymétrie .....	126
Figure 4. 8 : Répartition des valeurs du coefficient d'aplatissement par rapport aux limites de fluctuation.....	128
Figure 4. 9: Corrélation entre les coefficients d'aplatissement .....	129
Figure 4. 10 : Aplatissement en fonction de l'asymétrie à 7 et 28 jours. ....	131
Figure 4. 11 : Pourcentage des projets obéissent à la distribution normale pour l'ensemble des tests.....	134
Figure 4. 12 : Evolution des valeurs de la statistique p-valeur des tests de normalité du modèle.....	135
Figure 4. 13 : L'influence de la taille d'échantillon sur la normalité des données.....	138
Figure 4. 14 : Comparaison des valeurs de p-valeur entre les deux âges du béton. ....	140
Figure 4. 15 : Influence du coefficient de variation sur la normalité des données.....	140
Figure 4. 16 : Corrélation entre les résistances $f_{c7j}$ et $f_{c28j}$ du modèle.....	142
Figure 4. 17 : Influence de l'association statistique sur la corrélation entre $f_{c7j}$ et $f_{c28j}$ .....	144
Figure 5. 1 : Carte de contrôle de la résistance $f_{cmp}$ à 28 jours.....	148
Figure 5. 2 : Répartition des proportions de projets avec et sans variation en fonction du niveau de rejet des résultats .....	150
Figure 5. 3 : Exemples de distribution des données ajustées pour les niveaux de rejet de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.....	151
Figure 5. 4 : Variation de $\Delta f_{cmp}$ en fonction des valeurs rejetées pour les quatre niveaux.....	152
Figure 5. 5 : Représentation graphique des résultats du test de Student pour les groupes de rejet de 5%, 10%, 15% et 20%. ....	155
Figure 5. 6 : Évaluations de la qualité du béton selon la norme ACI (variation globale) .....	157
Figure 5. 7 : Comparaison entre la variation générale et la variation intra-lot.....	159
Figure 5. 8 : Critère de conformité du pourcentage maximal des résultats admis selon différents standards. ....	161
Figure 5. 9 : Comparaisons entre la résistance moyenne sur site et la résistance de référence (cible) pour 23 projets.....	165
Figure 5. 10 : Corrélation entre les résistances à la compression à 7 et 28 jours.....	165
Figure 5. 11 : Effet du niveau de rejet des résultats d'essai sur la non-conformité du béton.	166
Figure 5. 12 : Dispersion des résultats individuels autour de la résistance requise selon le premier critère de conformité de l'ACI.....	170
Figure 5. 13 : Répartition du taux des résultats conformes pour les résistances individuels. .....	170

---

Figure 5. 14 : Répartition des projets en fonction de l'année de réalisation pour les quatre groupes. ....	172
Figure 5. 15 : Répartition des projets en fonction de la qualification des entreprises. ....	172
Figure 5. 16 : Variation de l'expérience moyenne de l'organisme de contrôle (BET) pour les quatre groupes. ....	173
Figure 5. 17 : Critère de conformité des résultats individuels selon EN 206-1 et NA16002. ....	174
Figure 5. 18 : Dispersion des résultats de la résistance moyenne autour de la résistance requise selon le deuxième critère de conformité de l'ACI. ....	175
Figure 5. 19 : Répartition du taux des résultats conformes de la résistance moyenne pour les quatre groupes. ....	175
Figure 5. 20 : Taux globaux des résultats conformes de la résistance moyenne pour les quatre groupes. ....	176
Figure 5. 21 : Critère de conformité des résultats de la moyenne de résistance selon EN 206-1 et NA16002. ....	177
Figure 5. 22 : Comparaison de la conformité des résultats individuels selon différents codes. ....	178
Figure 5. 23 : Comparaison de la conformité des résultats de la moyenne selon différents codes. ....	178
Figure 5. 24 : Influence des méthodes de mise en œuvre sur la résistance. ....	181
Figure 5. 25 : Effet du mode de malaxage sur la résistance à la compression. ....	182
Figure 5. 26 : Évolution de la résistance du béton au fil du temps. ....	183
Figure 5. 27 : Variation de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction de la qualification des entreprises. ....	184
Figure 5. 28 : Variation de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction du stade d'avancement du projet. ....	186
Figure 5. 29 : Variation de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction du type d'élément. ....	187
Figure 5. 30 : Évolution de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction du rapport E/C. ....	189
Figure 5. 31 : Effet du dosage de l'adjuvant sur la moyenne de $f_{cmi}$ . ....	190
Figure 5. 32 : Effet du système granulaire sur la moyenne de $f_{cmi}$ . ....	191
Figure 5. 33 : Variation de la résistance $f_{cmi}$ en fonction de la densité. ....	192
Figure 5. 34 : Corrélation entre le dosage du sable normale est la résistance $f_{cmi}$ . ....	194
Figure 5. 35 : Variation de la moyenne de $f_{cmi}$ selon la provenance du sable normale. ....	195
Figure 5. 36 : Variation de la moyenne de $f_{cmi}$ selon la provenance du sable fin. ....	196

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 : Études sur la qualité du béton en Algérie : Revue des travaux. -----	29
Tableau 1. 4 : Combinaisons de la fraction granulaire étudiée.-----	38
Tableau 1. 5 : Pertes de masse et profondeur de l'abrasion des mélanges SCC. -----	41
Tableau 1. 6 : Résistance en compression et à la traction du béton pour des proportions variantes de l'eau traitée.-----	47
Tableau 1. 7 : Résistance à la compression des échantillons durcis avec différents procédés de cure. -----	60
Tableau 1. 8 : Facteurs de modification de l'écart type lorsque moins de 30 tests sont disponible.-----	62
Tableau 1. 9 : Résistance moyenne requise en l'absence de données.-----	63
Tableau 1. 10 : Critère de confirmation pour les formules individuelles.-----	64
Tableau 1. 11 : Critère d'acceptation de la moyenne des résultats selon EN 206-1 et NA 16002. -----	65
Tableau 1. 12 : Vérification de la valeur de l'écart type selon EN 206-1.-----	66
Tableau 1. 13 : Principales sources de la variation de résistance sur site.-----	67
Tableau 1. 14 : Appréciation du système de contrôle du béton pour $f' c \leq 35$ MPa selon ACI.	68
Tableau 2 1 : Formules usuelles de calcul des coefficients d'asymétrie .	78
Tableau 2 2 : Expression mathématique de la fonction de densité pour certaines lois de probabilité continues. ....	83
Tableau 2 3 : Principaux tests d'inférence paramétrique (P) et non paramétrique (NP) .....	88
Tableau 3. 1 : Tables et attributs de la base de données.	95
Tableau 4. 1 : Réparation des projets par rapport à la fonctionnalité des ouvrages.	108
Tableau 4. 2 : Structure technique des données. ....	109
Tableau 4. 3 : Répartition des entreprises en fonction de la catégorie de qualification. ....	109
Tableau 4. 4 : Volume des résultats d'écrasement du béton à 7, 14, et 28 jours. ....	110
Tableau 4. 5 : Répartition des projets en fonction du nombre de formulation employé. ....	114
Tableau 4. 6 : Forme de distribution des champs de résistance $f_{cmi 7j}$ et $f_{cmi 28j}$ . ....	115
Tableau 4. 7 : Distribution des données non-normales (NN) en se basant sur l'indice d'asymétrie. ....	125
Tableau 4. 8 : Distribution des données non-normal (NN) en se basant sur l'indice d'aplatissement. ....	128
Tableau 4. 9 : Formule mathématique de la prédiction de la résistance à la compression. ....	141
Tableau 4. 10 : Statistique descriptive et T-test d'échantillons appariés de $f_c 28j$ . ....	142

---

Tableau 5. 1 : Valeurs de $\mu_d$ pour les quatre niveaux du rejet des résultats.....	154
Tableau 5. 2 : Distribution des laboratoires impliqués.....	159
Tableau 5. 3 : Distribution des compositions de béton employées.....	159
Tableau 5. 4 : Non-conformité du béton pour différents travaux et selon différents codes.....	163
Tableau 5. 5 : Effet de l'association statistique sur la similarité de conformité selon différents codes.....	168
Tableau 5. 6 : Paramètres de dispersion en fonction du respect de la similarité de conformité du béton.....	168
Tableau 5. 7 : Test de normalité pour les deux groupes.....	180
Tableau 5. 8 : Test non paramétrique d'égalité de la variance.....	180
Tableau 5. 9 Test Anova à un facteur.....	180
Tableau 5. 10 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction de la qualification.....	185
Tableau 5. 11 : Effet du nombre des équipes sur la variation de la résistance.....	185
Tableau 5. 12 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction du stade d'avancement des travaux.....	187
Tableau 5. 13 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de $f_{cmi}$ en fonction du type d'élément.....	188
Tableau 5. 14 : Sous-ensembles homogènes pour le dosage des adjuvants.....	190
Tableau 5. 15 : Sous-ensembles homogènes pour la provenance de sable normale.....	194
Tableau 5. 16 : Propriétés du sable concassé.....	195
Tableau 5. 17 : Propriétés du sable fin.....	196



---

## LISTE DES ABREVIATIONS

ACI : institut américaine du béton.

Anova : analyse de la variance.

BAEL : règles technique de conception et de calcul.

BD : base de données.

BET : bureau d'études.

CTC : organisme de contrôle technique de construction.

C25/30 : béton d'une classe de résistance spécifique minimale égale à 25 MPa.

Cov : coefficient de variation.

$D_{\max}$  : dimension maximale du granulat.

E/C : rapport entre le dosage d'eau et le dosage en ciment.

E.S : équivalent de sable.

EN 206-1 : norme européenne du béton.

E : étendue.

$f_{ci}$  : résultat individuel de la résistance à la compression.

$f_{cmi}$  : la moyenne des résultats individuels de la résistance à la compression.

$f_{cm}$  : la moyenne des résistances à la compression.

$f_{ck}$  : résistance caractéristique de la classe du béton.

$f_{ck\ site}$  : résistance caractéristique du béton sur site.

$f^{\circ}_{cr}$  : la moyenne des résistances à la compression requise.

$f^{\circ}_c$  : la moyenne des résistances à la compression spécifiée.

$f(b)$  : fonction de répartition.

$f_{c\ 7j}$  : résistance à la compression à 7 jours.

$f_{c\ 28j}$  : résistance à la compression à 28 jours.

$f_{cmp}$  : résistance à la compression moyenne du projet.

HSC : béton à haute performance.

$H_0$  : hypothèse nulle.

$H_1$  : hypothèse alternative.

- $I_c$  : indice de courbure du squelette granulaire.
- $K$  : coefficient d'aplatissement.
- $M_d$  : la médiane d'une série statistique.
- MCD : modèle conceptuel des données.
- MLD : modèle logique des données.
- NA 16002 : norme algérienne du béton.
- $P(x)$  : fonction de densité.
- P-valeur : probabilité critique.
- PPI : période de production initiale.
- PPC : période de production continue.
- s/g : rapport entre le dosage du sable et le dosage du gravier.
- SSC : béton auto-plaçant.
- $S_{15}$  : écart type des 15 derniers résultats d'essais.
- $S^2_x$  : la variance de la série statistique.
- $S$  : coefficient d'asymétrie.
- $\bar{x}$  : La moyenne de la série statistique.
- VBA : Visual Basic for Applications.
- $\sigma$  : écart type de la population.
- $\alpha$  : risque du première espace.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

Le béton, reconnu pour ses qualités exceptionnelles, joue un rôle prédominant dans divers secteurs de la construction en Algérie, alliant performance et qualité pour des projets variés. Sa robustesse face à des charges considérables en fait un matériau prisée, utilisée aussi bien pour les structures imposantes que pour les projets individuels.

Toutefois, l'étude de la résistance à la compression en tant que paramètre essentiel de la qualité du béton dans les projets retient fortement l'attention des experts et des chercheurs. Cette considération résulte des conséquences indésirables pouvant découler d'une altération de cette caractéristique. Généralement, les recherches se concentrent sur la contribution de chaque composant ou caractéristique lié à la composition du béton sur cette propriété importante.

Cependant, la réflexion sur la qualité du béton dans les étapes postérieures, c'est-à-dire pendant et après sa mise en œuvre, n'a pas encore reçu toute l'attention qu'elle mérite dans le domaine de la technologie du béton, particulièrement en Algérie. Néanmoins, ces dernières années, nous avons observé un intérêt croissant de la part des chercheurs pour explorer ce domaine en profondeur. Des études variées ont été menées à travers le monde pour appréhender les multiples facettes de la qualité du béton.

C'est dans ce contexte que notre étude trouve sa pertinence. Notre objectif est d'apporter une nouvelle perspective à la question de la qualité du béton, en adoptant une approche scientifique novatrice. Notre ambition consiste à enrichir les connaissances existantes et à offrir de nouvelles perspectives pour appréhender la qualité du béton, tout en tenant compte des spécificités propres à l'Algérie.

## **Problématique**

L'origine de cette étude découle de l'observation d'un nombre considérable de projets soumis à des évaluations d'experts en raison de doutes persistants quant à la qualité du béton utilisé sur les chantiers de construction. Les données de la Direction des Équipements Publics de la wilaya de Blida ont montré qu'un cinquième des projets évalués ont des doutes sur la conformité de la résistance, et ont ainsi fait l'objet d'une vérification de la qualité du béton (Figure 1).

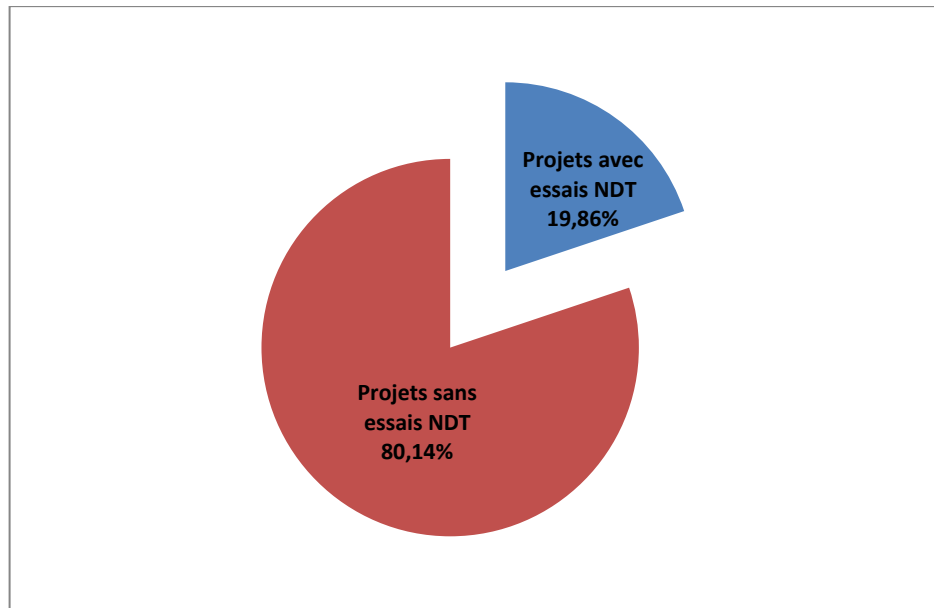


Figure 1 : Recensement des projets avec et sans essais NDT (2000-2014)

Cette situation suscite des interrogations pertinentes : Quelle est la raison sous-jacente à cette fréquence notable d'expertises ? Quels problèmes spécifiques se manifestent sur ces chantiers ? Quelle est la cause de la médiocrité de la qualité du béton en termes de résistance ?

En pratique, cette problématique trouve son origine lorsqu'une anomalie liée à la qualité du béton est repérée sur le site de construction. Ces anomalies sont généralement signalées par des organismes de contrôle tels que le Contrôle Technique de la Construction (CTC) ou par le bureau d'études chargé du suivi du projet. L'identification peut résulter soit d'une inspection visuelle du processus de bétonnage avant et pendant son exécution, soit de l'analyse des résultats d'essais de compression.

Face à cette constatation, le maître d'ouvrage convoque une réunion de travail visant à évaluer l'étendue des dommages et à trouver des solutions appropriées (Figure 2). L'utilisation d'essais non destructifs est généralement privilégiée pour confirmer ou infirmer le constat initial. Cependant, quelle que soit la décision prise, cette situation complexe engendre un éventail de problèmes, tant sur le plan de la gestion contractuelle que sur le plan technique.

Elle peut même mettre en péril la réalisation globale du projet. Les principales conséquences de cette problématique peuvent être synthétisées comme suit:

1. Retards et coûts supplémentaires : Les vérifications de la qualité du béton peuvent entraîner des retards dans l'avancement du projet, engendrant ainsi des coûts supplémentaires liés aux travaux de réparation et aux expertises techniques. Dans le cas extrême, on arrive même à l'abandon du projet en phase de construction si le problème est détecté à un stade très avancé.
2. Perte de confiance : Les doutes concernant la qualité du béton peuvent affecter la confiance entre le maître d'ouvrage et l'entrepreneur, ainsi qu'avec les parties prenantes du projet. Par conséquent, des litiges et un climat d'affaires tendu entre les différentes parties.
3. Risques structurels : Une mauvaise qualité du béton peut compromettre la stabilité et la durabilité de l'ouvrage, mettant ainsi en danger la sécurité des utilisateurs et des occupants. En plus, elle conduit à la formation d'un champ de résistances hétérogènes qui affecte la répartition de la rigidité dans la structure.
4. Impact sur la réputation : Les problèmes de qualité du béton peuvent nuire à la réputation de l'entrepreneur et du maître d'ouvrage, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur de futurs projets.
5. Complexité des procédures légales : En cas de litige, la résolution des problèmes liés à la qualité du béton peut entraîner des procédures légales complexes et coûteuses. Lorsqu'il y a des doutes sur la qualité du béton, cela peut conduire à des enquêtes, des expertises et des investigations pour déterminer la responsabilité des différents acteurs (entrepreneur, maître d'ouvrage, fournisseurs, bureau d'études, etc.) dans la défaillance éventuelle du matériau.

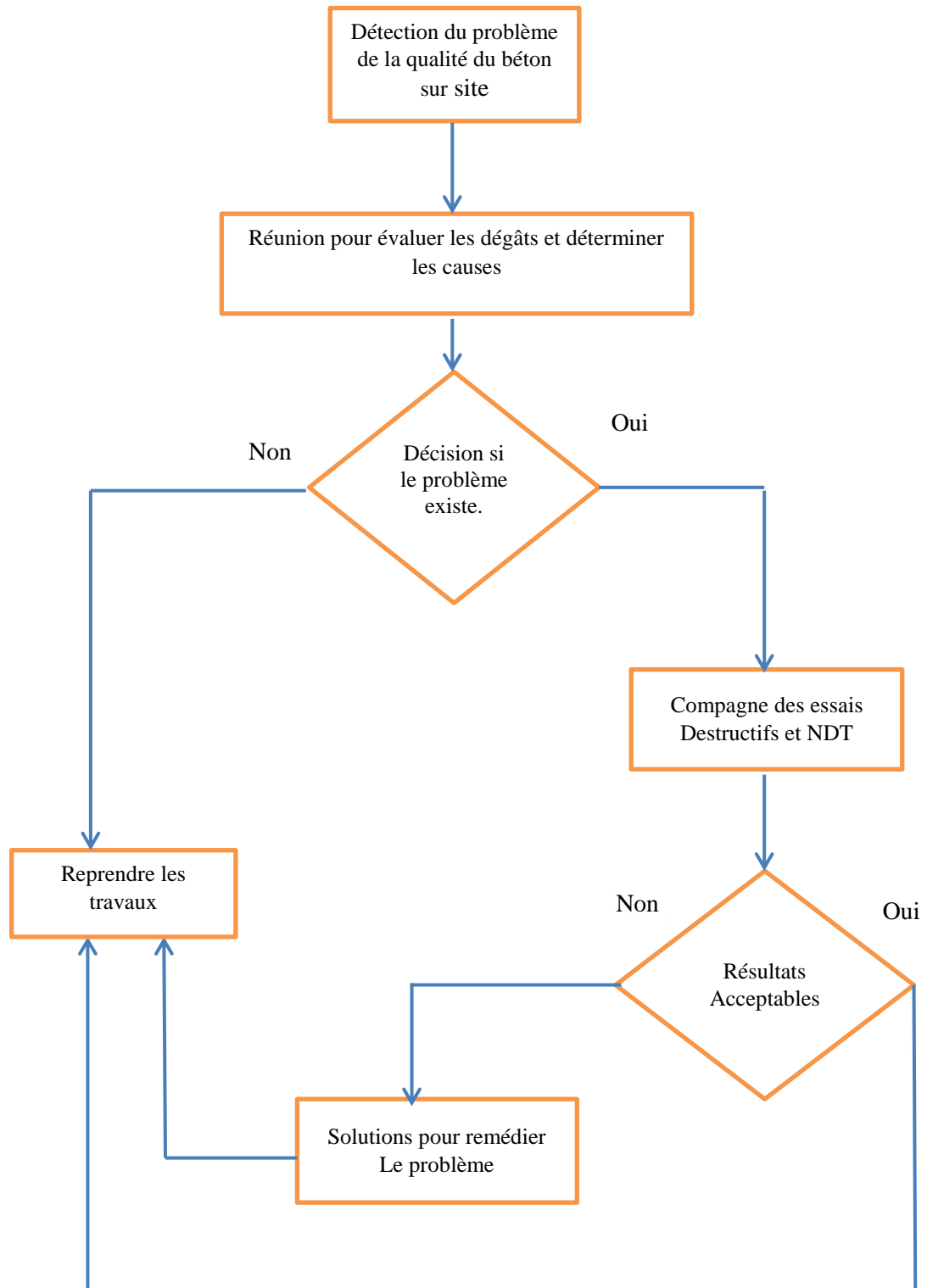


Figure 2 : Schéma décisionnel en cas de problème de qualité du béton sur site.

L'objectif principal de cette étude est d'approfondir l'analyse de la qualité du béton au sein des projets de construction. Cette analyse vise à identifier les facteurs qui influencent cette caractéristique essentielle et à proposer des solutions pour l'améliorer.

Dans cette perspective, plusieurs questions majeures se posent en ce qui concerne cette pathologie sur les sites de construction :

- Quelle est l'étendue des variations observées au niveau des résistances du béton sur les chantiers ?
- Y a-t-il une variation significative des résistances du béton au sein d'un même projet ou entre différents projets ?
- Quelle est le type de la forme de distribution des résistances à 7 et 28 jours, et quelle est la puissance de la corrélation entre ces deux champs ?
- Dans quelle mesure la norme NA 16002 définit-elle de manière adéquate la conformité du béton sur le site par rapport aux normes internationales ?
- Si des problèmes de qualité du béton sont identifiés au sein d'un projet, sont-ils liés à un élément structurel spécifique, à un niveau particulier ou à une période spécifique ?
- Est-ce que la qualité du béton s'est améliorée ces dernières années par rapport aux périodes précédentes ?

Ces questions, parmi d'autres, servent de lignes directrices pour notre recherche. Notre méthodologie repose sur l'utilisation avancée de l'analyse statistique, allant au-delà de l'approche traditionnelle basée sur la moyenne et l'écart type. Nous mettons en œuvre les principes de l'analyse inférentielle ainsi que l'étude de la distribution des données afin d'apporter un éclairage innovant sur la problématique de la qualité du béton sur les chantiers de construction.

Afin d'atteindre les objectifs cités, la thèse a été divisée en plusieurs parties. Le travail commence par une introduction générale décrivant les raisons et les objectifs de la recherche, une étude bibliographique sur les facteurs affectant la qualité du béton est donnée dans le premier chapitre. Le deuxième chapitre donne un rappel sur la notion des statistiques et en particulier celle appliquée en génie civil. La conception de la base de données sur la résistance à la compression du béton provenant de chantiers dans la wilaya de Blida entre 2001 et 2014 est détaillée dans le troisième chapitre.



Le quatrième chapitre propose une analyse statistique des données de la résistance à la compression. La dernière étape du traitement (chapitre 5) examine la conformité de la résistance à la compression par rapport aux différentes normes internationales. Enfin, le travail se termine par des conclusions générales et des recommandations pour les travaux futurs.

**CHAPITRE 1 : Revue Bibliographique**  
**QUALITE DU BETON**

## CHAPITRE 1 : QUALITE DU BETON

### 1.1 Introduction

L'amélioration de la qualité des produits manufacturés est un objectif constant pour les gestionnaires de sociétés dans divers secteurs de fabrication. L'initiation de cette démarche débute par une recherche systématique de la qualité, un élément crucial qui offre des opportunités d'accroître la productivité, de réduire les coûts et par conséquent, d'augmenter les profits.

La quête de la qualité est généralement suivie d'un processus de contrôle visant à assurer la mise en place de cette approche. Dans les années 1950, Feigenbaum [1] a introduit le concept de gestion de la qualité en décrivant le contrôle de la qualité comme un système impliquant différents groupes de production au sein d'une entreprise. Ces efforts collectifs visent à développer et maintenir un niveau de qualité suffisant pour satisfaire les clients. L'établissement d'un système de qualité présente également plusieurs avantages supplémentaires, tels que l'amélioration de la réputation de l'entreprise, la réduction du gaspillage et l'augmentation de la compétitivité.

Toutefois, l'application de cette approche a rencontré des obstacles dans le domaine de la construction, notamment en raison de la perception antérieure du béton comme un matériau durable et résistant. Cependant, cette perception s'est avérée erronée au fil du temps, avec des conceptions médiocres et des spécifications inadéquates conduisant à des travaux de réparation coûteux pour restaurer les structures en béton. Ces travaux ont généré des dépenses importantes pour les clients, comme en témoignent des exemples au Royaume-Uni : le coût estimé des réparations atteignait 8,5 milliards de dollars en 1984, en Australie les coûts de réparation représentaient plus de 34 % du coût initial de construction sur une période de 15 ans [2]. Aux États-Unis, le coût total estimé des réparations d'une seule année, de la réhabilitation et de la protection du béton s'élevait à environ 18 à 21 milliards de dollars en 2006 [3].

En Algérie, les problèmes liés à la mauvaise qualité du béton sont similaires à ceux observés dans le reste du monde. Cette préoccupation croissante a incité les maîtres d'ouvrage à renforcer leur vigilance dans le contrôle des projets de construction. L'intérêt croissant pour la qualité du béton s'est traduit par une attention accrue envers deux aspects

principaux : la résistance du béton face aux séismes fréquents et l'aspect économique lié à la durabilité des structures.

À l'échelle locale, les spécifications du béton se sont souvent concentrées sur sa résistance à la compression, ce qui a engendré des désaccords lorsque d'autres critères de qualité étaient négligés. En Algérie, il est courant d'observer des problèmes de qualité du béton, attribuables à des insuffisances dans les étapes de conception, de mise en place et de durcissement. Une étude exhaustive sur la qualité des composants du béton et les méthodes de mise en œuvre est donc nécessaire pour comprendre leur contribution à la qualité finale du béton.

En somme, ce chapitre examine en détail l'impact de chaque élément constituant du béton sur la qualité globale, tout en exposant différentes normes de qualité applicables. Il détaille la procédure de vérification de la conformité du béton selon ces normes, ce qui préparera le terrain pour l'analyse ultérieure de la variation de la résistance à la compression du béton sur les chantiers de construction.

## 1.2 La qualité de béton sur les chantiers Algériens

### 1.2.1 Définition de la qualité du béton

Dans le contexte de la construction, le défi de définir la qualité est plus complexe que dans d'autres domaines de production, comme le souligne Cornick [2]. Cette complexité découle du partage des efforts entre plusieurs individus et organisations impliqués dans la réalisation d'une structure. De plus, dans le cas des grands projets, le facteur temps s'ajoute, rendant la gestion encore plus ardue, compte tenu de la durée étendue de leur réalisation. Pour cette raison, il est crucial d'adopter une définition de qualité qui soit pratique, mesurable et applicable à toutes les parties concernées dans le processus de construction.

La littérature offre diverses définitions de la qualité du béton, mais celle qui se révèle la plus pragmatique et opérationnelle est celle qui considère la qualité du béton comme la mesure de sa conformité aux exigences préétablies. Ces exigences, établies avant et pendant la réalisation du projet, offrent des directives essentielles pour évaluer si le béton produit est de qualité. Cette définition s'avère adaptée à toutes les parties prenantes dans le

processus de construction, car elle garantit que le béton répond aux normes de performance et de sécurité requises pour le projet en question.

### 1.2.2 Paramètres de la qualité de béton

Les paramètres clés de la qualité du béton sont la résistance, la durabilité et l'ouvrabilité. Actuellement, les efforts de recherche sont orientés vers l'obtention d'un équilibre optimal entre ces paramètres, dans le but de créer un béton qui satisfait aux diverses contraintes requises.

#### 1.2.2.1 La résistance à la compression

Pendant longtemps, la résistance a été considérée comme la qualité primordiale, voire exclusive, à rechercher dans le béton. Cette propriété fondamentale a généralement été perçue comme un indicateur global de la qualité du béton.

Aujourd'hui, grâce aux avancées dans les méthodes de fabrication du béton, il est possible de commander du béton d'une classe de résistance spécifique (par exemple, C25 correspondant à une résistance caractéristique à la compression de 25 MPa à 28 jours). Cependant, cette facilité dans la gestion des travaux de bétonnage sur les chantiers n'a pu être atteinte qu'après des recherches approfondies sur la contribution de chaque composant du béton à l'amélioration de sa qualité.

Comme la résistance constitue le cœur de cette étude, une analyse détaillée de l'influence de chaque paramètre sur les valeurs de résistance à la compression du béton est essentielle. Les autres paramètres de qualité seront abordés de manière plus concise.

#### 1.2.2.2 La durabilité

Le terme "béton" a traditionnellement évoqué solidité, fiabilité et durabilité, avec une longévité pratiquement infinie. Cependant, ces dernières années, plusieurs incidents mondiaux médiatisés ont ébranlé la réputation du béton en tant que matériau de construction durable et fiable, non seulement pour le grand public, mais aussi pour l'industrie elle-même.

Plusieurs chercheurs ont souligné l'impact significatif du manque de durabilité du béton à travers le monde, ce qui est devenu un problème majeur non anticipé lors de son utilisation répandue dans la construction [2]. Il est désormais clair que tous les critères de qualité du béton doivent être pris en compte dès la phase de conception.

L'étude de la durabilité du matériau cimentaire présente une complexité due au fait qu'une mauvaise durabilité ne peut être attribuée à un seul facteur. Le béton, exposé à des éléments de détérioration, commence à se dégrader. Cependant, lorsque des facteurs défavorables s'additionnent, des problèmes surgissent [4].

Comme c'est le cas dans toutes les disciplines, il est crucial de comprendre les causes de la dégradation lors de l'établissement du diagnostic de l'état. Dans le domaine du génie civil, les dégradations du béton peuvent être divisées en deux principales catégories selon leur origine :

- Dommages mécaniques : généralement causés par des chocs, de l'abrasion, de l'érosion, etc.
- Dommages chimiques : résultant soit de réactions alcali-silice et alcali-carbonate, soit d'attaques chimiques externes (présence d'ions agressifs tels que Cl, sulfates, CO<sub>2</sub> ou liquides et gaz indésirables).

Dans la littérature l'attaque chimique a attiré une considérable attention de la part des chercheurs. Les résultats de ces études ont largement contribué au développement de l'industrie cimentière et à la révision des normes de construction. L'analyse de la durabilité du matériau cimentaire face à l'attaque chimique repose sur la compréhension de l'écoulement des fluides dans le béton ou le mortier. La perméabilité, le coefficient de diffusion et d'absorption, ainsi que la porosité sont des paramètres clés pour évaluer la résistance du béton ou du mortier aux mécanismes de détérioration auxquels ils pourraient être exposés.

Pour ces raisons, nous avons concentré notre recherche bibliographique sur les travaux portant spécifiquement sur la dégradation d'origine chimique.

### 1.2.2.3 Ouvrabilité

L'ouvrabilité du béton réfère à sa capacité d'être placé et compacté de manière efficace et sans difficulté pendant la construction. Elle est étroitement liée à la facilité avec laquelle le béton peut être travaillé et façonné lors de sa mise en place sur le chantier. L'ouvrabilité dépend de plusieurs facteurs tels que la composition des matériaux, le taux d'humidité, la taille des granulats et l'usage d'adjuvants spécifiques.

Une ouvrabilité adéquate est primordiale pour garantir la qualité du béton à chaque étape de sa mise en place. Si le béton manque de malléabilité, il peut être difficile à compacter correctement, créant ainsi des espaces vides et des poches d'air dans la masse du béton. Ces espaces vides peuvent compromettre la résistance et la durabilité du béton, laissant la structure sujette aux fissures et à une détérioration prématurée.

En revanche, une ouvrabilité excessive peut entraîner la séparation des composants du béton, où les particules plus lourdes ont tendance à se déposer au fond, tandis que l'eau et les particules plus fines remontent en surface. Ce phénomène peut entraîner une baisse de la résistance et de la durabilité du béton, ainsi qu'une diminution de sa résistance à l'abrasion.

### 1.2.3 La qualité du béton en Algérie

En Algérie, la prise en compte du problème de la qualité du béton a débuté dès l'indépendance, lorsque les problèmes liés à cette qualité ont commencé à émerger et à prendre de l'ampleur sur les chantiers de construction. Cette situation a encouragé les experts du domaine de la construction à entreprendre des études approfondies sur la qualité du béton in situ. L'objectif principal de ces travaux était de diagnostiquer les problèmes en temps réel et d'aider les autorités publiques à mettre en place les mesures nécessaires pour y remédier.

À titre illustratif, le tableau 1.1 présente quelques études menées dans ce domaine. Un élément commun entre ces travaux est qu'ils mettent en évidence l'existence d'une certaine irrégularité dans la production et le contrôle des bétons sur site. Cette irrégularité est souvent attribuée à l'absence ou à l'inefficacité des systèmes de contrôle de la qualité du béton. En conséquence, la plupart de ces études convergent vers la même conclusion : la résistance à la compression souhaitée (essai de convenance) est rarement atteinte sur le chantier.

Tableau 1. 1 : Études sur la qualité du béton en Algérie : Revue des travaux [5].

Travaux	Période	Consistance du travail	Conclusions
<b>Kenai et al</b> [106]	1978-1993	52 dossiers d'expertises et 268 rapports de laboratoire couvrant 93 projets	* <b>45 %</b> de désordres sont liés à la mise en œuvre et <b>16 %</b> dus à la mauvaise qualité du béton. * <b>43 %</b> des cas de la résistance à la compression du béton sont jugés en dessous de la résistance préconisée.
<b>Lechani et al</b> [107]	1983-1993	4 124 résultats d'écrasements de béton à 7, 14, 21 et 28 jours	* $f_{c28j}$ obtenues in situ est égale à <b>22 MPa</b> qui n'atteignent pas celles préconisée par la réglementation ( <b>27 MPa</b> ). * la dispersion de résistance des projets analysés à 28 jours, ayant un écart type de <b>6,5 MPa</b> .
<b>Laribi</b> [108]	1984-1997	484 Cas pathologiques des constructions à l'ouest de l'Algérie (14 wilayas)	* <b>20 %</b> des sinistres sont dus à la mauvaise qualité du béton * La résistance caractéristique. n'est atteinte que sur moins de <b>45 %</b> des projets étudiés et * Le béton utilisé n'est pas totalement régulier.
<b>Kharchi et Boutamine</b> [109]	1989-1991	Etude comparative entre les résistances du béton conçu en laboratoire et celles produites sur chantier	* La résistance en laboratoire est rarement atteinte sur chantier * Les valeurs de résistance sur chantier présentent des écarts types élevés.



### 1.3 Facteurs influant sur la qualité du béton.

Le béton est caractérisé par une hétérogénéité marquée, classé en trois phases : granulats, pâte de ciment et une zone de transition fine entre elles (10 à 50  $\mu\text{m}$ ). Cette zone de transition est souvent le maillon faible du béton. La qualité du béton dépend ainsi du type et de la nature des constituants, ainsi que du processus de mise en œuvre. Toute variation ou dysfonctionnement de ces paramètres peut directement influencer le comportement physico-chimique du matériau.

#### 1.3.1 Les constituants du béton

##### 1.3.1.1 Ciment

Étant donné l'influence considérable du ciment sur les propriétés des bétons, sa sélection doit faire l'objet d'une réflexion approfondie. Le choix d'un ciment approprié doit se baser sur une comparaison des caractéristiques effectives des ciments disponibles en fonction des objectifs recherchés. Le type de ciment et sa quantité doivent être déterminés en fonction des performances souhaitées, notamment la résistance mécanique et la résistance aux agents agressifs, ainsi que de la nature des autres composants. Le ciment influence la qualité du béton par sa finesse, son dosage, et sa classe.

##### (i) La finesse

La répartition de la taille des particules, le facteur d'homogénéité et la finesse de la surface spécifique sont des paramètres importants qui affectent les propriétés du ciment, notamment la résistance. Ils définissent la proportion de particules fines et grossières dans le ciment ainsi que leur distribution de taille. La résistance à la compression du mortier ou du béton augmente simultanément avec la finesse du ciment [6-8].

Divers chercheurs ont précisé une plage de dimensions des particules de ciment à partir de laquelle la résistance à la compression est notablement affectée par cette caractéristique. À titre d'exemple, Tsivilis et al [9] ont identifié un intervalle de dimensions se situant entre 16 et 24  $\mu\text{m}$  comme étant davantage propice au développement de la résistance. En revanche, d'autres chercheurs ont placé cette plage entre 3 et 30  $\mu\text{m}$  [10].

Cependant, au-delà de ces limites d'intervalle, l'effet de la finesse de ciment sur la résistance peut être variable :

- Soit elle a seulement un effet de remplissage pour les particules supérieures à 60  $\mu\text{m}$ , qui ne contribuent pratiquement pas au développement de la résistance.
- Soit elle entraîne des résistances initiales élevées pour les particules très fines ( $< 3 \mu\text{m}$ ) mais peut entraîner des changements de volume indésirables, ainsi qu'une détérioration des propriétés rhéologiques.

La figure 1.1 présente la variation de la résistance des mortiers en fonction de la finesse du ciment, exprimée en  $\text{m}^2/\text{kg}$ . On constate que la pente de toutes les corrélations effectuées sur les cinq mortiers étudiés est supérieure à zéro, ce qui indique que la résistance tend à augmenter lorsque la finesse du ciment augmente.

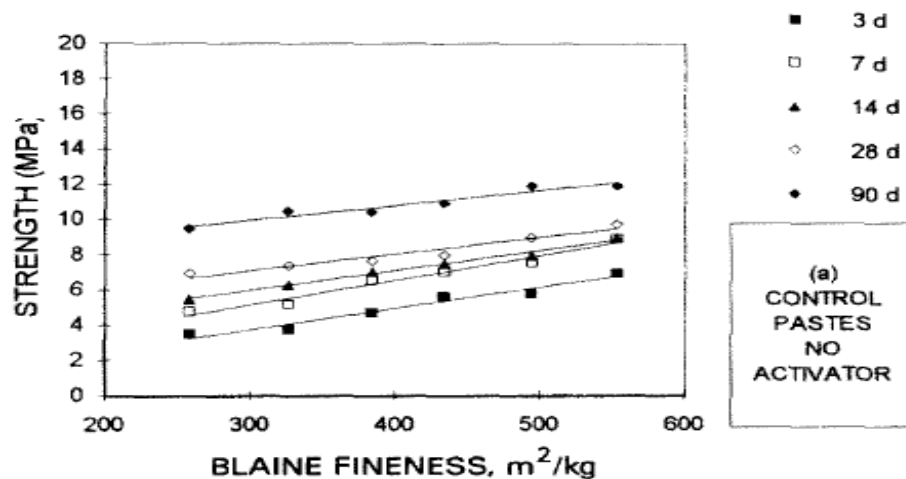


Figure 1. 1 : Variation de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la finesse du ciment [6].

Le gain de résistance est expliqué par l'effet des particules hydratées résultant de l'hydratation du ciment. Les particules fines réagissent rapidement avec l'eau, accélérant l'hydratation et augmentant ainsi le degré d'hydratation et la compacité de la matrice de ciment, ce qui renforce la résistance, principalement à un jeune âge.

Par ailleurs, l'accélération du processus d'hydratation engendre des chaleurs importantes (Figure 1.2). Cet effet est plus marqué dans les premiers âges, comme le démontre l'étude

de Hu et al. [11], où un ciment fin génère une chaleur d'hydratation plus élevée et rapide qu'un ciment grossier.

Contrairement à la résistance, l'augmentation excessive de la finesse du ciment a un impact négatif sur la durabilité. Elle entraîne une augmentation de la demande en eau du béton, ce qui n'est pas souhaitable pour la qualité du béton. Par exemple, dans le cas du béton à air entrainé, la finesse du ciment affecte fortement la maniabilité. De plus, elle influence le retrait au séchage : une augmentation de la finesse, et par conséquent la teneur en eau conduit à un accroissement du retrait de séchage [8].

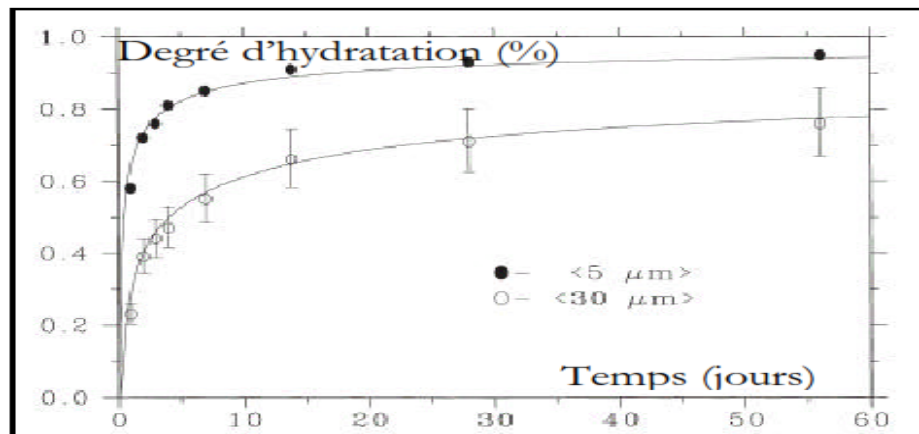


Figure 1. 2 : Influence de la finesse du ciment sur la cinétique d'hydratation [12].

## (ii) Dosage en ciment

Le dosage en ciment est déterminé par divers facteurs tels que le type de béton, l'usage prévu de la structure, la résistance requise et les conditions environnementales.

Le dosage en ciment impacte directement les résistances mécaniques du béton. Dans une certaine plage (300 à 400 kg/m<sup>3</sup>), la résistance est généralement proportionnelle au dosage. Par exemple, augmenter le dosage de ciment de 200 à 250, 300, 350, 400 et 500 kg/m<sup>3</sup> a augmenté la résistance à la compression de 68 %, 113 %, 164 %, 232 % et 265 % respectivement [13].

En ce qui concerne la durabilité, le dosage en ciment joue un rôle essentiel dans la réduction de la porosité de la pâte de ciment, un paramètre déterminant pour la vitesse et la progression des agents agressifs [15]. À mesure que le dosage en ciment augmente, la formation d'une pâte de ciment hydratée étanche devient plus marquée. En revanche, une faible teneur en ciment conduit à une pâte de ciment moins compacte, favorisant ainsi les mécanismes de dégradation. Par exemple, prenons le cas de la corrosion des armatures (Figure 1.3) : avec un rapport E/C de 0,55 et des dosages de ciment de 398 et 428 kg/m<sup>3</sup>, les taux de perte de poids étaient respectivement de 1,453 % et 1,008 %, tandis que les taux de rouille étaient de 97,4 % et 85,32 %.

Il est important de noter que la porosité est également influencée par la présence de vides dans le béton, résultant d'un mauvais compactage, d'accumulation d'eau de ressuage ou de la présence de joints. Les anciennes exigences en matière de qualité du béton, fondées sur une teneur minimale en ciment, ont été remplacées par des limitations sur le rapport maximal E/C et sur les teneurs minimales et maximales en ciment, en fonction des conditions d'exposition et d'autres facteurs, principalement liés à la nature de l'ouvrage [16].

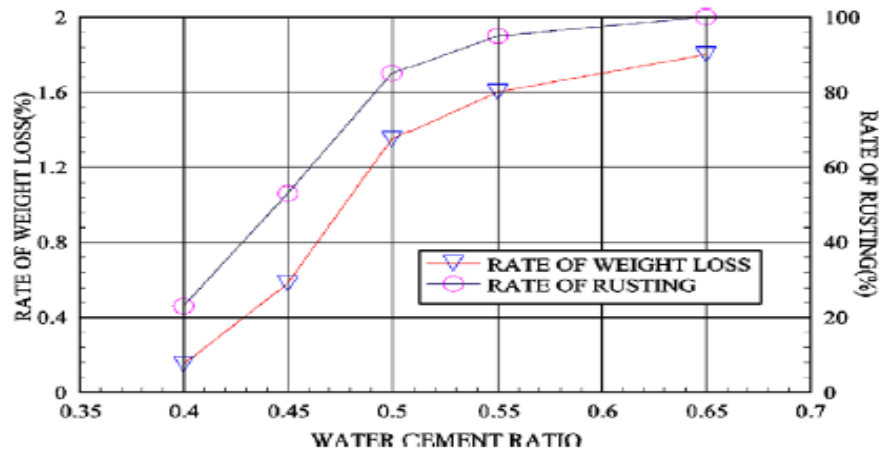


Figure 1. 3 : Taux de perte de poids et taux de rouille armatures en fonction du rapport E/C [14].

### (iii) Classe et type du ciment

La formulation d'un béton commence par le choix du ciment, qui implique le type de ciment (ciments portland, portland composé, de haut fourneau, pouzzolanique, au laitier et aux cendres) ainsi que sa classe de résistance. La classe de résistance est une

caractéristique essentielle du ciment, car elle influe généralement sur la résistance du béton finale [17].

La variation de la classe de résistance du ciment est liée d'une part à la composition chimique du clinker, et d'autre part à l'incorporation d'additions minérales telles que le calcaire, les cendres volantes, le laitier, etc. Ces ajouts visent à minimiser les coûts de production et à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

L'objectif principal de substituer le ciment portland ordinaire par des additifs minéraux est d'améliorer certaines propriétés du béton en variant le pourcentage de substitution, tout en considérant l'aspect économique. Cependant, il est important de noter que le remplacement partiel du clinker par ces substitutions n'a pas toujours été bénéfique pour les propriétés du béton. Dans certains cas, lorsque l'ajout dépasse certaines limites ou si l'ajout lui-même possède de mauvaises caractéristiques physico-chimiques, cela peut entraîner une diminution de la résistance à la compression (Figure 1.4).

La perméabilité du béton aux agents agressifs, notamment aux ions de chlorure, présente des variations en fonction de la classe de résistance du béton et du type de ciment utilisé (Figure 1.5).

Les ajouts cimentaires comme le laitier réduisent la perméabilité du béton par la densification de la matrice cimentaire et la réduction du volume des pores capillaires, et par conséquent améliorent la résistance aux ions de chlorure. Cependant, l'ajout calcaire tend à augmenter le coefficient de diffusion aux ions de de chlorure [18].

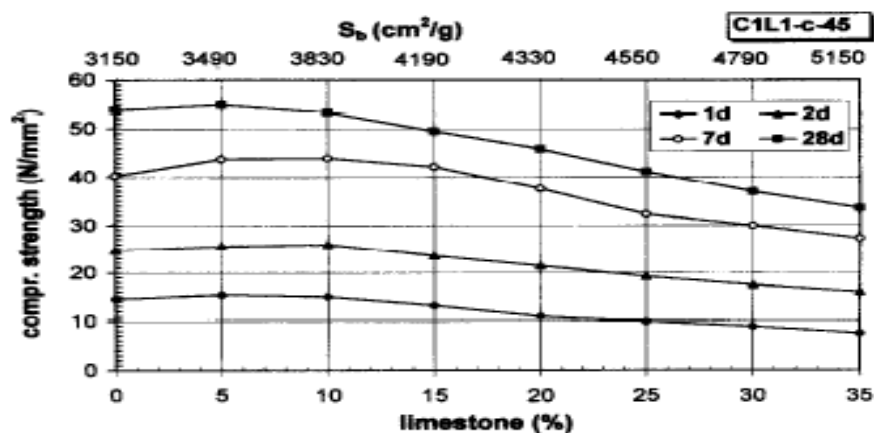


Figure 1. 4 : Effet du contenu en calcaire sur la résistance à la compression [19].

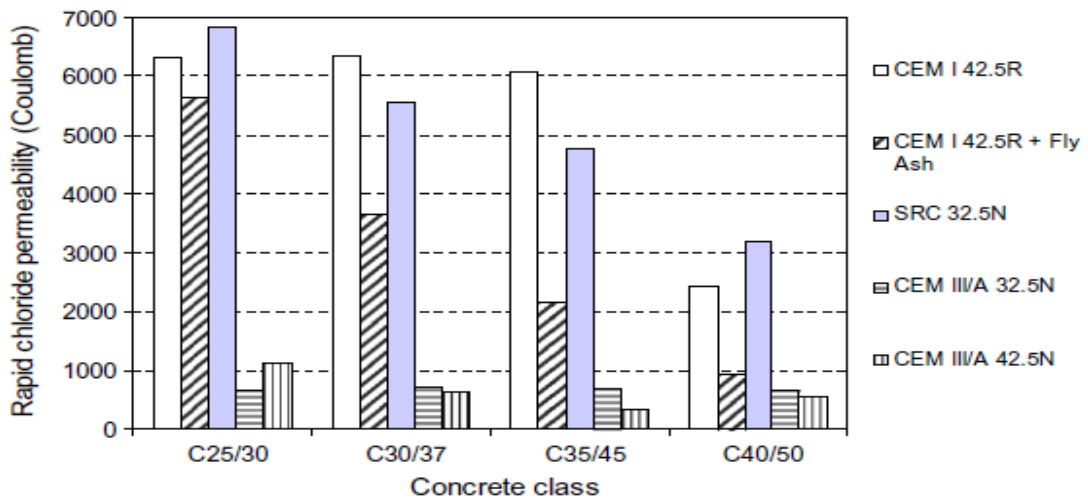


Figure 1. 5 : Effet du type de ciment sur la perméabilité des bétons au chlorure [20].

Les conditions d'exposition ont également un effet sur le mécanisme de détérioration du mortier ou du béton. Une forte humidité relative dans un milieu améliore les propriétés d'absorption capillaire, ainsi que la résistance à la pénétration du chlorure des mortiers (Figure 1.6). Cette amélioration peut être attribuée au maintien d'une faible action de séchage, permettant ainsi une disponibilité d'eau pour développer les réactions d'hydratation du clinker et du laitier.

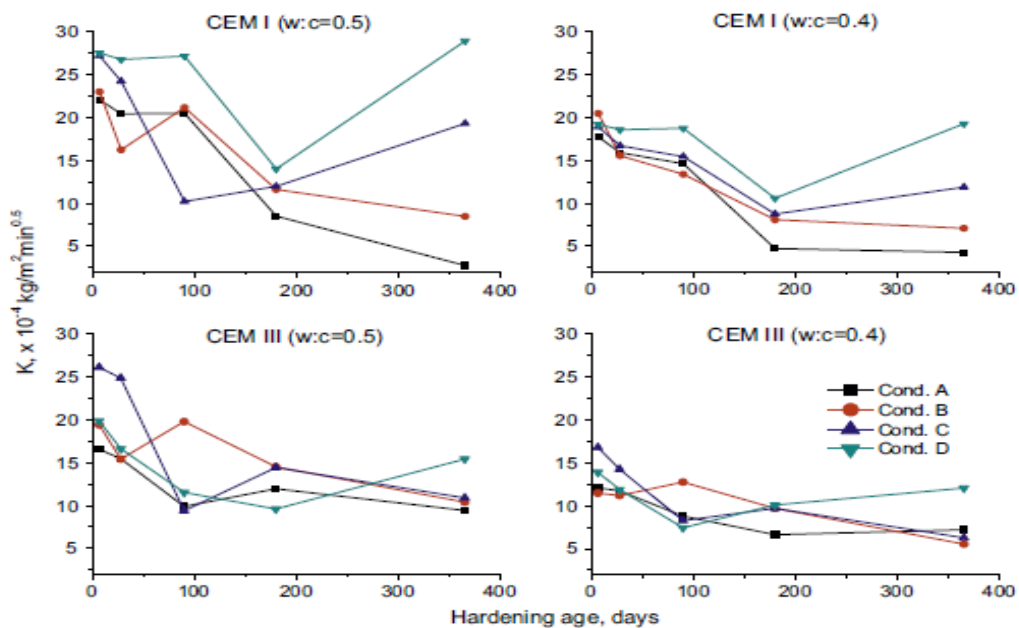


Figure 1. 6 : Absorption capillaire des mortiers en CEM I et III sous différentes conditions d'exposition. (Condition A : 20°C et 100 % HR, condition B : 15°C et 85 % HR, condition C : 20°C et 65 % HR, et condition D : 30°C et 40 % HR) [21].

### 1.3.1.2 Granulats

Les granulats utilisés dans le béton sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle. Contrairement à des éléments de tailles égales, les granulats sont composés d'ensembles de grains présentant des tailles variées, lesquelles sont comprises entre deux limites spécifiées : la plus petite dimension ( $d$ ) et la plus grande dimension ( $D$ ), exprimées en millimètres

Comme environ 75 % du volume du béton est occupé par les granulats, dont environ 45 % sont des gros granulats, il est important de déterminer à quel point ces ingrédients peuvent modifier la durabilité et la performance structurelle du béton. Par ailleurs, les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles du béton : soit elles ont une influence directe sur une propriété particulière du béton, soit elles ont une influence sur le rapport E/C, avec toutes les conséquences qui en résultent pour la résistance et la durabilité.

Le respect des critères de qualité du béton commence par le choix des agrégats. Les granulats doivent donc être des matériaux de qualité et satisfaire notamment deux exigences :

- la granulométrie : propriété géométrique essentielle d'un granulat dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.
- la propreté : particulièrement importante pour les sables ou la teneur en fines argileuses est strictement limitée.

Les principales caractéristiques des granulats qui influencent la qualité du béton sont :

(i) Effet de la taille et distribution des granulats

Au sein d'une matrice de béton, les granulats remplissent la fonction de protecteurs de la pâte de ciment, assumant une capacité de charge supérieure à celle de ladite pâte de ciment. C'est pourquoi la stratégie sous-jacente à la fabrication des bétons à haute résistance repose sur le principe d'exploiter pleinement le potentiel des agrégats grossiers lorsque le rapport E/C (eau/ciment) est maintenu à un niveau restreint [22]. En effet, plusieurs chercheurs ont souligné que l'accroissement de la taille maximale des agrégats engendre une augmentation de la résistance à la compression dans le cas de certains types

de béton [23]. Toutefois, pour d'autres types tels que le béton léger, cet accroissement de la taille des agrégats ne se traduit que par une amélioration négligeable de la résistance [24].

En outre, dans certaines conditions, l'augmentation de  $D_{\max}$  accompagnée d'une variation de la composition du béton est économiquement efficace, car il a été rapporté que les dépenses en ciment ont été réduites d'environ deux fois pour des bétons ayant la même résistance [25]. Pour les bétons hydrauliques à résistance modérée, la réduction du dosage de ciment entraîne une diminution du dégagement calorifique lors de l'hydratation du ciment, ce qui permet d'augmenter la résistance à la fissuration du béton.

La figure 1.7 illustre le développement de la résistance en compression des mélanges de béton présentés dans le tableau 1.4, avec un rapport E/C constant. On peut observer que le mélange C4, qui contient trois fractions granulaires différentes avec  $D_{\max} = 25$  mm, a montré la plus forte résistance en compression. En revanche, la plus faible résistance en compression a été obtenue en utilisant le mélange C1, qui contient seulement deux fractions granulaires avec  $D_{\max} = 15$  mm. Il faut noter que, les mélanges C2 et C3 ont également une taille maximale de 25 mm, tout comme le mélange C4, mais les résistances en compression de ces mélanges sont inférieures à celle de C4. Cela indique que le  $D_{\max}$  n'est pas le seul facteur prédominant dans la résistance à la compression du béton, mais que la distribution de la taille des grains du système granulaire a également un grand impact sur le développement de la résistance en compression. Un système granulaire présentant une distribution continue de la taille des granulats et une meilleure répartition fournit au mélange un compactage adéquat. Cette grande compacité du squelette granulaire, déduite comme le résultat d'un faible espace de vides, améliore forcément la résistance en compression du béton.

Ces résultats expliquent clairement que la résistance du béton d'une formulation donnée est sérieusement affectée par les dimensions des granulats et le degré de compactage de son système granulaire.



Tableau 1. 2 : Combinaisons de la fraction granulaire étudiée [26].

Mixture code	Coarse aggregate fraction (%)			Coarse aggregate fraction (kg/m <sup>3</sup> )			Total Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
	3/8	8/15	15/25	3/8	8/15	15/25	
C1	40	60	0	480	720	0	1200
C2	20	0	80	250	0	990	1240
C3	0	50	50	0	585	585	1170
C4	20	40	40	250	495	495	1240

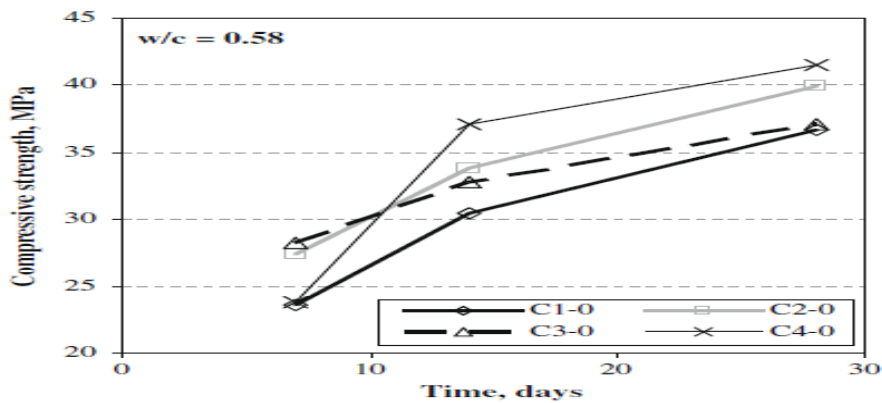


Figure 1. 7 : Développement de la résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires sans additifs chimiques [26].

En ce qui concerne l'effet de la taille des agrégats sur le critère de durabilité du béton, en particulier la corrosion des armatures, une enquête menée sur 18 ouvrages en béton armé (exposés à des milieux marins dans le sud de la Chine) a prouvé que les agrégats de grande taille affectent considérablement la corrosion des armatures [14]. L'étude a identifié que la principale cause de cette détérioration est l'uniformité des fissures dues au retrait, qui se forment facilement dans les bétons confectionnés à partir d'agrégats de grande taille (Figure 1.8). L'augmentation de la taille des agrégats modifie les propriétés de transport tel que la perméabilité et le coefficient de diffusion [27].

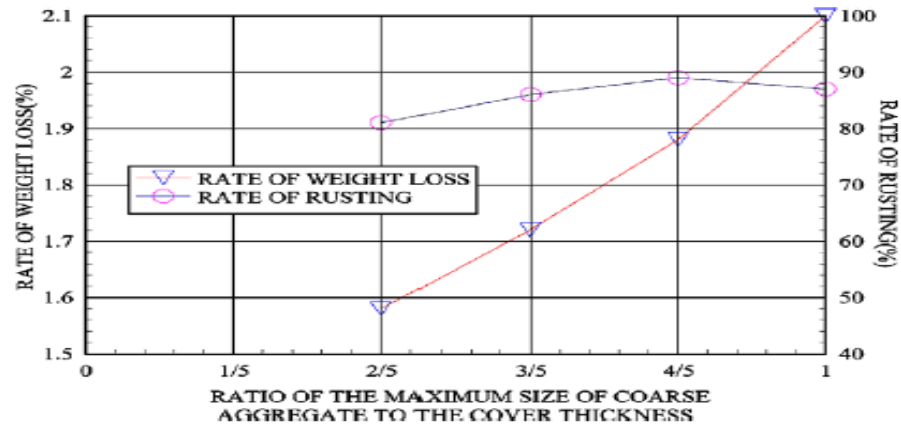


Figure 1. 8 : Taux de perte poids et le taux de rouille en fonction du rapport (taille agrégat/enrobage) [14].

(ii) Effet du volume de gros granulat sur la résistance en compression

L'influence du pourcentage des gros granulats dans la formulation du béton semble avoir une certaine limitation en ce qui concerne la résistance en compression. Il a été montré que la teneur optimale en gros granulat varie entre 36% et 40%, et l'augmentation de la teneur au-delà de 40% peut entraîner une réduction supplémentaire de la résistance à la compression du béton [26].

En outre, le volume de gros granulats dépend également de l'utilisation ou non d'un adjuvant, comme le montre la figure 1.9. Lorsqu'aucun adjuvant chimique n'est ajouté à la formulation, l'augmentation de la teneur en agrégats grossiers de 44% à 47% a conduit à une augmentation de la résistance à la compression.

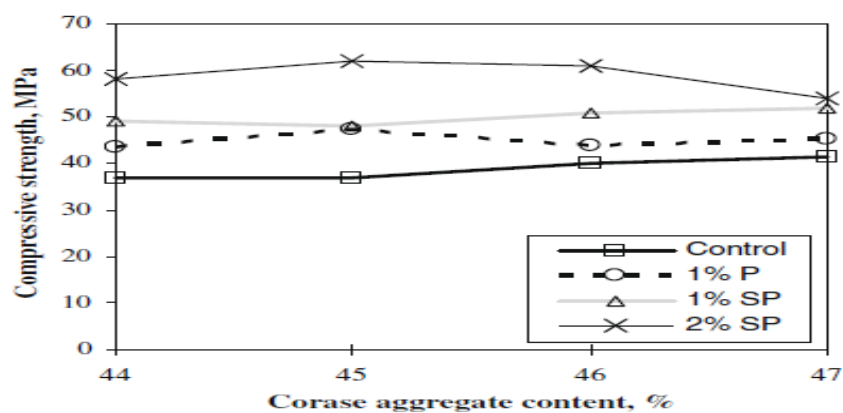


Figure 1. 9 : Variation de la résistance en compression en fonction du pourcentage d'agrégats gros (P : adjuvant réducteur d'eau ; SP ; super plastifiant)[26].

Le rapport sable/gravier (s/g) peut également illustrer l'effet des gros granulats sur le développement de la résistance à la compression du mélange de béton. La Figure 1.10 présente l'évolution de la résistance en compression en fonction du s/g. On peut observer que pour des valeurs de s/g comprises entre 0,49 et 0,58, le rapport s/g n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression de référence. Au-delà de cette plage, nous pouvons remarquer un abaissement de la résistance à mesure que le rapport s/g augmente.

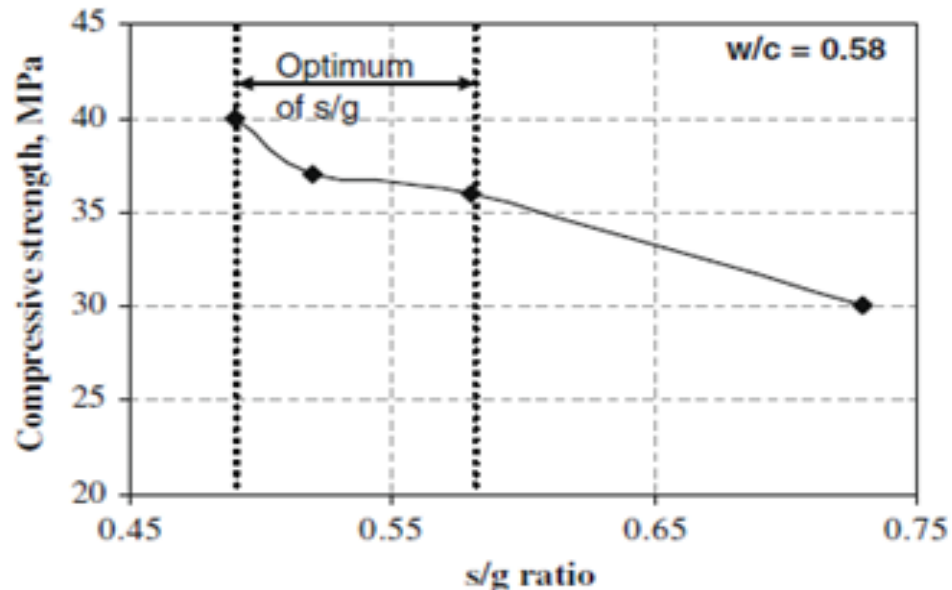


Figure 1. 10 : Evolution de la résistance en compression en fonction du rapport (s/g) [26].

### (iii) L'influence de la nature des granulats

Plusieurs propriétés de l'agrégat, telles que la composition minérale et chimique, la forme, la rugosité, le degré d'altération, la densité, la dureté, la stabilité physique et chimique, ainsi que la structure des pores, sont liées aux propriétés de la roche mère. Le lien entre ces caractéristiques et la qualité du béton a fait l'objet de plusieurs recherches.

Les bétons à base de calcaire peuvent avoir un module élastique et une résistance sensiblement plus élevés que ceux faits à partir de granit et de gravier de rivière [26]. L'andésite et la dolomite produisent un béton très rigide par rapport au granit ou au quartzite. Par compte, le béton à base de basalte a une résistance à la compression plus élevée que celui fait avec des granulats de calcaire [26].

Les granulats ayant des formes, textures, minéralogies et forces différentes peuvent entraîner des changements de résistance dans le béton, pour des propriétés de la pâte de ciment similaires. Il a aussi été observé que l'augmentation de la résistance pour une augmentation donnée de la teneur en ciment dépend du type de granulats utilisés et de la teneur en ciment elle-même. En plus, l'influence des propriétés des gros granulats sur la résistance du béton devient primordiale lorsque la qualité de la pâte est améliorée, comme dans le cas des bétons auto-plaçant [23].

En général, il existe une relation entre la résistance des agrégats et leur résistance à l'abrasion lorsqu'ils sont utilisés dans le béton. Il est à noter que la dureté des agrégats est un facteur important pour protéger le béton contre l'abrasion.

Le mélange M5 avec des granulats basaltes présente des valeurs faibles de profondeur à l'abrasion et de perte de masse par rapport aux autres mélanges à base de calcaire (M1), marbre (M2), dolomite (M3), et grès (M4) à 28, 56 et 90 jours (Tableau 1.5). Cette performance peut être attribuée à la plus grande dureté des granulats de basalte.

Le type d'agrégat a aussi un effet significatif sur la résistance à la compression (Figure 1.11). Les valeurs maximales de résistance à la compression ont été mesurées dans le mélange préparé avec des granulats de basalte, tandis que la plus faible valeur de résistance à la compression a été relevée dans le mélange préparé avec les granulats de calcaire, à 28, 56, et 90 jours.

Tableau 1. 3 : Pertes de masse et profondeur de l'abrasion des mélanges SCC [23].

Mixture No.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Curing time (28d)											
Abrasion depth (mm)	2.68	1.59	2.54	1.70	1.29	1.92	2.10	2.50	2.35	2.77	3.02
Mass loss (%)	1.90	2.32	3.24	2.12	0.90	1.72	1.97	2.51	2.52	2.98	2.77
Curing time (56d)											
Abrasion depth (mm)	2.41	1.58	2.25	1.91	1.12	1.76	1.83	2.21	2.05	2.69	2.94
Mass loss (%)	1.75	2.29	3.01	1.97	0.85	1.65	1.85	2.50	2.38	2.91	2.55
Curing time (90d)											
Abrasion depth (mm)	2.26	1.45	2.31	1.58	0.98	1.69	1.79	2.09	2.02	2.60	3.01
Mass loss (%)	1.63	2.26	2.95	1.92	0.71	1.56	1.81	2.31	2.31	2.96	2.44

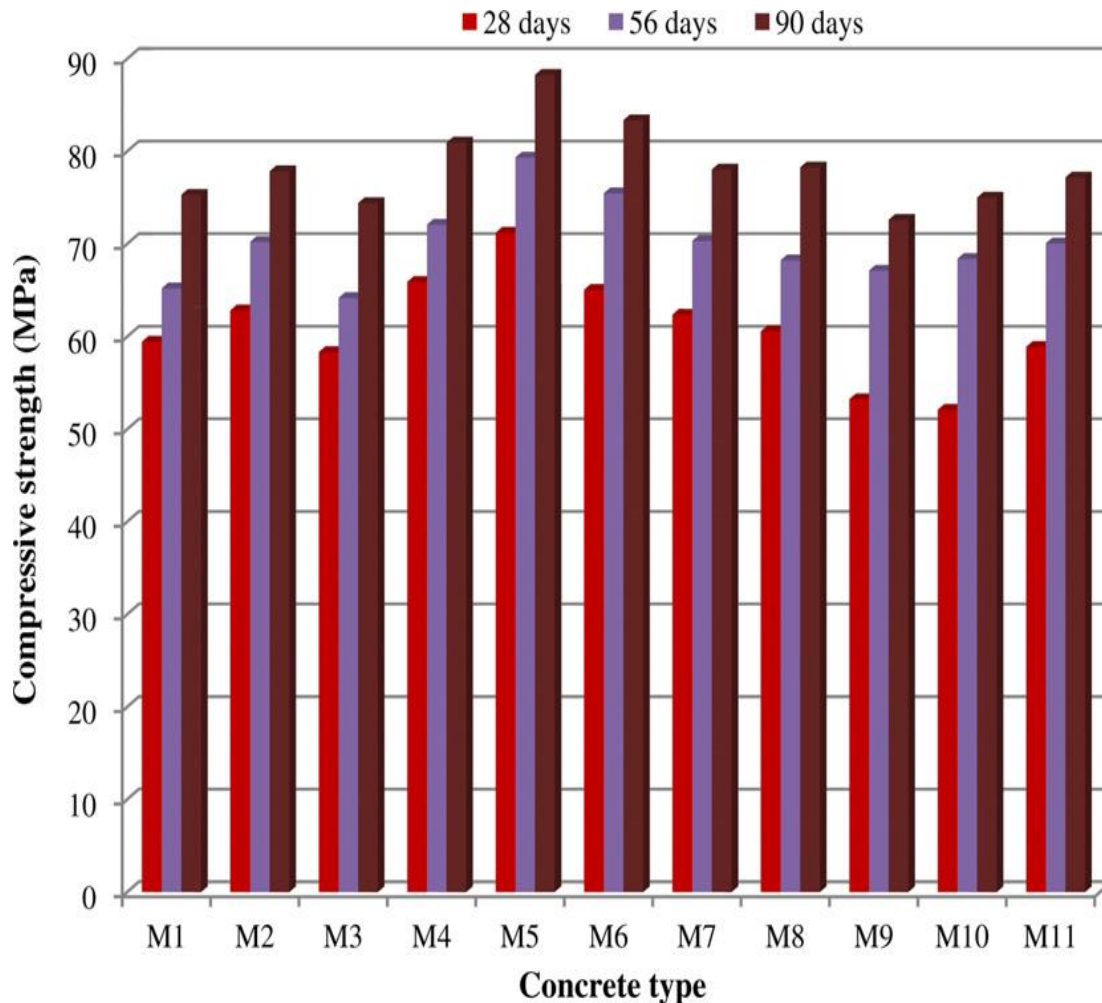


Figure 1. 11 : Résistance la compression des mélanges SCC [23].

(iv) Propreté des granulats

La présence de fines, et plus particulièrement de fines argileuses, doit être évitée. Les impuretés nuisent à la durabilité du béton et contribuent de manière significative à la modification des liaisons inter-phases au sein du béton, notamment l'adhérence et la cohésion. En fonction du risque potentiel que ces impuretés peuvent engendrer, on peut distinguer deux catégories d'impuretés :

- \* Impuretés prohibées : il s'agit des débris végétaux, du charbon, des grains légers, etc. Ces impuretés sont déterminées par un tri manuel effectué sur des tamis.
- \* Impuretés tolérables : Il s'agit de particules très fines et/ou solubles, telles que les matières organiques, l'argile, les sulfates, etc. La limite de leur utilisation est définie par les normes en vigueur.

En général, la propreté des granulats pose plus souvent problème dans le sable que dans le gravier. L'association argile-granat entraîne une couverture de la surface externe des grains. Cette influence est beaucoup plus marquée sur les sables que sur les éléments des classes granulaires correspondant aux graviers ou aux cailloux [28]. En effet, la présence d'argile, même en petite quantité, peut entraîner l'apparition de taches à la surface du béton et réduire les résistances mécaniques tout en augmentant le retrait [29].

Le contrôle de la propreté du sable s'effectue via l'essai d'« équivalent de sable » (E.S.), qui permet de mesurer la capacité du sable à flocculer les impuretés dans des conditions standardisées d'agitation et de temps [25]. Les résultats de cet essai se traduisent par une valeur d'E.S. qui permet de définir différentes catégories de sables. Ainsi, une valeur de :

- \* E.S. < 60 indique un sable argileux inadapté à l'utilisation dans les bétons ;
- \*  $60 < \text{E.S.} < 70$  correspond à des sables légèrement argileux : ils peuvent être utilisés pour les bétons courants mais présentent un risque de retrait important ;
- \*  $70 < \text{E.S.} < 80$  correspond à des sables propres qui conviennent parfaitement aux bétons de haute qualité ;
- \* E.S. > 80 correspond à des sables très propres, avec une quasi-absence de fines argileuses.

La présence d'argile dans l'agrégat peut retarder l'hydratation du ciment et compromettre la stabilité du volume du béton. [30]

La figure 1.12, montre clairement que, pour un équivalent de sable identique, les résistances mécaniques dépendent de la nature minéralogique des éléments fins. Les sables calcaires et siliceux augmentent les résistances, indépendamment du pourcentage de filler présent.

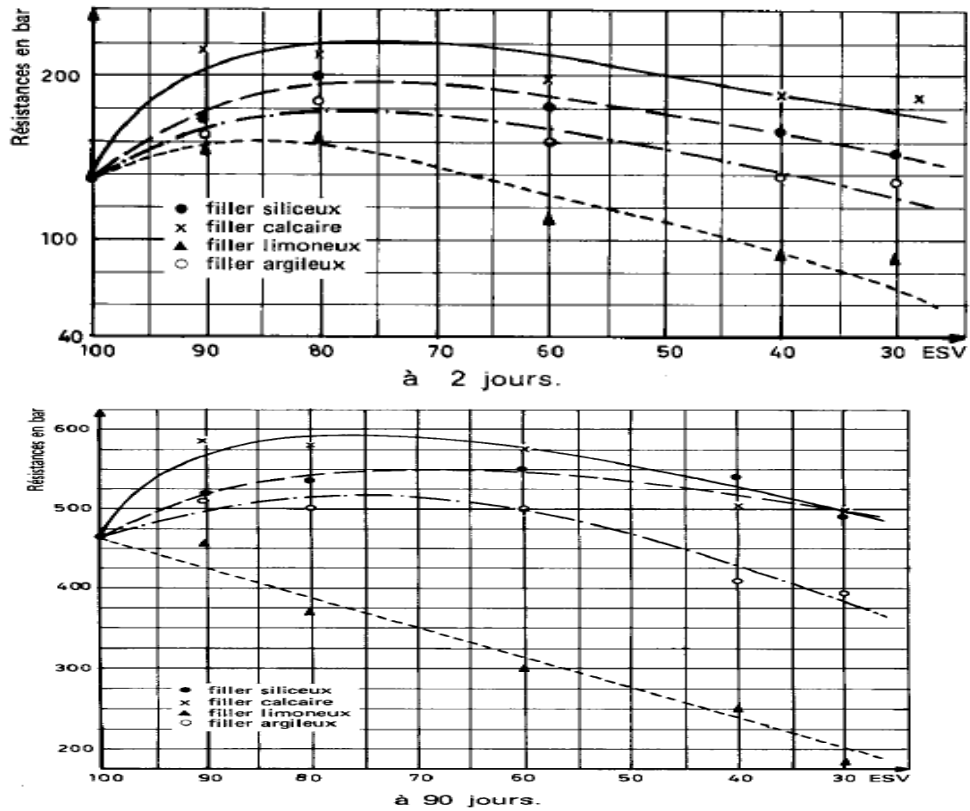


Figure 1. 12 : Variations des résistances à la compression en fonction de l'équivalent de sable[29].

Des études [31-33] ont montré la possibilité d'utiliser du sable provenant de dunes ou de concassage comme substitut au sable traditionnel, mais la résistance du béton diminue généralement avec l'augmentation de la teneur de substitution des sables au-delà d'une limite critique (Figure 1.13). Cette diminution de la résistance est attribuée à l'augmentation de la surface spécifique des granulats fins, qui nécessitent plus de coulis pour revêtir leur surface.

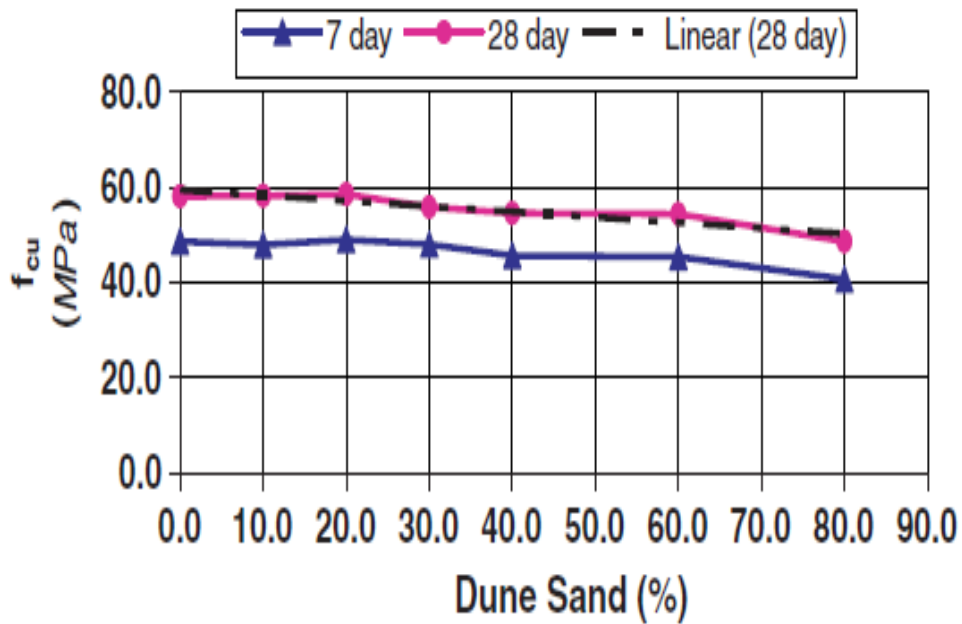


Figure 1. 13 : Effet de la teneur de sable des dunes sur la résistance en compression [31].

Il convient de noter que les autres paramètres géométriques du sable, tels que le module de finesse, la surface spécifique et le poids apparent, peuvent être déduits à partir de la courbe granulométrique. Ces paramètres peuvent être corrélés avec la demande en eau du sable dans le mortier et peuvent également influencer les propriétés des mortiers durcis [34].

Il a aussi été reporté une forte corrélation entre le pourcentage et le type de filler et le retrait du matériau cimentaire. La figure 1.14 illustre l'évolution du rapport de retrait des bétons avec sables fillérisés par rapport à celui du témoin en fonction de l'équivalent de sable, à l'échéance de 6 mois. On remarque que l'influence de la nature du filler sur le retrait final est très marquée. Cette observation peut s'expliquer par une compétition entre l'argile et le ciment vis-à-vis de l'eau. Même si la quantité d'eau est généralement largement suffisante pour hydrater l'ensemble du ciment, certains grains de clinker peuvent localement ne pas s'hydrater en raison de l'argile présente. Cette capacité de l'argile à retenir l'eau est liée à la surface spécifique.



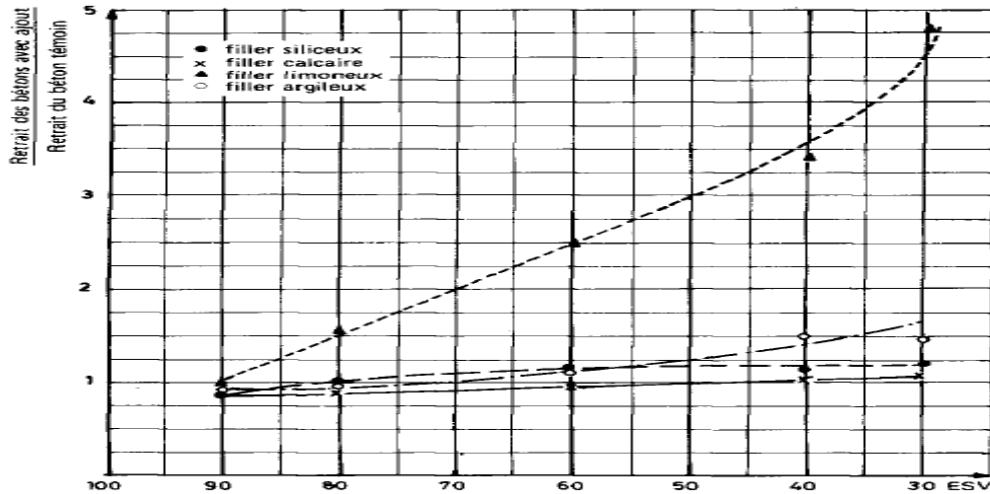


Figure 1. 14 : Variation du retrait par rapport au béton témoin à l'échéance de 6 mois [29].

### 1.3.1.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage joue un rôle double dans la fabrication du béton : elle sert à la fois de milieu de dispersion et de dissolution du ciment, ainsi que de réactant dans le processus d'hydratation. Elle facilite également la mise en œuvre du béton en agissant comme lubrifiant, à condition qu'elle ne soit pas utilisée en excès, ce qui peut réduire les résistances et la durabilité du matériau. L'eau utilisée dans la fabrication du béton soit propre et ne contienne pas d'impuretés nocives telles que des matières organiques ou des alcalis. L'eau est considérée comme appropriée si elle ne modifie ni le temps de prise de 30 minutes, ni ne réduit la résistance de plus de 20% par rapport au temps de prise et à la résistance des éprouvettes préparées en utilisant de l'eau distillée.

L'impact de la qualité de l'eau sur la résistance mécanique est considérable, surtout lorsque l'eau utilisée ne répond pas aux normes de l'eau potable. Le tableau 1.6 met en évidence l'effet de la substitution graduelle d'eaux usées traitées à l'eau potable. On constate que la diminution de la résistance est proportionnelle à la proportion d'eaux usées incorporées dans l'eau de gâchage. Cependant, incorporer 20 % d'effluents traités maintient une résistance en compression d'environ 90 %.

En général, la présence d'éléments nocifs dans l'eau de gâchage ou une qualité douteuse peut provoquer des interactions chimiques avec l'hydratation du ciment. Cela peut conduire à une modification de la prise à très court terme, une réduction des résistances à moyen terme ou des réactions de destruction à long terme [4].

Tableau 1. 4 : Résistance en compression et à la traction du béton pour des proportions variantes de l'eau traitée [35].

Proportion of treated effluent in mixing water (%)	Curing period								
	7 days			28 days			1 year		
	Compressive Strength (fc)	Tensile Strength (ft)	fc/ft	Compressive Strength (fc)	Tensile Strength (ft)	fc/ft	Compressive Strength (fc)	Tensile Strength (ft)	fc/ft
0	24.46	2.04	12.00	34.66	2.45	14.15	36.70	2.61	14.06
20	22.43	1.83	12.26	32.62	2.42	13.48	35.17	2.51	14.01
40	20.39	1.63	12.51	30.58	2.14	14.29	32.62	2.41	13.54
60	18.35	1.33	13.80	29.56	2.08	14.21	30.58	2.20	13.90
80	14.78	1.02	14.50	27.52	1.83	15.04	29.56	1.96	15.08
100	12.23	0.87	14.06	23.96	1.63	14.70	25.48	1.75	14.56

La quantité d'eau requise pour le béton dépend de nombreux facteurs tels que la quantité de ciment, les granulats utilisés et la consistance souhaitée du béton frais. En général, la quantité d'eau utilisée se situe entre 140 et 200 litres par mètre cube. Chaque formulation nécessite en pratique une quantité d'eau efficace qui représente l'eau occupant les espaces vides entre les granulats. Au moment du malaxage, l'eau contenue dans le béton peut se diviser en deux parties : l'eau ajoutée dans le béton et celle retenue par les granulats. Cette dernière peut être soit :

- En partie absorbée dans la structure poreuse des granulats ou rester libre à la surface de ces derniers.
- Ou bien Lorsque le granulat n'est pas saturé et qu'il reste de l'air dans certains de ses pores, une partie de l'eau ajoutée dans le béton sera absorbée par le granulat durant les premières minutes de malaxage.

Un excès d'eau entraîne plusieurs inconvénients, notamment le phénomène de ressuage, qui se traduit par la formation d'un film d'eau à la surface du béton, pouvant causer des fissures après évaporation. D'autres conséquences d'une teneur excessive en eau sont la diminution de la compacité et des résistances, l'augmentation de la porosité, un risque de

ségrégation des constituants du béton, une augmentation du retrait et un état de surface défectueux, caractérisé notamment par du bullage. Pour éviter ces problèmes, il est important de limiter la teneur en eau au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

Le phénomène de ressuage peut également être influencé par la granularité du béton. Il a été montré que l'augmentation de l'indice de courbure ( $I_c$ ) entraîne une augmentation du taux de ressuage du béton et que le temps de ressuage varie proportionnellement à l'indice de courbure ( $I_c$ ) (Figure 1.15).

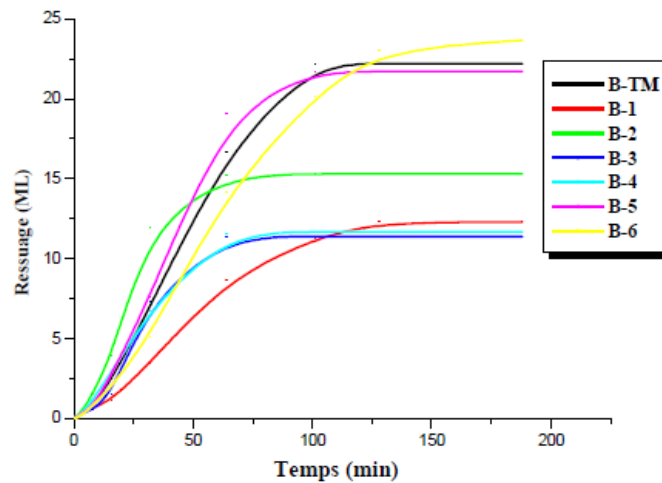


Figure 1. 15 : Evolution du volume d'eau ressué en fonction du temps [36].

#### 1.3.1.4 Le rapport (eau/ciment)

La formulation d'un béton consiste à sélectionner des constituants de qualité, puis à optimiser leurs proportions afin d'atteindre les spécifications requises par le cahier des charges. Le rapport E/C constitue l'un des critères importants dans l'étude du béton ; c'est un paramètre essentiel pour l'ouvrabilité du béton ainsi que pour ses performances en termes de résistance mécanique et de durabilité. Des études ont montré que la résistance du béton augmente de manière significative lorsque le rapport E/C est réduit [37].

La figure 1.16 présente l'évolution de la résistance en compression des mélanges jusqu'à l'âge de 28 jours. Il est clairement observable qu'une réduction de la teneur en eau et donc

du rapport E/C conduit à un développement rapide de la résistance. La grande partie de cette résistance peut être fournie par un rapport E/C optimal. Il a été rapporté que 20 % de la résistance à 28 jours du béton étudié a été fournie principalement par un E/C optimal [38]. Cette valeur optimale du rapport E/C se situe entre deux bornes : une valeur permettant une meilleure consistance du béton frais, et celle garantissant la plus grande résistance du béton durci (Figure 1.17).

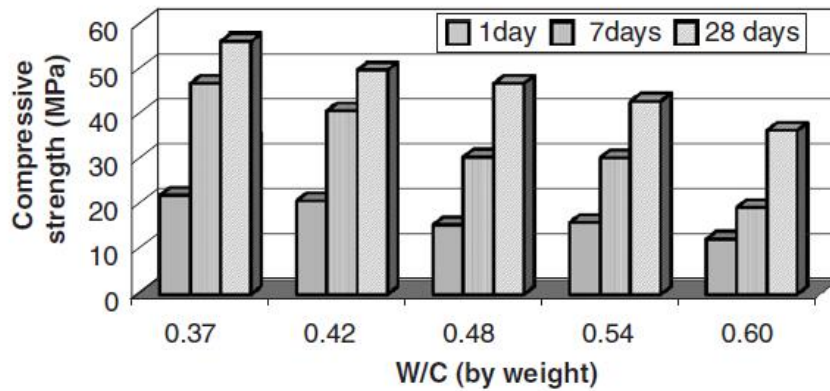


Figure 1. 16 : Variation de la résistance en compression en fonction du rapport E/C [39].

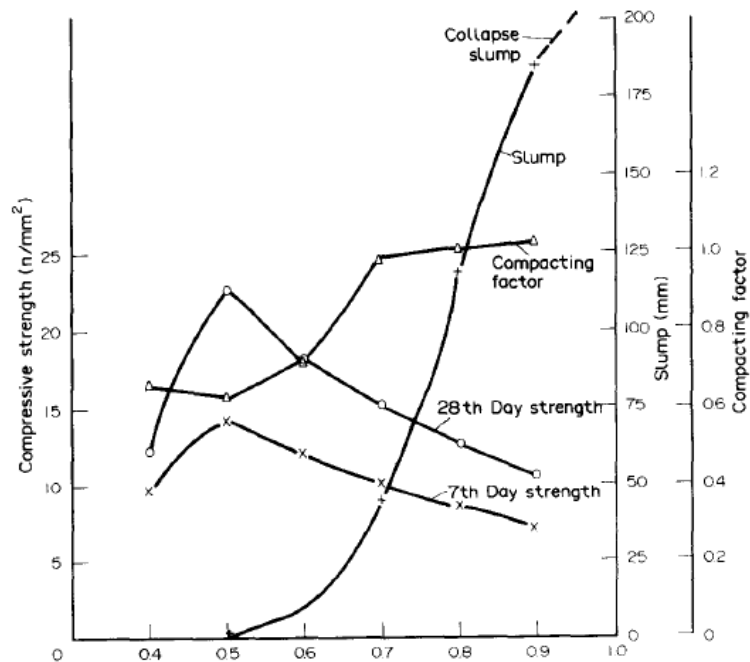


Figure 1. 17 : Variation de la résistance à la compression, l'affaissement, et le facteur du compactage en fonction du rapport E/C [40].

Le rapport E/C revêt une grande importance dans l'interconnexion du réseau poreux et, par conséquent, dans la diffusivité des espèces gazeuses ou ioniques au sein du béton. Il détermine en grande partie la perméabilité, et donc joue un rôle majeur dans le comportement du béton face à l'attaque d'origine chimique.

La porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C (Figure 1.18), mais diminue avec l'âge car l'hydratation entraîne une augmentation de la densité des produits d'hydratation dans l'espace initial rempli d'eau entre les grains de ciment. Cette faible porosité du béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité.

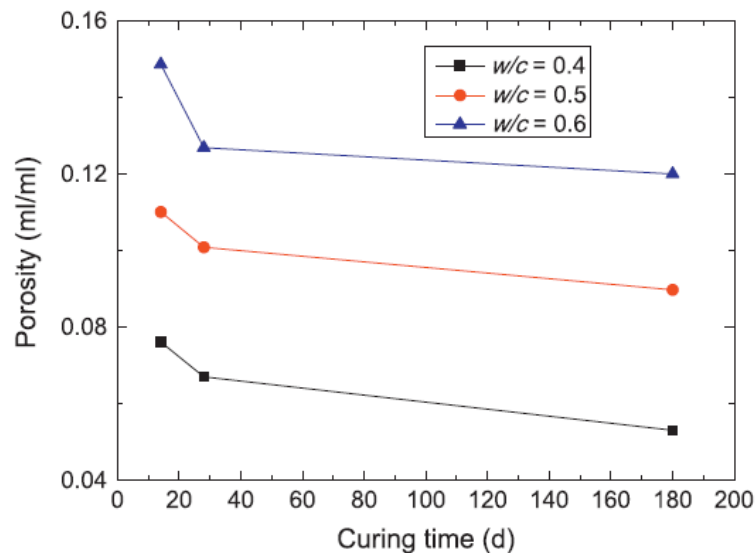


Figure 1. 18 : Effet du rapport E/C et du temps de durcissement sur la porosité du mortier en ciment [41].

La carbonatation est aussi affectée par le rapport E/C. il a été rapporté une carbonatation très avancé pour le béton avec un rapport E/C élevé (E/C=0,6) surtout après plus de trois mois d'exposition (Figure 1.19). Cette différence n'est pas significative au cours du premier mois d'exposition, car tous les bétons ont une capacité similaire à retenir l'eau de gâchage pendant cette période. Cependant, après 3 mois d'exposition, la distinction devient remarquable, et les bétons avec E/C=0,40 et E/C=0,50 présentent une carbonatation moins prononcée en raison du faible volume des pores grossiers, qui joue à la fois un rôle dans le développement de la résistance et dans la prolongation de la durée de cure.

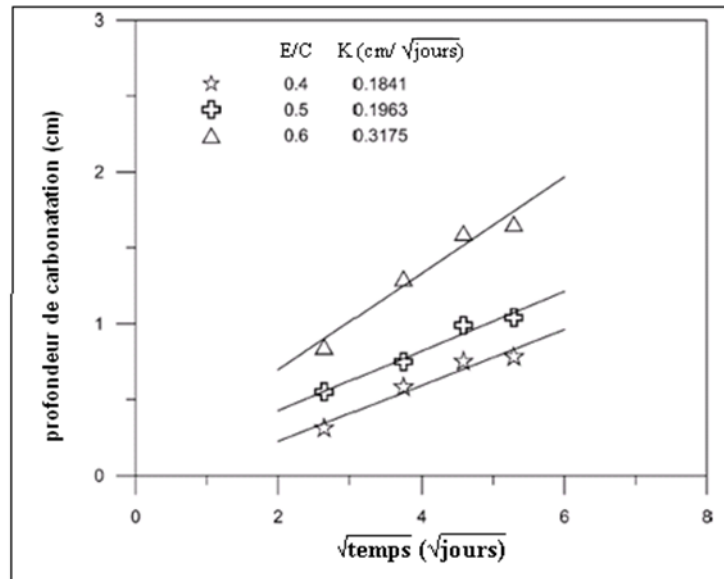


Figure 1. 19 : Variation de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps pour différents rapport E/C [42].

#### 1.3.1.5 Adjuvants

L'addition d'adjuvants est une pratique couramment utilisée dans la production de béton. Des études récentes ont démontré les effets bénéfiques des adjuvants sur les caractéristiques du béton [43]. Bien que l'utilisation d'adjuvants ne soit pas obligatoire dans la fabrication du béton, il est de plus en plus rare de produire du béton sans en utiliser.

L'usage des adjuvants est devenu incontournable en raison de leur capacité à économiser du temps et à améliorer les propriétés du béton à l'état frais et durci. Ils contribuent ainsi à améliorer les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés.

Par exemple, l'utilisation de plastifiants-réducteurs d'eau et de super-plastifiants facilite la mise en place du béton dans les éléments minces fortement armés, ainsi que la réalisation de bétons à hautes performances. Les accélérateurs de prise facilitent le bétonnage par temps froid, tandis que les retardateurs de prise sont utiles lors du bétonnage par temps chaud.

Les figures 1.20 et 1.21 présentent l'effet de l'ajout d'un super-plastifiant sur la résistance en compression du béton. Nous pouvons constater que la résistance des bétons contenant 1% d'adjuvant n'excède pas la valeur de 52 MPa. Cependant, lorsque les bétons

contiennent 2% de super-plastifiant, toutes les résistances mesurées dépassent cette valeur. Cette évolution significative du comportement de la résistance en compression met en évidence le rôle primordial des adjuvants qui assurent une meilleure dispersion des particules de ciment dans la matrice cimentaire.

Ce phénomène est attribuable à l'adsorption des molécules d'adjuvants chimiques à la surface des particules de ciment lors de la phase initiale de la réaction d'hydratation [26]. Ce processus d'adsorption améliore l'ouvrabilité du béton et réduit la teneur en eau dans le mélange, ce qui a pour conséquence une amélioration de la résistance en compression.

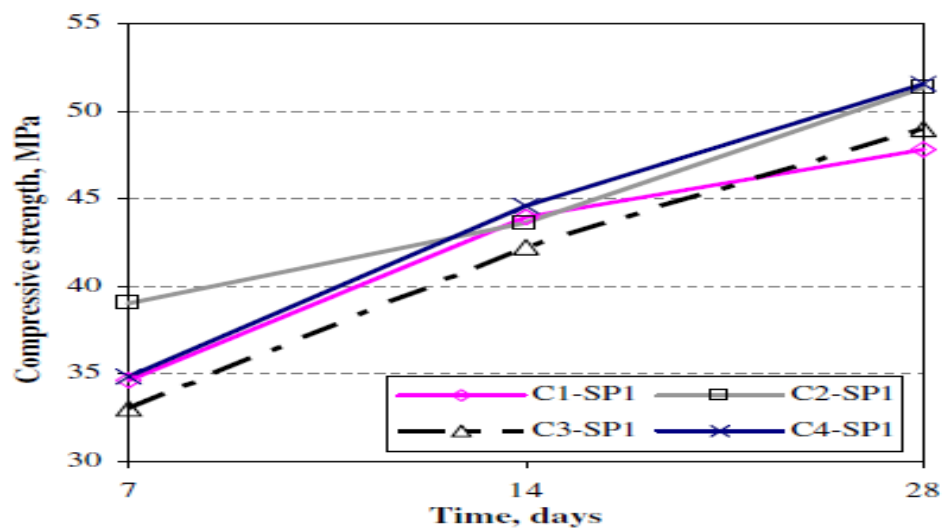


Figure 1. 20 : Résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires avec 1 % de SP [26].

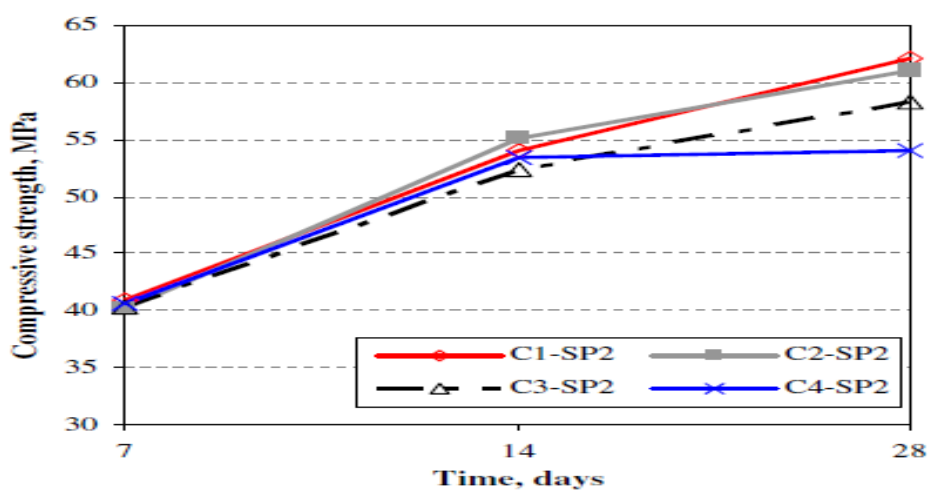


Figure 1. 21 : Résistance à la compression des quatre combinaisons granulaires avec 2 % SP [26].

### 1.3.2 Conditions de mise en œuvre

#### 1.3.2.1 Le malaxage

Le malaxage constitue une phase essentielle de la fabrication du béton, car il conditionne la qualité de son homogénéité. Afin de garantir le succès de cette opération, il est crucial de choisir un équipement adapté et de déterminer un temps de malaxage suffisant. Le choix entre une bétonnière et un malaxeur dépend de plusieurs facteurs, tels que la capacité de production et l'aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, plastiques, etc.), en vue d'obtenir des bétons réguliers.

Les bétonnières réalisent le mélange en faisant tourner la cuve autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné. Les bétons produits avec des bétonnières atteignent généralement une classe de résistance maximale de C16/20, pouvant être améliorée à C20/25 avec un contrôle minutieux de la production. En revanche, les malaxeurs offrent une homogénéité supérieure grâce au mouvement relatif des composants dans le mélange. Ce mouvement est provoqué par des palettes ou des planétaires dont l'axe est excentré par rapport à la cuve, soit fixe soit tournante. La plupart des malaxeurs ont des axes verticaux, permettant un brassage puissant à la fois verticalement et horizontalement, idéal pour l'homogénéité du béton.

Sur un chantier, il est fréquent de chercher à malaxer le béton le plus rapidement possible. Cependant, il est essentiel de déterminer le temps minimal nécessaire pour obtenir un béton homogène et résistant. Ce temps varie en fonction du type de malaxeur, et ce n'est pas la durée exacte mais plutôt le nombre de rotations de la cuve qui compte. Généralement, le malaxage dure environ 45 secondes. Cependant, des bétons plus rigides ou contenant beaucoup de fines particules peuvent nécessiter de 1 à 2 minutes de malaxage.

#### 1.3.2.2 Vibration (manque et excès)

L'objectif de la vibration est d'optimiser l'agencement des particules, favorisant ainsi un écoulement fluide, un remplissage efficace des vides et un enrobage adéquat des armatures. Parallèlement, il élimine en grande partie l'air emprisonné dans le béton, contribuant à sa compaction.



L'effet de paroi a une influence sur la microstructure du béton en surface. Lors de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois du moule que leur rayon  $r$ . Par conséquent, le volume occupé par les vides entre les gros granulats à proximité des parois est plus important que dans la partie centrale du béton, appelée le béton de masse (Figure 1.22). Cette différence de compacité entre les zones proches des parois et le béton de masse a pour conséquence une concentration plus élevée de particules fines près des parois.

Ces zones proches des parois du moule sont donc admises comme étant plus riches en particules fines. Cela peut avoir des implications sur les propriétés du béton, car les particules fines influent sur la porosité, la résistance et la durabilité du matériau. Par exemple, les zones riches en particules fines peuvent présenter une porosité plus élevée, ce qui peut affecter la résistance et l'imperméabilité du béton de surface.

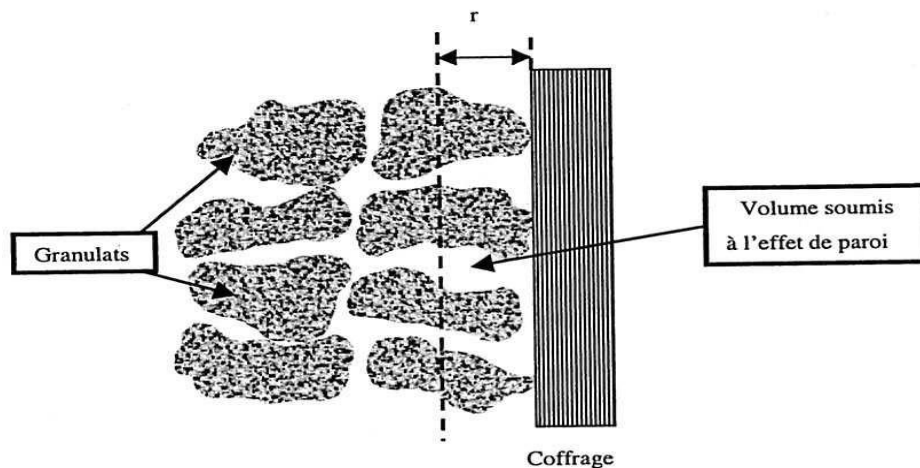


Figure 1. 22 : Effet de paroi au voisinage d'un coffrage [44].

Lorsque le béton frais est soumis à la vibration, l'un des effets principaux est l'expulsion de l'air emprisonné à l'intérieur. L'arrêt du dégagement d'air indique le moment où la vibration n'a plus d'effet sur la compaction du béton. Au-delà de ce point, la vibration peut même devenir préjudiciable en provoquant la ségrégation des granulats plus lourds, qui se déplacent vers le bas par rapport à la laitance de ciment plus légère.

### 1.3.2.3 La cure

La cure du béton est une étape indispensable pour éviter la perte d'humidité et de maintenir l'hydratation du béton, favorisant ainsi son processus de maturation optimal. Cette pratique devient d'autant plus cruciale dans des conditions atmosphériques défavorables, telles que le vent, l'exposition solaire directe ou une faible humidité.

La cure du béton a pour but fondamental de maintenir la fraîcheur de la pâte de manière à remplir au maximum les espaces inter granulaires (pores capillaires) avec les produits d'hydratation. L'hydratation du ciment se produit lorsque la pression de vapeur dans les capillaires atteint un niveau suffisamment élevé, généralement environ 0,8 de la pression de saturation. Par conséquent, lorsque le processus de séchage commence, il arrête l'hydratation du ciment avant que les pores ne soient entièrement comblés par les produits d'hydratation, ce qui permet la formation d'une structure poreuse plus continue [45].

Le béton d'enrobage est particulièrement vulnérable au séchage, car il a tendance à perdre de l'eau plus rapidement. La présence d'une structure poreuse continue dans la couche de recouvrement du béton facilite la pénétration d'agents agressifs, ce qui peut provoquer la détérioration de la structure du béton. Un séchage rapide peut également causer un retrait excessif et des fissures, aggravant ainsi le processus de détérioration du béton.

D'autre part, maintenir une quantité adéquate d'eau à l'intérieur de la matrice cimentaire favorise un développement approprié de la résistance du béton. Cependant, une perte d'humidité dans les pores capillaires, que ce soit par évaporation ou par hydratation dissipée, peut réduire l'hydratation du ciment, entraînant ainsi une diminution de la résistance du béton [46].

La durée de cure humide et le régime de cure affectent la performance du béton. La figure 1.23 montre l'effet de plusieurs régimes de cure sur la résistance à la compression in situ (condition 1 : durcissement humide, condition 2 : Absence de cure après le démoulage, condition 3 : durcissement à la température ambiante au bout de deux jours de durcissement humide, condition 4 : durcissement à  $T = 38^{\circ} \text{C}$  et  $\text{RH} = 65 \%$ ).

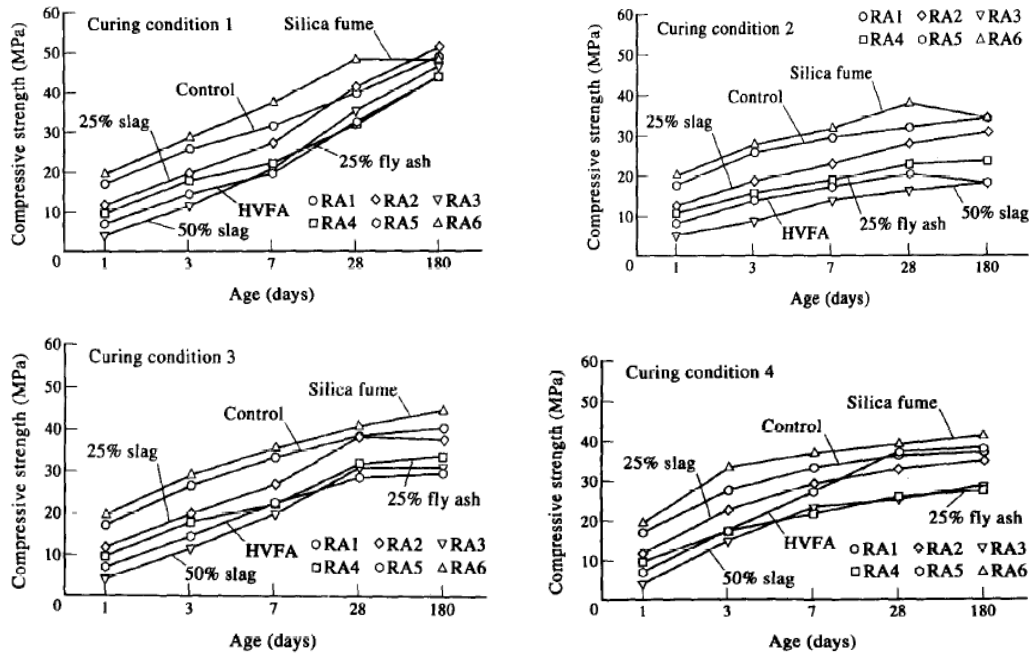


Figure 1. 23 : Résistance en compression avec différentes conditions de cure [47].

Cette étude a révélé que les bétons soumis à une absence de cure après le démoulage présentaient les résultats les plus médiocres en termes de développement de la résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions de chlorure. En revanche, les bétons durcis dans des conditions humides pendant seulement deux jours ont montré une amélioration significative de leur résistance et d'autres caractéristiques par rapport aux bétons non durcis. Concernant la condition 4 (38 °C et 65 %), les gains de résistance observés initialement n'ont pas été maintenus à un stade plus avancé ; les résistances à la compression à 180 jours étaient nettement inférieures à celles des bétons durcis dans des conditions humides correspondantes.

En effet, la perte de résistance du béton semble être directement liée à la perte d'eau qui se produit pendant la période de maturation du matériau cimentaire. L'absence de durcissement humide, en particulier lorsque l'humidité relative de l'air ambiant est inférieure à celle du système poreux du béton, affecte de manière défavorable sa résistance en raison des échanges entre les deux milieux. Cet effet est d'autant plus prononcé lorsque le rapport eau/ciment est élevé et que le béton présente une faible vitesse de développement de sa résistance.

Les bétons contenant des matériaux cimentaires supplémentaires comme le laitier et les cendres volantes, sont plus sensibles à un manque d'humidité et présentent une perte significative de résistance par rapport à ceux ayant subi une cure humide adéquate [50].

La figure 1.24 présente les variations de la résistance à la compression du béton Portland, ainsi que du béton contenant un ajout pouzzolanique, soumis à deux conditions de cure (immersion dans l'eau et exposition à l'air). Cette figure montre une plus grande sensibilité des bétons à ajout pouzzolanique à une cure insuffisante par rapport aux bétons Portland.

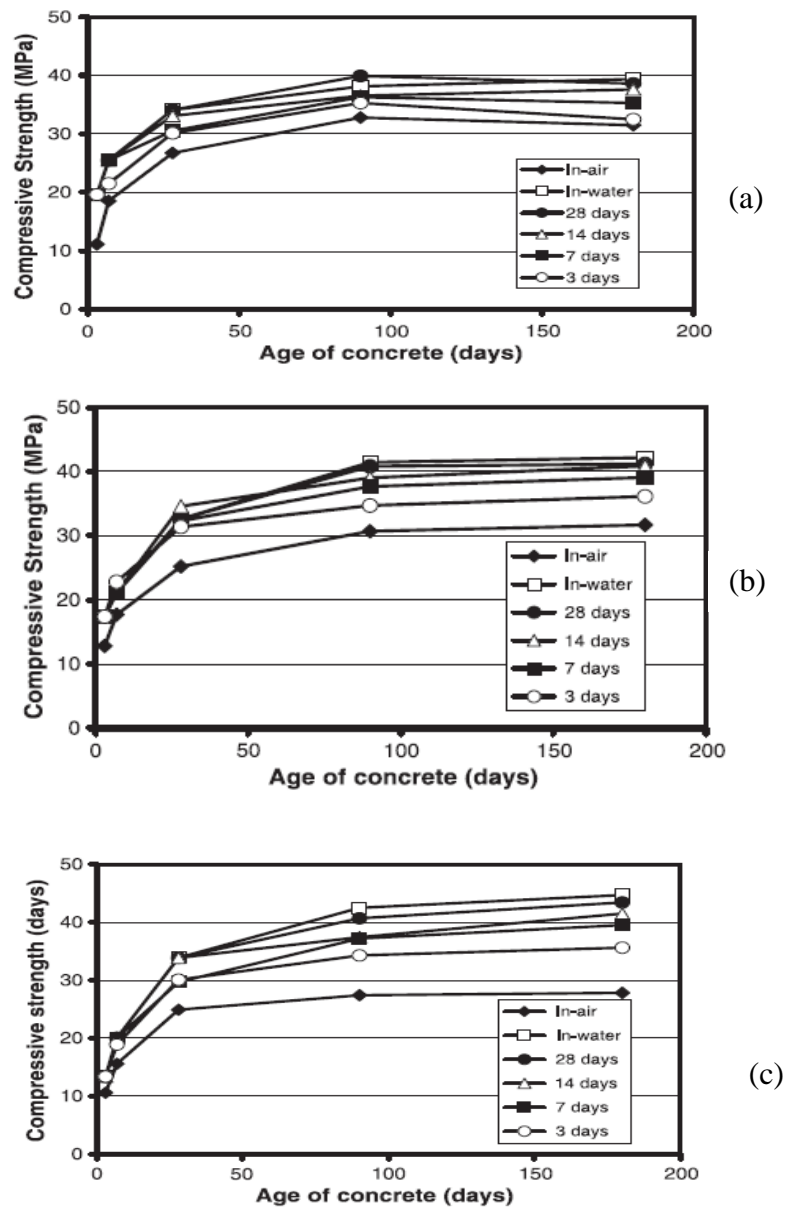


Figure 1. 24 : Développement de la résistance du béton (a) CPA, (b) BC et (c) TC [49].

La pouzzolane a besoin d'un environnement humide et la présence d'hydroxyde de calcium pour que la pouzzolane puisse exprimer ses propriétés de liaison. Lorsque l'eau disponible dans le milieu commence à s'évaporer, cela empêche la pouzzolane de manifester ses propriétés de liaison. Ainsi, les conditions de durcissement sec ont une influence plus importante sur le béton contenant de la pouzzolane que sur le béton sans pouzzolane.

La durée de la cure du béton est déterminée en fonction de plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, le développement de la résistance du béton et la géométrie des éléments. En général, une période de 5 à 10 jours est recommandée, mais elle peut être prolongée si la température ambiante est basse [49, 51].

La figure 1.25 montre une augmentation progressive et continue des résistances mécaniques du béton au fil de longues périodes de cure humide.

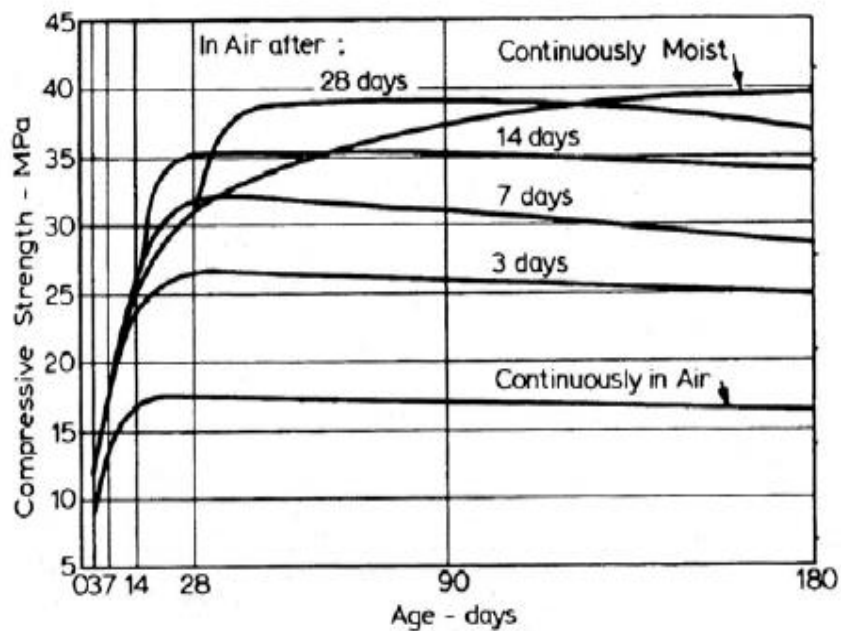


Figure 1. 25 : Influence de la durée de cure sur la résistance d'un béton (rapport E/C = 0,5) [44].

Les mesures de profondeur de carbonatation effectuées à l'aide de phénolphtaléine après 1 mois révèlent que le béton durci à l'air présente une carbonatation de 3 mm à partir de la surface, tandis que celui durci dans l'eau ne présente qu'une carbonatation de 1,5 mm. La

profondeur de carbonatation continue d'augmenter pour atteindre respectivement 10 mm et 8,5 mm pour les deux cas (Figure 1.26).

Les procédés de cure ont aussi un effet sur le développement de la résistance à la compression du béton. Le tableau 1.7 montre que l'application de composés de durcissement améliore la résistance du béton et réduit sa perméabilité par rapport aux techniques classiques de durcissement, telles que l'utilisation de bâches en plastique et l'humidification à l'eau. Il a été rapporté aussi que les techniques modernes de la maturation du béton améliorent significativement la résistance à la compression [48].

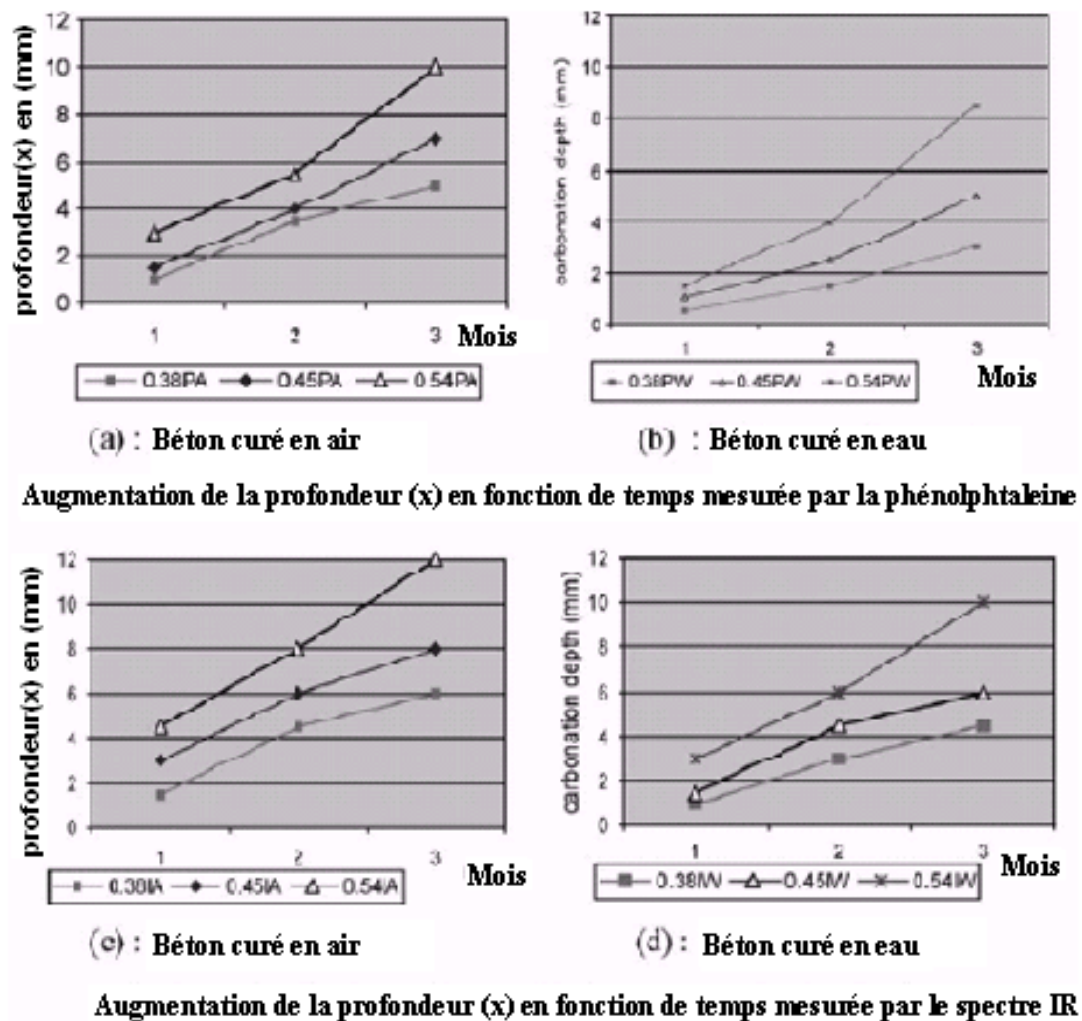


Figure 1. 26 : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps et type de cure [42].

Tableau 1. 5 : Résistance à la compression des échantillons durcis avec différents procédés de cure [51].

Curing method	Initial wet burlap Curing (days)	Compressive strength, MPa after		
		14 days	28 days	60 days
Wet burlap	1	27.2	29.7	30.1
	2	30.3	32.0	34.4
	3	31.0	33.0	35.0
	7	31.1	33.2	35.1
Acrylic curing Compound	1	27.4	27.8	30.4
	2	31.9	33.0	34.5
	3	32.4	34.0	35.5
	7	33.0	34.5	36.2
Bitumen-based curing Compound	1	30.6	32.2	34.9
	2	33.3	34.5	36.0
	3	34.0	35.5	36.5
	7	34.5	36.0	37.1
Water-based curing compound	1	28.8	31.3	32.4
	2	29.0	31.1	33.1
	3	29.9	30.2	34.0
	7	32.7	33.5	35.0

#### 1.4 Normes pratiques de contrôle de la qualité du béton

Les normes pratiques de construction sont conçues pour assurer le suivi et le contrôle de la qualité de l'exécution des travaux tout au long des différentes phases de construction. Elles reposent essentiellement sur la philosophie consistant à choisir dès le départ les bons matériaux en fonction des exigences établies préalablement, puis à vérifier la conformité de ces matériaux aux normes spécifiques, et enfin à appliquer des méthodes scientifiques pour en vérifier la conformité des travaux. Tous ces aspects contribuent certainement à la livraison d'un produit de qualité à la clientèle, en termes de résistance, durabilité et sécurité.

Parmi les directives énoncées par ces normes, on trouve la conformité du béton aux critères spécifiques relatifs à la résistance à la compression. Le respect de ces critères sur un chantier est indispensable, car il permet de garantir la création d'un champ de résistances homogène, avec des valeurs adéquates répondant aux exigences du contrat.

### 1.4.1 Critère de conformité

Dans le contexte de la conformité du béton, le risque encouru par le producteur correspond à la probabilité de rejet d'un lot, tandis que le risque encouru par le consommateur correspond à la probabilité d'accepter un lot non conforme, selon des critères bien définis. L'application des critères de conformité visent à réduire au minimum le risque de rejet de lots de béton en mettant en place un plan d'échantillonnage commun pour le producteur et le consommateur [61].

#### 1.4.1.1 Critère d'acceptation des résultats individuels

En pratique, l'évaluation d'un lot de béton sur site repose sur sa résistance caractéristique. Le principe du test consiste à évaluer les valeurs de résistance du béton produit sur place, qui doivent être supérieures à celles spécifiées par une classe de béton précise (résistance caractéristique), avec une marge de tolérance. Plusieurs normes de construction, telles que la norme brésilienne ABNT NBR 12655 [53], la norme égyptienne [54] et l'euro-code ([55] et [56]), définissent la valeur de résistance caractéristique du béton comme la limite à partir de laquelle 5% des résultats des tests sont autorisés à être inférieurs à cette valeur. En se basant sur cette terminologie, la conformité d'un lot de béton selon ce critère est déclarée si l'inéquation suivante est satisfaite :

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1.64 * \sigma \dots\dots\dots (1.1)$$

$$\text{Ou bien } f_{ck_{site}} = f_{cm} - 1.64 * \sigma \geq f_{ck} \dots\dots\dots (1.2)$$

Avec

$f_{cm}$  : La résistance moyenne du béton

$f_{ck}$  : La résistance caractéristique de la classe du béton

$f_{ck_{site}}$  : La résistance caractéristique du béton mesurée sur site

$\sigma$  : L'écart type

Par ailleurs, ce critère n'est pas largement utilisé par certaines normes, telles que le code **ACI 318**, qui ne l'utilise pas fréquemment. Ce critère est exigé dans des situations spécifiques où la résistance moyenne joue un rôle fondamental dans la méthodologie de conception, comme dans certaines spécifications des projets de chaussée [57]. Dans de tels cas, la recommandation habituelle consiste à ne pas autoriser plus de 10 % des essais de



résistance à tomber en dessous de la valeur requise. La formule de vérification dans ce cas est donnée par l'équation suivante :

$$f'_{cr} \geq f'c + 1.28 * \sigma \dots\dots\dots (1.3)$$

Avec

$f'_{cr}$  : la résistance à la compression moyenne requise.

$f'c$  : la résistance à la compression spécifiée.

$\sigma$  : l'écart type de l'échantillonnage.

Dans la plupart des cas, le **ACI** préconise d'autres critères pour évaluer les résultats individuels en fonction de la valeur de la résistance spécifiée  $f'c$  [58]. Les formules établies pour ce critère s'écrit comme suit :

$$f'_{cr} \geq f'c + 2.33 * \sigma - 3.5 \dots\dots\dots (1.4) \text{ pour } f'c \leq 35 \text{ MPa}$$

$$f'_{cr} \geq 0.90f'c + 2.33 * \sigma \dots\dots\dots (1.5) \text{ pour } f'c > 35 \text{ MPa}$$

Pour l'estimation de l'écart-type de l'échantillonnage, l'ACI exige un minimum de 30 tests consécutifs ou de deux groupes de tests consécutifs totalisant au moins 30 tests. Si le volume de tests n'est pas disponible, il convient d'apporter une modification à la valeur estimée de l'écart-type, conformément au tableau 1.8. Cependant, en cas d'indisponibilité totale des données pour établir l'écart-type d'échantillon, la norme définit d'autres critères spécifiques pour l'évaluation de la conformité pour cette situation, comme présenté dans le tableau 1.9.

Tableau 1. 6 : Facteurs de modification de l'écart type lorsque moins de 30 tests sont disponible [58].

Nombre des tests	Facteurs de modification de l'écart type de l'échantillon
Moins de 15	Voir Tableau 1.9
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 ou plus	1,00

Tableau 1. 7 : Résistance moyenne requise en l'absence de données [57].

Résistance à la compression spécifiée, MPa	Résistance à la compression moyenne requise, MPa
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.3$
$f'c > 35$	$f'cr = 1.10 f'c + 5.0$

Pour l'évaluation de la conformité selon les normes **EN 206-1** [59] et **NA 16002** [60], il est nécessaire de considérer deux périodes de production distinctes : la période initiale et la période continue. La période initiale couvre la production jusqu'à ce qu'au moins 35 résultats d'essais soient disponibles. En revanche, la période continue est atteinte lorsque 35 résultats d'essais au minimum sont obtenus sur une période n'excédant pas 12 mois. En plus de cette distinction, la norme **EN 206-1** exige davantage durant la période continue une évaluation de la conformité basée sur la fréquence des essais. Cette évaluation doit être effectuée sur les résultats d'essais obtenus pendant une période d'évaluation qui ne doit pas dépasser la durée définie par l'une des options suivantes :

- Pour les installations ayant des fréquences d'essai plus faibles (nombre de résultats d'essais pour le béton prévu inférieur à 35 tous les trois mois), la période d'évaluation doit comprendre au moins 15 résultats et ne pas dépasser 35 résultats consécutifs obtenus sur une période n'excédant pas 6 mois.
- Pour les installations ayant des taux d'essai plus élevés (nombre de résultats d'essais pour le béton prévu de 35 ou plus tous les trois mois), la période d'évaluation doit comprendre au moins 15 résultats consécutifs et ne pas dépasser trois mois.

Le critère d'acceptation des résultats individuels est identique pour les deux périodes d'évaluation. Il est simplement nécessaire de garantir que l'inéquation suivante soit satisfaite pour l'ensemble des résultats :

$$f_{ci} \geq f_{ck} - 4 \dots\dots\dots (1.6)$$

Avec

$f_{ci}$  : résultat individuel d'essai.

$f_{ck}$  : résistance caractéristique du béton.

En plus de ce critère, les deux normes recommandent également un autre critère concernant l'appartenance du béton à la même famille, tel qu'indiqué dans le Tableau 1.10. Ce critère stipule que la moyenne de tous les résultats bruts d'essais provenant d'une même formulation de béton doit être supérieure à la résistance caractéristique, en tenant compte d'une marge de sécurité en fonction du nombre de résultats d'essais. Il convient de noter que la norme **EN 206-1** prévoit une vérification pour un nombre de résultats pouvant dépasser 15, tandis que la norme **NA16002** limite cette vérification à  $n=6$ . Si un béton ne satisfait pas à ce critère, il doit être exclu de la famille et sa conformité est évaluée individuellement.

Tableau 1. 8 : Critère de confirmation pour les formules individuelles [59].

Nombre « n » de résultats d'essais de résistance pour un béton particulier	Moyenne de tous les résultats d'essais bruts ( $f_{cm}$ ) pour un béton particulier N/mm <sup>2</sup>
2	$\geq f_{ck} - 1$
3	$\geq f_{ck} + 1$
4	$\geq f_{ck} + 2$
5	$\geq f_{ck} + 2,5$
6	$\geq f_{ck} + 3,0$
7 à 9	$\geq f_{ck} + 3,5$
10 à 12	$\geq f_{ck} + 4,0$
13, 14	$\geq f_{ck} + 4,5$
$\geq 15$	$\geq f_{ck} + 1,48 \sigma$

#### 1.4.1.2 Critère d'acceptation de la moyenne des résultats

Concernant le critère d'acceptation de la moyenne des résultats d'essais, l'**ACI** recommande que la moyenne arithmétique de chaque groupe de trois résultats de test consécutifs soit égale ou supérieure à  $f'c$ . La condition d'acceptation s'écrit comme suit :

$$f'_{cr} \geq f'c + 1.34 * \sigma \dots\dots\dots (1.7)$$

Selon les normes **EN 206-1** et **NA 16002**, la moyenne des résultats d'essais est évaluée pour les deux périodes de production, comme indiqué dans le tableau 1.11. L'écart type utilisé pendant la période continue est estimé initialement à partir de 35 résultats d'essais consécutifs obtenus sur une période de plus de trois mois précédant la période de production pour laquelle la conformité doit être vérifiée. La validité de la valeur retenue doit être vérifiée selon deux méthodes :

- La première méthode consiste à s'assurer que l'écart type des 15 derniers résultats d'essais ne s'éloigne pas de manière significative de la valeur initiale estimée. Si l'écart type reste dans une plage acceptable, la valeur initiale est considérée comme valide pour la période de conformité. Cette approche est considérée comme valide sous les conditions suivantes :

$$0,63 * \sigma \leq S_{15} \leq 1,37 * \sigma$$

La norme EN 206-1 utilise une procédure détaillée pour vérifier la validité de l'écart type en fonction du nombre de résultats d'essais (Tableau 1.12).

- La deuxième méthode implique l'utilisation d'un système continu pour estimer la nouvelle valeur de l'écart type. Ce système doit avoir une sensibilité équivalente à celle de la méthode 1. La nouvelle estimation de l'écart type devra ensuite être appliquée pour la nouvelle période d'évaluation.

Tableau 1. 9 : Critère d'acceptation de la moyenne des résultats selon EN 206-1 et NA 16002 [60].

Production	Nombre «n» de résultats d'essai de résistance dans le groupe	Critère
		Moyenne de n résultats ( $f_{cm}$ ) N/mm <sup>2</sup>
Initiale	3	$\geq f_{ck} + 4$
Continue	$\geq 15$	$\geq f_{ck} + 1.48 \sigma$

Tableau 1. 10 : Vérification de la valeur de l'écart type selon EN 206-1 [59].

Nombre des résultats d'essai	Limite pour $S_n$
15 à 19	$0,63 * \sigma \leq S_n \leq 1,37 * \sigma$
20 à 24	$0,68 * \sigma \leq S_n \leq 1,31 * \sigma$
25 à 29	$0,72 * \sigma \leq S_n \leq 1,28 * \sigma$
30 à 34	$0,74 * \sigma \leq S_n \leq 1,26 * \sigma$
35 <sup>a</sup>	$0,76 * \sigma \leq S_n \leq 1,24 * \sigma$
a pour plus de 35 résultats, la formule (4) est appliquée. $S_n$ : l'écart type de la seconde période d'évaluation	

#### 1.4.2 Classification du système de contrôle

L'origine du problème de la qualité du béton sur un chantier, du point de vue de la résistance, réside sans aucun doute dans la variation des résultats. Cette variation peut être due soit à des variations intra-lot, soit à des variations inter-lots, la variation globale tenant compte des deux sources de variation.

Le **ACI 214R-11** résume les principales sources de variation des résultats de résistance sur un site de construction dans le tableau 1.13. La lecture de ce tableau révèle que les causes sont diverses, ce qui rend la surveillance du système de contrôle de la qualité du béton difficile. Cependant, la norme propose un système de contrôle du béton basé sur l'estimation de l'écart-type ( $\sigma$ ) et du coefficient de variation (Cov) (Tableau 1.14). En effet, en fonction des valeurs de ces statistiques, nous pouvons classer la nature du système. Par exemple, si la valeur de l'écart-type varie entre 3,4 et 4,10 MPa, en tenant compte de la variation globale, le système de contrôle est considéré comme acceptable. De même, si le Cov se situe dans des intervalles précis pour la variation intra-lot, le système peut aussi être classé.

Tableau 1. 11 : Principales sources de la variation de résistance sur site [57].

Inter-lots	Intra-lot
<p><b>Variations dans les caractéristiques et les proportions des composants</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulats ;</li> <li>- Matériaux cimentaires, y compris les pouzzolanes ;</li> <li>- Adjuvants.</li> </ul> <p><b>Variations du rapport E/C causées par :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un mauvais contrôle de l'eau ;</li> <li>- La variation des conditions d'humidité des stocks de granulats ;</li> <li>- Les mesures variables de l'humidité des granulats ;</li> <li>- Le retraitement.</li> </ul> <p><b>Variations dans le malaxage, le transport et l'échantillonnage :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps et vitesse de malaxage ;</li> <li>- Distance entre l'usine et le lieu de placement ; <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions de la route ;</li> <li>- Échec pour obtenir un échantillon représentatif du lot.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Variations dans la mise en place et la consolidation :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chute, pompe ou chariot ;</li> <li>- Vibrations internes ou externes ;</li> <li>- Différents opérateurs.</li> </ul> <p><b>Variations de température et de durcissement du béton :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Saison ;</li> <li>- Humidité ambiante ;</li> <li>- Vitesse du vent.</li> </ul>	<p><b>Échantillonnage incorrect de l'échantillon du lot</b></p> <p><b>Variations dues aux techniques de fabrication :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions non conformes ;</li> <li>- Outils incorrects ;</li> <li>- Moules de mauvaise qualité, endommagés ou déformés ;</li> <li>- Moulage et consolidation non standard ;</li> <li>- Manipulation incorrecte des échantillons de tests frais.</li> </ul> <p><b>Différences dans le durcissement :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Retards dans le début du durcissement initial ;</li> <li>- Variation de température ;</li> <li>- Contrôle variable de l'humidité ;</li> <li>- Durcissement initial non conforme aux normes ;</li> <li>- Retards dans le transport des cylindres vers le laboratoire ;</li> <li>- Manipulation brute des cylindres pendant le transport ;</li> <li>- Durcissement final incorrect.</li> </ul> <p><b>Variations dans les tests d'échantillons :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Testeur non certifié ;</li> <li>- Préparation de la surface de l'échantillon ;</li> <li>- Équipement de test inadéquat ou non calibré ;</li> <li>- Taux de chargement non conforme aux normes ;</li> <li>- Mauvaise tenue des registres.</li> </ul>

Tableau 1. 12 : Appréciation du système de contrôle du béton pour  $f'_{c} \leq 35$  MPa selon ACI [57].

<b>Overall variation</b>					
Classe of operation	Standard deviation for different control standards, psi (MPa)				
	Excellent	Very good	Good	Fair	Poor
General Construction testing	Below 400 (below 2.8)	400 to 500 (2.8 to 3.4)	500 to 600 (3.4 to 4.1)	600 to 700 (4.1 to 4.8)	Above 700 (above 4.8)
Laboratory trial batches	Below 200 (below 1.4)	200 to 250 (1.4 to 1.7)	250 to 300 (1.7 to 2.1)	300 to 350 (2.1 to 2.4)	Above 350 (above 2.4)
<b>Within-batch variation</b>					
Classe of operation	Coefficient of variation for different control standards,				
	Excellent	Very good	Good	Fair	Poor
Field control testing	Below 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	5.0 to 6.0	Above 6.0
Laboratory trial batches	Below 2.0	2.0 to 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	Above 5.0

### 1.5 Conclusion

L'analyse bibliographique de la qualité du béton a mis en évidence que la résistance à la compression et la durabilité du béton dépendent de la qualité des composants (sable, gravier, ajouts cimentaires et adjuvants). Les normes exigent des critères minimaux pour le choix des ingrédients. Une composition optimale, avec un rapport eau/ciment aussi faible que possible, garantit un béton de qualité.

De plus, les étapes de fabrication et en particulier le malaxage, la vibration, et la cure humide sont aussi importants. La conformité du produit fini, à savoir le béton produit sur site, repose sur l'analyse statistique des résultats des essais. Le chapitre 2 explore les concepts statistiques fondamentaux nécessaires à cette évaluation.

**CHAPITRE 2 :**  
**NOTIONS DE STATISTIQUES**



## CHAPITRE 2 : NOTIONS DE STATISTIQUES

### 2.1 Introduction

La science statistique couvre un champ de connaissances vaste, et les définitions qui lui sont associées sont intrinsèquement liées les unes aux autres. Le présent chapitre vise à introduire les concepts statistiques pour faciliter la compréhension du traitement des données.

### 2.2 Terminologie et concepts fondamentaux

#### 2.2.1 Population et individus

La population désigne un ensemble d'unités statistiques. Ces unités statistiques, également appelées individus ou observations, représentent des personnes, des animaux ou des objets. Dans la plupart des cas, les termes "individus" ou "observations" désignent les données quantitatives recueillies lors d'un protocole expérimental, telles que la résistance à la compression d'un béton dans une condition expérimentale donnée. On peut faire une distinction entre ces deux termes en considérant que les observations représentent des informations de nature diverse, tandis que les individus constituent le support sur lequel ces informations ont été recueillies.

Dans le cadre de cette étude portant sur l'analyse de données quantitatives recueillies à partir de chantiers de construction, il convient d'utiliser le terme "observations". Par exemple, pour étudier la qualité du béton dans les projets de construction en se basant sur sa résistance à la compression, nous mesurons cette résistance pour chaque lot de bétonnage. Dans ce contexte, le problème est formulé de la manière suivante :

- Propriété étudiée (observation) : la résistance à la compression du béton ;
- Population statistique : l'essai de compression du béton ;
- Unité statistique : résultats de l'essai de compression.

### 2.2.2 Echantillon

Il s'agit d'un groupe d'individus sélectionnés à partir d'une population spécifique. Lorsque la population est de grande taille (plus étendue), ce qui rend généralement son observation impossible, on étudie un échantillon, c'est-à-dire un sous-ensemble beaucoup plus restreint de la population. Dans tous les cas, l'échantillon doit être soigneusement choisi afin de représenter la population de manière adéquate et de fournir une description précise des résultats de l'analyse.

### 2.2.3 Caractère et variable statistique

Le caractère désigne une caractéristique définie présente chez tous les individus d'une population soumise à une étude statistique. En fonction du nombre de caractères étudiés, la dimension de la série statistique et le type d'analyse utilisé peuvent être déterminés et choisis. Un caractère est qualifié de "quantitatif" s'il est mesurable, tandis qu'il est qualifié de "qualitatif" s'il est identifiable mais non mesurable.

D'autre part, une variable statistique est un caractère qui fait l'objet d'une étude statistique. Elle peut donc être soit qualitative, soit quantitative. Dans notre étude, nous porterons une attention particulière aux variables quantitatives, qui peuvent être discrètes ou continues.

- Variables qualitatives

Également connue sous le nom de variable catégorielle, une variable qualitative est une variable dont les modalités ne peuvent pas être mesurées sur une échelle spécifique. C'est le cas, par exemple, de la classe du ciment ou le type de l'adjuvant. On distingue les variables nominales et des variables ordinales, ces dernières pouvant être ordonnées ou recodées sur une échelle arbitraire.

- Variables quantitatives

Les variables quantitatives, également appelées variables numériques, possèdent une "métrique", c'est-à-dire qu'elles peuvent être représentées sur une échelle de mesure spécifique. Elles peuvent être continues, c'est-à-dire prendre des valeurs dans l'ensemble des nombres réels. Par exemple, lorsqu'on mesure les valeurs de résistance à la compression du béton dans un projet. Elles peuvent également être discrètes, c'est-à-dire

prendre des valeurs dans l'ensemble des entiers naturels. C'est le cas, par exemple, lorsqu'on procède au décompte des résistances à un certain âge donné.

#### 2.2.4 Modalités

Ce sont les différentes situations possibles pour un caractère. Les modalités d'un caractère doivent être mutuellement exclusives et exhaustives ; chaque individu doit présenter une et une seule modalité. Les modalités d'un caractère qualitatif correspondent aux différentes catégories d'une nomenclature.

Dans le cas d'un caractère quantitatif, la mesure peut prendre des valeurs entières appartenant à un ensemble limité, ce que l'on appelle un caractère discret. Dans certains cas, la mesure peut prendre des valeurs décimales parmi un ensemble de valeurs potentiellement important (comprenant plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de possibilités). Afin de faciliter l'étude et notamment la représentation graphique, il peut être nécessaire de regrouper les valeurs en classes. Dans ce cas, on parle de caractère continu.

### 2.3 Analyse descriptive ou déductive

L'analyse descriptive englobe l'ensemble des méthodes utilisées pour collecter, organiser, réduire et condenser les données. L'objectif de cette analyse est de résumer la quantité importante d'informations numériques accumulées dans un ensemble de données en un ensemble synthétique d'indicateurs descriptifs. De plus, elle vise à fournir une représentation graphique des résultats permettant de visualiser rapidement leurs principales caractéristiques.

#### 2.3.1 Type d'analyse descriptive

Le choix des indicateurs dépend de la nature de la variable considérée. Lorsqu'il s'agit de résumer l'information contenue dans les données recueillies, les indicateurs numériques les plus importants sont les indicateurs de tendance centrale, également appelés indicateurs de position, et les indicateurs de dispersion, ou de variabilité. Ces deux d'indicateurs permettent d'évaluer le comportement global des observations, en termes de "moyenne", ainsi que leur répartition par rapport à cette valeur centrale.

Il est souvent complémentaire d'effectuer une analyse plus détaillée de la distribution des observations en utilisant ce que l'on appelle les indicateurs de forme. Cette approche permet de préciser la manière dont les observations se répartissent aux extrémités de la plage de valeurs, c'est-à-dire les valeurs faibles et élevées, ainsi que les valeurs extrêmes. De plus, elle permet d'évaluer l'homogénéité de la répartition des observations par rapport à la valeur moyenne, c'est-à-dire les valeurs centrales. Cette analyse fine de la distribution des observations permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les caractéristiques des données.

### 2.3.1.1 Paramètres de tendance centrale ou de position

Les paramètres de position (moyenne, médiane, mode et quartiles) permettent de savoir autour de quelles valeurs se situent les valeurs d'une variable statistique. Ils fournissent une indication de l'ampleur des valeurs qui composent la série, ainsi que de la position autour de laquelle les valeurs de cette série semblent se regrouper.

#### (i) Le mode ou valeur dominante

Le mode, noté  $M_O$ , représente la valeur ayant la fréquence la plus élevée dans une distribution. Il peut être calculé pour tous les types de variables, qu'elles soient quantitatives ou qualitatives. Dans le cas d'une variable quantitative continue, on parle de classe modale, qui correspond à la classe ayant la densité de fréquence maximale. Le mode est fortement influencé par la manière dont les données sont regroupées en classes. En effet, une variable statistique peut présenter plusieurs modes locaux, ce qui signifie qu'elle est plurimodale. Cette situation est intéressante car elle révèle l'existence de sous-populations distinctes et met en évidence l'hétérogénéité de la population étudiée.

#### (ii) La médiane

La médiane, notée  $M_d$  est une mesure centrale d'une série statistique qui est déterminée de la manière suivante : on trie la série statistique par ordre croissant des valeurs observées, puis la valeur qui se situe au milieu de cette série ordonnée est considérée comme la médiane. On nomme cette série ordonnée : la statistique d'ordre. L'utilisation de cette notation, couramment utilisée en statistique, permet de définir la médiane de manière concise et précise.

- Si n est impair  $x_d = x_{\frac{(n+1)}{2}} \dots\dots\dots (2.1)$

- Si n est pair  $x_d = \frac{1}{2} \{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}\} \dots\dots\dots (2.2)$

avec n la taille de l'échantillon.

Une caractéristique importante de la médiane est qu'elle dépend uniquement de l'ordre des valeurs et n'est donc pas influencée par les observations aberrantes.

(iii) La moyenne

Dans le cas de variables numériques continues, il est préférable d'utiliser la moyenne comme indicateur de position, car elle représente le centre de gravité de l'ensemble des valeurs observées pour cette variable. Contrairement aux deux indicateurs de position mentionnés précédemment, la moyenne est une valeur quantitative exprimée dans la même unité de mesure que les observations. Par définition, la moyenne est calculée en effectuant la somme de toutes les valeurs observées et en la divisant par le nombre total d'observations. Elle est généralement notée  $\bar{x}$ .

Cependant, il est important de noter que la moyenne peut ne pas être un indicateur précis dans certains cas, car elle est sensible aux valeurs extrêmes. En effet, deux variables ayant la même moyenne peuvent présenter des dispersions très différentes, ce qui peut influencer l'interprétation des données.

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_i+\dots+x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (2.3)$$

(iv) Quartiles, déciles, et centiles

Pour une variable statistique quantitative continue réelle X, les quartiles sont des valeurs réelles notées Q1, Q2 et Q3. Ces valeurs correspondent respectivement aux fréquences cumulées de X de 0,25, 0,50 et 0,75. En d'autres termes, ce sont les valeurs pour lesquelles l'ordonnée de la courbe cumulative des fréquences atteint ces proportions. Les quartiles divisent la distribution en quatre intervalles ayant le même effectif (k = 4).

L'intervalle interquartile est la différence entre les valeurs du troisième quartile (Q3) et du premier quartile (Q1), soit [Q3 - Q1]. Cet intervalle contient 50 % des valeurs de X, ce qui permet d'évaluer la dispersion des données autour de la médiane.

Pour  $k = 10$ , les quantiles sont appelés déciles, ce qui signifie qu'il y a neuf déciles notés D1, D2, ... D9.

Pour  $k = 100$ , les quantiles sont appelés centiles, et il existe 99 centiles, chacun correspondant à 1 % de la population étudiée. Ces centiles permettent de segmenter la distribution en pourcentages équivalents, offrant ainsi une meilleure compréhension de la répartition des valeurs.

### 2.3.1.2 Paramètres de dispersion ou variabilité

L'étendue, la variance, l'écart type et le coefficient de variation sont les principaux paramètres de dispersion utilisés pour décrire les variables statistiques quantitatives. Ces caractéristiques quantifient les fluctuations des valeurs observées par rapport à la valeur centrale et permettent d'apprécier l'étalement de la série.

#### (i) Etendue

L'étendue représente la différence entre la plus grande et la plus petite valeur observée, offrant ainsi une indication brute de la variation totale des données.

$$E = x_{Max} - x_{Min} \dots\dots\dots (2.4)$$

Ce paramètre est fréquemment utilisé dans les contrôles de fabrication, où il permet de définir les tolérances de construction préétablies. Cependant, son utilité est limitée car il dépend uniquement des valeurs extrêmes, qui peuvent parfois être des valeurs aberrantes ou atypiques.

#### (ii) Variance et écart-type.

La variance est un indicateur de la dispersion d'une série par rapport à sa moyenne. Pour simplifier, on peut dire que c'est la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne arithmétique. On peut également l'appeler écart quadratique moyen ou variance empirique.

La variance d'une série statistique est définie par la formule suivante :

$$S^2_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

Elle peut également être exprimée de la manière suivante :

$$S^2_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

Où

$S_x^2$  représente la variance des  $n$  valeurs associées aux  $n$  unités statistiques de la population, et  $\bar{x}$  est la moyenne arithmétique de ces unités statistiques.

L'écart-type d'une série est la racine carrée de sa variance :

$$S_x = \sigma = \sqrt{S_x^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Une propriété importante de l'écart-type est la suivante : s'il est faible, cela indique que les valeurs sont relativement concentrées autour de la moyenne, tandis que s'il est élevé, cela signifie au contraire que les valeurs sont plus dispersées autour de la moyenne.

(iii) Coefficient de variation.

Le coefficient de variation est un nombre adimensionnel qui permet de comparer deux variables statistiques de natures différentes. Il est souvent exprimé en pourcentage et calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$Cov = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100 \dots\dots\dots (2.8)$$

L'utilisation de ce paramètre permet d'évaluer la représentativité de la moyenne  $\bar{x}$  par rapport à l'ensemble des données, ainsi que d'apprécier l'homogénéité de la distribution. Il offre des informations sur la dispersion relative des données par rapport à la moyenne, ce qui permet de déterminer si la moyenne est une mesure fiable et si la distribution des données est homogène ou non.

### 2.3.1.3 Paramètres de forme

La tendance centrale et la dispersion ne sont pas les seules caractéristiques intéressantes d'une distribution. Au-delà des moments d'ordre un et deux, il peut être nécessaire de s'interroger sur les propriétés des moments d'ordres supérieurs, notamment trois et quatre, qui nous renseignent sur la symétrie et la courbure de la distribution. Ces quantités revêtent une importance particulière lorsqu'on souhaite discuter de l'hypothèse de normalité, à laquelle on se réfère souvent pour mener des tests paramétriques.

## (i) Coefficient d'asymétrie

Une distribution est considérée comme symétrique lorsque les valeurs de la variable statistique sont réparties de manière équivalente de part et d'autre d'une valeur centrale. Pour une distribution symétrique : Mode = médiane = moyenne arithmétique.

En règle générale, l'asymétrie d'une distribution est mesurée à l'aide d'un coefficient appelé coefficient d'asymétrie (skewness). En statistique, il existe plusieurs formules pour calculer les coefficients d'asymétrie, parmi lesquelles les plus couramment utilisées sont les suivantes :

- Le coefficient d'asymétrie de **Pearson** fait intervenir le mode  $M_o$ . Si le mode existe, il est utilisé pour comparer la moyenne et le mode, et il est ensuite standardisé par l'écart-type. Ce coefficient permet de quantifier l'asymétrie de la distribution en termes de la différence entre la moyenne et le mode, tout en tenant compte de la dispersion des données.
- Le coefficient d'asymétrie de **Yule** utilise la médiane et les quartiles dans son calcul. Il est basé sur les positions des trois quartiles (premier quartile, médiane et troisième quartile) et est normalisé par la distance interquartile. Ce coefficient permet de mesurer l'asymétrie de la distribution en fonction de la répartition des données entre les quartiles, tout en tenant compte de l'amplitude de la distribution.
- Le coefficient d'asymétrie de **Fisher** utilise les moments centrés dans son calcul. Ce coefficient permet de mesurer l'asymétrie d'une distribution en utilisant les moments centrés d'ordre supérieur. Il fournit une mesure quantitative de la dissymétrie de la distribution par rapport à sa moyenne. Plus précisément, il est basé sur les différences entre les moments centrés d'ordre trois et les moments centrés d'ordre deux élevés au cube.

Tous les coefficients d'asymétrie ont les mêmes propriétés. Ils sont nuls lorsque la distribution est symétrique, négatifs lorsque la distribution présente une asymétrie à gauche (asymétrie gauche) et positifs lorsque la distribution présente une asymétrie à droite (asymétrie droite), comme illustré dans la figure 2.1. Le tableau 2.1 regroupe les formules couramment utilisées pour calculer le coefficient d'asymétrie.



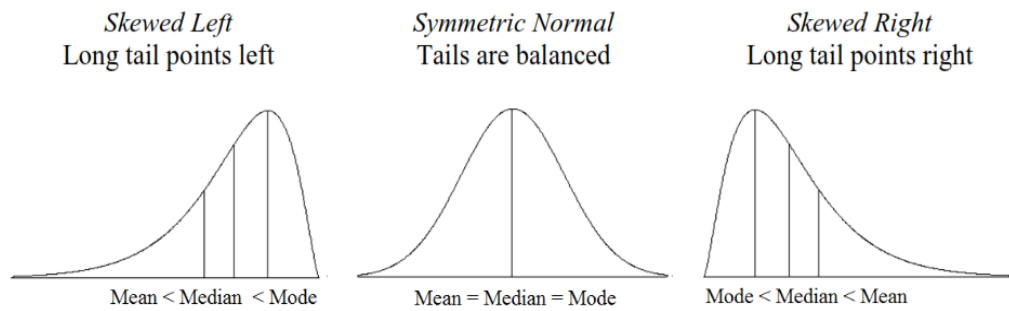


Figure 2. 1 : Asymétrie d’une distribution [62].

Tableau 2 1 : Formules usuelles de calcul des coefficients d’asymétrie [63].

Coefficient d’asymétrie	Principe de calcul	équation
Yule et Kendall noté $C_y$	Basé sur la position des quartiles par rapport à la médiane	$C_y = \frac{Q_3 + Q_1 - 2M_d}{Q_3 - Q_1}$
Pearson noté $\beta_1$	Basé sur le calcul des moments centraux : moyenne et mode	$\beta_1 = \frac{\bar{x} - M_0}{S}$
Fisher noté $g_1$	Basé sur le moment centré d’ordre trois	$g_1 = \frac{m_3}{S_x^3}$ Avec $m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$ $S_x^3$ est le cube de l’écart-type

(ii) Coefficient d'aplatissement (kurtosis).

Encore une fois, différentes définitions sont possibles pour ce paramètre [63].

- Le coefficient d'aplatissement de Pearson est :

$$\beta_2 = \frac{m_4}{S_x^4} \dots\dots\dots (2.9)$$

Où  $m_4$  est le moment centré d’ordre 4, et  $S_x^4$  est le carré de la variance.

- Le coefficient d'aplatissement de Fisher est

$$F_2 = \beta_2 - 3 = \frac{m_4}{S_x^4} - 3 \dots\dots\dots (2.10)$$

On peut se demander pourquoi le coefficient d'aplatissement de Fisher est fixé à -3. Cela s'explique par le fait que, en probabilités, il a été démontré que le coefficient d'aplatissement de Pearson pour une variable aléatoire réelle suivant une distribution

normale est égal à 3. Ainsi, afin de comparer l'aplatissement d'une distribution statistique à celui d'une variable gaussienne, il est naturel d'introduire le coefficient de  $\beta_2$ .

$$F_2 = \beta_2 - 3 \dots\dots\dots (2.11)$$

En fonction de la valeur du coefficient  $F_2$ , nous pouvons distinguer trois formes de distribution, comme illustré dans la figure 2.2 :

- Si  $F_2$  est égal à 0, la loi de distribution de la variable présente le même aplatissement qu'une courbe en cloche. On dit alors que la variable est mésokurtique.
- Si  $F_2$  est  $> 0$ , la loi de distribution de la variable est moins aplatie qu'une courbe en cloche. On dit alors que la variable est leptokurtique.
- Si  $F_2$  est  $< 0$ , la loi de distribution de la variable est plus aplatie qu'une courbe en cloche. On dit alors que la variable est platykurtique.

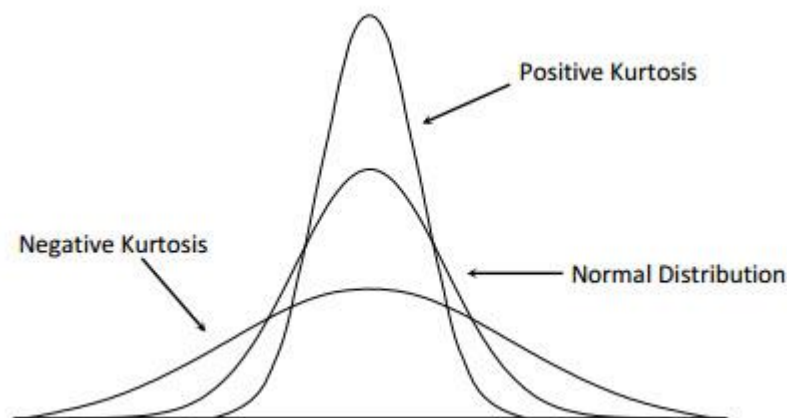


Figure 2. 2 : Aplatissement d'une distribution

#### 2.4 Analyse mathématique inductive (inférentielle)

Le terme "analyse inférentielle" désigne le processus de passer de la description à l'inférence en utilisant des raisonnements inductifs, c'est-à-dire des raisonnements allant du particulier au général. Elle regroupe les méthodes qui permettent de faire des prévisions et des interpolations sur une population à partir des résultats obtenus sur un échantillon.

Le principe de l'analyse inférentielle consiste à décrire les paramètres de la population totale en utilisant un sous-ensemble de cette population, appelé échantillon. Les paramètres

de la population sont estimés à partir des indicateurs descriptifs, qui sont ce que l'on appelle des statistiques.

Cette approche statistique utilise des modèles théoriques, tels que les lois de probabilités, comme points de référence. Elle nécessite généralement la recherche d'échantillons qui représentent au mieux la diversité de la population étudiée. L'étude sur échantillon est justifiée principalement pour réduire les coûts élevés de l'expérimentation et limiter la destruction d'individus pour obtenir des réponses statistiques.

### 2.4.1 Lois de probabilité

De nombreux problèmes nécessitent le calcul des probabilités, car on peut associer à une variable aléatoire la loi de probabilité appropriée. Cela permet d'analyser des phénomènes aléatoires et de prendre des décisions éclairées en fonction des résultats probables. En utilisant les lois de probabilités appropriées, on peut estimer la fréquence d'occurrence de certains événements, calculer des probabilités conditionnelles, réaliser des tests d'hypothèses et effectuer des prévisions statistiques.

#### 2.4.1.1 Fonction de densité et de répartition

##### (i) Fonction de densité

La fonction de densité de probabilité (PDF) d'une variable aléatoire continue permet de déterminer la probabilité qu'une variable  $X$  prenne une valeur dans un intervalle donné [63]. Elle permet également de déterminer les zones de probabilité élevée ou faible pour les valeurs de cette variable. L'équation de la fonction de densité de probabilité représente la loi de probabilité de cette variable et s'exprime de la manière suivante :

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x). dx \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$[a, b]$  : l'intervalle des valeurs

Une caractéristique importante de la fonction de densité est que l'aire délimitée par la courbe représentative de la fonction et l'axe des abscisses est égale à 1. Cela signifie que l'intégrale de la fonction de densité sur l'ensemble de l'espace des valeurs possibles de la variable aléatoire est égale à 1.

## (ii) Fonction de répartition ou distribution

La fonction de répartition est une notion clé de la théorie des probabilités. Elle est définie pour tout nombre réel comme la probabilité que la variable aléatoire prenne une valeur inférieure ou égale à ce nombre réel [63]. Par exemple, la fonction de distribution d'une variable  $X$  au point  $b$ , où  $b$  est un nombre réel positif ( $0 < b < \infty$ ), s'exprime de la manière suivante :

$$f(b) = P(x \leq b) \dots \dots \dots (2.13)$$

Pratiquement, la fonction de répartition permet de résoudre efficacement les problèmes impliquant une seule variable aléatoire  $X$ . Cependant, lorsque plusieurs variables sont impliquées, la connaissance de cette fonction ne suffit pas à déterminer leur dépendance mutuelle [64]. Il est donc nécessaire de recourir à d'autres concepts statistiques pour appréhender le problème de manière adéquate.

Dans la suite, nous présenterons uniquement deux des lois de probabilité les plus couramment utilisées en statistique. Les autres lois de probabilité continue seront récapitulées à la fin de cette section sous la forme d'un tableau exhaustif.

2.4.1.2 Loi normale (Loi de Gauss)

De nombreux tests statistiques requièrent, pour leur validité, la vérification de la conformité des échantillons utilisés à une loi normale. En effet, cette loi revêt une importance capitale en statistique, s'appliquant à tout phénomène où les fluctuations de la variable aléatoire continue sont dues à un grand nombre de petites causes indépendantes dont les effets s'additionnent. Ainsi, les résultats des mesures seront distribués selon une loi de Gauss si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Les sources d'erreur sont nombreuses et indépendantes.
- Les erreurs sont de même ordre de grandeur, sans erreur prépondérante.

la densité de probabilité  $f(x)$  de la loi normale  $N(\mu, \sigma)$  est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \dots \dots \dots (2.14)$$

où  $\mu$  et  $\sigma$  sont respectivement la moyenne et l'écart-type de la population.

La loi normale présente une caractéristique distinctive sous la forme d'une courbe en cloche, symétrique. Elle est centrée sur la moyenne et sa largeur à mi-hauteur est

équivalente à deux fois l'écart-type. Lorsqu'une distribution suit une loi normale, le coefficient d'asymétrie est nul, tandis que le coefficient d'aplatissement est égal à 3 (Figure 2.3) [64].

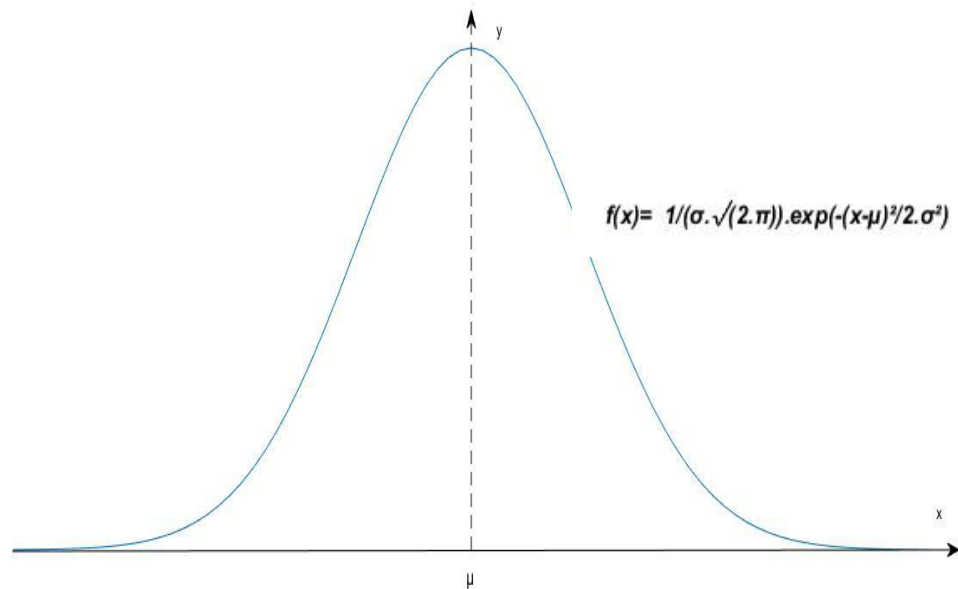


Figure 2. 3 : Distribution de la loi normale (loi de Gauss).

#### 2.4.1.3 Loi de Student

La loi de distribution de Student joue un rôle crucial dans l'étude de la statistique de la moyenne  $\bar{x}$  pour une distribution normale dont on ne connaît pas la variance [64]. Sa fonction de densité est donnée par l'expression suivante :

$$f(x) = \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\sqrt{\nu\pi} \cdot \Gamma(\frac{\nu}{2})} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}} \dots\dots\dots (2.15)$$

$\Gamma$  est la fonction gamma et  $\nu$  : nombre de degrés de liberté

La distribution de Student peut prendre différentes formes en fonction des valeurs de  $\nu$  (Figure 2.4). La courbe de densité de probabilité pour la loi de Student présente une similitude avec celle d'une loi normale. La loi de Student est caractérisée par un paramètre  $\nu$  (entier  $> 0$ ) appelé le nombre de degrés de liberté  $\nu$ . Cette loi est utilisée lorsque la taille de l'échantillon est inférieure à 30 [63]

Tableau 2 2 : Expression mathématique de la fonction de densité pour certaines lois de probabilité continues. ([63], [64], et [65]).

Loi	Fonction de densité	E(x)	V(x)	Caractéristiques
Loi de Cauchy	$f(x) = \frac{1}{\pi\theta} \left[ 1 + \left( \frac{x - \alpha}{\theta} \right)^2 \right]^{-1}; \theta > 0$ <p><math>\alpha</math> et <math>\theta</math> : paramètres de tendance centrale et de dispersion respectivement</p>	$\frac{a + b}{2}$	$\frac{(b - a)^2}{12}$	- elle est symétrique en $x = \alpha$
Loi de Laplace	$f(x) = \frac{1}{2\Phi} \cdot \exp \left[ -\frac{ x - \theta }{\Phi} \right] \Phi > 0$ <p>La forme standard de la fonction de densité s'écrit :</p> $f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2}} \cdot \exp \left[ -\sqrt{2} \cdot \frac{ x - \mu }{\sigma} \right] \sigma > 0$ <p>Ou <math>\mu = \theta</math> et <math>\sigma = \sqrt{2} \cdot \Phi</math></p> <p><math>\Phi</math> est un paramètre de dispersion et <math>\theta</math> est l'espérance mathématique</p>			- elle est symétrique autour de son espérance $\theta$ qui correspond également au mode et la médiane
Loi de Fisher	$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} \cdot \frac{x^{\frac{m+2}{2}}}{\left(1 + \frac{m}{n} \cdot x\right)^{\frac{m+n}{2}}}$ <p><math>\Gamma</math> fonction gamma et m,n sont les degrés de liberté</p>			
Loi de gamma	$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^r}{(r-1)!} x^{r-1} e^{-\lambda x} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$	$\frac{r}{\lambda}$	$\frac{r}{\lambda^2}$	
Loi-Log normale	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \mu)^2 \right] & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases}$	$e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}$	$e^{2\mu + \sigma^2} + (e^{\sigma^2} - 1)$	
Loi Uniforme	$f(x) \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$			

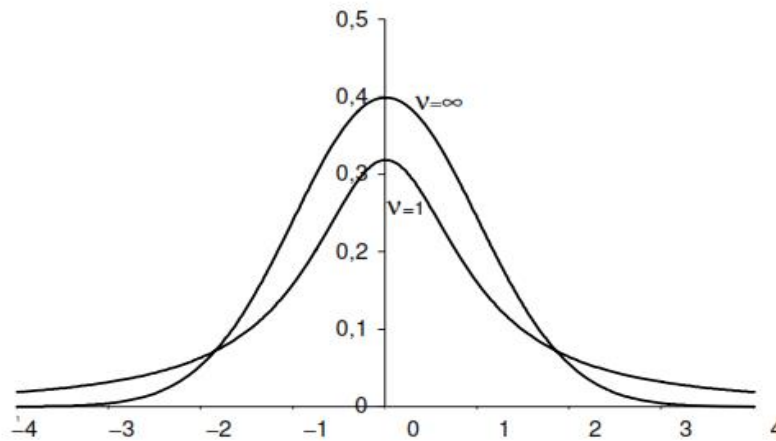


Figure 2. 4 : Densité de la loi de Student.

### 2.4.2 Conditions générales de l'analyse inférentielle

Les conditions d'application des procédures inférentielles varient en fonction du type de statistique utilisée. Cependant, de manière générale, on peut mentionner les principales hypothèses implicites liées aux tests d'inférence classiques portant sur la comparaison de moyennes ou l'analyse de variance. Ces hypothèses comprennent notamment :

- L'échantillonnage aléatoire : l'échantillon considéré est composé d'observations indépendantes et sélectionnées de manière aléatoire dans la population.
- La normalité de la distribution : les écarts entre les observations et la moyenne de l'échantillon, également appelés résidus, suivent une loi normale  $N(0; s^2)$ .
- L'homogénéité des variances (également appelée homoscélasticité) : Lorsqu'il y a plusieurs échantillons, leurs variances respectives sont approximativement égales.

La décision issue du test repose sur un caractère aléatoire et implique toujours un certain niveau de risque. Les conditions d'application propres à chaque test seront précisées lors de l'examen des tests paramétriques et non paramétriques dans la section dédiée.

## 2.5 Principes des tests statistiques

### 2.5.1 Généralités sur les tests

Un test statistique est utilisé pour prendre une décision en se basant sur les informations collectées à partir d'un échantillon. Les tests sont conçus pour déterminer si une

caractéristique (moyenne ou écart-type) tirée d'un échantillon est identique à une référence (une norme) ou à celle d'un autre échantillon. Cela correspond, par exemple, aux deux cas suivants :

- Comparaison d'une caractéristique physico-chimique d'un béton avec une valeur fixée par le cahier des charges : on examine si l'écart entre la valeur mesurée à partir de l'échantillon et la valeur de référence est significatif, c'est-à-dire s'il ne peut pas être expliqué uniquement par la variabilité aléatoire des mesures effectuées sur un échantillon.
- Comparaison d'une caractéristique physico-chimique d'un béton obtenue à partir de deux formulations différentes : on examine si les valeurs obtenues à partir d'un échantillon pour chaque formulation présentent une différence significative, ou si cette différence peut s'expliquer par la variabilité aléatoire des mesures.

### 2.5.2 Construction et exploitation d'un test

Une hypothèse  $H_0$ , également appelée hypothèse nulle, est formulée concernant une caractéristique de l'échantillon. Cette hypothèse stipule que l'écart observé entre la valeur de la caractéristique de l'échantillon et la valeur de référence (standard ou autre échantillon) est uniquement dû à des fluctuations aléatoires. En revanche, une hypothèse  $H_1$ , appelée hypothèse alternative, est formulée en opposition à l'hypothèse  $H_0$ .

Dans ce contexte, on définit un risque  $\alpha$  (risque de première espèce), qui correspond au risque de rejeter  $H_0$  alors que cette hypothèse est vraie. Couramment, on choisit un risque  $\alpha$  de 5 %. Cela signifie qu'il existe une probabilité de 5 % de commettre une erreur en rejetant à tort l'hypothèse nulle, c'est-à-dire en concluant à une différence significative alors qu'en réalité aucune différence réelle n'existe. Ce choix du risque  $\alpha$  permet de contrôler le niveau de confiance des tests statistiques et de limiter les erreurs de décision.

La décision est précise se présente de la manière suivante :

- si la probabilité est supérieure au risque  $\alpha$ , on accepte  $H_0$  comme n'étant pas invraisemblable et on en déduit que l'écart n'est pas significatif.
- si la probabilité est inférieure au risque  $\alpha$ ,  $H_0$  est rejetée car il apparaît invraisemblable que l'écart soit causé par la seule cause du hasard. Néanmoins un écart supérieur peut parfaitement apparaître dans moins de  $\alpha$  % des cas.



En conclusion rejeter l'**hypothèse nulle  $H_0$**  revient à accepter l'**hypothèse alternative  $H_1$** . La conclusion est toujours formulée sur l'hypothèse nulle, soit on ne rejette pas  $H_0$ , soit on rejette  $H_0$ , et que le non rejet de  $H_0$  ne signifie pas que la proposition qui lui est associée est vraie, mais seulement que l'information contenue dans les données ne permet pas raisonnablement de l'abandonner au profit de l'alternative. Les tests mis en œuvre peuvent être unilatéral ou bilatéral, selon les hypothèses postulées (Figure 2.5).

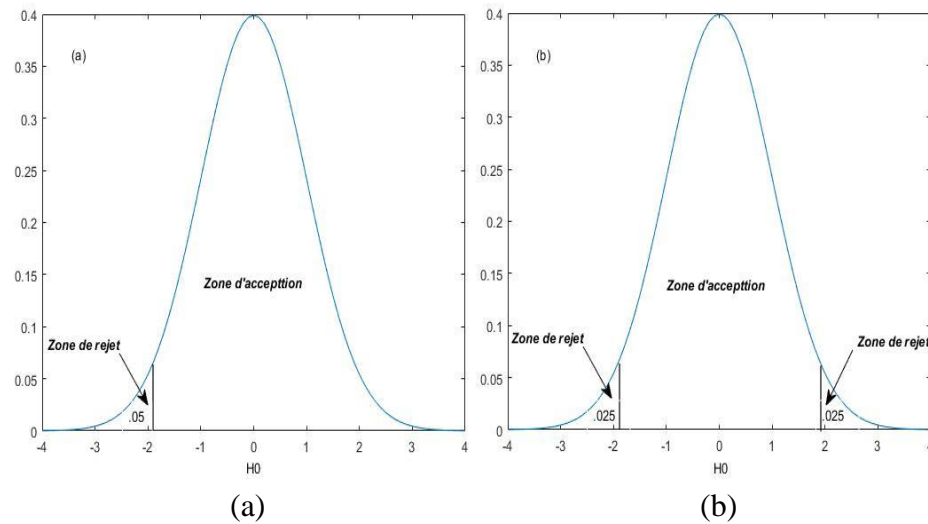


Figure 2. 5 : Test unilatéral (a), et bilatéral (b) : zones d'acceptation et de rejet pour une distribution normale à un seuil de décision  $\alpha = 0:05$  sous l'hypothèse nulle  $H_0$ .

### 2.5.3 La notion de p-valeur

La probabilité critique où p-value est la probabilité que la statistique de test prenne une valeur supérieure à celle obtenue sur l'échantillon alors que  $H_0$  est vraie. Naturellement, plus le p-value est proche de zéro et moins l'information tirée de l'échantillon s'accorde avec la proposition décrite par  $H_0$ . La règle de décision suivante s'impose alors :

- si p-value  $< \alpha$ , on doit rejeter  $H_0$  en faveur de  $H_1$
- si p-value  $> \alpha$ , on ne rejette pas  $H_0$

La p-value représente la probabilité d'obtenir la valeur observée dans l'échantillon (par exemple, la moyenne) égale à celle spécifiée dans l'hypothèse nulle ( $H_0$ ). Lorsque la statistique p-value est inférieure ou égale au niveau de risque  $\alpha$  défini à l'avance, cela suggère que l'hypothèse  $H_0$  peut être rejetée au profit de l'hypothèse  $H_1$ . Le p-value est

également utile pour déterminer quel niveau de risque  $\alpha$  pourrait être choisi pour ne pas rejeter l'hypothèse nulle ( $H_0$ ).

## 2.6 Tests paramétriques et non paramétriques

Plusieurs raisons peuvent nous pousser à effectuer un test concernant la nature de la distribution aléatoire à l'origine de l'échantillon. Par exemple, pour des raisons théoriques, il est possible d'avoir une hypothèse préalable sur la distribution à partir de laquelle les données sont obtenues, et il est souhaitable de vérifier si cette hypothèse est justifiée. Il peut aussi être nécessaire de vérifier que les conditions requises par un test, dont la validité est basée sur une distribution spécifique, ne sont pas violées. De plus, lorsque l'on suppose que les observations qui décrivent les individus proviennent de distributions dépendant d'un nombre fini de paramètres, on se trouve dans le contexte des tests paramétriques. En revanche, si aucune distribution n'est imposée sur ces variables, on entre dans le domaine de la statistique non paramétrique.

La validité des tests paramétriques dépend en grande partie du respect des hypothèses distributionnelles établies en amont, comme l'hypothèse de normalité des observations par exemple. En contraste, la validité des tests non paramétriques ne repose pas sur la distribution des observations. Par conséquent, ils sont intrinsèquement plus robustes que les tests paramétriques. Ainsi, lorsque l'on ne souhaite pas faire d'hypothèses sur les distributions des observations, ou si la taille des échantillons est insuffisante pour justifier une hypothèse de distribution particulière par le biais de théorèmes de convergence asymptotique, il devient nécessaire de recourir à des tests non paramétriques. Les méthodes non paramétriques offrent la possibilité d'obtenir des conclusions là où les méthodes classiques ne peuvent pas être appliquées [66].

Le tableau 2.3 présente une liste exhaustive des tests paramétriques et non paramétriques essentiels, ainsi que leurs conditions d'utilisation, appliqués dans le contexte de cette étude. Ces tests comprennent ceux permettant d'évaluer la normalité des données, d'étudier les associations entre variables, de comparer les moyennes de différents groupes, ainsi que l'analyse de variance. Il est important de noter que certains autres tests, tels que les tests post-hoc et le test de Levene, qui ont été utilisés pour des vérifications spécifiques dans cette recherche, ne sont pas inclus dans le tableau en raison de leur utilisation limitée.

Tableau 2 3 : Principaux tests d'inférence paramétrique (P) et non paramétrique (NP) [67 -75].

Test	Type	Statistique calculée	Domaine d'application
Fisher	P	$F = \frac{U}{m} \cdot \frac{n}{V}$ <p>U, V variables aléatoires suivant une loi de chi-carré. m,n degrés de liberté</p>	Analyse de variance, analyse de covariance, analyse de régression
Student	P	$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$	Tester la moyenne d'un échantillon, ou sur la comparaison des moyennes de deux échantillons
Kolmogorov-Smirnov	NP	$D = \sup_x  F_{emp}(x) - F_{théor}(x) $	Tester l'adéquation entre la distribution empirique et théorique
Cramer-von Mises	NP	$W^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{2i-1}{2n} - F(x_{(i)}) \right)^2 + \frac{1}{12n}$	Tester l'adéquation entre la distribution empirique et théorique
Shapiro-Wilk	P	$w = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Tester l'adéquation entre la distribution empirique et théorique
Anderson-Darling	NP	$A^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (F_x(x, \theta) - F_N(x)) \right)$	Tester l'adéquation entre la distribution empirique et théorique
Kruskal-Wallis	NP	$H = \left( \frac{12}{N(N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3 \cdot (N+1)$	Tester k populations si sont toutes identiques
Mann-Whitney	NP	$U = m \cdot n \frac{n(n+1)}{2} - T$	Tester l'égalité de deux populations
Wilcoxon	NP	$W_i = \frac{W - N}{\alpha} \text{ si } n \geq 12$	
Coefficient de corrélation de Pearson	P	$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	Mesure d'association

Coefficient de corrélation de Spearman	NP	$\hat{\rho}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (rx_i - r\bar{x})(ry_i - r\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (rx_i - r\bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (ry_i - r\bar{y})^2}}$	Mesure d'association
Coefficient de corrélation de Kendall	NP	$\hat{t}_b = \frac{\sum_{i < j} [\text{sgn}(x_i - x_j) \cdot \text{sgn}(y_i - y_j)]}{\sqrt{(n_t - n_x) \cdot (n_t - n_y)}}$	Mesure d'association

## 2.7 Description de l'analyse de la variance

### 2.7.1 Principe de l'analyse

L'analyse de la variance (ANOVA) repose sur le principe de l'évaluation de l'association entre une variable qualitative indépendante et une variable quantitative. Cette approche flexible est conçue pour traiter les situations où plusieurs variables indépendantes (caractères qualitatifs) peuvent conjointement influencer une ou plusieurs variables quantitatives.

L'objectif principal du test ANOVA est de comparer les moyennes. Plutôt que de recourir à des tests de Student, qui multiplieraient les comparaisons et augmenteraient les risques d'erreur de type 1 en explorant divers groupes qui pourraient se ressembler, l'ANOVA permet d'examiner les variations entre les groupes de manière globale.

Plusieurs dérivés de l'ANOVA existent, tels que l'analyse de covariance (ANCOVA), qui prend en compte une variable quantitative comme facteur de contrôle, le MANOVA, qui considère plusieurs facteurs indépendants dans l'analyse, et le MACOVA, qui explore la variance de manière multivariée.

La méthodologie de l'ANOVA commence par déterminer si des différences significatives entre les groupes existent. En cas d'association avérée, il est alors possible d'effectuer des tests post-hoc pour identifier la source de ces différences et pour comprendre les facteurs influençant la variable dépendante, indépendamment du niveau d'affectation.

### 2.7.2 Formulation de l'hypothèse du test et conditions d'application de l'analyse.

Prenons un exemple où nous souhaitons étudier l'effet des différentes classes de ciment (CPA32.5, CPJ32.5, CPJ42.5, etc.) sur la résistance à la compression du béton. Chaque

classe de ciment représente un groupe distinct dans notre échantillon. Les hypothèses formulées sont les suivantes :

Hypothèse nulle  $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_n$

Hypothèse alternative  $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$

L'hypothèse nulle énonce qu'il n'existe aucune association ou différence significative entre les différentes classes de ciment en termes de résistance à la compression. En contraste, l'hypothèse alternative suggère que les moyennes des groupes d'étude diffèrent d'au moins deux ensembles, sans spécifier l'origine de cette disparité. L'objectif de cette analyse consiste à évaluer si les données fournissent des preuves suffisantes pour réfuter l'hypothèse nulle et conclure que des différences existent bel et bien entre les classes de ciment en ce qui concerne leur résistance à la compression.

Pour accomplir cette analyse, certaines conditions doivent être satisfaites :

- 1- Échantillon aléatoire.
- 2- Indépendance des échantillons : les échantillons de chaque groupe doivent être indépendants les uns des autres, c'est-à-dire que les observations dans un groupe ne doivent pas être liées ou dépendantes des observations dans d'autres groupes.
- 3- Normalité de la variable dépendante : les données doivent être distribuées de manière normale, ce qui signifie que les observations dans chaque groupe doivent suivre une distribution en forme de cloche. Dans notre étude c'est bien la résistance à la compression.
- 4- L'homogénéité de la variance : les variances des échantillons doivent être égales, ce qui implique que la dispersion des données dans chaque groupe doit être similaire. En pratique, pour vérifier l'homogénéité des variances, on utilise souvent le test de Levene basé sur la moyenne. Si la p-valeur du test est supérieure à 5%, on accepte l'hypothèse nulle, ce qui signifie que la variance est similaire dans chaque groupe. Cela indique que les conditions d'homogénéité des variances sont satisfaites. Cependant, en cas de non-homogénéité des variances, on doit utiliser des méthodes alternatives, comme la statistique F corrigée de Welch ou le test Bown-Forsythe, qui sont des tests robustes adaptés à des situations où l'homogénéité des variances n'est pas respectée. Ces tests permettent de surmonter

les problèmes causés par l'hétérogénéité des variances et de réaliser une analyse de variance fiable même dans de telles circonstances.

5- Pas de valeurs extrêmes (outliers).

Il est important de noter que certains tests post-hoc requièrent que la condition d'homogénéité de la variance soit respectée, notamment des tests tels que ceux de Scheffé, Tukey et Bonferroni, entre autres. Cependant, en cas de non-conformité à cette condition, il est alors plus approprié d'utiliser des tests non paramétriques comme ceux de Tamhane et Dunnett, par exemple.

## 2.8 Conclusion

Cette revue bibliographique a permis d'établir les assises théoriques du traitement statistique appliqué aux données recueillies, en vue de scruter la qualité du béton dans les projets de construction. Ces fondements théoriques, solidement étayés, constituent un socle solide offrant un appui tangible pour la réflexion, l'analyse et l'interprétation des résultats découlant des données collectées.

## **CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE LA BASE DES DONNEES**

## CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE LA BASE DES DONNEES

### 3.1 Introduction

Les bases de données occupent une place prépondérante dans notre société moderne. Elles se définissent comme des ensembles organisés de données, structurés de manière à faciliter le stockage, la récupération et la manipulation efficaces des informations. Leur omniprésence dans la vie quotidienne est indéniable, soutenant nos interactions en ligne, nos applications mobiles, nos systèmes de gestion de santé [67], et bien d'autres domaines.

Dans le domaine du génie civil, diverses bases de données ont été développées pour répondre aux problématiques spécifiques étudiées. Ces bases de données sont précieuses pour les professionnels de la construction et de l'ingénierie, car elles fournissent les ressources nécessaires pour une gestion efficace de projets complexes. De plus, elles offrent une opportunité d'explorer un large éventail de problématiques liées au béton, y compris celles liées au fluage et au retrait [68]. Grâce à leur nature, ces bases de données permettent des analyses approfondies visant à établir des conclusions générales sur les propriétés mécaniques du matériau. Ce caractère particulièrement pertinent devient évident lorsque de nouvelles lignes de recherche émergent, avec des travaux encore dispersés [69].

En outre, ces bases de données contribuent significativement à l'amélioration de la qualité du béton par l'analyse de la résistance du béton dans les bâtiments existants, grâce à l'utilisation d'essais de carottage. L'analyse des données recueillies permet de détecter et de corriger les erreurs commises dans le passé [70].

Le traitement des données présente un défi majeur pour les chercheurs, en particulier lorsque les observations sont nombreuses et variées. Ce défi devient encore plus complexe en l'absence de structuration préalable des données et de définition de méthodes d'analyse appropriées.

Dans ce contexte, il est pertinent d'explorer une approche scientifique visant à gérer le volume considérable de données. Par exemple, des chercheurs spécialisés en métrologie ont élaboré une méthode systématique pour la collecte de données, tout en développant des méthodes statistiques structurées permettant l'analyse et la prédiction des changements climatiques ainsi que des risques catastrophiques [71].



### 3.2 Etapes de la construction d'une base de données

De manière conventionnelle, la conception d'une base de données passe par quatre étapes clés :

1. Analyse de la situation existante et des besoins : Cette étape consiste à étudier en profondeur la situation du problème ainsi que les besoins spécifiques afin de déterminer les données nécessaires à collecter et à intégrer dans la base de données.
2. Création d'une série de modèles conceptuels : Une fois les besoins identifiés, il est essentiel de développer des modèles conceptuels qui représentent tous les aspects importants du problème. Ces modèles permettent de définir la structure et les relations entre les données.
3. Traduction des modèles conceptuels en modèle logique : À partir des modèles conceptuels, il convient de traduire ces derniers en un modèle logique. Ce modèle logique définit les tables, les colonnes et les contraintes nécessaires pour représenter les données de manière cohérente.
4. Implémentation de la base de données dans un SGBD : Enfin, le modèle logique est mis en œuvre en utilisant un système de gestion de base de données (SGBD). Cela implique la création des tables, l'insertion des données et la configuration des requêtes pour permettre une manipulation et une récupération efficaces des informations stockées.

Ces étapes permettent de garantir une conception soignée de la base de données, en alignant les données sur les besoins spécifiques et en utilisant des modèles appropriés pour représenter les informations de manière logique et cohérente.

Pour surmonter l'obstacle lié à la quantité importante de données à traiter, diverses solutions logicielles ont été proposées. Ces logiciels présentent des fonctionnalités variées et sont adaptés à différents cas d'utilisation. Le choix du logiciel dépendra des besoins spécifiques du projet et des fonctionnalités requises pour chaque base de données. De plus, un critère important est la disponibilité et le coût de ces plateformes, c'est-à-dire s'il est possible d'acquérir certains de ces logiciels à des tarifs relativement accessibles. Cela est particulièrement crucial, car certains logiciels nécessitent un véritable investissement et ne sont généralement pas destinés à un usage étudiant. En revanche, d'autres logiciels sont proposés en version d'évaluation entièrement fonctionnelle ou sont disponibles

gratuitement, comme c'est le cas de « ACCESS ». Cette dernière option est sans doute la plus intéressante et la plus avantageuse.

ACCESS est incontestablement l'un des logiciels les plus prometteurs actuellement. Son développement est soutenu par une communauté grandissante de contributeurs issus du domaine de la recherche. De plus, il se révèle très pratique pour la structuration des données grâce à ses modules VBA performants. Il offre également une grande souplesse et élégance pour automatiser des tâches répétitives ou créer des actions personnalisées. Grâce à ses fonctionnalités, il est considéré comme un outil analytique capable de fournir des solutions puissantes pour résoudre des scénarios et problèmes courants en analyse [72]. Son utilisation ouvre des opportunités importantes pour les chercheurs, en leur permettant de manipuler efficacement de grandes quantités de données et d'explorer en profondeur les résultats.

### 3.3 Cadre Conceptuel de données et méthodologie de structuration

La variation de la résistance à la compression sur site est principalement due aux effets des matériaux, de la mise en place et des essais [73]. Évidemment, le grand volume de données techniques provenant des projets de construction rend l'analyse statistique de ces effets difficile. Il est donc important de structurer ces informations de manière à ce que l'analyse des données soit rapide et pratique.

Dans cette étude, la méthodologie de structuration des données est basée sur le principe de séparation de l'information par type et par origine. Cela peut être réalisé en créant des tables indépendantes pour chaque catégorie de données. Cela permet également à l'utilisateur d'éviter la redondance des informations et de réaliser des mises à jour rapides de la base de données.

#### 3.3.1 Le modèle conceptuel des données

Avant de réfléchir au schéma relationnel d'une application, il est bon de modéliser la problématique à traiter d'un point de vue conceptuel et indépendamment du logiciel utilisé [74]. Dans ce contexte, l'architecture du modèle de données conceptuel (MCD) proposé ici est organisée en plusieurs entités (tables) interconnectées par des relations spécifiques, comme illustré dans la figure 3.1.

Ces tables regroupent des données relatives aux projets, à la formulation du béton, aux méthodes de mise en place, aux résultats de résistance à la compression et à d'autres paramètres pertinents. Chaque entité possède ces propres attributs (champs des données) qui sont essentiels pour le traitement de la qualité du béton. Les attributs sont définis en fonction des types d'informations à enregistrer, tels que les valeurs numériques, les dates, les codes ou les descriptions (tableau 3.1).

Les relations entre les tables ont été établies en fonction de la dépendance directe de chaque table par rapport aux autres. Il est important de noter que chaque table contient des informations spécifiques et qu'elles ne doivent pas être affichées dans une autre table.

Enfin, la configuration de ces tables avec leurs attributs spécifiques permet de stocker et d'organiser les informations de manière claire et cohérente, ce qui facilite leur consultation et leur utilisation ultérieure. De plus, cette technique de structuration des données garantit une gestion efficace et précise de toutes les informations concernant la qualité et les performances du béton.

Tableau 3. 1 : Tables et attributs de la base de données.

Tables	Informations
Projet	Nom, Secteur, Lieu d'implantation, Année, Montant, Quantité du béton
B E T	Dénomination, Adresse, Statut, Qualification, Année d'activité
Entreprise	Nom, Adresse, Expérience BET
Formulation	N° référence, Date, E/C, G/S, Slump, Dosage G 15/25, Dosage G 8/15 Dosage G 3/8, Dosage S N, Dosage S Dosage Ciment, Dosage Adjuvants, Densité, Résistance à la compression
Agrégats	Provenance, Densité Abs, Densité App, L.A, Aplatissement, Propreté, M F E S, % fines
PV écrasement	N° PV, Eléments, Localisation, Niveau, Affaissement, Température Ambiante, Température Béton-frais, Date coulage, conditions d'exécution
Laboratoire	Nom, Adresse, Expérience Laboratoire
Essais D et NDT	Essai scléromètre, essai ultra-son, essai carottage

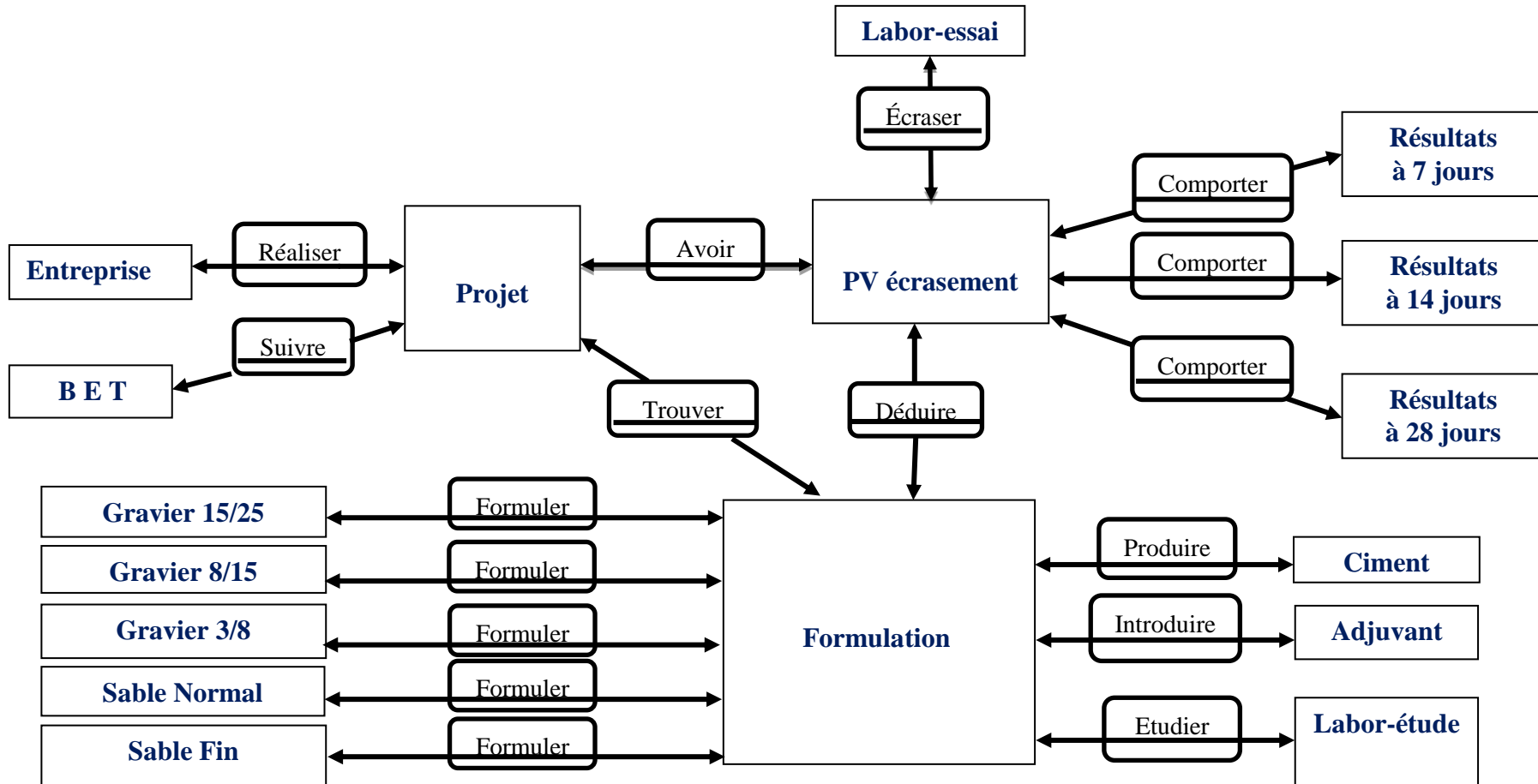


Figure 3. 1 : Modèle conceptuel des données.

### 3.3.2 Modèle logique

Le modèle logique des données est une représentation abstraite de la structure des données au sein d'une base de données. Il offre une vision conceptuelle des entités, des attributs et des relations qui les lient, sans se préoccuper des détails spécifiques de leur mise en œuvre physique ou des contraintes techniques.

Pour compiler notre base de données sous le logiciel "ACCESS", nous avons procédé au transfert du modèle conceptuel des données (MCD) vers un modèle logique des données (MLD). Ce dernier permet de décrire les données avec un niveau de détail maximal, indépendamment de leur implémentation physique dans la base de données. Cette étape cruciale consiste à définir les connexions entre les différentes tables de manière logique en établissant les cardinalités appropriées [75]. Par exemple, la cardinalité "réaliser", qui relie la table "projet" à la table "entreprise", indique qu'un projet peut être réalisé par au moins une seule entreprise, et jusqu'à N entreprises, comme illustré dans la Figure 3.2.



Figure 3. 2 : Exemple d'une relation entre deux tables.

### 3.4 Phases de la modélisation sous ACCESS

La conception d'une plateforme de visualisation permettant d'accéder à la saisie des données, à leur affichage, à leur contrôle et à d'autres fonctionnalités au sein d'une plateforme unique revêt une grande importance pour notre étude. Cette approche a été choisie pour résoudre le problème du volume important d'informations de projets dans la modélisation de la base de données. Grâce à sa nature graphique, cette approche offre une facilité d'utilisation accrue par rapport aux autres techniques basées sur du texte. Elle s'avère être un outil pratique et extrêmement utile pour la recherche, le contrôle et l'analyse de la qualité du béton.

La modélisation de la base de données consiste à reproduire le modèle logique de données (MLD) précédemment discuté sous la forme d'un masque de saisie. Ce masque permet, tout d'abord, d'entrer les données dans les champs appropriés, puis de gérer tous les événements qui surviennent lors de l'exécution du processus. Toutes les commandes et fonctions de la base de données sont exécutées à l'aide de sous-programmes, assurant ainsi l'exécution correcte de chaque tâche spécifique.

#### 3.4.1 L'accès à la base et menu principal

Tout d'abord, l'accès aux données se fait par le biais de la fenêtre "Accès", assurant ainsi la sécurité de la base de données et la protection des données matérialisées (Figure 3.3). Un autre aspect de sécurité a été pris en compte, consistant à limiter l'accès aux données à trois niveaux :

- niveau 1 : modifier et effectuer des analyses et requêtes ;
- niveau 2 : introduire les données ;
- niveau 3 : consulter et imprimer les résultats.

La Figure 3.4 illustre le menu principal de la base de données.

Le modèle de structuration des données implique quatre étapes de saisie correspondant aux informations provenant des chantiers de construction, lesquelles sont nécessaires pour l'analyse de la qualité du béton. Chaque clic sur une étape permet d'accéder à la fenêtre correspondante et d'introduire les informations dans la base de données. La tâche 1 concerne les informations relatives aux projets, tandis que la tâche 2 concerne les données issues des procès-verbaux d'essai d'écrasement. Les tâches 3 et 4 intègrent les résultats de résistance à différents âges ainsi que ceux des essais destructifs et non destructifs.

Les trois derniers onglets de cette base de données sont réservés à l'analyse des résultats. Ils permettent aux utilisateurs de consulter certains états statistiques de la base de données, d'effectuer une analyse descriptive, d'appliquer des critères de conformité selon la norme souhaitée, et de visualiser l'influence de certains facteurs sur la résistance à la compression sous forme de graphes.

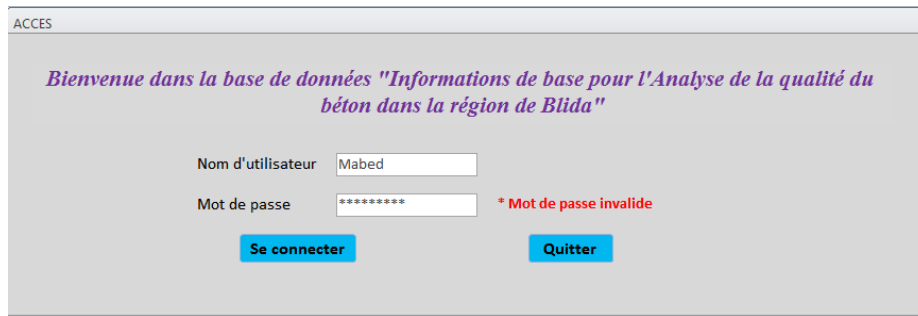


Figure 3. 3 : Interface d'accès à la base de données.



Figure 3. 4 : Menu principal de la base de données.

### 3.4.2 Formulaire de projet

La saisie dans la BD débute par l'identification du projet à l'aide d'une fiche analytique. Cette tâche implique la combinaison de plusieurs composants qui sont nécessaires pour structurer les informations techniques et contractuelles d'un projet (Figure 3.5). Tous les partenaires impliqués dans la réalisation d'un projet sont interconnectés.

Les relations entre les différents champs de données ont été établies de manière à couvrir tous les cas possibles qui peuvent survenir pendant l'exécution du projet, tels que par exemple, le changement la formulation du béton et la résiliation du contrat avec l'entrepreneur.

Des critères d'intégrité ont été incorporés dans le système pour superviser la saisie des données et détecter les valeurs inhabituelles introduites par l'utilisateur. L'une des fonctions de ces modules consiste à contrôler les informations fournies, notamment dans le cas de la formulation du béton, en veillant à ce qu'elle respecte le dosage requis pour un projet

donné. Par exemple, une valeur supérieure à 500 kg/m<sup>3</sup> ou inférieure à 250 kg/m<sup>3</sup> n'est pas autorisée dans le champ de teneur en ciment (Figure 3.6). Ces conditions permettent de visualiser les anomalies dans les informations saisies et assurent un niveau élevé de fiabilité des données stockées dans la base de données.

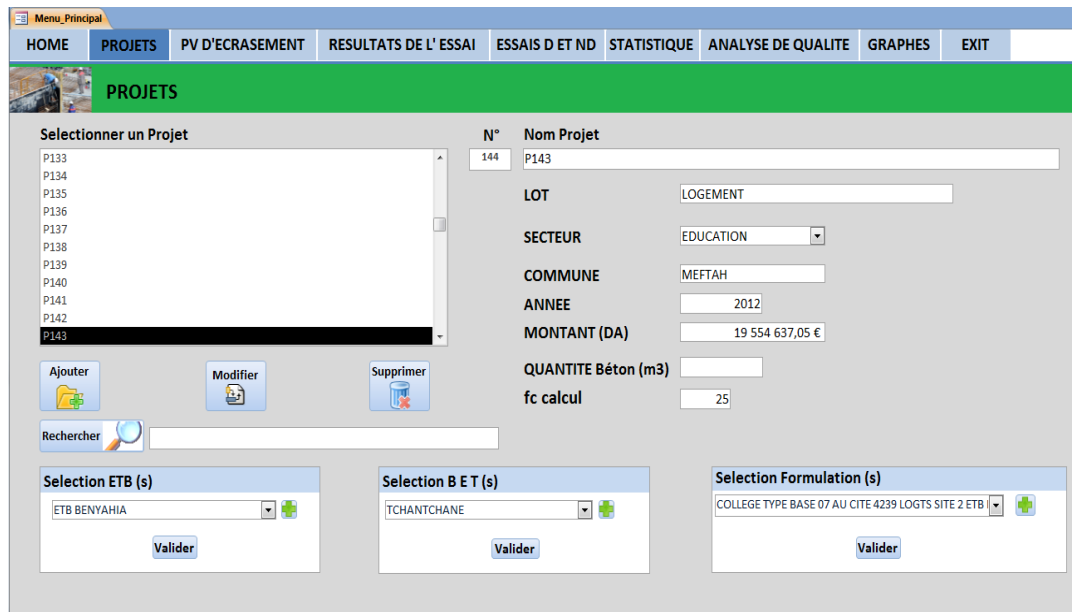


Figure 3. 5 : Interface de saisie des informations du projet.

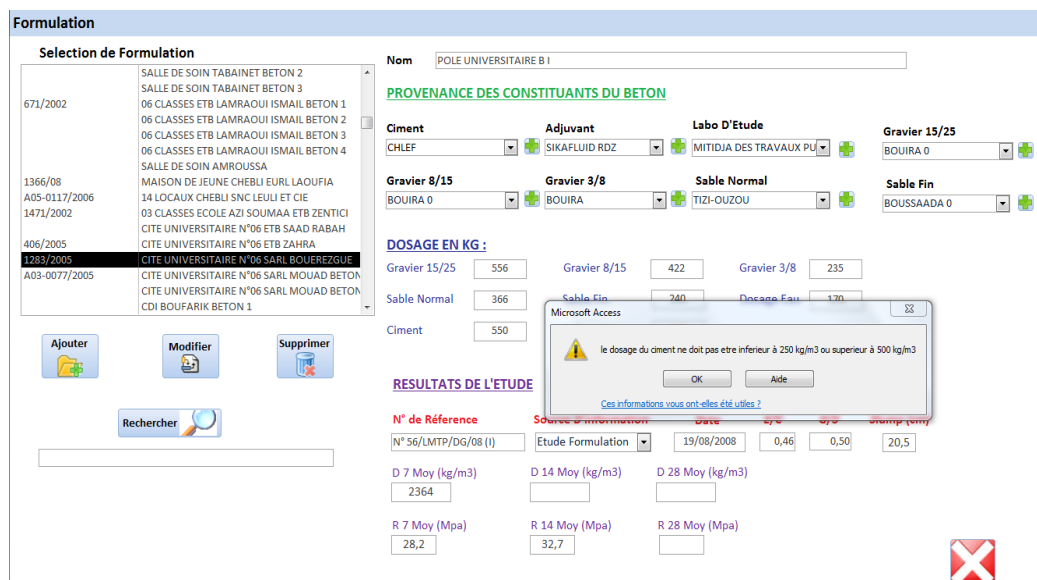


Figure 3. 6 : Exemple d'un critère d'intégrité pour le dosage en ciment.



### 3.4.3 Formulaire d'enregistrement pour le rapport d'essai d'écrasement

Cette tâche vise à enregistrer les informations relatives au rapport d'essai d'écrasement du béton. Afin de couvrir tous les aspects essentiels qui influent sur la qualité du béton, un formulaire d'enregistrement très détaillé a été utilisé. Ce formulaire englobe toutes les caractéristiques liées à l'élément structurel (type d'élément et sa localisation) durant l'opération de coulage. De plus, il comprend des informations détaillées sur les conditions climatiques du site (température et humidité relative), et les techniques de mise en place du béton (mode de malaxage, vibration, type et durée de cure) (Figure 3.7).

Pour assurer la cohérence des données, chaque rapport est automatiquement lié à son projet correspondant ainsi qu'à sa formulation spécifique, en utilisant une liste déroulante qui établit la liaison entre les différentes tables.

The screenshot shows a web application interface for recording concrete test data. The interface includes a navigation menu with options like HOME, PROJETS, PV D'ECRASUREMENT, RESULTATS DE L' ESSAI, ESSAIS D ET ND, STATISTIQUE, ANALYSE DE QUALITE, GRAPHES, and EXIT. The main content area is titled 'PV Ecrasement' and contains several input fields and a table.

Input fields include:

- Reference PV: 3471/2012
- N°: 6
- PROJET: P143
- Bloc: (empty)
- Formulation: COLLEGE TYPE BASE 07 AU CITE 4239 LOGTS SITE 2 ETB BENYAHIA
- Element: Voile+Poteaux
- Labo chargé d'essai: LHCC UNITE ROUBA
- Localisation: (empty)
- Niveau: RDC
- Hauteur: 3,06
- Date de coulage: 28/11/2012
- Conditions Climatiques: Nove
- Conditions De Mise En Oeuvre: (empty)
- Affaissement en cm: (empty)
- Mode de Malaxage: (empty)
- Temperature. B frais en °C: (empty)
- Mise en oeuvre: (empty)
- Quantité du Béton coulée en m3: (empty)
- Vibration: (empty)
- Type de cure: (empty)
- Durée de cure: (empty)

A table titled 'Liste des PV(s)' displays the following data:

Référence PV	N° PV	N° Projet	Date coulage	Element	Niveau
2270/2012	31	144	08/08/2012	Fondation	INFRA
2330/2012	2	144	14/08/2012	Amorces Poteaux	INFRA
2550/2012	3	144	11/09/2012	Longrine	INFRA
2680/2012	4	144	23/09/2012	Voile+Poteaux	INFRA
3374/2012	5	144	17/11/2012	Plancher	INFRA
3471/2012	6	144	28/11/2012	Voile+Poteaux	RDC
18/2013	7	144	29/12/2012	Plancher	1er Etage
147/2013	8	144	10/01/2013	Acrotere	1er Etage
507/2013	9	144	17/02/2013	Plancher	2eme Etage
531/2010	1	145	22/09/2012	Fondation	INFRA
537/2010	2	145	24/09/2012	Amorces Poteaux	INFRA
565/2010	3	145	08/10/2012	Fondation	INFRA

Figure 3. 7 : Exemple d'un enregistrement des informations du Procès-verbal d'écrasement du béton.

### 3.4.4 Formulaire d'enregistrement des résultats de résistance à la compression

Ce formulaire représente la phase finale de la saisie des données issues de la procédure de bétonnage. Il enregistre les informations obtenues à partir de l'essai de résistance à la

compression du béton (Figure 3.8). Les valeurs usuelles de la résistance à la compression du béton (R) et de sa masse volumique (D) sont réparties sur trois tableaux, correspondant aux périodes d'essai de 7, 14 et 28 jours. Cette répartition permet de suivre l'évolution de la résistance du béton au fil du temps. La plage des résultats a été étendue à 6 valeurs afin de prendre en compte le coulage d'éléments spécifiques nécessitant plusieurs prélèvements.

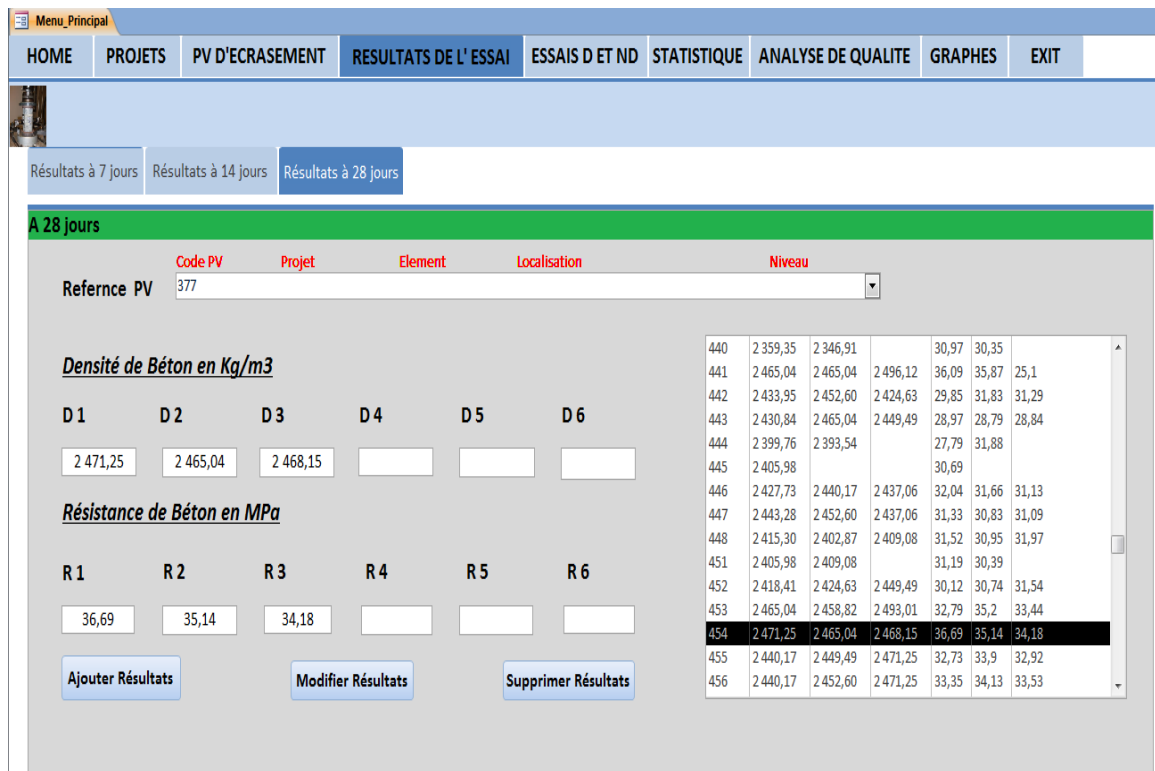


Figure 3. 8 : Interface de saisie des résultats de l'écrasement du béton.

### 3.4.5 Formulaire de tests destructifs et non destructifs

Lorsque la qualité du béton, évaluée à travers les résultats des tests de résistance à la compression, suscite des incertitudes, le consultant et/ou l'ingénieur de l'organisme de contrôle ont recours à des essais destructifs et non destructifs pour évaluer la conformité du béton. Ces méthodes sont mises en œuvre dans le but de réduire les litiges et les conflits sur site, et elles permettent de vérifier les résistances faibles des cylindres ainsi que d'évaluer l'étendue des non-conformités. Dans notre base de données, cette tâche est prise en compte et englobe trois méthodes de test : le test sur carottes, le test du marteau de

rebond (scléromètre) et le test ultrasonique, comme illustré à la figure 3.9. Tous les résultats mesurés sont associés à l'élément structural faisant l'objet du diagnostic.

Element	Description	Niveau	Résistance (Mpa)
Amorces Poteaux	A3+A5	Infra	20,65
Poteau	A2 ET C3	RDC	25,65
Poteau	AXE A FILE 5, AXE B FILE 4, AXE D FILE 3	RDC	23,37
Poteau	B3 ET C2	RDC	21,55
Poteau	BLOC pedagogique B5, F5, C2 et F1		24,38
Poteau	BTN8	RDC	26,93
Poteau	C3-E2-3	RDC	23,18
Poteau	E4 ET E5	RDC	11,5
Poteau	F4, H1 ET H4	RDC	22,72
Poteau	M-6 ET N-5	2eme Etage	26,9
Poteau	P2,P6	RDC	19,75
Poutre	AXE D,E,G	Infra	21,67
Voile	FILE 1 AXE B-A ET FILE 4 AXE B-A	RDC	23,2
Voile Periph	ENTRE AXE C ET B FILE 4	Infra	20,3
voile+poteaux	BLOC pedagogique A4 et A2		24,75
voile+poteaux	P A-2, V A3-2, P B-3	RDC	21,97

Figure 3. 9 : Formulaire des essais destructif et non destructif.

#### 3.4.6 Formulaire d'analyse

Cette tâche représente la dernière étape de la modélisation de la base de données. Son formulaire est composé de trois onglets. Le premier onglet regroupe les données récapitulatives de la base de données, telles que le nombre de projets, le nombre total de résultats saisis, ainsi que les résultats du calcul statistique (Figure 3.10). Le deuxième onglet est dédié à la vérification des critères de conformité du béton selon différentes normes de construction (Figure 3.11). Enfin, l'onglet graphique est utilisé pour générer des courbes, des histogrammes et d'autres formes de présentation des données, dans le but de suivre l'évaluation de la qualité du béton et d'observer la corrélation entre les différents paramètres (Figure 3.12). Il convient de noter que ces données peuvent être facilement exportées afin d'être utilisées dans des calculs statistiques avancés à l'aide de logiciels statistiques tels que SPSS.

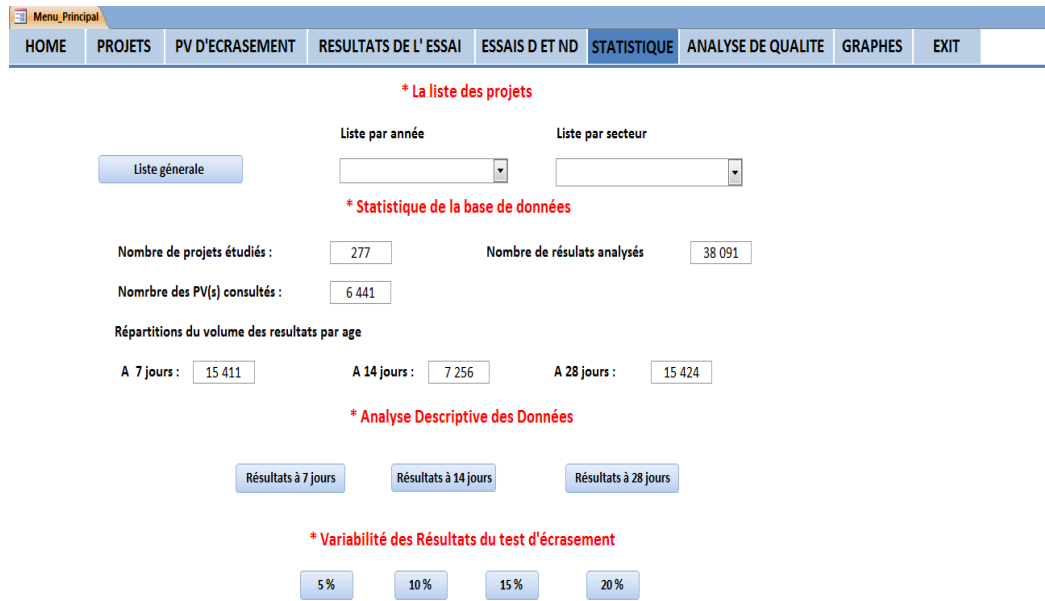


Figure 3. 10 : Statistiques de la base des données.

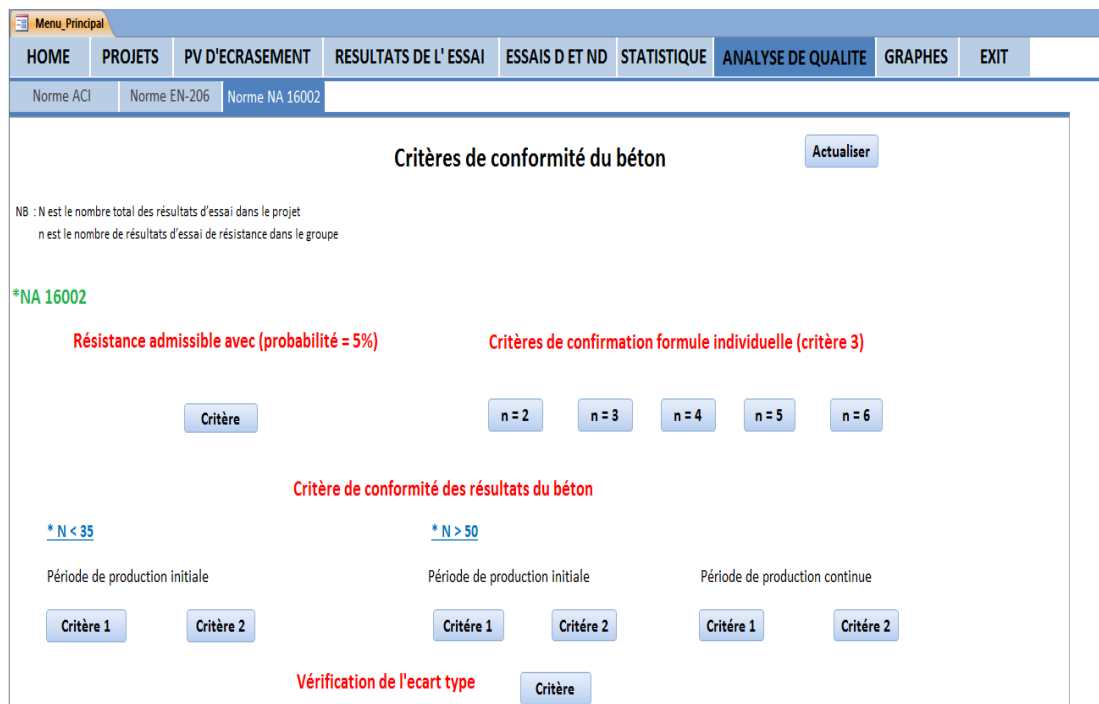


Figure 3. 11 : Evaluation des critères de conformité du béton.

### 3.5 Conclusion

L'adoption d'un modèle structuré de saisie de données dans le contexte des projets de construction se révèle essentielle pour résoudre les problèmes relatifs à la qualité du béton sur les chantiers. Le modèle élaboré dans le cadre de cette étude offre une série d'avantages significatifs :

Tout d'abord, il permet une saisie systématique et organisée d'une grande quantité d'informations liées aux projets de construction, même par des personnes non spécialisées. Cette approche assure l'enregistrement cohérent et exhaustif de toutes les informations pertinentes. De plus, le modèle garantit la traçabilité des données en les associant automatiquement aux projets correspondants. Cette fonctionnalité facilite la recherche de l'origine des données et l'identification des projets auxquels elles sont liées.

Le modèle intègre des critères d'intégrité et des vérifications spécifiques pour contrôler la conformité des données saisies. Ceci permet la détection précoce d'erreurs ou d'anomalies dans les données, assurant ainsi leur fiabilité. Par ailleurs, le modèle simplifie l'analyse statistique des données en regroupant les résultats et en autorisant des calculs et des comparaisons. Il offre une vue d'ensemble de la qualité du béton dans divers projets, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées.

Une caractéristique importante du modèle réside dans sa capacité à présenter visuellement les données. Les représentations graphiques telles que les courbes et les histogrammes améliorent la compréhension et la possibilité d'analyse des données, ce qui facilite l'interprétation des résultats.

Enfin, le modèle présenté offre une base solide pour évaluer la procédure de contrôle de la qualité du béton sur le chantier. Grâce à sa capacité à regrouper les données, il permet d'effectuer une gamme variée d'analyses visant à déterminer la véritable contribution de chaque facteur lié à la qualité sur la résistance à la compression du béton. Cette évaluation peut être utilisée comme un critère supplémentaire lors du choix des entreprises, ainsi que pour résoudre les déséquilibres qui pourraient survenir pendant la réalisation du projet, ce qui renforce considérablement les exigences en matière de contrôle de qualité.

## **CHAPITRE 4 : ANALYSE STATISTIQUE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION**

## **CHAPITRE 4 : ANALYSE STATISTIQUE DE LA RÉSISTANCE A LA COMPRESSION**

### 4.1 Introduction

De nombreuses activités scientifiques débutent par la collecte de données, que l'on peut obtenir par le biais de sondages, d'expérimentations ou de la constitution d'échantillons. Ces données constituent la matière première de l'analyse de données. L'analyse de données regroupe de nombreuses méthodes d'analyse statistique différentes et variées, utilisées dans de nombreux secteurs pour le contrôle des processus, la détection et la prévention de leurs défauts. Les principales forces de ces méthodes résident dans leur capacité à déterminer les valeurs inconnues des paramètres de la population à partir des données de l'échantillon, ainsi que dans leur capacité à réduire considérablement le temps et l'effort nécessaires pour le traitement des données, en les minimisant de manière optimale.

Le présent chapitre analysera statistiquement la résistance à la compression du béton qui s'ouvrira par une présentation exhaustive des données de l'étude. Seront exposées l'origine des données, leur classification, la répartition des résultats d'écrasement du béton dans la base de données, ainsi que les conditions rigoureuses ayant présidé au choix du modèle pour cette étude.

La première partie de l'analyse de ce chapitre sera consacrée à l'examen des champs de résistance du béton à la compression à différents stades de maturation. Au cours de cette section, nous approfondirons principalement notre compréhension de la forme de distribution des données du point de vue statistique, en mettant l'accent sur les comportements observés des champs de résistance à 7 et 28 jours. Nous procéderons à une évaluation minutieuse des paramètres statistiques pertinents, tout en mettant en lumière les relations existantes entre eux.

La deuxième partie de ce chapitre sera dédiée à l'analyse de la normalité des données. Nous présenterons des tests de normalité rigoureux, ainsi qu'une étude approfondie de la variation de cette caractéristique. Parallèlement, nous mènerons une analyse de l'association entre les deux champs de résistance, en examinant leurs liens intrinsèques.

#### 4.2 Présentation des données

L'achèvement d'une étude nécessite généralement l'acquisition de données, qui représentent l'axe principal de la recherche et sont choisies et dimensionnées en fonction de la problématique étudiée. Dans cette étude, nous avons opté pour l'utilisation de données provenant de projets de construction de la région de Blida.

Ces informations sont des données réelles collectées à partir des chantiers et comprennent des informations contractuelles sur le projet ainsi que des informations techniques liées directement à la composition du béton.

La collecte des données a été effectuée sur une période de 14 ans (2000-2014). Cette durée a été choisie pour permettre d'une part de couvrir l'ensemble de la région et ainsi obtenir le maximum d'informations, et d'autre part pour donner une grande fiabilité aux résultats obtenus à travers cette étude.

#### 4.3 Répartition et classification des projets de l'étude

Les projets étudiés sont de nature publique, avec la direction du logement et des équipements publics de la wilaya de Blida comme gestionnaire de contrat. Le choix de se concentrer sur le secteur public n'était pas arbitraire, car il est important d'analyser la qualité du béton en s'assurant qu'un système de contrôle de qualité a été préalablement mis en place. Ce système consiste généralement à faire mobiliser trois différents organismes de contrôle indépendants qui sont : le bureau d'études, le laboratoire, et l'organisme du contrôle technique de construction (CTC).

Le nombre de projets est de 276, répartie à travers de la wilaya de Blida. Ces projets ont été regroupés en trois grandes familles, à savoir :

- Educations : regroupe les projets des trois cycles de l'éducation nationale, et ceux de l'enseignement supérieur.
- Equipements publics : cette catégorie regroupe les projets à usage administratif et sportif tels que des directions, des administrations, des équipements sportifs et des projets de la sureté nationale. ....
- Logements : les projets du logement de toutes catégories confondues.



Le tableau 4.1 montre la réparation des projets par rapport à la fonctionnalité de l'ouvrage. L'assemblage des données (Figure 4.1), a fait sortir une distribution irrégulière de la fréquence des projets par année. Nous pouvons constater que la fréquence des projets augmentait simultanément avec les années, atteignant un pic en 2012 avec 45 projets enregistrés. Cette augmentation est due en partie à la disponibilité de l'information pendant ces années, mais également à un grand programme de construction d'équipements publics lancé par le gouvernement dans la région.

Le tableau 4.2, présentant la structure technique des données, indique que le béton le plus couramment utilisé sur le site est fabriqué selon le mode traditionnel (bétonnière), avec 145 cas. Cela semble logique car la plupart des entreprises ont un niveau de qualification professionnelle faible (61,64 % des entreprises ont une qualification II et III) selon le tableau 4.3. Il est important de rappeler que pour les qualifications de ces niveaux, seule une bétonnière est requise en termes de matériel pour la confection du béton.

Mais la question qui se pose pourquoi la majorité des entreprises figurant dans cette étude ont un niveau de qualification professionnelle faible ? La réponse est très simple : la plupart des projets sont de petite ou moyenne taille. Dans ces cas, les exigences du cahier des charges établi par les autorités compétentes ne sont pas strictes et aucune spécification particulière relative à la qualité du béton n'est exigée. Autrement dit, le plan de qualité n'est pas un élément important dans de l'attribution du marché. Dans ces conditions, il nous semble que le problème de la qualité du béton est à analyser dès cette étape.

Tableau 4. 1 : Réparation des projets par rapport à la fonctionnalité des ouvrages.

Groupe	Secteur	Nombre des projets
1	Education	128
2	Equipements publics	115
3	Logements	33
Total		276

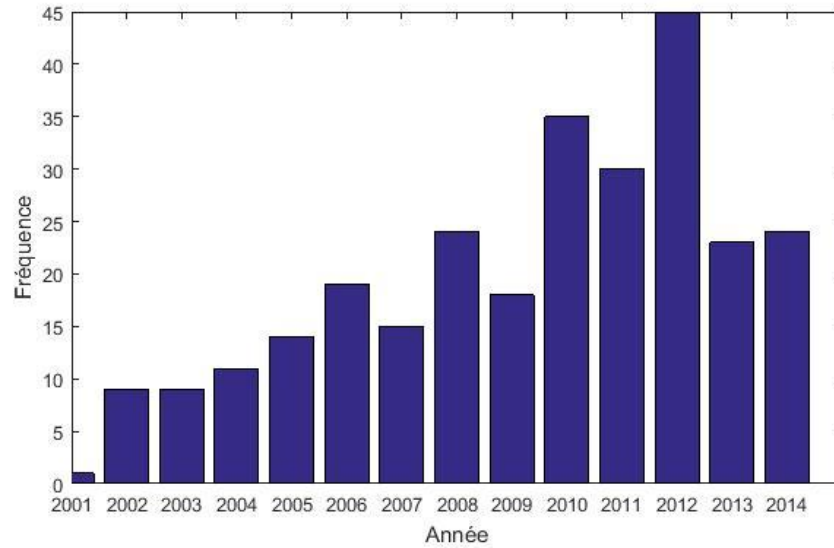


Figure 4. 1 : Fréquence des projets par année .

Tableau 4. 2 : Structure technique des données.

		Public	Privé	Etrangère					
Types d'entreprises		5	261	10					
Mode de confection du béton	Bétonnière	Malaxeur	Centrale à béton	pas d'information					
	145	24	54	53					
Nombre des niveaux			RDC	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	Pas d'information
			85	103	36	14	18	4	16

Tableau 4. 3 : Répartition des entreprises en fonction de la catégorie de qualification.

Catégorie	Nb des entreprises
II	21
III	43
IV	22
V	7
VII	3
Hors Catégorie	8
Pas d'information	176

### 4.3.1 Volume des résultats de l'essai d'écrasement du béton

L'essai d'écrasement du béton est une expérience aléatoire, car il est impossible de prédire le résultat. Cela signifie que si l'expérience est répétée dans les mêmes conditions, elle peut donner des résultats différents. Dans ce contexte, étant donné que notre analyse de la qualité du béton est basée sur sa résistance à la compression, il est donc crucial de savoir comment cette grandeur est répartie à l'intérieur de la base de données. Il est important de noter que nous avons uniquement ciblé la classe de béton C25/30 afin de réduire le volume de calcul et de normaliser les résultats de l'étude.

Le tableau 4.4 présente le nombre de résultats d'écrasement du béton des projets en fonction de l'âge du béton. On peut constater que le nombre de résultats à 14 jours est inférieur à celui des autres âges. Cela est dû au fait que cet âge n'est pas souvent pris en compte lors de l'essai d'écrasement du béton sur la plupart des chantiers. Cette mesure est généralement prise pour éviter des coûts supplémentaires qui peuvent impacter directement l'équilibre financier de l'entreprise. Toutefois, le fait d'ignorer cet âge dans la gestion du projet a des conséquences négatives sur la surveillance de la cinétique de développement de la résistance du béton. En cas de litiges, nous manquons d'informations pour diagnostiquer le problème de qualité et déterminer à quel moment le béton a cessé de gagner en résistance.

Tableau 4. 4 : Volume des résultats d'écrasement du béton à 7, 14, et 28 jours.

Age du béton	<i>7 jours</i>	<i>14 jours</i>	<i>28 jours</i>
Total des résultats	15 411	7 256	15 424

## 4.4 Analyse statistique des champs de résistance à 7 et 28 jours

### 4.4.1 Analyse descriptive

L'appréhension d'un jeu de données passe systématiquement par les statistiques descriptives. Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2, l'objectif de la statistique descriptive est de décrire de façon synthétique et parlante des données observées pour mieux les analyser. Elle donne en effet, une image globale sur la variation des données, et elle permet d'avoir une idée sur les techniques que l'on pourrait utiliser pour le traitement des données. Les tâches qui relèvent de la statistique descriptive constituent la première étape de toute analyse statistique. Dans ce contexte, nous allons voir donc l'application de ces notions sur les données collectés en analysant le comportement des champs de

résistances à la compression. En raison de la nature de variable étudiée (variable quantitative), nous avons limité notre traitement seulement aux paramètres de dispersion et de forme. Ces deux paramètres nous permettent de décrire largement le type de la distribution des données et qui peuvent nous

Notre étude est basée uniquement sur les résultats obtenus à 7 et 28 jours, car ceux à 14 jours ont été exclus en raison de faible nombre de projets ayant fourni ces données.

Le dimensionnement du modèle repose sur le principe de regrouper les résultats de deux âges de l'essai d'écrasement du béton en même temps, soit à 7 jours ou à 28 jours. Les projets ne contenant que des résultats à un seul des deux âges ne sont pas pris en compte. De plus, pour des raisons de normalisation du modèle, les projets ayant une résistance moyenne à 7 jours supérieure à 25 MPa sont écartés. Il est important de noter que 9 projets ont été exclus car ils présentaient des résistances à 7 jours en dehors de la plage normale. Ces projets ont été considérés comme aberrants.

Finalement, en tenant compte des conditions mentionnées précédemment, le filtrage des données a conduit à l'obtention d'un modèle comprenant 104 projets. Ce modèle sera utilisé pour les différentes étapes du traitement des données en appliquant les principales techniques d'analyse déductive. Tous les paramètres calculés dans le cadre de l'analyse descriptive sont présentés en annexe (A) à la fin de ce manuscrit.

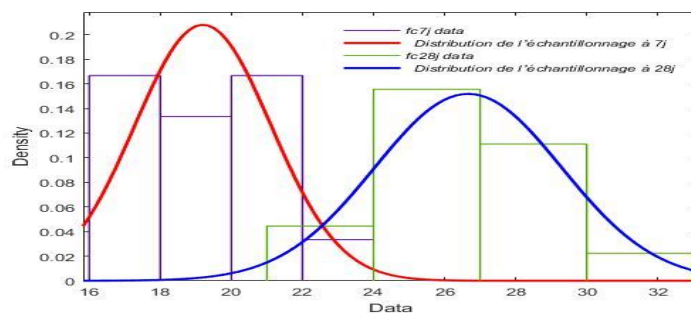
#### 4.4.2 Analyse visuelle de la forme de distribution des résistances

Nous considérons la résistance  $f_{cmi_j}$  comme la variable de la série statistique étudiée. Cette variable représente la résistance moyenne d'un test d'écrasement propre à un lot du bétonnage à un âge donné. Les lots possèdent seulement deux résultats d'écrasement ne sont pas prêt en considération afin de donner plus de certitude et de précision aux données de l'étude.

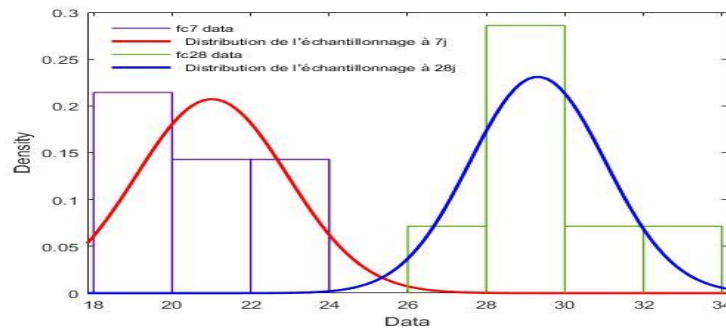
En utilisant cette terminologie, nous avons créé deux vecteurs :  $f_{cmi_{7j}}$  et  $f_{cmi_{28j}}$ , qui représentent respectivement la résistance moyenne à la compression du béton à l'âge de 7 jours et à l'âge de 28 jours. Ces vecteurs ont été facilement et rapidement créés grâce à des requêtes intégrées à la base de données. Notons ici que la taille des vecteurs dépend forcément de la consistance du projet et de la disponibilité des résultats des tests d'écrasement. Une fois que les données de ces deux vecteurs sont prêtes, elles seront

transférées vers le logiciel Matlab afin de tracer la forme de distribution des résistances pour chaque projet.

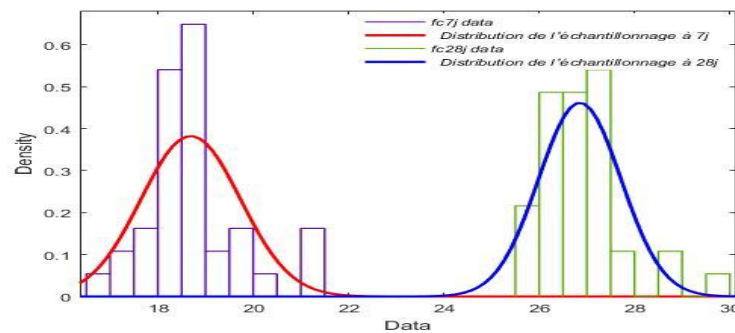
La première observation que nous avons constatée en analysant la forme de distribution des données est la répartition des champs de résistance (7 et 28 jours) en deux cas de figure. Le premier cas est caractérisé par un chevauchement entre les formes de distribution, ce qui est observé dans 34 projets. Le deuxième cas, qui est beaucoup plus fréquent avec 70 projets, ne montre aucune interaction entre les courbes de distribution (Figure 4.2).



(a) Cas d'interaction entre les distributions 'Projet 205'



(b) Cas d'un intervalle d'interaction réduit 'Projet 38'



(c) Cas absence d'interaction 'Projet 147'

Figure 4. 2 : Exemples de la forme de distribution des échantillonnages à 7 et 28j.

Cette observation peut être expliquée en premier lieu par l'influence de l'amplitude de l'intervalle séparant la résistance maximale à 7 jours et la résistance minimale à 28 jours. En effet, si cet intervalle n'existe pas, cela signifie que les valeurs de résistance à 7 jours se glissent à l'intérieur du champ de résistance de 28 jours ou vice-versa produisant ainsi une zone d'interaction entre les courbes de distribution. Ce phénomène est également observé même lorsque la grandeur de cet intervalle est très petite, c'est-à-dire lorsque les deux valeurs extrêmes se rapprochent l'une de l'autre sans se chevaucher. Cela conduit également à créer une zone d'interaction, mais avec une aire plus ou moins réduite. Cette observation nous a permis de constater qu'il était possible que le problème de qualité commence à ce stade. Ce constat a suscité de nombreuses interrogations quant à l'origine de ce comportement.

Par ailleurs, l'interprétation visuelle du phénomène discuté précédemment repose nécessairement sur un appui technique et pratique qui a conduit à cette distinction. En effet, notre première réaction a été d'envisager de modifier la formulation du béton lors de la réalisation des projets. Cependant, il est important de souligner qu'un changement de la formulation du béton pendant la construction peut avoir un impact significatif sur sa structure initiale et, par conséquent, influencer les résultats de l'essai d'écrasement.

Pour confirmer ou infirmer cette proposition, nous avons recensé le nombre de compositions de béton structurel employées, en évoquant la question de l'utilisation d'une ou plusieurs formulations dans un même projet. Le recensement des projets a montré que 61,76% des projets ont été réalisés avec une seule formulation de béton, tandis que 20,59% des projets ont utilisé deux formulations ou plus pour le premier cas (chevauchement entre les distributions) comme indiqué dans le tableau 4.5. Pour le deuxième cas (absence de chevauchement), ces taux n'ont pas changé de manière significative, et nous avons calculé (66,67% et 15,94%, respectivement).

En comparant ces taux, nous pouvons remarquer qu'il n'y a pas de glissement important en analysant ces deux cas de figures complètement différents. Un écart faible d'environ 5% entre les deux situations peut être considéré comme tolérable, et ne peut pas être considéré comme la cause principale de cette fameuse interaction entre les champs de résistances.

A ce stade, il nous semble que la pratique de changer la formulation du béton au moment de l'exécution des travaux n'a pas vraiment d'effet sur la forme de la distribution de l'échantillonnage. Ceci peut être dû au contrôle préalable de la nouvelle formulation du

béton avant qu'elle ne soit exécutée sur le chantier. Cette procédure, utilisée par le contrôleur de la qualité, peut garantir que la deuxième production du béton donne des valeurs similaires en matière de résistance, même si une ou plusieurs substitutions des constituants ont été modifiées pour une raison ou une autre.

En écartant cette hypothèse, il est fort probable que le problème ait une autre cause liée peut être au processus de maturation du béton. Toutefois, avant de poursuivre l'analyse de cette proposition, il est préférable de continuer à examiner la forme de distribution des données et de voir ce qui se passe lorsqu'on passe des résultats à 7 jours à ceux de 28 jours en termes d'allure des courbes. Pour cela, nous avons comparé simultanément toutes les paires de distributions pour observer les éventuels changements de la courbe en passant d'une distribution à l'autre.

Tableau 4. 5 : Répartition des projets en fonction du nombre de formulation employé.

(a) Cas chevauchement entre les formes de distribution

Une seule formulation	deux ou plus	absence d'information
21	7	5
61,76%	20,59%	17,65%

(b) Cas aucun chevauchement entre les formes de distribution

Une seule formulation	deux ou plus	absence d'information
46	11	12
67,14%	15,71%	17,14%

Lors de notre analyse comparative des formes de distribution, une observation majeure concernant la distribution des données dans le modèle a été mise en évidence. Cette observation concerne la coexistence simultanée des deux formes de distribution bien connues : platykurtique et leptokurtique. Cependant, la contribution de la forme de distribution mésokurtique dans le modèle est insignifiante par rapport aux autres formes, comme le montre le tableau 4.6.

Une analyse approfondie de la situation met en lumière que, à un stade précoce, une grande diversité de distributions est observée, avec une nette prédominance des distributions de type platykurtique (55,77% des projets débutent avec une distribution platykurtique, tandis

que 39,42% commencent avec une distribution leptokurtique). Cependant, il est intéressant de noter que la configuration initiale subit des évolutions significatives une fois atteint l'âge de 28 jours. Par exemple, lorsque la distribution débute avec une forme platykurtique, elle demeure platykurtique pour 34 projets, mais devient leptokurtique pour 21 autres projets. Cette tendance est également observée lorsque la distribution initiale à 7 jours présente une forme leptokurtique.

L'interprétation physique de ce changement repose sur la manière dont les résultats sont regroupés autour de la moyenne des valeurs à 7 et 28 jours. Si les valeurs de la résistance à un âge donné ont tendance à se rapprocher de sa valeur moyenne, l'histogramme des données sera étroit et pointu (leptokurtique). Cela indique généralement une population relativement homogène avec des valeurs assez similaires. En revanche, si la variation des résistances augmente, cela implique une plus grande dispersion des données, ce qui se traduit par un histogramme de fréquence relative moins variable, et la distribution sera courte et large (platykurtique). Cependant, une distribution latykurtique n'implique pas nécessairement une variance plus élevée qu'une leptokurtique, comme nous le verrons en détail lors de l'analyse des paramètres de forme.

Une autre explication statistique qui pourrait expliquer ce phénomène est liée à la limitation ou à l'absence de valeurs extrêmes dans certaines distributions. En effet, lorsque la distribution est tronquée dans les queues, c'est-à-dire que certains cas extrêmes sont supprimés ou absents, cela peut avoir un impact significatif sur la forme de la distribution. Même la suppression d'un petit nombre de cas peut suffire à modifier le coefficient d'aplatissement (kurtosis) de positif à négatif, indiquant ainsi un changement notable dans la forme de la distribution [76].

Tableau 4. 6 : Forme de distribution des champs de résistance  $f_{cmi 7j}$  et  $f_{cmi 28j}$

<i>Groupe</i>	<i>Forme de distribution <math>f_{c7j}</math></i>	<i>Forme de distribution <math>f_{c28j}</math></i>	<i>Nbr des projets</i>
1	Leptokurtique	Leptokurtique	21
2	Leptokurtique	Platykurtique	18
3	Leptokurtique	Mésokurtique	2
4	Platykurtique	Leptokurtique	21
5	Platykurtique	Platykurtique	34
6	Platykurtique	Mésokurtique	3
7	Mésokurtique	Leptokurtique	2
8	Mésokurtique	Platykurtique	3



En examinant la configuration des distributions de résistance dans le modèle, nous avons constaté un chevauchement relativement restreint entre les distributions des diverses variables. Dans plus de la moitié des projets analysés (67,31 %), aucune interaction entre ces variables n'a été observée. Par ailleurs, il est probable que l'utilisation de formulations différentes de béton au sein d'un même projet n'ait pas d'impact significatif sur le chevauchement des distributions des données. Ces résultats suggèrent que l'étude de la formulation du béton est maîtrisable et que la reproduction d'une formulation de béton identique ne pose aucun problème majeur.

L'analyse a également mis en évidence une certaine instabilité dans la forme des distributions, avec des perturbations observées dans certains projets. En effet, il n'a pas été possible de maintenir la même nature de distribution pour l'ensemble des projets à la fois pour l'âge de 7 jours et celui de 28 jours. Cependant, il est intéressant de noter que la forme platykurtique semble être la configuration la plus stable lors de la transition des données de 7 jours à celles de 28 jours.

De plus, on peut également suggérer que la distribution des résultats à l'âge de 28 jours est probablement influencée par l'état de distribution des données à jeune âge, en se basant toujours sur l'examen visuel de la forme de distribution des observations.

#### 4.4.3 Etude de paramètres de dispersion

L'analyse visuelle de la forme des distributions a révélé une grande variabilité dans le comportement des données à l'âge de 7 et 28 jours. Cependant, cette méthode d'analyse est sujette à des limitations, notamment son caractère non-quantitatif.

C'est pourquoi nous avons cherché à approfondir notre compréhension du comportement de la variable étudiée en examinant d'autres paramètres numériques fréquemment utilisés en statistique descriptive pour évaluer la dispersion des données. Dans cette partie, nous allons étudier la variation des résultats à l'aide de l'écart-type  $\sigma$  et de l'étendue  $E$ , qui sont de bons estimateurs de la dispersion d'une série statistique.

La figure 4.3 illustre la variation de  $\sigma$  et  $E$  des résultats d'écrasement du béton du modèle à 7 et 28 jours.

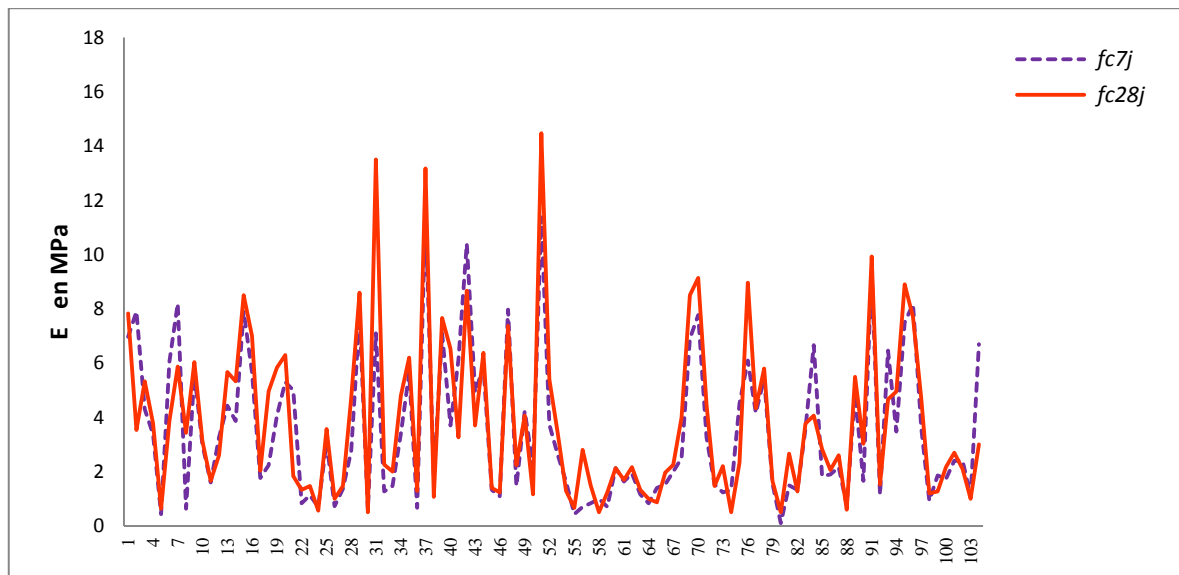
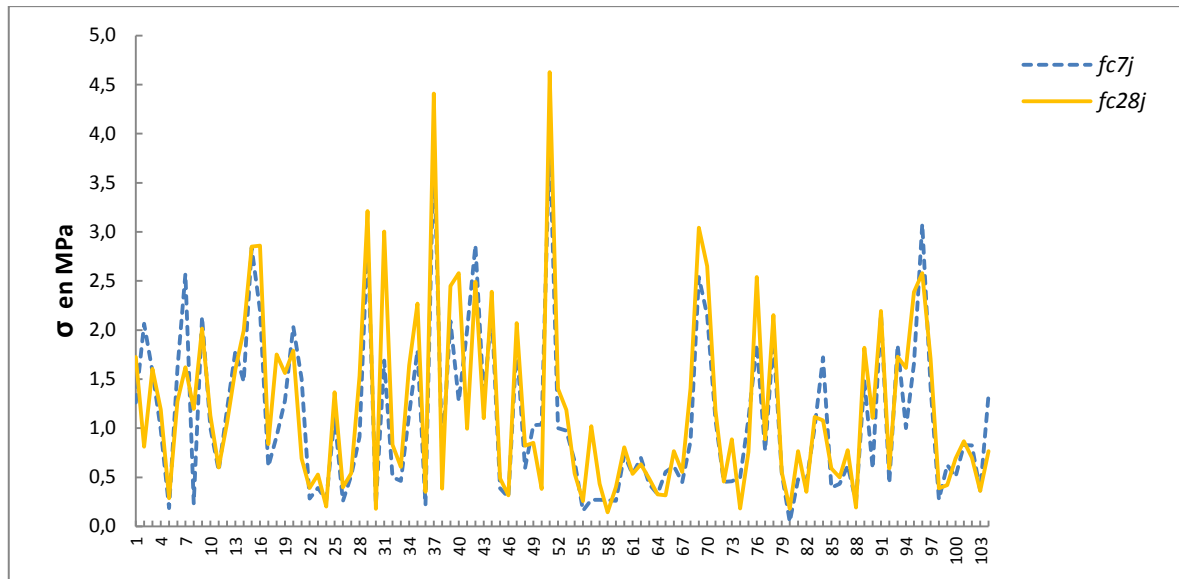


Figure 4. 2 : Comparaison des paramètres de dispersion du modèle à l'âge de 7 et 28 jours.

Un simple calcul statistique établi montre que 67,31 % des projets ont un écart type à l'âge de 28 jours nettement supérieur à celui de 7 jours. La même observation a été constatée pour le paramètre étendue ou nous avons marqué un taux de 71,15 %. Par compte, seulement quatre projets ont montré une égalité entre les écarts-type des résultats, et un seul projet pour l'étendue.

Contrairement à l'analyse visuelle des formes de distribution, il est maintenant clair que la dispersion des résultats est beaucoup plus importante à l'âge de 28 jours. En nous appuyant

sur ce résultat, nous pouvons conclure que la variation observée à cet âge est l'un des indicateurs responsables de la création de la zone d'interaction et que le problème peut être localisé à ce niveau. Cependant, la question qui reste en suspens est de savoir comment cela peut se produire ?

D'autre part, il convient de souligner que la déduction précédente ne signifie pas qu'il n'existe pas de dépendance linéaire entre les paramètres de dispersion calculés. En effet, la corrélation obtenue indique un coefficient de corrélation acceptable de 0,80 et 0,77 pour  $\sigma$  et E respectivement (Figure 4.4). Toutefois, cela peut être attribué au faible écart entre les valeurs mesurées, ce qui a permis de minimiser, voir négligé, l'influence de cet écart sur la corrélation entre les valeurs estimées.

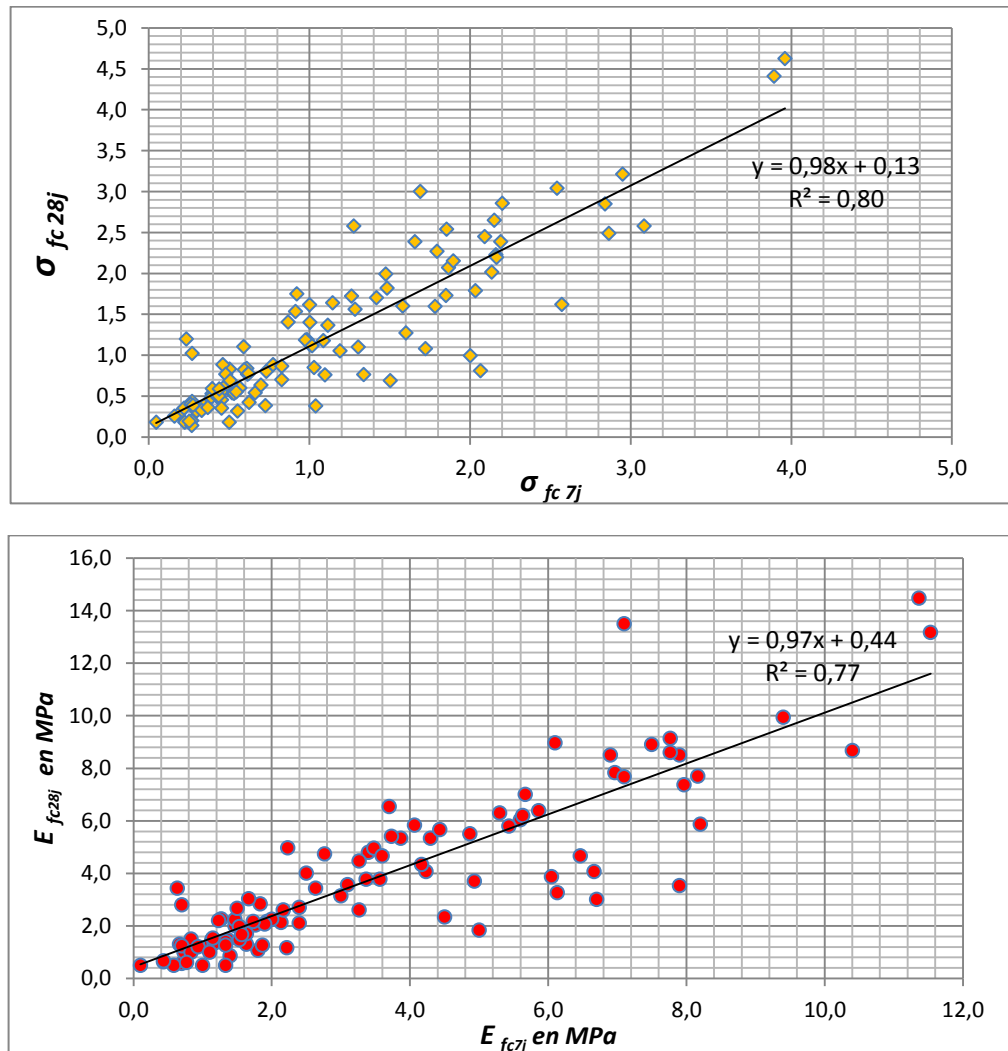


Figure 4. 3 : Corrélation entre les paramètres de dispersion du modèle (écart type et étendue).

Les résultats obtenus confirment que la dispersion des données du modèle est plus élevée à l'âge de 28 jours, avec des variances plus élevées. Il est possible que les résultats d'écrasement à cet âge se combinent avec les résultats à un jeune âge, favorisant ainsi la création de bulles de contact entre les champs. Les origines de ce problème pourraient être liées à la composition du béton, aux techniques de fabrication des éprouvettes, ou encore aux conditions de conservation des éprouvettes en laboratoire.

De plus, l'écart réduit entre les valeurs des paramètres calculés induit une corrélation acceptable entre eux, ce qui justifie la limitation et la puissance de la liaison entre les formes de distribution mentionnées dans la section précédente.

Cette déduction nous offre une nouvelle piste d'investigation concernant la zone d'interaction, mais elle demeure incomplète pour prendre une telle décision, compte tenu des spécifications des paramètres utilisés. Pour poursuivre l'analyse, la section suivante va approfondir cette tendance de changement dans les formes de distribution en utilisant une autre technique statistique.

#### 4.4.4 Etude de paramètres de forme

Jusqu'à présent, l'analyse des paramètres de dispersion du modèle nous a permis de diagnostiquer le problème de la variation des données de chantier en termes de dispersion. La comparaison des deux champs nous a fourni une information cruciale concernant la contribution des résultats à 28 jours à la création de la zone d'interaction en raison de leur hétérogénéité, bien que nous ne sachions pas encore comment cela peut se produire.

Malheureusement, en raison de son concept de base, l'analyse de dispersion ne peut pas traiter la problématique de manière schématique. Pour pouvoir déchiffrer les verrous scientifiques de l'interférence entre les distributions, il est nécessaire de faire appel à d'autres indicateurs. Dans cette situation, les paramètres de forme peuvent être utiles pour répondre à cette inquiétude.

Par définition, ces statistiques sont des indicateurs de la forme de la distribution d'une série statistique. Il est naturel de calculer ces indicateurs pour se faire une idée, même si elle est très approximative, du rapprochement possible de la distribution empirique avec une gaussienne qui représente la référence de la normalité des données utilisée dans la plupart des études d'analyse des phénomènes naturels. Cette référence magique sera traitée de

manière détaillée lorsque nous aborderons l'analyse de la normalité des données à l'aide des techniques statistiques habituelles.

L'histogramme présenté ci-dessous illustre la répartition des projets en fonction du signe des coefficients de forme calculés. En analysant le signe de ces coefficients, nous pouvons déterminer le comportement et la direction de la déviation des données par rapport à la distribution normale. Il est important de noter que l'asymétrie et l'aplatissement de l'échantillon sont contraints par des fonctions dépendant de la taille de l'échantillon.

Ces contraintes introduisent un biais dans l'estimation et, dans des cas extrêmes, suggèrent qu'aucun échantillon ne peut représenter exactement la distribution parente [77].

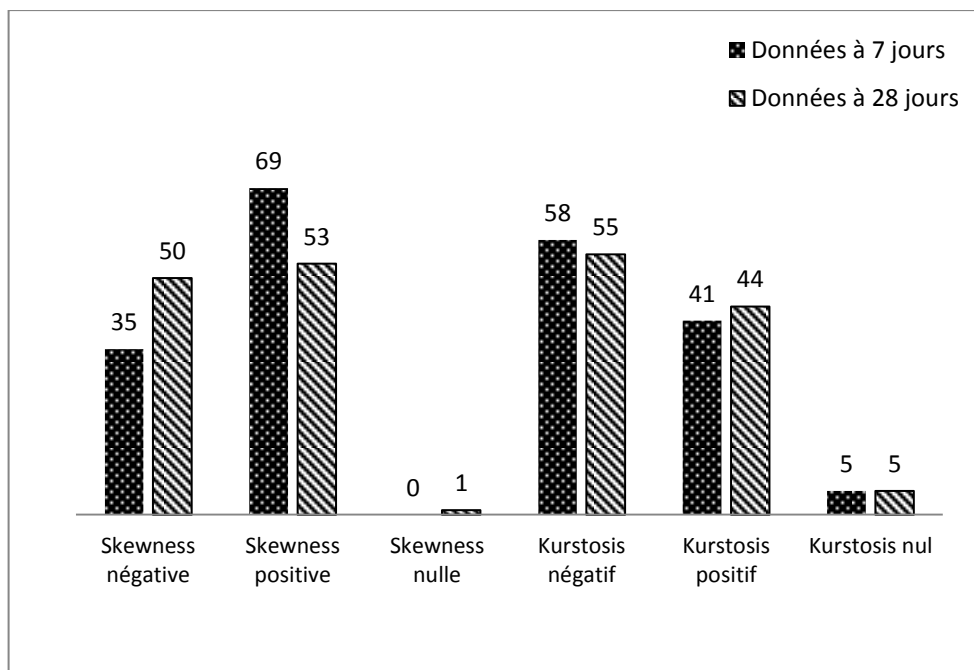


Figure 4. 4 : Histogramme des paramètres de forme du modèle

La comparaison des paramètres de forme pour les données à l'âge de 28 jours n'a pas montré de différence significative en termes de changement de signe. Aucune tendance de déviation par rapport à la normalité n'était prédominante et les valeurs étaient proches les unes des autres, avec seulement un écart de trois projets pour l'asymétrie et de 11 projets pour l'aplatissement.

Cependant, à l'âge de 7 jours, une différence notable a été observée en fonction de l'orientation des données. Le modèle présentait un coefficient d'asymétrie positif dominant

(69 projets), ce qui indique que la queue de distribution allongée à droite était plus importante que celle allongée à gauche. Cette asymétrie est due à la présence d'un grand nombre de cas dans la queue droite de la distribution. Parallèlement, la prédominance de valeurs négatives pour le coefficient d'aplatissement à l'âge de 7 jours indique que la courbe dans ce cas est moins aplatie qu'une courbe en forme de cloche.

Statistiquement parlant, cela se traduit par un décalage de la position de la moyenne de résistances du béton à jeune âge qui s'émigre vers le champ  $f_{cmi\ 28j}$ . Cela s'explique par le fait que les valeurs de résistance à 28 jours sont généralement supérieures à celles du champ  $f_{cmi\ 7j}$ , en raison du processus de développement de la résistance.

Ce résultat confirme encore les observations discutées dans la section 4.4.2, lors de l'analyse visuelle des formes de distribution et de l'interaction entre les champs. Ainsi, cette nouvelle donnée montre que la forme de distribution à jeune âge contribue également à la création de la zone en question.

Maintenant que nous savons que la distribution des données à 7 jours contribue à la création de la zone d'interaction, une question se pose : est-ce que cette distribution à jeune âge est le seul facteur responsable de cette situation ? Quel est le rôle du processus de maturation du béton, motivé par une hétérogénéité des données à l'âge de 28 jours constatée précédemment ? Pour répondre à cette question, nous avons sélectionné un échantillon de 13 projets parmi les 69 projets dont l'asymétrie des données est positive à jeune âge. Tous ces projets ont également un coefficient d'asymétrie positif à 28 jours, à l'exception de trois projets qui ont un coefficient nul.

L'idée est de tester la moyenne des résultats d'essai des projets par rapport à celle donnée par la formulation du béton correspondante, et de déterminer s'il y a une translation régulière des résistances lorsqu'on passe d'un âge à un autre (Figure 4.6).

D'après la figure 4.6, il est clair que la résistance moyenne réelle des projets est nettement inférieure à celle donnée par l'étude de la formulation du béton pour les deux âges, à l'exception de trois projets. Cependant, on peut remarquer que l'écart entre les deux mesures est beaucoup plus important à l'âge de 28 jours, tandis qu'une superposition entre les valeurs à 7 jours est observée (avec une fourchette de variation de [0,02-2,41] MPa et [0,34-6,07] MPa pour 7 et 28 jours respectivement). Cette situation indique qu'il existe réellement un ralentissement dans le processus de développement de la résistance entre les

deux âges sur site. Par conséquent, la probabilité de l'apparition de cette fameuse zone de contact est élevée, car la moyenne des résistances à 28 jours se positionne près de celle à 7 jours qui reste presque inchangée. Ceci est contraire à ce qui avait été prévu dans la littérature, où la résistance du béton à la compression devrait augmenter à un âge plus avancé pour qu'elle soit plus éloignée de celle de jeune âge.

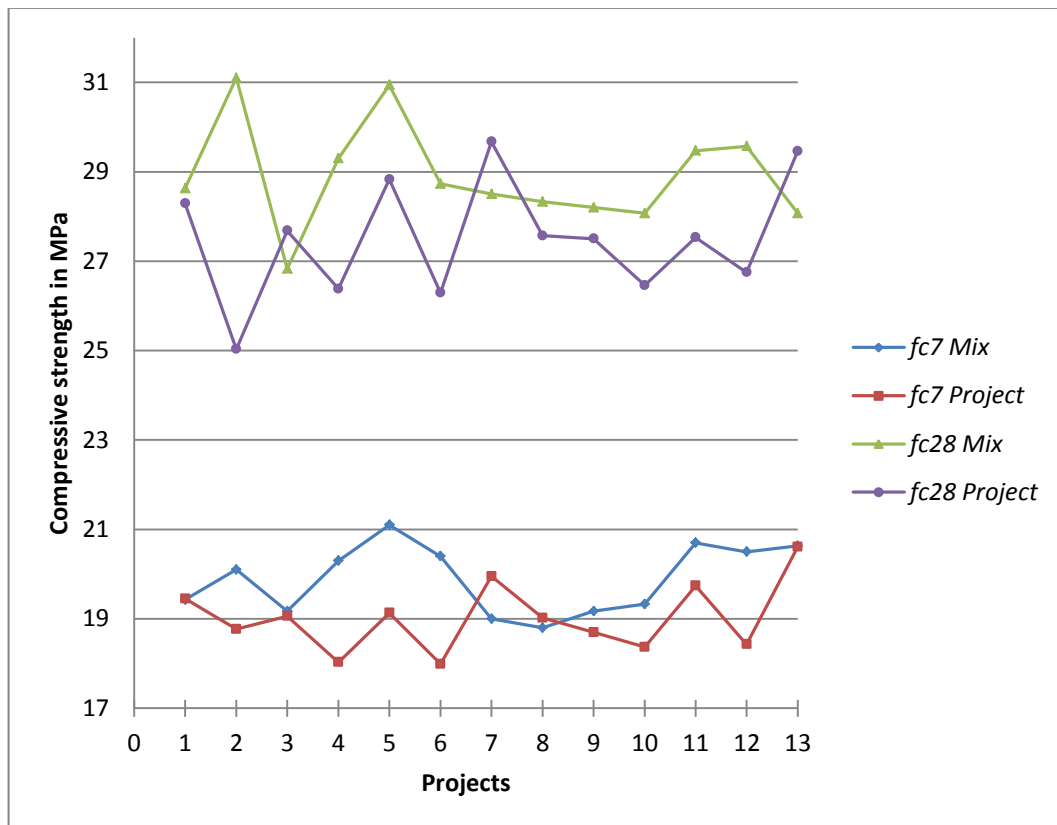


Figure 4. 5 : Comparaison entre les résistances du béton (site/formulation).

La combinaison de la distribution des données à jeune âge caractérisée par un aplatissement positif, ainsi que la non-régularité de la cinétique de développement de la résistance sur site, ont contribué de manière systématique au développement de la zone d'interaction entre les deux distributions. En effet, les résultats obtenus dans cette section permettent de mieux comprendre et de schématiser l'un des phénomènes responsables du problème de mauvaise qualité du béton sur le site, en termes de la distribution des champs de résultats d'écrasement du béton.

Après avoir diagnostiquer les causes probables de l'apparition de la zone d'interaction entre les distributions des données étudiées, il reste alors à comprendre la nature réelle de la forme de distribution des données. En nous basant sur la littérature et en examinant toutes les principales méthodes de test de la normalité de distribution, nous allons dans la section suivante vérifier la conformité des courbes de distribution du modèle par rapport à la distribution Gaussienne.

#### 4.5 Étude de la normalité de la distribution des résultats

L'importance de la distribution normale est indéniable puisqu'il s'agit d'une hypothèse sous-jacente à de nombreuses procédures statistiques. C'est aussi la distribution la plus fréquemment utilisée dans la théorie et les applications statistiques.

En premier lieu, la normalité des données peut être étudiée visuellement en utilisant des outils graphiques tels que l'histogramme de fréquences, boîte à moustache, Q-Q plot, P-P plot etc... Ces méthodes reposent sur un examen visuel subjectif peuvent ne pas fournir la garantie nécessaire pour confirmer si les données suit une loi normale [78].

En raison de l'importance accordée à l'étude de la normalité dans l'analyse des données, en particulier lorsqu'il s'agit de l'analyse de la conformité du béton, nous allons traiter en détail dans cette partie les différentes méthodes d'analyse de la normalité. Cette étude est essentielle car une grande partie de l'inférence statistique repose sur l'hypothèse de la distribution normale.

Les tests de normalité peuvent être divisés en deux catégories : les statistiques descriptives et les méthodes théoriques. Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont considérés comme des statistiques descriptives, car ils fournissent des mesures quantitatives de la forme de la distribution. En revanche, les méthodes basées sur la théorie incluent des tests de normalité tels que les tests SW (Shapiro-Wilk), KS (Kolmogorov-Smirnov) et AD (Anderson-Darling). Ces tests sont conçus pour évaluer si une distribution de données suit ou non une distribution normale théorique [77].

##### 4.5.1 Méthode des indices de forme

###### 4.5.1.1 Asymétrie (skewness)

Les valeurs du coefficient d'asymétrie peuvent être facilement estimées à l'aide du moment normalisé de troisième ordre. Le jugement préalable de la forme de la distribution et la



détermination du sens de déviation par rapport à la loi normale sont basés sur la valeur de cette statistique. Dans cette étude, le coefficient d'asymétrie de Fisher est utilisé pour contrôler le biais des distributions.

De manière générale, si la valeur de cette statistique dépasse les limites de leur erreur type (standard error of skewness « SES »), cela indique que la distribution des données est asymétrique et il est possible de supposer que la distribution est significativement biaisée. En revanche, si le coefficient d'asymétrie se situe dans les limites des fluctuations probables de cette statistique (c'est-à-dire  $\pm$  SES), cela indique une asymétrie significative de la distribution [79]. Cette définition est utilisée pour évaluer la normalité des données du modèle par la méthode des indices de forme.

La figure 4.7 montre la position des valeurs d'asymétrie du modèle par rapport aux limites de fluctuation.

Analytiquement, un simple calcul du pourcentage des valeurs écartant de la fourchette montre que les valeurs positives sont plus répandues dans le modèle. En effet, l'attention est beaucoup plus attribuée aux données à jeune âge dont 31,73% des projets ont montré une déviation positive de cette fourchette (Tableau 4.7).

Pour l'ensemble des données, il a été observé que 45,19 % des valeurs à 7 jours et 36,54 % à 28 jours se trouvaient en dehors de l'intervalle dans les deux sens. Ces taux élevés posent un problème de normalité des données de résistance provenant des sites de construction, en particulier pour les échantillons à jeune âge. Bien que ce problème soit présent, les statisticiens ne prennent généralement pas de décision définitive basée uniquement sur la valeur de cette statistique, car l'asymétrie d'une distribution est difficile à évaluer dans le cas d'échantillons de petite taille. Cela est dû à la fourchette très large du coefficient d'asymétrie qui est trop probable dans ces cas. En revanche, la plage attendue de l'asymétrie diminue à mesure que la taille de l'échantillon augmente [62].

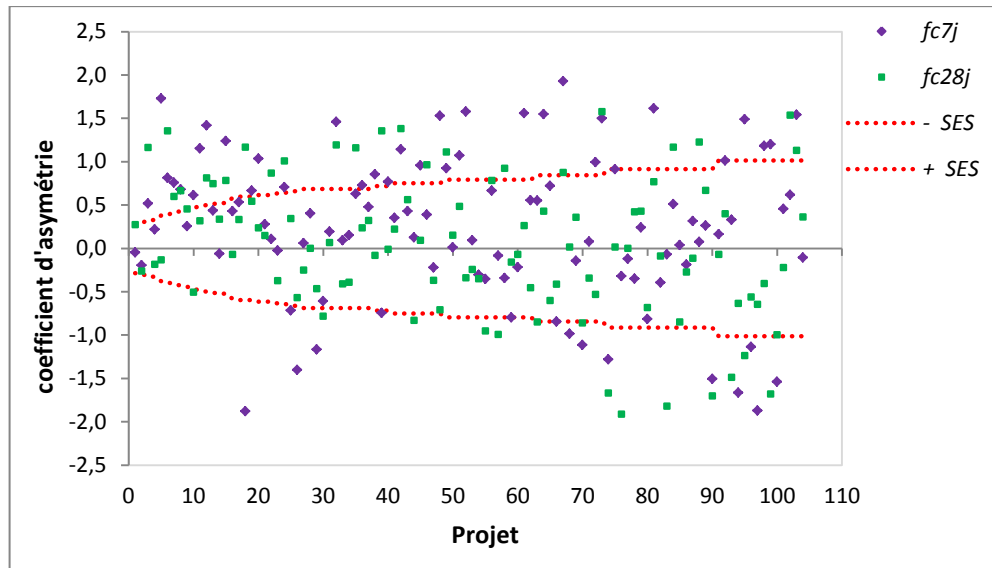


Figure 4. 6 : Répartition des valeurs du coefficient d’asymétrie par rapport aux limites de fluctuation.

Tableau 4. 7 : Distribution des données non-normales (NN) en se basant sur l’indice d’asymétrie.

	< -SES (NN)	> +SES (NN)	TOTAL	Pourcentage (%)		
				< -SES (NN)	> +SES (NN)	TOTAL
<i>fc7j</i>	14	33	47	13,46%	31,73%	45,19%
<i>fc28j</i>	14	24	38	13,46%	23,08%	36,54%

En ce qui concerne la variabilité du coefficient d'asymétrie dans le modèle, les intervalles de variation sont presque similaires à l'âge de 7 et 28 jours (entre -1,88 et 1,93 pour *fc7j*, et de -1,91 à 1,58 pour *fc28j*). De plus, cette variation n'a pas d'impact significatif sur la relation entre les deux statistiques, même si le sens de l'orientation change. En d'autres termes, si l'asymétrie des données à 28 jours est opposée à celle de 7 jours, la relation entre elles est moyennement faible. La même observation est faite lorsqu'on compare le cas où le signe de déviation reste le même (Figure 4.8). Nous pouvons donc conclure que cette liaison ne dépend pas du sens de l'orientation des données, c'est-à-dire qu'elle n'est pas sensible au changement de signe des paramètres.

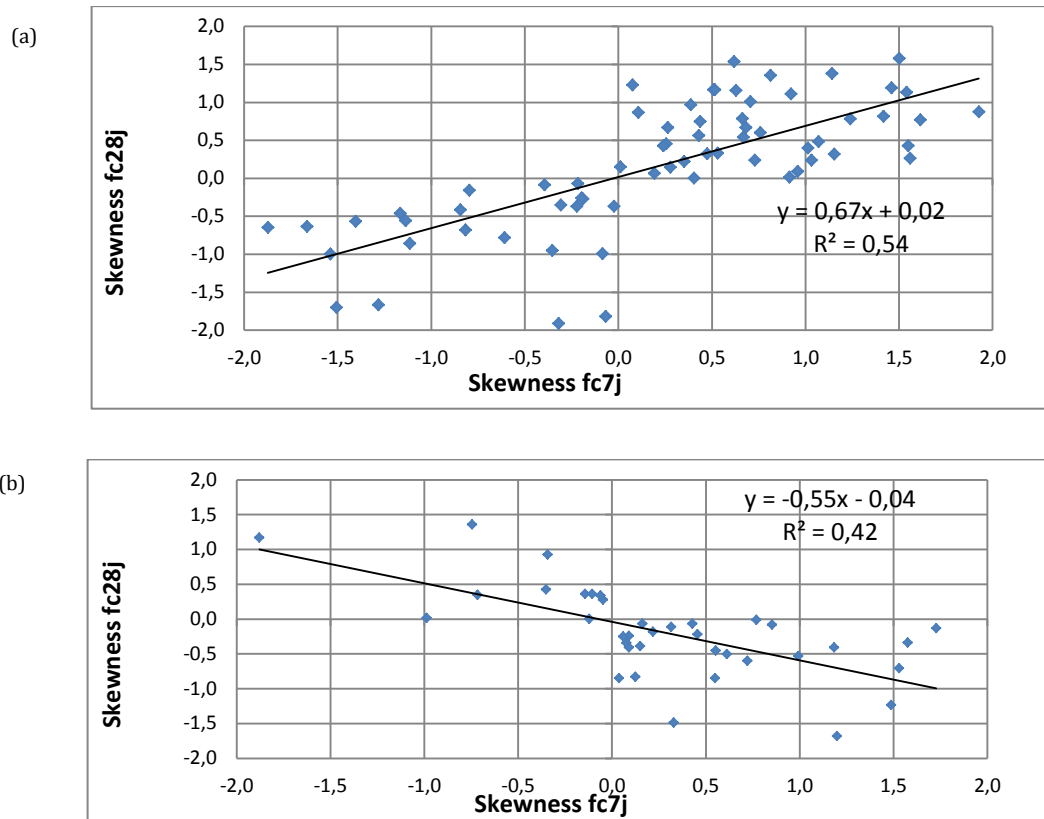


Figure 4. 7 : Corrélation entre les coefficients d'asymétrie

(a) Même signe de paramètre (67 projets)

(b) Changement de signe (37 projets)

#### 4.5.1.2 Aplatissement (Kurstosis)

La plupart des logiciels statistiques utilisent la formule ajustée de Fisher pour calculer la valeur du coefficient d'aplatissement. Cette formule permet de normaliser la valeur du coefficient d'aplatissement d'une distribution par rapport à la valeur typique de la loi normale, afin de détecter facilement les différences.

Pour l'analyse du deuxième paramètre de forme, le kurtosis, nous appliquons le même principe d'évaluation. Dans ce cas et contrairement à l'asymétrie, la déviation par rapport aux limites est presque identique dans les deux sens. Les résultats obtenus révèlent une répartition des valeurs qui démontre une dispersion équivalente de part et d'autre des limites de fluctuation autorisées pour les deux âges étudiées (Figure 4.9). Cela rend plus difficile l'évaluation de l'âge auquel la normalité des données est respectée. De plus, l'estimation de l'intervalle de variance donne les fourchettes suivantes : de -4,85 à 5,37

pour l'âge de 7 jours et de -5,50 à 3,96 pour l'âge de 28 jours, ce qui indique une légère extension de l'intervalle de variation à l'âge de 7 jours par rapport à celui de 28 jours.

Sur le plan statistique, et de manière similaire au coefficient d'asymétrie, une valeur de Kurtosis trop grande ou trop petite indique une non-normalité de la distribution. L'interprétation de ce paramètre en statistique prend en compte deux composantes : le pic et les queues. Un coefficient d'aplatissement positif indique un excès dans la queue, au pic, ou dans les deux, tandis qu'un Kurtosis négatif indique une légèreté dans la queue, au pic, ou dans les deux.

Contrairement au coefficient d'asymétrie, la corrélation entre les coefficients d'aplatissement dépend nécessairement du respect du signe du paramètre (Figure 4.10). La puissance de corrélation est beaucoup plus importante lorsque le signe du paramètre ne change pas. Lorsque ce signe change, c'est-à-dire, il passe du positif au négatif ou inversement, on remarque que la liaison perd de sa puissance.

Bien que le coefficient d'aplatissement soit l'un des indicateurs permettant de décrire la forme d'une distribution, son utilisation seule pour tirer des conclusions sur les variations des résultats est insuffisante, car le Kurtosis représente un mouvement de masse qui n'affecte pas la variance [80].

En d'autres termes, le coefficient d'aplatissement reflète la forme d'une distribution en dehors de la variance, et il ne peut pas seul confirmer de manière fiable une décision basée uniquement sur sa valeur estimée.

En statistique, il existe une limitation significative liée à l'utilisation de la valeur de kurtosis pour définir une distribution spécifique. Les statisticiens ont souligné que l'inclusion de la valeur de kurtosis dans la définition d'une distribution peut conduire à des hypothèses erronées concernant sa véritable nature [76].

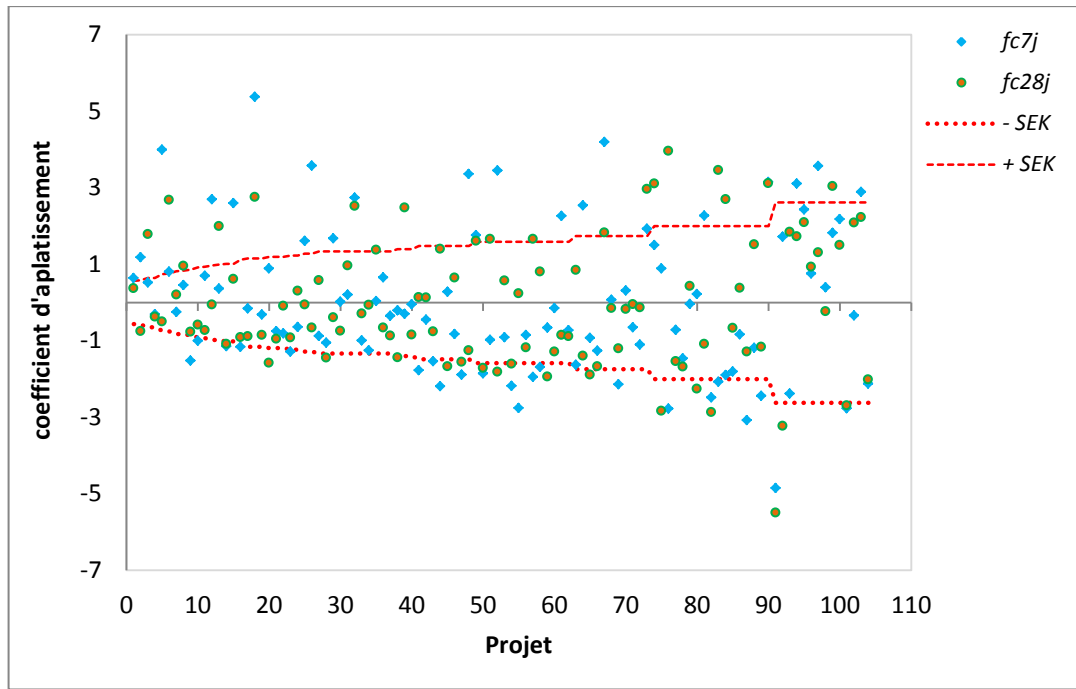


Figure 4. 8 : Répartition des valeurs du coefficient d’aplatissement par rapport aux limites de fluctuation.

Tableau 4. 8 : Distribution des données non-normal (NN) en se basant sur l’indice d’aplatissement.

	< -SES (NN)	> +SES (NN)	TOTAL	Pourcentage (%)		
				< -SES (NN)	> +SES (NN)	TOTAL
<i>fc7j</i>	22	23	45	21,15%	22,12%	43,27%
<i>fc28j</i>	20	19	39	19,23%	18,27%	37,50%

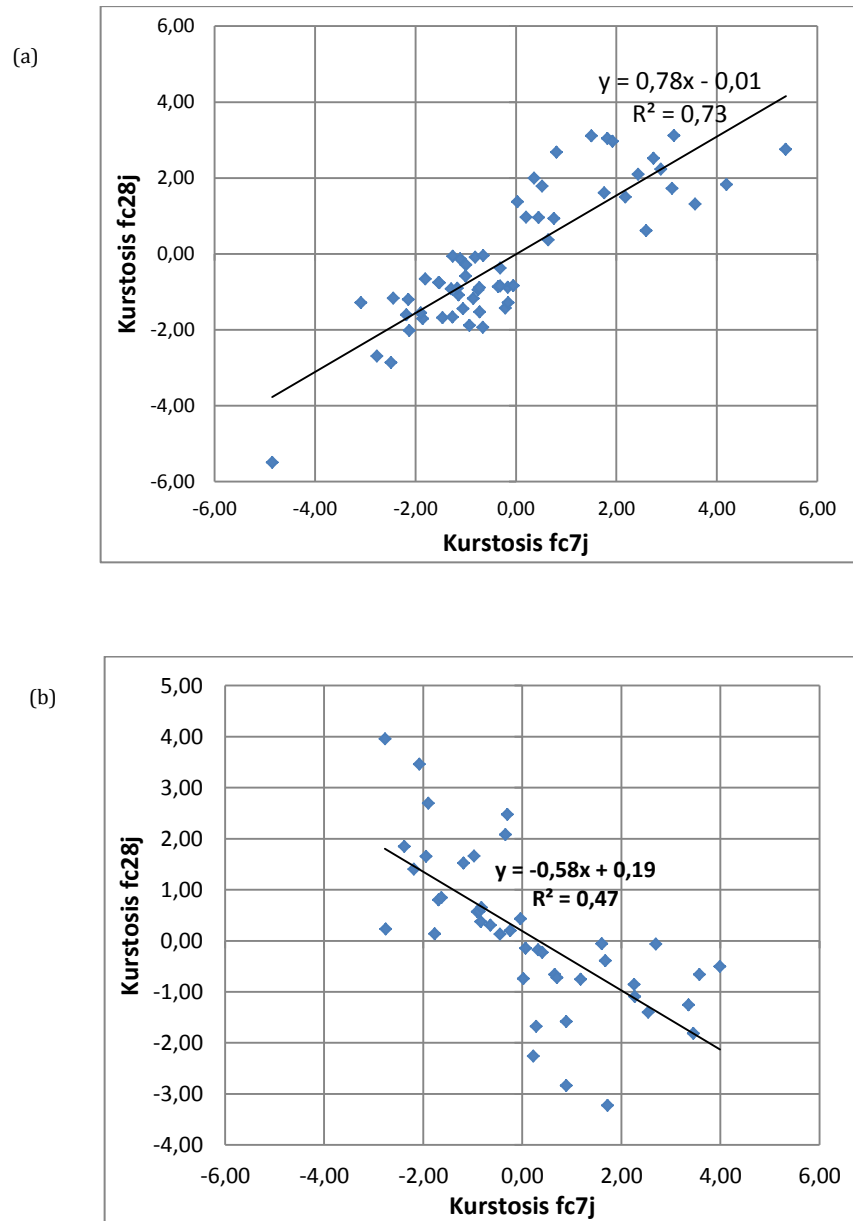


Figure 4. 9: Corrélation entre les coefficients d'aplatissement

- (a) Même signe de paramètre (60 projets)      (b) Changement de signe (44 projets)

La comparaison des indices de forme du modèle, effectuée de manière séparative, nous a impliqués qu'il existe un problème de normalité des données, notamment les données à jeune âge. De plus, l'analyse a montré que la corrélation entre les coefficients d'aplatissement est beaucoup plus sensible au changement de signe du paramètre que le coefficient d'asymétrie. Cependant, l'évaluation de ces deux statistiques séparément n'a pas permis de parvenir à des résultats concrets concernant la nature précise de la distribution des données, car nous ne connaissons pas encore la relation entre les deux statistique. Cette méthode peut être utilisée lorsque des décisions rapides doivent être

prises concernant la normalité de la distribution. Dans certains cas où les données sont volumineuses, les résultats de cette méthode peuvent être considérés comme fiables, mais il est toujours recommandé de vérifier la normalité de la distribution en utilisant d'autres méthodes statistiques plus précises et exhaustives.

Afin d'appréhender la normalité des données du modèle sous un autre angle, une approche simultanée de l'étude des deux statistiques de forme sera adoptée, en s'appuyant sur les relations établies dans la littérature. Cette démarche se justifie par les limitations inhérentes de chaque statistique dans l'évaluation de la normalité de la distribution, comme discuté précédemment. En combinant les informations fournies par le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement, l'objectif est d'obtenir une vision plus complète de la forme de la distribution des données du modèle.

#### 4.5.1.3 Relation entre Skewness et Kurtosis

La précision des tests d'asymétrie est largement influencée par la kurtosis de la distribution sous-jacente, ce qui signifie que l'asymétrie non normale ne peut pas être considérée comme distincte de la kurtosis non normale [62]. Par conséquent, l'analyse de la relation entre les indicateurs de forme doit être une étape essentielle dans la classification des distributions de données d'une population.

Dans une étude récente, Cristelli et al [81] ont examiné la relation entre l'asymétrie et la kurtosis pour une distribution non gaussienne. Les auteurs ont conclu que, pour une distribution uni-modale, cette relation peut être exprimée par la formule suivante :

$$K = S^2 + \frac{189}{125} \dots\dots\dots\text{équation (4.1)}$$

En plus de la relation présentée par l'équation 4.1, les statisticiens ont également suggéré qu'il était possible d'envisager une autre forme de relation entre les deux paramètres de forme, qui peut être décrite par une loi de puissance d'ordre 4/3. Dans ce cas, l'expression de la relation est la suivante :

$$K \approx N^{\frac{1}{3}} \cdot S^{\frac{4}{3}} \dots\dots\dots\text{équation (4.2)}$$

avec N : la taille de l'échantillon.

Les statisticiens justifient l'équation 4.2 en expliquant qu'un événement extrême dans l'ensemble de données peut avoir une influence significative sur la somme des écarts, et que la contribution des autres points peut être considérée comme négligeable. Cela peut être le cas lorsque la distribution présente une forte kurtosis, c'est-à-dire une concentration importante des données autour de la moyenne. Dans de telles situations, l'asymétrie peut être dominée par la kurtosis, et la formule de l'équation 4.2 peut fournir une approximation raisonnable de la relation entre ces deux paramètres de forme.

La figure 4.11 illustre la répartition des données du modèle par rapport aux courbes des équations 4.1 et 4.2. Il est important de souligner que les valeurs présentées dans cette section correspondent à celles calculées à partir de la formule de Pearson (valeurs non ajustées).

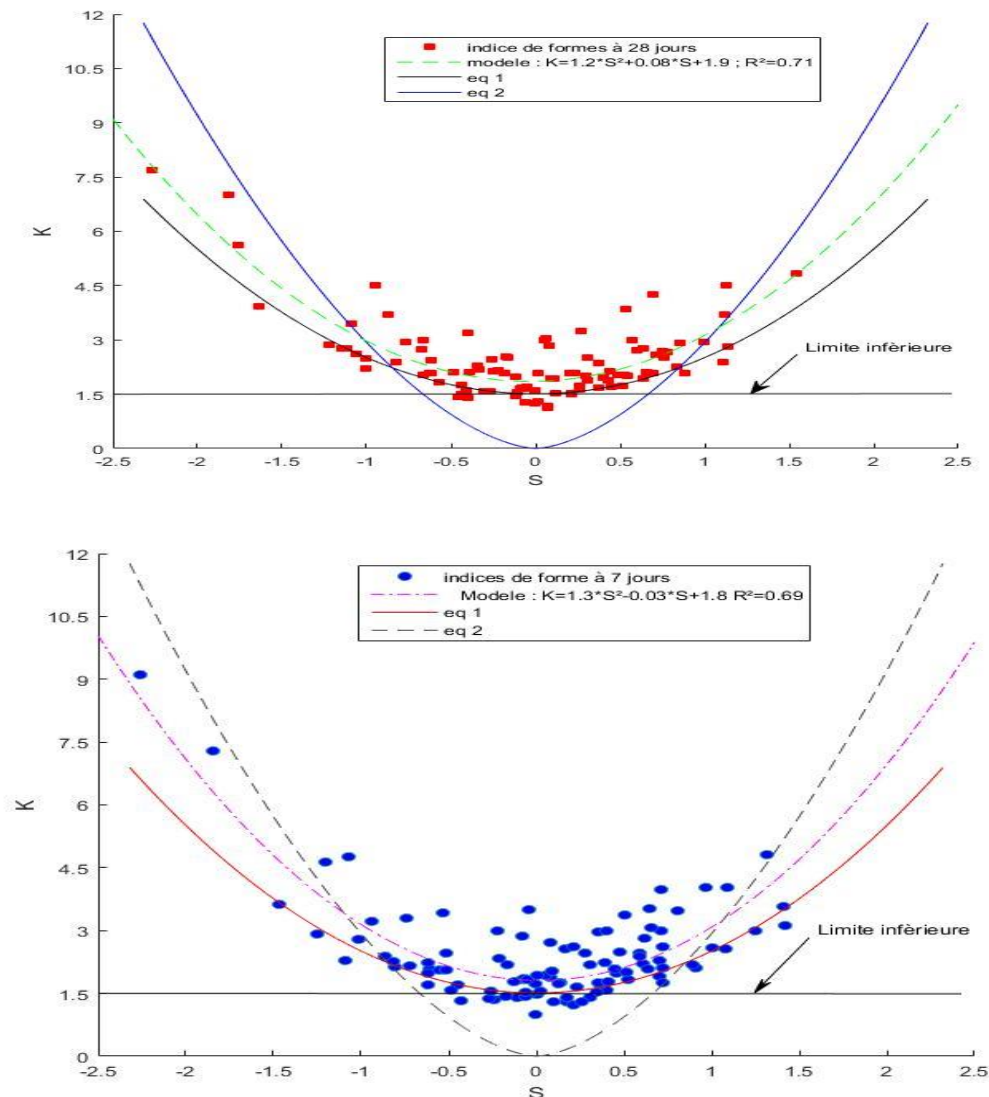


Figure 4. 10 : Aplatissement en fonction de l'asymétrie à 7 et 28 jours.



Avant de discuter la position des points par rapport aux équations 1 et 2, il convient de souligner que les valeurs de  $S = 0$  et  $K = 3$  sont des valeurs caractéristiques d'une distribution gaussienne infinie. Le terme constant de l'équation 4.1 représente la limite inférieure pour la différence  $(K - S^2)$ .

Nous pouvons remarquer sur la figure 4.19 que les données de deux âges du béton se rapprochent tous les deux à la fonction de puissance de l'ordre 2 (équation 4.1). Le coefficient de corrélation le plus faible est déduit pour les données à 7 jours. Ceci peut être dû à la domination du kurtosis dans ce cas. Nous remarquons également que les valeurs situées au-dessus de la limite inférieure de l'équation (4.1) sont plus importantes pour les données à jeune âge que pour celles de 28 jours.

En approfondissant notre analyse, nous pouvons constater que les valeurs pour l'âge de 28 jours sont regroupées de manière plus étroite et concentrées autour de la zone caractéristique d'une distribution gaussienne infinie ( $S = 0$  et  $K = 3$ ), tandis que les valeurs pour l'âge de 7 jours s'en éloignent. Ce résultat confirme que la normalité des données à 28 jours semble être mieux respectée, et que les données à cet âge se rapprochent davantage d'une distribution gaussienne que celles pour les données à jeune âge. Cela renforce le résultat précédemment obtenu, suggérant que la normalité des données est préoccupante à jeune âge.

De plus, la relation établie démontre également que la distribution de l'ensemble des données du modèle ne correspond pas à une distribution gaussienne. Cette observation indique que la distribution des données de la population mère, représentée par l'ensemble des projets, ne satisfait pas le critère de normalité. Cette constatation peut être attribuée à la variabilité des résultats observés d'un projet à l'autre, ce facteur étant la principale cause de cette divergence. De plus, cette observation restreint la possibilité d'aboutir à des conclusions solides et basées sur des critères de qualité du béton qui s'appliqueraient à l'ensemble de la population observée. Pour illustrer, envisageons l'évaluation de la conformité du béton produit dans la population entière, en le comparant à un seuil prédéfini de conformité (tel que le pourcentage minimal de résultats en dessous de la valeur requise). Cette tâche devient plus complexe en raison de la non-normalité de la distribution des données, ce qui compromet la fiabilité de l'analyse.

D'un point de vue statistique, lorsqu'une série d'événements extrêmes se produit, impliquant des données provenant des extrémités de la distribution, et qu'ils deviennent

prédominants dans le contexte du champ de résistance d'un projet donné, le point correspondant aux paramètres dans la relation  $K$  vs  $S$  commence à s'éloigner du régime où  $S = 0$  et  $K = 3$ . Ceci est particulièrement observé pour les champs de résistance à 7 jours, car ils présentent des coefficients d'aplatissement positifs, indiquant que les queues sont plus lourdes en présence de valeurs extrêmes [82]. L'interprétation du coefficient d'aplatissement est focalisée sur les extrémités de la queue de la distribution, soit en signalant la présence d'outliers (dans le cas du coefficient d'aplatissement d'un échantillon), soit en indiquant une tendance à générer des outliers (pour le coefficient d'aplatissement d'une distribution de probabilité) [83].

Cependant, une question se pose désormais : est-ce que le problème de non-normalité à jeune âge aura une incidence sur la normalité des données à long terme ? Et si c'est le cas, quels sont les paramètres qui influencent cette dépendance ?

Établir un lien entre l'asymétrie et l'aplatissement peut constituer une approche pour évaluer la distribution des données. Nous remarquons que les résultats individuels de cette analyse montrent des écarts minimes par rapport aux valeurs de référence, ce qui suggère une possible adéquation des données à la loi normale, en particulier à l'âge de 28 jours.

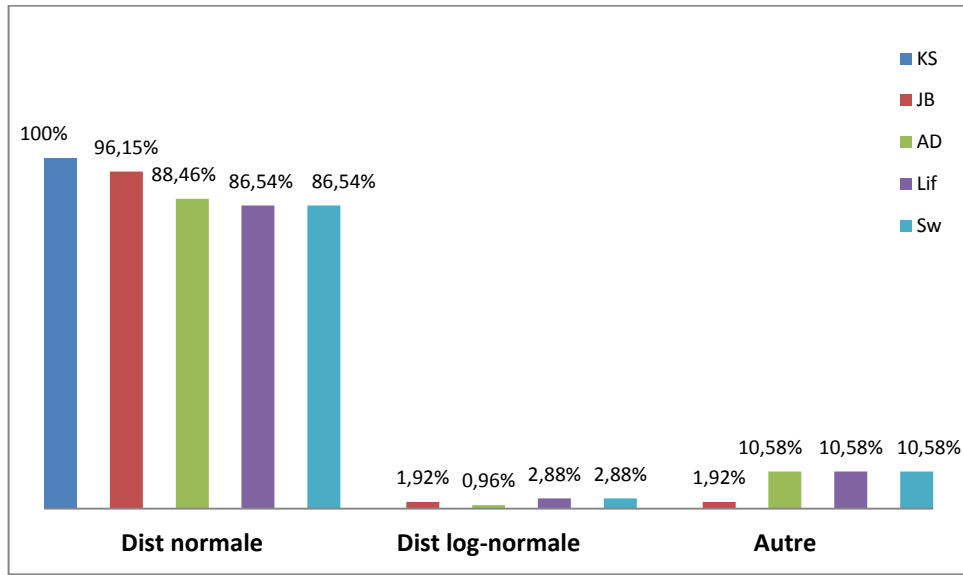
Dans de telles situations, pour obtenir un niveau accru de précision, il est judicieux de recourir à des tests d'adéquation. Ces tests sont essentiels lorsque les méthodes statistiques conventionnelles ne permettent pas d'évaluer de manière précise la normalité des données. Cette limitation découle généralement de la nature spécifique des tests classiques et de la taille de l'échantillon utilisé dans une étude.

#### 4.6 Tests d'adéquation de la normalité

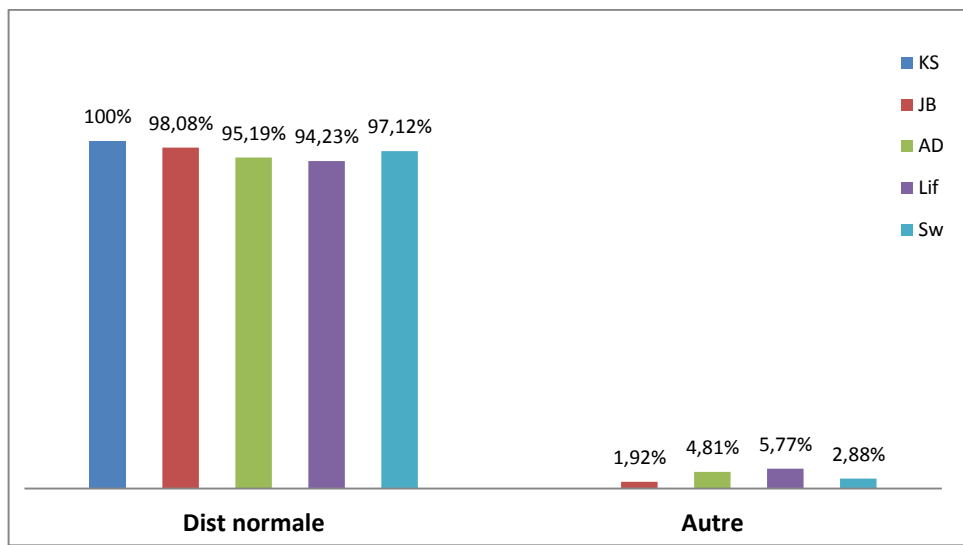
Les tests de normalité revêtent une importance particulière dans les études statistiques. Il est impératif, dans une démarche rigoureuse, de vérifier au préalable la compatibilité des distributions avec l'hypothèse de normalité avant de procéder aux tests statistiques proprement dits, surtout lorsqu'il s'agit d'échantillons de petite taille. C'est pourquoi les tests de normalité, également appelés tests d'adéquation à la loi normale, sont des outils d'évaluation très objectifs, offrant la possibilité de vérifier avec précision la normalité des données.

En effet, pour l'ensemble du modèle, la normalité des données est évaluée par cinq tests de normalité à savoir : le test du Kolmogorov-Smirnov (KS), Jarque-Bera (JB), Anderson-

Darling (AD), Lilliefors (Lif), et Shapiro-Wilk (Sw). Tous les calculs ont été déterminés en utilisant les logiciels XLSAT et SPSS avec un seuil de signification  $\alpha$  égal à 5%.



(a) données à 7 jours



(b) données à 28 jours

Figure 4. 11 : Pourcentage des projets obéissent à la distribution normale pour l'ensemble des tests.

L'analyse des cinq tests de normalité révèle une variabilité dans les pourcentages de projets satisfaisant aux critères de normalité, comme présenté dans la figure 4.12. Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) indique que la majorité des observations suivent une distribution normale à la fois à 7 jours et à 28 jours, suivi par le test de Jarque-Bera (JB).

Cependant, ces résultats ne sont pas cohérents avec les trois autres tests, qui ont démontré une variation presque similaire entre eux.

Les tests de Lilliefors et de Shapiro-Wilk appliqués aux données à 7 jours ont révélé le pourcentage le plus bas de projets conformes à la loi normale, avec une non-normalité observée dans 13,46% des projets. En revanche, pour les données à l'âge de 28 jours, les trois tests ont montré un niveau de performance presque similaire. Ces résultats réaffirment la conclusion précédente selon laquelle la non-conformité à la distribution normale des données se manifeste principalement à un jeune âge.

En effet, tous les tests conduisent à la même conclusion, à savoir la compatibilité avec la loi normale, mais à des degrés différents, ce qui peut être visualisé à travers l'évolution de la valeur de la statistique p-valeur (Figure 4.13). Il est clairement observé que les tests KS et JB convergent rapidement vers l'acceptation de l'hypothèse de normalité des données par rapport aux autres tests. Cette observation peut être expliquée par la spécificité et la puissance de chaque test. Nous rappelons qu'un test est considéré comme puissant lorsqu'il a une forte probabilité de rejeter l'hypothèse nulle de normalité lorsque l'échantillon étudié provient d'une distribution non normale.

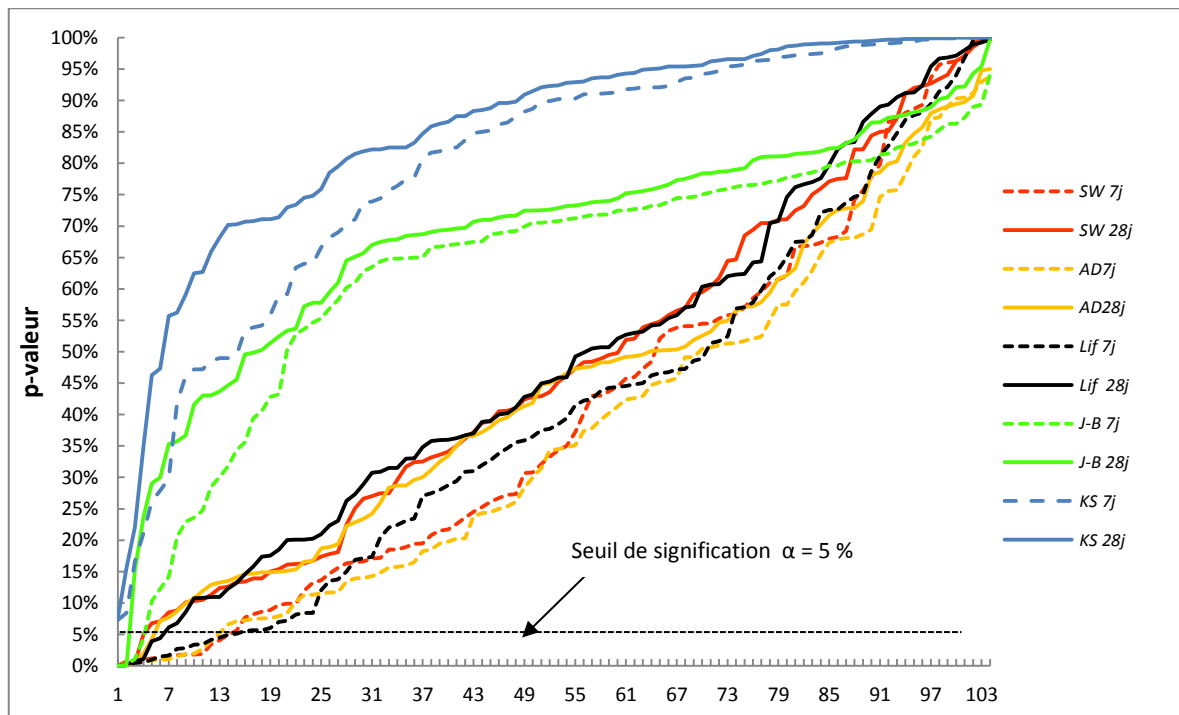


Figure 4. 12 : Evolution des valeurs de la statistique p-valeur des tests de normalité du modèle.

La différence observée dans le pourcentage de projets dont les distributions obéissent à la loi normale est associée à la puissance statistique de chaque test, ce qui peut être interprété de la manière suivante :

- Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS-test) est un test non paramétrique qui compare les fonctions de répartition empirique et théorique. Il utilise des intervalles pour évaluer la normalité. Cependant, la puissance statistique de ce test est influencée par la définition de l'intervalle. Si l'intervalle est trop large, la puissance statistique peut être réduite en raison d'un nombre limité d'intervalles. De même, si l'intervalle est trop étroit, les calculs deviennent trop complexes en raison d'un grand nombre d'intervalles [84]. De plus, ce test a tendance à être plus sensible au centre de la distribution qu'à la queue, ce qui peut entraîner une perte d'informations en ne tenant compte que de la plus grande différence entre la distribution cumulative de l'échantillon et une distribution cumulative normale [85].
- Pour le test de Jarque-Bera (JB-test), la puissance du test dépend principalement de la forme de la distribution et de la taille de l'échantillon. Ce test examine l'asymétrie et l'aplatissement de l'échantillon. Le JB-test présente de moins bonnes performances pour les petits échantillons, car il est bien connu que les distributions asymétriques sont souvent associées à des queues épaisses dans de petits échantillons [86]. En revanche, sa puissance est confirmée pour les distributions symétriques à longues queues, où elle peut être comparable à celle du test SW [87].
- Cependant, les autres tests tels que SW (Shapiro-Wilk), LIF (Lilliefors) et AD (Anderson-Darling) sont moins susceptibles à accepter l'hypothèse de normalité lorsque la distribution présente une forme symétrique à longues queues. Leur puissance est confirmée pour les distributions symétriques à queues courtes, c'est-à-dire avec de faibles valeurs d'aplatissement [87]. De plus, des études ont démontré que le test SW est le plus puissant parmi tous les tests lorsque la distribution des données est asymétrique, et ce, même dans le cas d'une distribution non normale symétrique, indépendamment de la valeur du coefficient d'aplatissement [88] et [89].

À la lumière de cette analyse de l'adéquation des données à la normalité en utilisant les tests d'adéquation, nous pouvons conclure que la violation de la normalité des données est plus prononcée à jeune âge. La performance des tests est étroitement liée à la forme de distribution des données et à la taille de l'échantillon. Le choix de la méthode d'analyse à utiliser dépend de ces deux facteurs.

Dans les cas où l'hypothèse de normalité des données est clairement violée, les méthodes d'analyse non paramétriques sont généralement préférables. L'utilisation de ces méthodes réduit le risque de tirer des conclusions erronées, car elles ne font aucune hypothèse sur la population, même si elles peuvent avoir une puissance statistique plus faible. Cependant, il convient de noter que dans les situations où les échantillons sont de petite taille, ces méthodes peuvent avoir une puissance statistique inférieure par rapport aux techniques paramétriques. Dans certains cas, les méthodes paramétriques peuvent conduire à des résultats significatifs, tandis que les méthodes non paramétriques peuvent être plus appropriées dans d'autres cas. Lorsque les méthodes paramétriques sont utilisées, il est essentiel que toutes les hypothèses formulées soient satisfaites. Si ce n'est pas le cas, il est préférable d'opter pour des méthodes non paramétriques, car elles sont toujours valables, mais pas toujours efficaces. En revanche, les méthodes paramétriques sont toujours efficaces, mais pas toujours valables [84].

#### 4.6.1 L'impact de la taille de l'échantillonnage sur la normalité des résultats

La taille de l'échantillon est un facteur déterminant pour les tests de normalité. Ces tests sont en effet sensibles à la taille de l'échantillon. Il est fréquent de constater une compatibilité avec la loi normale pour de petits effectifs, tandis que l'incompatibilité avec cette loi est souvent établie pour de grands effectifs, même lorsque les écarts de distribution sont minimes. Il est donc essentiel de prendre en compte attentivement la taille de l'échantillon lors de l'évaluation de la normalité des données.

La figure 4.14 montre l'évolution de la statistique p-valeur en fonction de la taille de l'échantillonnage. On peut observer que la probabilité d'accepter l'hypothèse de normalité diminue à mesure que la taille de l'échantillon augmente, tant pour les données à jeune âge que pour celles à un âge plus avancé. De plus, il est remarquable que la puissance de corrélation soit plus marquée à jeune âge.

En interprétant cette influence d'un point de vue statistique, il peut être affirmé que, pour les échantillons de petite taille, les tests de normalité ont un faible pouvoir de rejet de l'hypothèse nulle, ce qui implique que les petits échantillons passent souvent le test de normalité. En revanche, pour les échantillons de grande taille, des résultats significatifs peuvent être obtenus même en présence d'une légère déviation par rapport à la normalité [78]. Ce raisonnement est lié à l'ampleur des erreurs de type du test. Lorsque la taille de l'échantillon augmente, les erreurs de type diminuent, ce qui rend les tests sous l'hypothèse nulle de distribution normale plus susceptibles d'être rejetés dans les grands échantillons, où la distribution peut différer considérablement de la normalité. En revanche, dans les petits échantillons, l'hypothèse nulle a tendance à être acceptée plus facilement que nécessaire. C'est pourquoi les statisticiens exigent des valeurs critiques différentes pour le rejet de l'hypothèse nulle en fonction de la taille de l'échantillon [90].

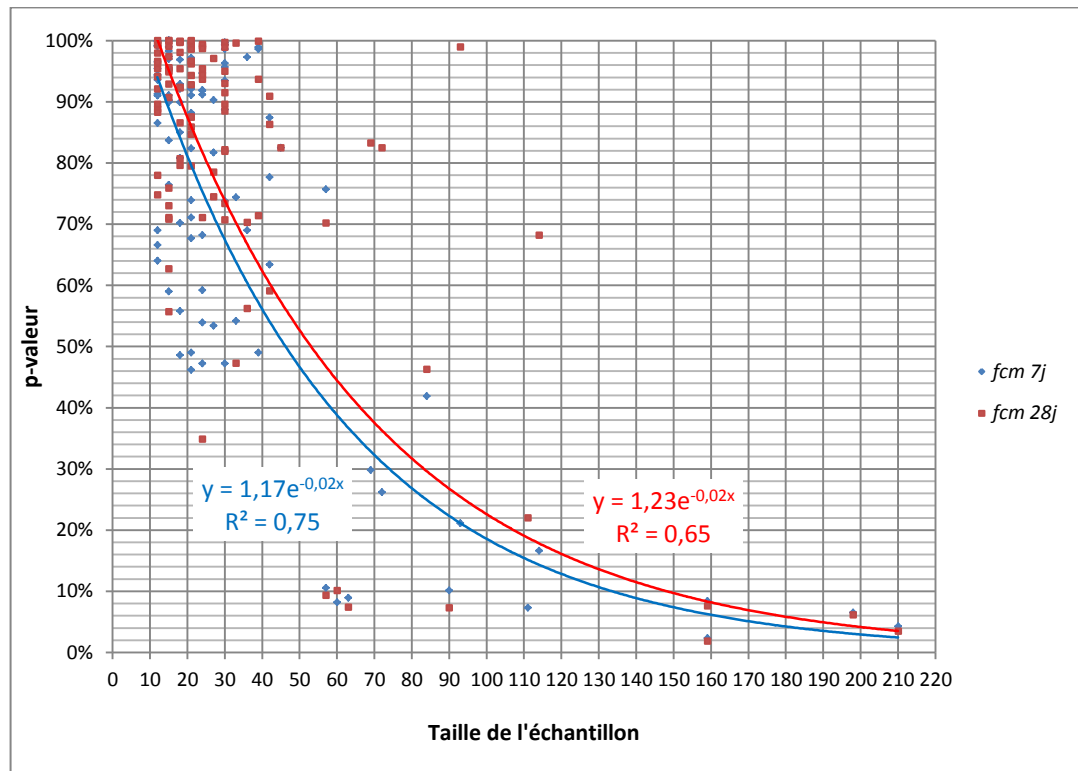


Figure 4. 13 : L'influence de la taille d'échantillon sur la normalité des données.

#### 4.6.2 Comparaison de la normalité des données pour les deux âges

Précédemment, lors de l'analyse de la normalité à l'aide des indices de forme, la question de l'influence de l'état de normalité des données à jeune âge sur celui à long terme a été abordée. Afin de répondre à cette question, une comparaison entre les valeurs de la p-valeur du test de normalité a été effectuée entre les deux âges du béton (Figure 4.15).

Les résultats de cette comparaison ont révélé que 55,77 % des projets présentaient une valeur de p-valeur nettement plus élevée à 28 jours par rapport à celle à 7 jours. En revanche, 41,35 % des projets ont montré l'inverse, et seulement 2,88 % des projets avaient des valeurs de p-valeur identiques aux deux âges. Ces résultats confirment davantage l'observation précédente concernant l'instabilité des formes de distribution du modèle.

Étant donné que la forme de distribution des données est influencée par des statistiques clés telles que la moyenne et l'écart type, toute variation de ces valeurs peut avoir un impact sur la distribution. Dans ce contexte, nous allons examiner la relation entre la p-valeur du test de normalité et le coefficient de variation des données. Pour ce faire, nous avons calculé deux facteurs supplémentaires représentant la différence de p-valeur et la différence de coefficient de variation pour les deux variables respectives, à savoir :

$$\Delta \text{ p-valeur} = (\text{p-valeur } 28j - \text{p-valeur } 7j).$$

$$\Delta \text{ Cov} = (\text{Cov } 28j - \text{Cov } 7j).$$

La figure 4.16 illustre la variation de la différence de p-valeur ( $\Delta$ p-valeur) en fonction de la différence de coefficient de variation ( $\Delta$ Cov) pour l'ensemble des données du modèle. On remarque que lorsque la différence de coefficient de variation ( $\Delta$ Cov) est proche de zéro, ce qui se produit lorsque les valeurs de coefficient de variation sont équivalentes, l' $\Delta$ p-valeur tend également à se rapprocher de zéro. Cette constatation implique que lorsque le coefficient de variation ne présente pas de variations significatives, la probabilité d'accepter la normalité demeure similaire pour les deux tranches d'âge du béton.

Au-delà de cette zone, et lorsque  $\Delta$ Cov est positive, ce qui indique que le coefficient de variation à 28 jours est supérieur à celui à 7 jours, la différence de p-valeur prend des valeurs négatives, ce qui suggère une probabilité plus élevée d'accepter la normalité à 7 jours par rapport à 28 jours. En revanche, lorsque  $\Delta$ Cov est négative, ce qui signifie que le coefficient de variation diminue en passant de 7 à 28 jours, la p-valeur augmente dans le même sens, indiquant une probabilité accrue d'accepter la normalité à 28 jours par rapport à 7 jours.



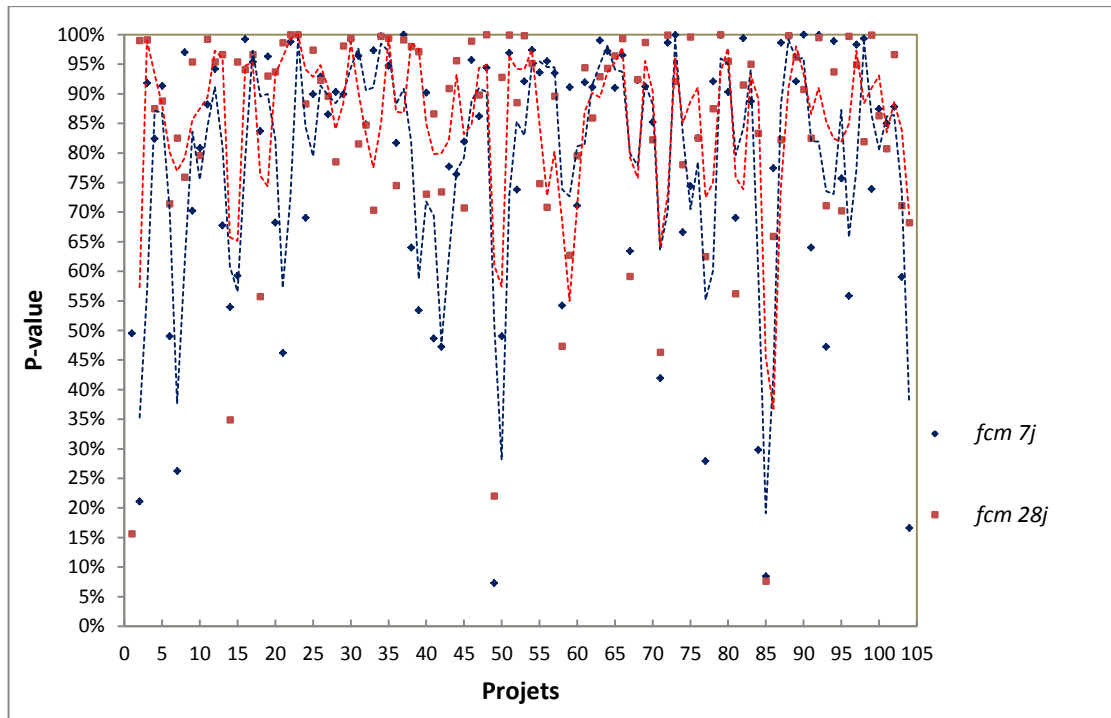


Figure 4. 14 : Comparaison des valeurs de p-valeur entre les deux âges du béton.

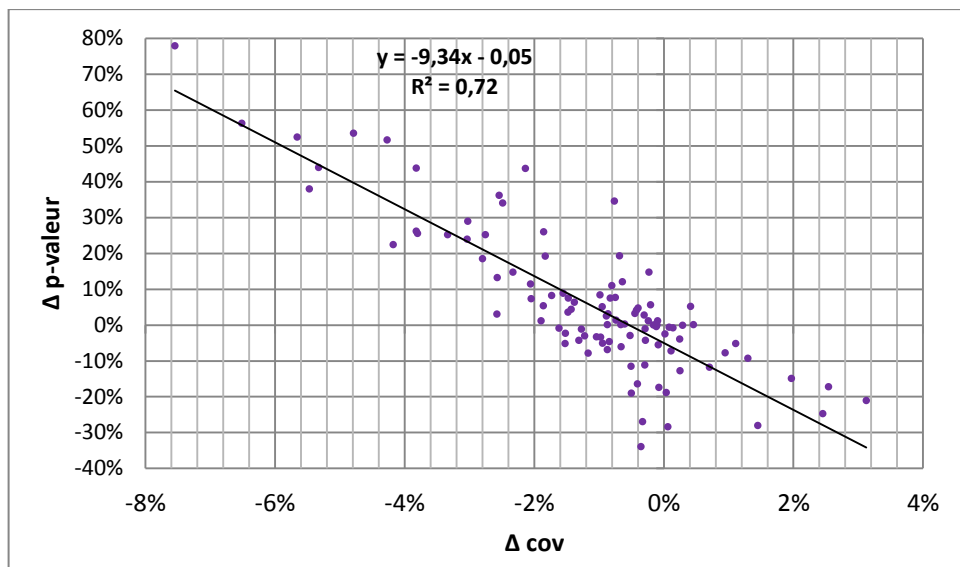


Figure 4. 15 : Influence du coefficient de variation sur la normalité des données.

#### 4.7 Effet de l'association statistique sur la cinétique de la résistance à la compression

La prédiction de la résistance à la compression du béton à un âge avancé peut être réalisée à partir des résultats des tests effectués à un âge précoce. Certaines études récentes considèrent que le résultat de la résistance aux premiers jours constitue un indice important

pour prévoir la résistance du béton [91]. Plusieurs techniques sont employées pour prédire cette caractéristique, utilisant soit des modèles mathématiques conventionnels fondés sur l'analyse de régression, soit des techniques plus avancées telles que les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes génétiques et la logique floue [92]. Le tableau 4.9 résume quelques modèles mathématiques utilisés dans la prédiction de la résistance à la compression du béton.

Tableau 4. 9 : Formule mathématique de la prédiction de la résistance à la compression.

Modèle	Formule mathématique
ACI [93]	$f_{ct} = f_{c28} \left( \frac{t}{4 + 0.85t} \right)$
CEB-FIP [94]	$f_{ct} = f_{c28} \exp \left[ 0.25 \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right]$
BAEL [95]	$f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f_{c28}$
Slater	$f_{c28} = f_{c7} + 2.49\sqrt{f_{c7}}$

L'analyse de la dépendance entre les deux vecteurs révèle une corrélation moyennement acceptable, caractérisée par une pente d'inclinaison de la droite de régression inférieure à celle des autres modèles (Figure 4.17). De plus, nous avons observé que la position de la droite du modèle dépend de la valeur précoce de la résistance. Si cette valeur est inférieure à 19,60 MPa, la droite se situe entre le modèle de BAEL et celui de l'ACI. En revanche, si la valeur dépasse cette limite, la droite se positionne entre le modèle de l'ACI et celui de CEB-FIP. Le modèle de Slater présente la plus grande déviation par rapport aux données du modèle étudié.

Cette constatation est principalement attribuée aux formules de prédiction de chaque modèle, qui introduisent des distinctions entre les valeurs calculées. Par exemple, la formule du modèle de Slater surestime considérablement les valeurs de  $f_c$  28j, comme démontré par H.A. Kasani [94]. Toutefois, afin de déterminer s'il existe une différence significative entre les données du modèle et celles des autres formules, nous avons effectué un test d'égalité des moyennes de  $f_c$  28j pour des échantillons appariés ou dépendants, au seuil de signification  $\alpha=5\%$  (Tableau 4.10). Toutes les valeurs de  $f_c$  28j ont été calculées à partir des résistances  $f_c$  7j en utilisant les formules précédentes.

L'analyse du tableau 4.10 révèle que la moyenne des données du modèle est presque identique à celle donnée par le modèle de l'ACI, et proche de celles des modèles BAEL et CEB-FIP. De plus, nous constatons que toutes les paires étudiées rejettent l'hypothèse de l'égalité des moyennes, à l'exception de la paire "fc28 projet - modèle ACI", dont la p-valeur (=0,362) est nettement supérieure à 5%. Cela signifie que la formule de prédiction de l'ACI est la plus appropriée pour le modèle de l'étude, avec un intervalle de confiance de 95%.

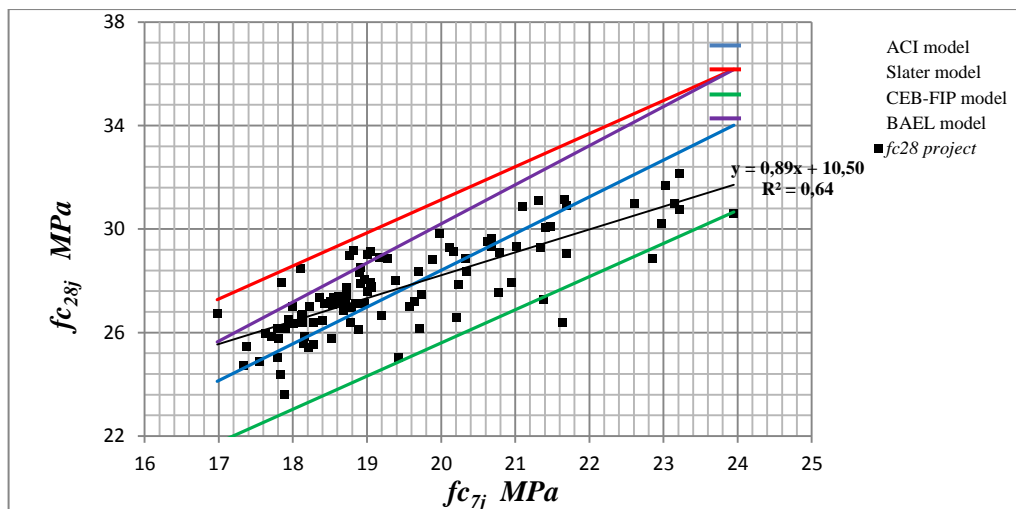


Figure 4. 16 : Corrélation entre les résistances  $fc_{7j}$  et  $fc_{28j}$  du modèle

Tableau 4. 10 : Statistique descriptive et T-test d'échantillons appariés de  $fc_{28j}$ .

Statistiques pour échantillons appariés		Moyenne	N	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Paire 1	fc28j project	27,7149	104	1,74901	,17150
	ACI model	27,5940	104	2,23915	,21957
Paire 2	fc28 j project	27,7149	104	1,74901	,17150
	Slater model	30,4002	104	2,01444	,19753
Paire 3	fc28j project	27,7149	104	1,74901	,17150
	CEB-FIP model	24,8735	104	2,01839	,19792
Paire 4	fc28j project	27,7149	104	1,74901	,17150
	BAEL model	29,3429	104	2,38106	,23348

## Test échantillons appariés

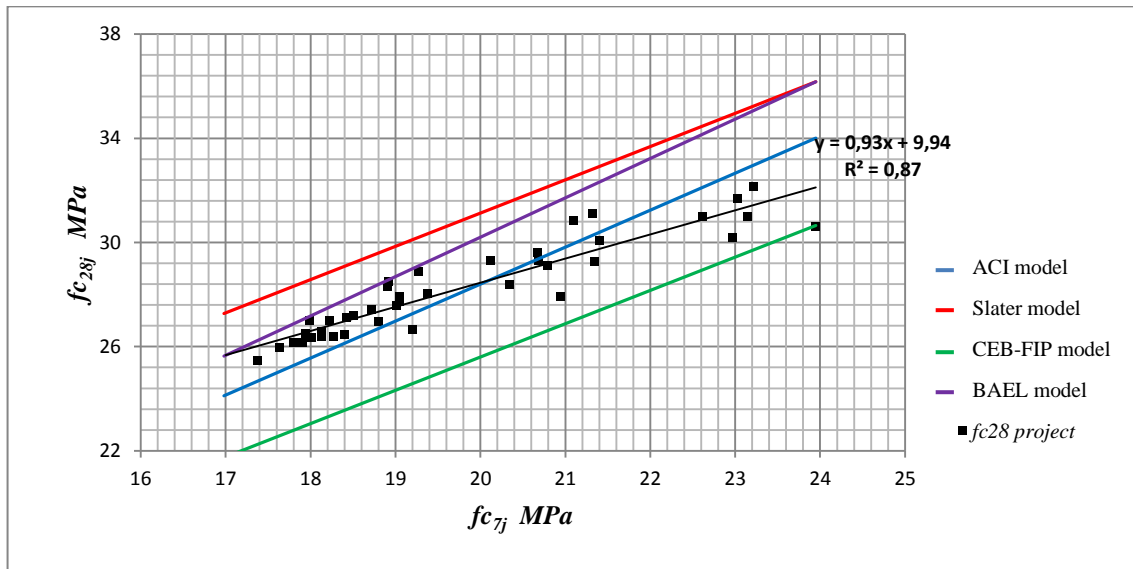
	Différences appariées					t	ddl	Sig. (bilatérale)
	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence				
				Inférieure	Supérieure			
Paire 1 <i>fc28</i> projet - ACI model	,12094	1,34791	0,13217	-,14120	,38307	0,915	103	,362
Paire 2 <i>fc28</i> projet - Slater model	-2,68528	1,21896	0,11953	-2,92233	-2,44822	-22,465	103	0,000
Paire 3 <i>fc28</i> projet - CEB-FIP model	2,84147	1,22219	0,11985	2,60379	3,07916	23,709	103	0,000
Paire 4 <i>fc28</i> projet - BAEL model	-1,62798	1,44085	0,14129	-1,90819	-1,34777	-11,522	103	0,000

Il est évident que la puissance de la corrélation entre les deux vecteurs dépend du type d'association linéaire qui les lie. Afin d'illustrer l'importance de cette association sur la puissance de la corrélation, nous avons effectué un test bilatéral d'association de Spearman avec un niveau de confiance de 95%. Nous avons choisi un test bilatéral plutôt qu'unilatéral, étant donné que nous ne connaissons pas précisément le sens de la corrélation en raison du caractère aléatoire des variables. Le test de Spearman permet de déterminer s'il existe une association significative entre les deux variables étudiées, même si la condition de normalité des données n'est pas respectée.

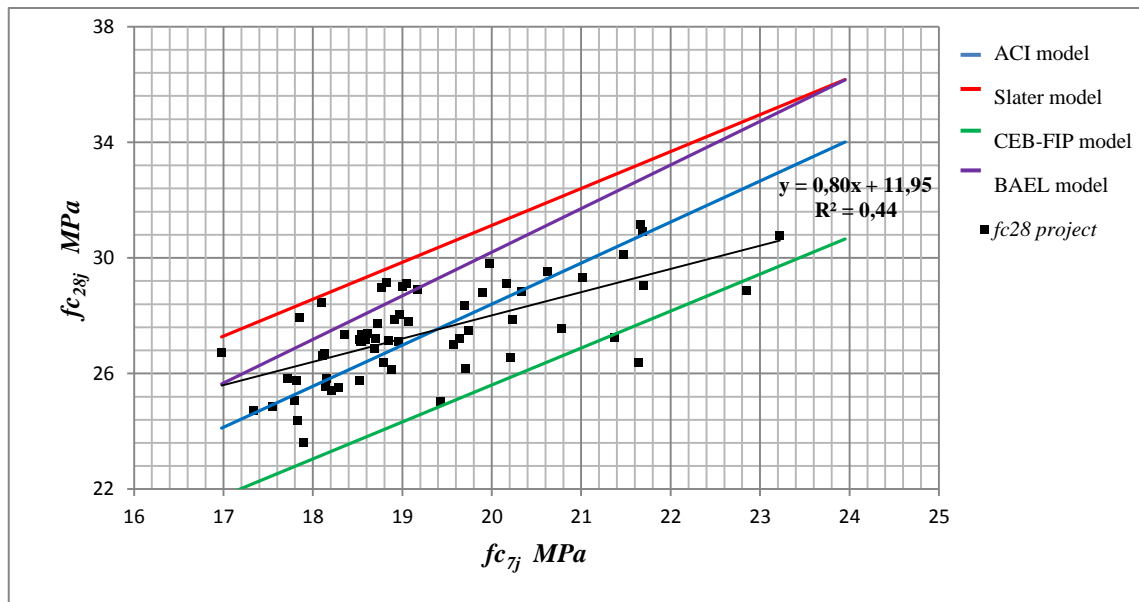
L'examen des résultats du test de Spearman (les résultats sont présentés en annexe B) révèle que 42 projets présentent une corrélation significative entre les deux vecteurs, dont 6 projets ont démontré une corrélation parfaite (coefficient de corrélation égal à 1). En revanche, 62 projets n'ont pas montré de corrélation significative au seuil de signification de 5%, dont 9 projets ont affiché une corrélation négative.

En pratique, si le test d'association de Spearman indique une valeur  $p$  supérieure à 5%, cela indique l'absence d'une association statistiquement significative entre les résistances à différents âges. Dans ce cas, la relation perd de sa puissance et la courbe de régression présentera un faible coefficient de corrélation, ce qui témoigne d'une faible dépendance entre les deux variables. En revanche, si le test d'association de Spearman révèle une valeur de  $p$ -valeur inférieure à 5%, cela indique une association significative entre les résistances

à différents âges. Dans ce cas, la corrélation devient importante et la courbe de régression présentera un coefficient de corrélation élevé, mettant en évidence une forte dépendance entre les deux vecteurs étudiés (Figure 4.18).



(a) corrélation « cas d'association statistique entre les vecteurs (42 projets) »



(b) corrélation « cas d'absence d'association (62 projets) »

Figure 4. 17 : Influence de l'association statistique sur la corrélation entre  $fc_{7j}$  et  $fc_{28j}$ .

#### 4.8 Conclusion

En résumé, cette étude statistique approfondie des distributions de résistance à différents âges du béton confirme les observations des travaux précédents sur la qualité, mettant en évidence une dispersion notable des résultats, en particulier à 28 jours. Le chevauchement entre les courbes de distribution peut constituer une piste d'investigation pour évaluer la qualité du béton. La configuration de la distribution des données à un jeune âge, combinée à la grande dispersion des résultats à 28 jours, semble contribuer à la production de béton de moindre qualité dans certains projets. L'irrégularité de la cinétique du développement de la résistance sur site, et la puissance de la corrélation entre les données à 7 et 28 jours dépendent du type de l'association statistique.

L'étude de la normalité des données constitue une étape importante dans l'analyse de la qualité du béton, car les critères de conformité du béton reposent sur cette caractéristique. L'examen de cette question a révélé que la violation de la normalité des données est plus prononcée à un jeune âge. Les résultats obtenus ont clairement mis en évidence la nécessité de prêter une attention particulière aux variations de la normalité des résultats à travers les différents stades de maturation du béton. Il a été constaté que le changement du coefficient de variation d'un âge à l'autre peut affecter la normalité des données. Le chapitre 5 aborde la conformité du béton sous différents aspects.

# **CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA CONFORMITE DU BETON**

## CHAPITRE 5 : ANALYSE DE LA CONFORMITE DU BETON

### 5.1 Généralité

La qualité du béton présente une importance capitale pour les maîtres d'ouvrage qui aspirent invariablement à l'excellence dans leurs projets de construction. Pour répondre à cette préoccupation, autour de laquelle s'articulent les différentes étapes de l'analyse de la conformité du béton, il est impératif de comprendre en amont l'impact de la variabilité des résultats sur la distribution de la résistance au sein d'un projet. Néanmoins, la recherche de la qualité du béton ne s'arrête pas là. Les critères de conformité définis dans les normes de construction jouent également un rôle important dans l'évaluation de la qualité. L'intégration de ces critères permet de garantir que le béton employé dans les ouvrages respecte les normes et les exigences spécifiques de l'industrie de la construction. Cela contribue à assurer la durabilité, la sécurité et la performance des structures en béton, tout en répondant aux attentes des maîtres d'ouvrage et en garantissant la satisfaction des utilisateurs finaux.

La première partie du chapitre est consacrée à l'analyse de la variabilité des résultats d'écrasement du béton. Dans un premier temps, nous examinerons le critère de variabilité des résultats pour l'ensemble des projets de la base en utilisant une technique statistique couramment employée dans le contrôle de la qualité. Ensuite, nous approfondirons et élargirons notre recherche en exploitant les résultats à titre individuel, c'est-à-dire à l'échelle de chaque projet. Dans cette partie nous allons voir l'effet du niveau de rejet des résultats sur le comportement du champ de résistances.

La deuxième partie abordera les critères de conformité du béton conformément aux normes et codes nationaux et internationaux. Nous analysons tout d'abord le critère de la résistance admissible sous un modèle composé de 100 projets, puis nous abordons les autres critères de conformité à l'échelle de chaque projet.

Nous terminons notre traitement de l'étude la conformité du béton par l'analyse de la variance ANOVA. Cette analyse touche principalement l'influence de la pratique de mise en œuvre du béton et les paramètres liés aux projets de construction. Concernant l'effet des composants du béton sur la résistance à la compression, nous traitons seulement la



variation due aux principaux paramètres de la composition du béton vu la complexité du problème.

## 5.2 Etude de la variabilité des résultats

En pratique, la variabilité des résultats des essais de résistance à la compression du béton joue un rôle important en tant qu'indicateur de la qualité du béton. Dans le contexte des exigences actuelles en matière d'assurance qualité définies par différentes normes, il est essentiel pour les ingénieurs en exercice d'analyser la variabilité des résultats de résistance à la compression du béton sur les chantiers de construction et de comprendre son influence.

Dans cette section, nous abordons la problématique sous deux aspects distincts. Le premier aspect, appelé "macro-variation", se concentre sur la variation des résultats à l'échelle globale en analysant les tendances et les variations générales observées dans la résistance du béton. Cette analyse agrégée permet de comprendre les schémas généraux sans se focaliser sur des cas spécifiques. Le deuxième aspect, nommé "micro-variation", se concentre sur l'évaluation individuelle des résultats d'écrasement pour chaque lot de bétonnage. Cette approche approfondie permet de mettre en évidence l'influence du niveau de rejet des résultats sur la forme de distribution et la résistance moyenne d'un projet. En combinant ces deux volets d'analyse, nous obtenons une vision plus complète de la variabilité des résultats et de son incidence sur le comportement de la résistance du béton dans un projet de construction.

### 5.2.1 Macro-variation de la résistance à 28 jours

Plusieurs techniques statistiques ont été conçues pour contrôler les processus de fabrication afin d'assurer et de maintenir la qualité du produit sans avoir besoin d'investissements importants dans des équipements lourds. Parmi ces techniques, la carte de contrôle est un outil essentiel dans la mise en œuvre du contrôle statistique. Elle permet de détecter les tendances dérivées et de corriger les défauts fréquents dans l'industrie du béton avant sa production. De plus, elle peut également être utilisée en aval du processus, une fois le projet terminé, pour évaluer la qualité du béton fabriqué et en tirer des conclusions sur ses performances ([53], [96]).

Dans cette section, la macro-variation de la résistance moyenne des projets ( $f_{cmp}$  à 28 jours) a été évaluée à l'aide de cette technique. L'objectif de cette évaluation n'est pas de

déterminer les causes des variations, mais plutôt de mesurer le niveau de fluctuation des résistances d'un projet à l'autre.

Par définition, une carte de contrôle est à la fois un outil statistique et graphique utilisé pour surveiller l'évolution des valeurs d'une variable qui représente une caractéristique d'un produit ou la moyenne d'un échantillon prélevé. Cette carte se compose d'un axe horizontal représentant la valeur cible de la variable surveillée, ainsi que des limites de contrôle. Les limites de contrôle inférieure (LCL) et supérieure (UCL) sont calculées en utilisant la valeur moyenne  $\pm 3\sigma$ , tandis que les limites d'avertissement inférieure (LWL) et supérieure (UWL) sont calculées en utilisant la valeur moyenne  $\pm 2\sigma$  [97] comme indiqué par la figure 5.1.

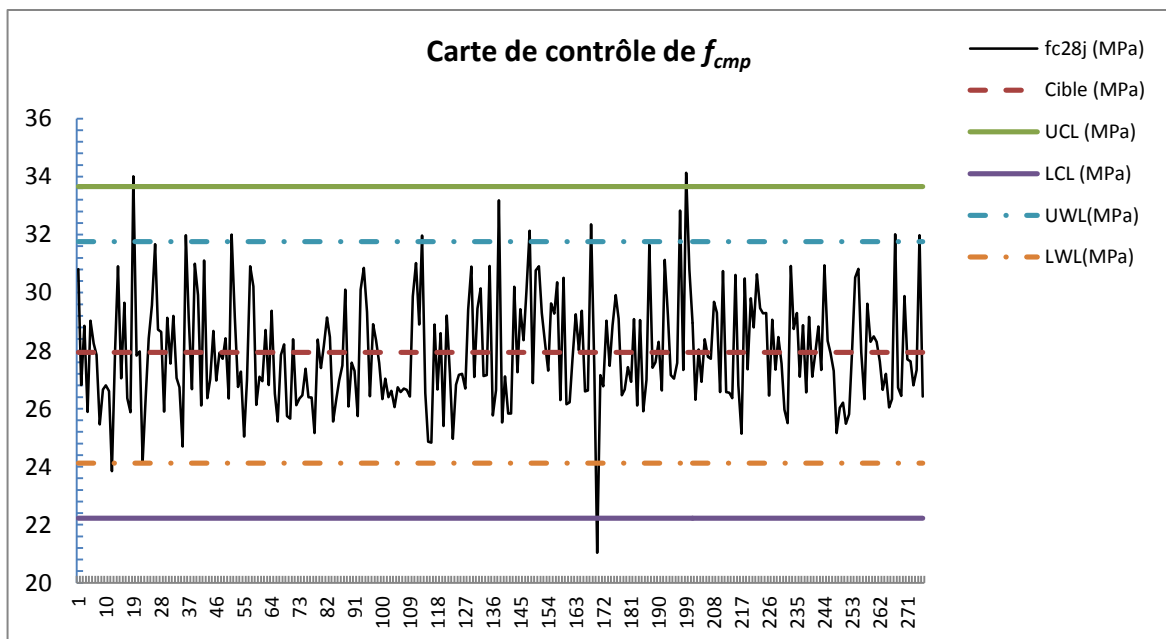


Figure 5. 1 : Carte de contrôle de la résistance  $f_{cmp}$  à 28 jours.

L'analyse de la présente carte permet d'obtenir une première évaluation préliminaire de la qualité du béton produit dans les projets étudiés en termes de résistance. En effet, la grande majorité des valeurs tracées se situent dans la bande comprise entre la limite de contrôle supérieure et la limite de contrôle inférieure, à l'exception de trois projets. Les valeurs qui se situent en dehors de la plage de surveillance représentent 13 projets sur 276, soit 4,71 % des résistances. Cependant, il est important de souligner que plus de la moitié des valeurs

se trouvent en dessous de la moyenne, avec un pourcentage de 57,61 % des projets. De plus, on peut clairement observer une multitude de coudes ou de points d'inflexion dans la forme du graphique.

En cherchant à expliquer une macro-variation de la résistance qui oscille fortement autour de la moyenne, le positionnement des points montre une diversité des valeurs  $f_{cmp}$ , bien que nous ayons traité une seule classe de béton C25/30. Cette disposition a entraîné une fluctuation significative des données, pouvant être attribuée à différentes causes interdépendantes telles que le rapport eau/ciment, les conditions de cure et la variabilité des résultats individuels.

En effet, cette situation se présente lorsque les valeurs sont trop éloignées les unes des autres. Par conséquent, on peut mentionner que nous sommes confrontés à un processus de production du béton plus ou moins instable entre les projets et que la variabilité de la résistance est présente même lorsque le paramètre de classe du béton est fixé a priori. Cependant, cette approche basée sur une vue macroscopique rend complexe la prise de décision concernant la variabilité des données, et peut même être sujette à des éléments subjectifs. Il semble donc nécessaire de se tourner vers une approche plus approfondie afin de diagnostiquer de manière précise ce phénomène.

### 5.2.2 Micro-variation de la résistance à 28 jours

Chaque vérification effectuée dans le cadre du contrôle de la qualité du béton repose sur un seuil limite, qui détermine si un résultat doit être accepté ou rejeté. L'utilisation de ces critères présente l'avantage de garantir l'objectivité du test, car il se fonde sur des conditions qui permettent d'isoler, de filtrer et de vérifier les données de manière rigoureuse.

Dans un projet donné, lorsque nous visons une résistance à la compression relativement homogène, la meilleure façon de le faire est de contrôler la dispersion des résultats par la statistique **E** (étendue). Cela implique d'évaluer la variation entre les différentes valeurs de résistance obtenues, afin de déterminer si elles sont acceptables et conformes aux critères établis.

En règle générale, lorsque les résultats de deux ou plusieurs échantillons d'essai, issus du même échantillon et ayant le même âge, présentent un écart supérieur à un pourcentage défini de la moyenne, ils doivent être considérés comme non valides et exclus de l'analyse.

Les normes de l'industrie du béton, telles que la norme européenne EN 206-1 [59], la norme marocaine NM 10.1.008 [98], et la norme algérienne NA 16,002 [60], ainsi que le code de Hong Kong [99], ont des dispositions pour exclure les résultats de résistance issus du même échantillon qui présentent des écarts significatifs par rapport à la moyenne. Par exemple, pour un béton ordinaire, ces normes excluent généralement les résultats qui dépassent 15 % (ou parfois 20 % selon le code de Hong Kong) de la moyenne des valeurs de résistance. Cependant, l'ACI adopte une approche différente en utilisant l'écart-type pour identifier les résultats indésirables. Selon les critères de l'ACI, le résultat d'un essai sur un spécimen peut être rejeté s'il s'écarte de la moyenne d'essai de plus de trois fois l'écart-type [57].

Dans cette optique, afin d'examiner la micro-variation du champ de résistance à la compression, quatre ensembles de données ont été formés en fonction du degré de rejet des résultats d'essai. Chaque ensemble représente les données filtrées en se conformant à cette condition. Les taux respectifs sont de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, appliqués à l'ensemble des projets. Le diagramme circulaire présenté dans la figure 5.2 montre les pourcentages de projets avec et sans variation dans les résultats.

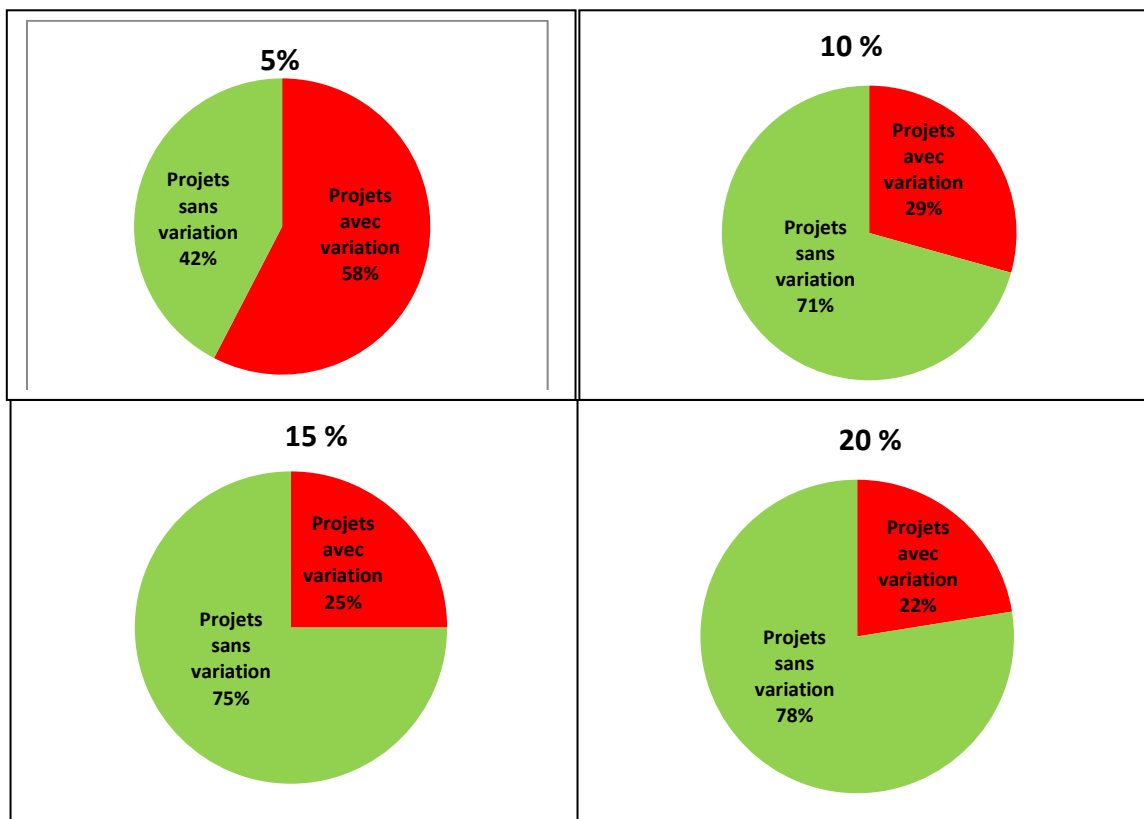
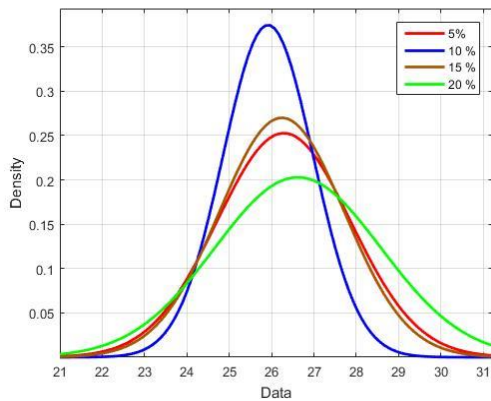


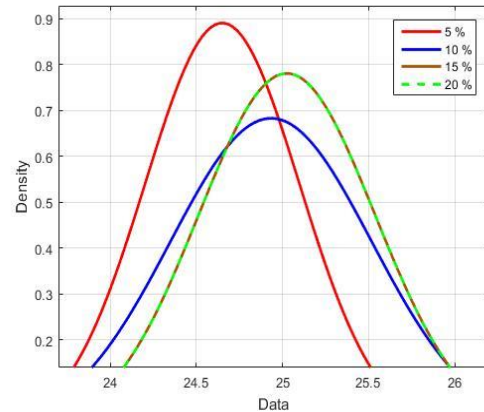
Figure 5. 2 : Répartition des proportions de projets avec et sans variation en fonction du niveau de rejet des résultats.

On constate que le pourcentage de projets affichant des variations dans les résultats est considérable pour le groupe à 5 %. À mesure que le taux de rejet augmente, le nombre de projets avec des variations diminue, atteignant 22 % à un taux de rejet de 20 %. Cette tendance est logique car l'augmentation du niveau de rejet réduit le nombre de valeurs aberrantes, entraînant ainsi une prédominance de la zone rouge pour les taux de rejet respectifs de 10 %, 15 % et 20 %.

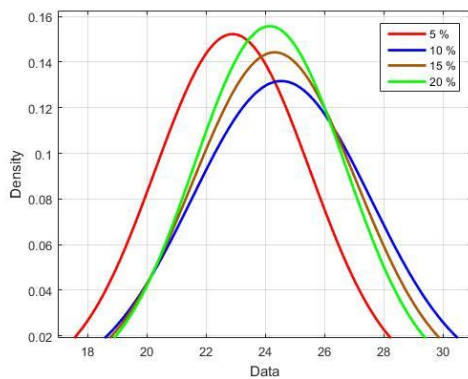
De plus, la distribution des données a subi des modifications d'un niveau à l'autre. La figure 5.3 illustre un exemple de la distribution des données ajustées (les données restantes) en fonction du niveau de rejet pour quatre projets. À partir de cette figure, il est clair que les ajustements apportés à la forme des courbes (la distribution des moyennes de résistance) ont affecté la valeur de la résistance moyenne des projets  $f_{cmp}$ .



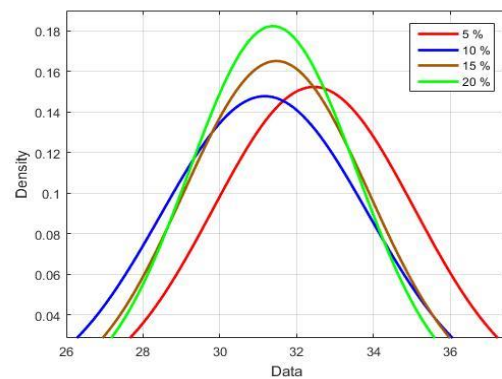
P 92



P105



P130



P215

Figure 5. 3 : Exemples de distribution des données ajustées pour les niveaux de rejet de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

Cependant, ce résultat est très limité et il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure le niveau de rejet peut influencer la résistance in-situ d'un projet donné. D'autre part, la méthode la plus simple pour déterminer si la variation de ce niveau de rejet a un impact sur la résistance moyenne du projet est d'étudier cette grandeur avant et après l'élimination des résultats indésirables. À cette fin, une sélection de 30 projets a été opérée. La sélection de ces projets a été effectuée de manière à assurer que la variation des résultats soit présente de manière significative dans au moins deux groupes successifs, à partir du groupe de rejet à 20 %. Par la suite, la différence absolue  $\Delta f_{cm}$  entre la moyenne des résistances initiales et les données ajustées de chaque projet a été calculée. La variation de cette différence en fonction du taux de rejet est représentée dans la figure 5.4.

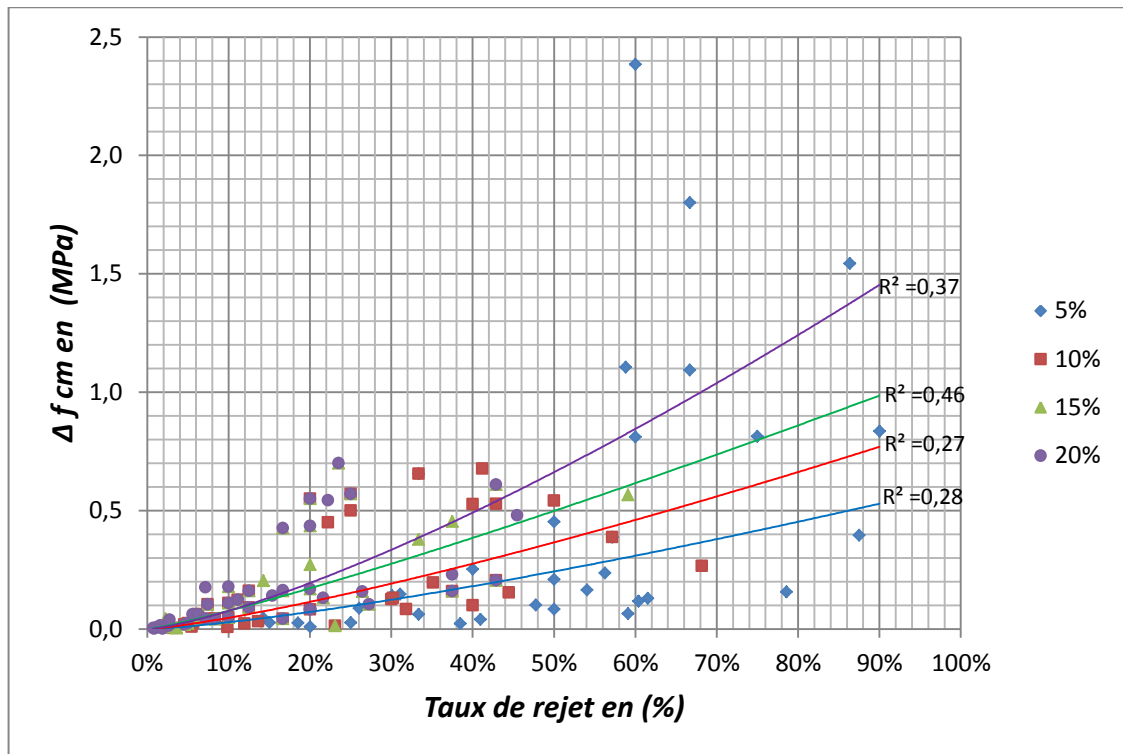


Figure 5. 4 : Variation de  $\Delta f_{cm}$  en fonction des valeurs rejetées pour les quatre niveaux.

En se référant à la figure 5.4, il est possible d'observer que la variation  $\Delta f_{cm}$  est influencée par le taux de rejet des résultats, ce phénomène se manifestant différemment selon les quatre niveaux considérés, chacun présentant une ampleur propre. Par exemple, dans le cas du niveau de rejet de 5 %, les valeurs de  $\Delta f_{cm}$  se montrent relativement élevées par

rapport aux autres cas, affichant des niveaux significatifs lorsque le taux de rejet des résultats dépasse les 60 %. En revanche, pour le niveau de rejet de 20 %, les valeurs deviennent substantielles dès que les taux de rejet dépassent 16 %. Étant donné que le premier niveau (5 %) représente le cas le plus déviant des résistances réelles in situ en raison à sa faible valeur, il peut être envisagé comme une référence pour évaluer le critère d'acceptation des résultats.

En effet, l'augmentation du niveau de rejet entraîne une plus grande sélectivité des résultats d'essais à travers le filtre, conduisant à un tamisage plus rigoureux. Par conséquent, la résistance moyenne du projet après l'essai tend à se rapprocher de celle estimée initialement, engendrant une différence  $\Delta f_{\text{cmp}}$  minime voire négligeable pour les projets qu'ont un faible taux de rejet des résultats.

La tendance des résultats décrite ci-dessus met en évidence une corrélation claire entre la valeur du niveau de rejet et la résistance moyenne du projet, ce qui est parfaitement rationnel pour deux raisons. Tout d'abord, un faible niveau de rejet entraîne une réduction significative du volume de données dans le champ de résistance. Deuxièmement, l'influence des valeurs de résistance rejetées après l'essai entraîne une différence plus marquée entre la moyenne des résistances  $f_{\text{cmp}}$  et la valeur initiale en raison de leur impact dominant dans le calcul de la moyenne.

Maintenant, regardant la corrélation entre  $\Delta f_{\text{cmp}}$  et le niveau de rejet pour les quatre scénarios, on remarque que la corrélation devient significative lorsque le niveau de rejet des résultats est augmenté. Cela confirme davantage l'influence de la nouvelle réorganisation des valeurs dans le champ de résistance sur la moyenne  $f_{\text{cmp}}$  en cas de faible niveau de rejet.

En conséquence de ce traitement, il est évident qu'en augmentant le niveau de rejet des résultats, la structure du champ de résistance à la compression dans un projet est modifiée. Cependant, à ce stade, quel est le taux optimal pour qu'il n'y ait pas de différence statistiquement significative entre les deux moyennes ?

### 5.2.3 Analyse statistique inférentielle de la variation de la résistance

Pour répondre à la question posée ci-dessus, un test de Student pour observations appariées a été réalisé. Rappelons que le test de Student est un test paramétrique qui vise à comparer les moyennes de deux populations suivant une distribution normale. L'hypothèse nulle ( $H_0$ )

est l'hypothèse d'égalité entre deux moyennes, tandis que l'hypothèse alternative ( $H_1$ ) indique que les moyennes des deux populations ne sont pas identiques. Le seuil de signification  $\alpha$  est égal à 5%. La formulation des hypothèses est la suivante :

$H_0 : \mu_{\text{initiale}} = \mu_{\text{ajusté}} \Rightarrow \mu_d = \mu_{\text{initiale}} - \mu_{\text{ajusté}} = 0$  (il n'y a pas de différence entre les traitements)

$H_1 : \mu_{\text{initiale}} \neq \mu_{\text{ajusté}} \Rightarrow \mu_d = \mu_{\text{initiale}} - \mu_{\text{ajusté}} \neq 0$  (il y a une différence entre les traitements)

Avec :

$\mu_{\text{Initiale}}$  : moyenne des résistances initiales.

$\mu_{\text{ajusté}}$  : moyenne des résistances ajustées.

$\mu_d$  : la moyenne des différences entre les populations.

Le tableau 5.1 affiche les valeurs de la différence des moyennes  $\mu_d$  pour les quatre groupes d'acceptations.

Tableau 5. 1 : Valeurs de  $\mu_d$  pour les quatre niveaux du rejet des résultats.

Projets	$\mu_d$				Projets	$\mu_d$			
	5%	10%	15%	20%		5%	10%	15%	20%
P1	-0,810	-0,527	-0,435	-0,435	P21	0,147	0,043	0,007	0,000
P2	0,045	0,003	-0,014	-0,014	P22	-2,383	-0,550	-0,550	-0,550
P3	0,656	0,656	0,426	0,426	P23	0,141	0,027	0,009	0,006
P4	-1,800	-0,153	-0,378	-0,543	P24	0,083	0,161	0,161	0,161
P5	0,252	0,125	-0,177	-0,177	P25	-0,040	-0,032	-0,041	-0,039
P6	1,093	-0,449	-0,062	-0,062	P26	0,387	0,387	0,610	0,610
P7	-0,165	-0,196	-0,131	-0,131	P27	-0,101	-0,022	-0,043	0,003
P8	-1,105	-0,676	-0,699	-0,699	P28	0,812	0,542	0,454	0,229
P9	0,208	0,158	0,158	0,158	P29	0,129	0,013	0,013	-0,140
P10	-0,022	0,008	0,004	-0,013	P30	-0,156	-0,529	-0,204	0,175
P11	0,117	0,130	0,158	0,158					
P12	1,543	0,265	0,565	0,479					
P13	-0,065	-0,083	-0,104	-0,104					
P14	0,835	0,099	0,168	0,168					
P15	-0,452	-0,499	-0,163	-0,163					
P16	-0,061	0,042	0,024	0,042					
P17	0,236	0,061	0,061	0,061					
P18	0,026	-0,042	-0,042	-0,042					
P19	0,082	0,082	0,271	0,082					
P20	0,087	0,009	-0,007	0,001					



Pour les quatre niveaux de rejet (5 %, 10 %, 15 % et 20 %), les valeurs calculées de  $\mu_d$  sont respectivement de -0,009, -0,032, 0,002 et -0,012. Les statistiques t-Student correspondantes sont de -0,067, -0,555, 0,030 et -0,230. En effet, au seuil de signification  $\alpha= 5 \%$ , toutes les valeurs de la statistique t-Student se situent dans la zone d'acceptation, ce qui indique qu'aucun groupe ne présente de différence significative, en moyenne, entre les deux observations (Figure 5.5). Par conséquent, cela conduit au non-rejet de l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes. Ce résultat est confirmé par les valeurs de p-valeur qui affichent des probabilités respectives de 94,7 %, 58,3 %, 97,7 % et 82 %, largement supérieures à 5 %. On peut aussi remarquer que les valeurs de t-Student pour les groupes de 5 % et 15 % sont proches de zéro, ce qui donne un excellent résultat de test par rapport aux autres. Cependant, le résultat attribué au groupe de 5 % ne peut pas être retenu car les observations étudiées ne proviennent pas d'une population distribuée selon une distribution normale (la normalité est mise en défaut dans ce groupe, le test de Kolmogorov-Smirnov donne une valeur  $p = 0,044 < 0,05$ ). En statistique, la violation de cette exigence du test de Student rend la décision invalide et le test ne garantit pas une certitude absolue [63].

En excluant le groupe de 5 %, on peut conclure que le groupe d'acceptation de 15 % représente le taux optimal auquel le nouveau champ de résistance peut le mieux décrire la résistance réelle sur site. En d'autres termes, ce nouveau champ de résistance ajusté ne présente pas de différence statistiquement significative en moyenne par rapport au champ initial.

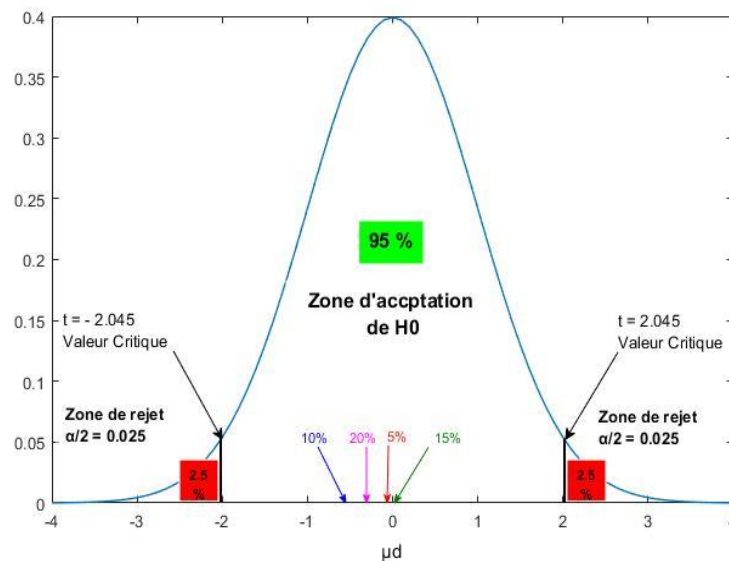


Figure 5. 5 : Représentation graphique des résultats du test de Student pour les groupes de rejet de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %.

### 5.3 Analyse de la qualité du béton

Dans cette partie de l'étude, nous avons utilisé les données de résistance à 28 jours de 100 chantiers de construction (Tableau présenter en annexe C) qui satisfont aux deux critères suivants :

- 1- Taille du projet avec plus de 30 résultats de résistance pour éviter l'erreur due à l'estimation de l'écart-type pour les projets de petite taille.
- 2- La normalité des résultats doit être satisfaite pour appliquer les critères de conformité.

L'application de la première condition a conduit à l'élimination de 170 projets, tandis que la deuxième condition a entraîné l'élimination de 6 autres projets dont les tailles variaient entre 39 et 75, ne satisfaisant pas ainsi à la condition de normalité des résultats. Au total, 176 projets ont été exclus en appliquant les deux conditions. Cependant, il convient de noter que 13 projets ont été inclus dans la liste, même si la condition de normalité n'a pas été confirmée. Cette exception s'explique par la grande taille de l'échantillon de ces projets, dépassant les 100 résultats. En statistique, comme cela a été démontré précédemment, on peut considérer que l'échantillon est distribué normalement lorsque sa taille devient suffisamment grande.

Le modèle sélectionné dans ce chapitre comprend 40 projets faisant partie de l'échantillon initial choisi pour l'analyse statistique des données. Les autres projets de cet échantillon initial n'ont pas satisfait aux conditions établies dans le cadre de cette analyse. De plus, ce modèle sera exclusivement utilisé pour évaluer la qualité du système de mise en œuvre du béton et de vérifier le critère du pourcentage maximal de résultats acceptables. En ce qui concerne les autres critères de conformité, tels que les résultats individuels et la moyenne des résultats de chaque lot, nous utiliserons l'ensemble complet des projets de la base de données.

#### 5.3.1 Appréciation de la qualité du béton mis en œuvre

Supposons que nous nous trouvions sur un chantier de construction et qu'il nous soit demandé d'évaluer ou de juger le système de contrôle de la qualité du béton. Dans une telle situation, quelle serait notre démarche pratique si nous ne possédons pas de connaissances approfondies en matière de conformité du béton? Pour répondre à cette question, une approche simple et efficace consiste à mesurer la tendance de la variation des résultats sur

l'ensemble des essais d'écrasement. Cette approche, discutée précédemment dans la section 1.4.2 du chapitre 1, permet aux ingénieurs non seulement d'évaluer la qualité, mais aussi de déterminer la source de variation.

La figure 5.6 présente les écarts-types du modèle en relation avec le niveau de contrôle de la qualité selon cette approche. L'analyse de cette figure révèle un résultat surprenant en ce qui concerne le contrôle de la qualité. En effet, il est remarquable que 89 % des projets présentent un niveau de contrôle excellent, tandis que les données restantes sont réparties entre les niveaux suivants : très bon, bon, acceptable et mauvais contrôle. Cette constatation suggère que la production de béton est soumise à un contrôle adéquat, et que le béton prêt à l'emploi présente une homogénéité en termes de résistance dans la plupart des projets. Ce constat inattendu peut sembler contradictoire par rapport aux observations de nos ingénieurs sur site, si nous considérons cette approche comme étant l'unique indicateur de la qualité du produit.

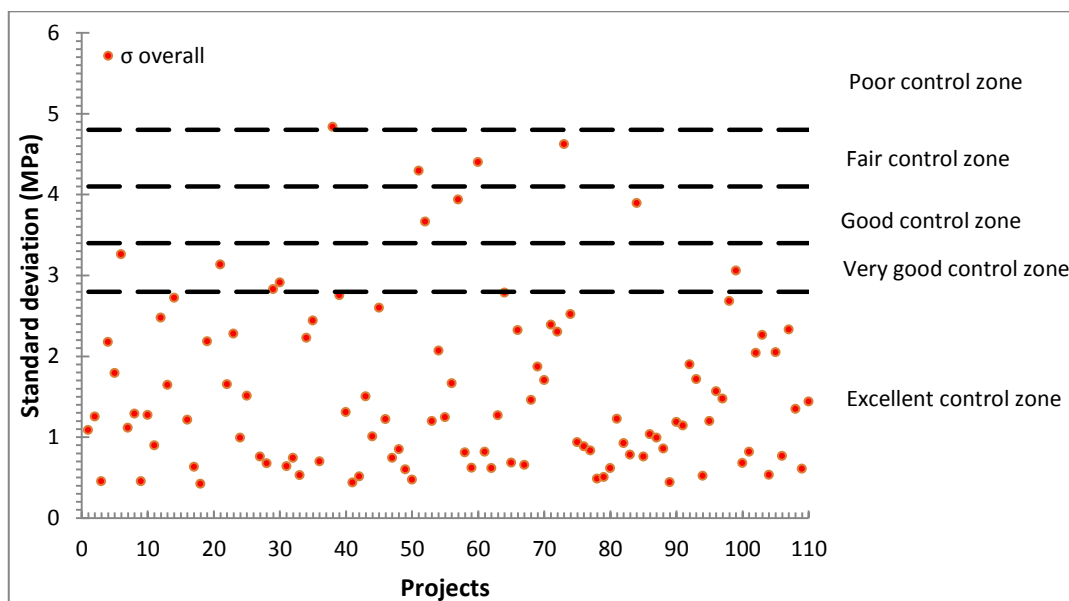


Figure 5. 6 : Évaluations de la qualité du béton selon la norme ACI (variation globale)

L'éclaircissement de cette contradiction nécessite inévitablement l'analyse des origines de variation qui contrôlent la qualité. En effet, comme mentionné précédemment dans le chapitre 1, la variation des résultats d'écrasement provient de deux sources : la variation intra-lot et la variation inter-lot.

La première source de variation au sein d'un lot est contrôlée en utilisant le coefficient de variation intra-lot ( $V_1$ ), qui exprime la quantité de variation en pourcentage par rapport à la résistance moyenne. Il est déterminé par l'équation suivante :

$$V_1 = \frac{S_1}{\bar{X}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

Avec :

$V_1$  : Coefficient de variation intra-lot.

$\bar{X}$  : La résistance moyenne.

$S_1$  : l'écart-type intra-lot donné par la formule :

$$S_1 = \frac{1}{d_2} \bar{R} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$\bar{R}$  : La moyenne des étendus d'au moins 10 résultats d'essais de résistance de même âge.

$d_2$  : Facteur lié au nombre d'échantillons (dans cette étude,  $d_2 = 1,693$  pour  $n = 3$ ).

L'analyse de la variation au sein du lot (intra-lot) révèle toujours un pourcentage élevé correspondant à un excellent contrôle (73 % des projets). Cela peut s'expliquer par une certaine stabilité dans la procédure d'essai, car le même laboratoire d'essai et le même opérateur ont été utilisés tout au long de la réalisation de la plupart des projets (Tableau 5.1). En pratique, cela conduit à un processus d'essai stable, depuis la fabrication des éprouvettes jusqu'à leur maturation et leur essai. Il convient de noter ici que la variation au sein du lot suit pratiquement celle de la variation générale (Figure 5.7).

D'autre part, l'examen de l'indicateur le plus prédominant de la qualité du béton, directement lié aux opérations de bétonnage, montre que 43 % des projets ont été réalisés avec une seule formulation de béton, tandis que 24 % ont utilisé plus d'une formulation (Tableau 5.2). Cette situation réduit davantage l'ampleur de la variation sur l'ensemble des résultats et conduit à des résultats plus uniformes, en collaboration avec un processus d'essai stable.

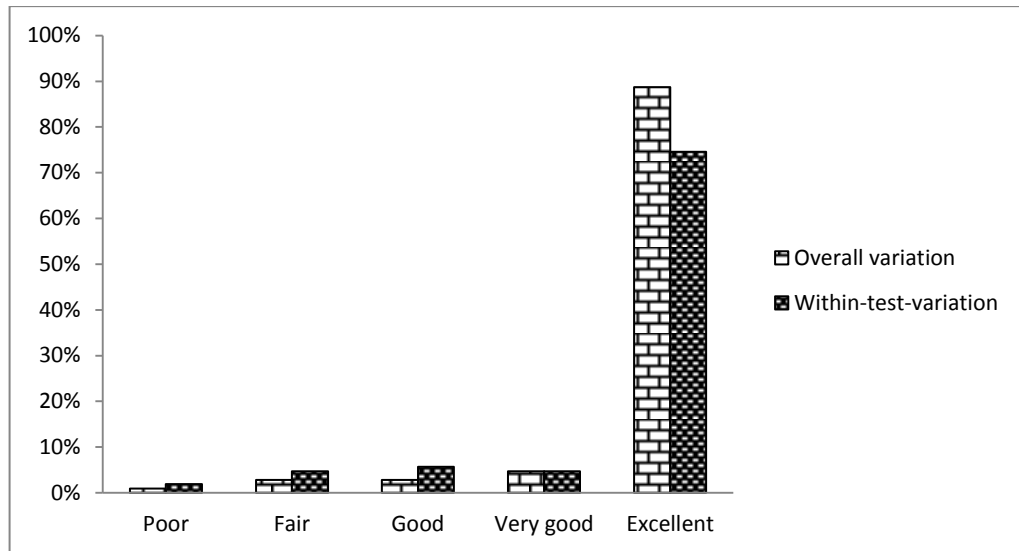


Figure 5. 7 : Comparaison entre la variation générale et la variation intra-lot

Tableau 5. 2 : Distribution des laboratoires impliqués.

	Unique	Multiple	Absence d'information
Laboratoire	78	10	12

Tableau 5. 3 : Distribution des compositions de béton employées.

	Unique	Multiple	Absence d'information
Formulation	43	24	33

En résumé, l'évaluation du système de contrôle déployé sur les chantiers objet de cette étude démontre son efficacité en favorisant la production d'un champ de résistance relativement homogène au sein de chaque projet, comme en témoigne l'écart-type inférieur à 2,80 MPa observé dans la majorité des cas. Cependant, il convient d'aborder avec prudence l'interprétation des paramètres liés à la qualité du béton. Une décision définitive doit reposer sur une compréhension approfondie de la signification de chaque paramètre, tout en s'appuyant sur l'ensemble des indicateurs disponibles pour une déduction rationnelle et fiable sur le terrain. Par ailleurs, il est crucial d'explorer un autre aspect fondamental de la qualité du béton, à savoir sa conformité aux normes. Cette démarche assurera une évaluation exhaustive et précise de la qualité du béton, renforçant ainsi la robustesse de nos conclusions.

### 5.3.2 Analyse des critères de conformité du béton selon les normes

Le suivi de la conformité de la résistance du béton sur site est un outil recommandé par la plupart des normes de construction internationales afin de prévenir les bétons non conformes et les litiges. La surveillance continue permet aux ingénieurs sur site d'accepter ou de rejeter un lot de béton, de rectifier les erreurs de formulation et de garantir la conformité du béton structurel aux normes établies. De plus, à long terme, le contrôle de la conformité peut influencer positivement le comportement du béton face aux diverses contraintes [100]. Cela conduit à une augmentation de l'indice de sécurité des structures en béton d'environ 20 à 30 % lorsque la conformité est prise en compte, comme l'ont rapporté Caspeele et Taerwe [101].

#### 5.3.2.1 Critère du pourcentage maximal des résultats admis

L'estimation de la résistance caractéristique du béton sur site peut présenter des variations en fonction des codes et des normes appliqués. Afin de mieux appréhender cette variation et d'évaluer le degré de conformité du béton, une comparaison est effectuée entre les résistances caractéristiques estimées sur site et la résistance caractéristique attendue pour la classe de béton étudiée. La conformité du béton est déclarée lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$fck_{site} \geq fck_{classe} \dots\dots\dots (5.3)$$

Où  $fck_{site}$  représente la résistance caractéristique estimée sur site selon les différentes normes, et  $fck_{classe}$  correspond à la résistance caractéristique attendue pour la classe de béton spécifiée.

La figure 5.8 présente une comparaison des résistances caractéristiques estimées selon différents codes. Nous pouvons constater que les différents codes ont donné des résultats approximativement similaires en termes d'estimation de la résistance caractéristique sur site. Cette similitude s'explique par l'influence des faibles valeurs d'écart-type, ce qui indique une faible variation des résultats des essais sur site. Toutefois, à mesure que l'écart-type augmente, la distinction entre les valeurs de  $fck_{site}$  devient plus prononcée pour les différents codes.

En revanche, la majorité des résultats confirment que l'ACI fournit des valeurs légèrement plus élevées de  $fck_{site}$  par rapport aux autres codes, suivi de l'EN 206-1, puis des autres

codes. Ce résultat a été mis en évidence par Larrossa et al. [53] dans une étude portant sur l'évaluation de la conformité du béton dans les travaux de construction d'un port. Cependant, cette constatation est valable jusqu'à la valeur de  $\sigma = 3,94$  MPa, pour laquelle les valeurs de  $f_{ck\_site}$  données par le premier critère de l'ACI demeurent les plus élevées. Dans cette plage, la norme américaine est moins rigoureuse que les autres en termes de conformité du béton. Au-delà de cette limite, les valeurs fournies par l'ACI passent à la deuxième place, et les valeurs de  $f_{ck\_site}$  calculées selon la norme EN 206-1 prennent la première place. Cela est dû au fait que, dans ce cas, les valeurs considérées de  $f_{ck\_site}$  sont celles estimées par le deuxième critère de l'ACI, plutôt que le premier critère. Cela conduit à des valeurs inférieures de  $f_{ck\_site}$  par rapport au premier cas, lorsque l'écart-type était relativement faible. Dans cette comparaison, la résistance caractéristique théorique attendue  $f_{ck}$ , est fixée à 25 MPa, correspond à la valeur minimale de la classe de béton C25/30 selon le tableau 12 du code EN 206-1 [59].

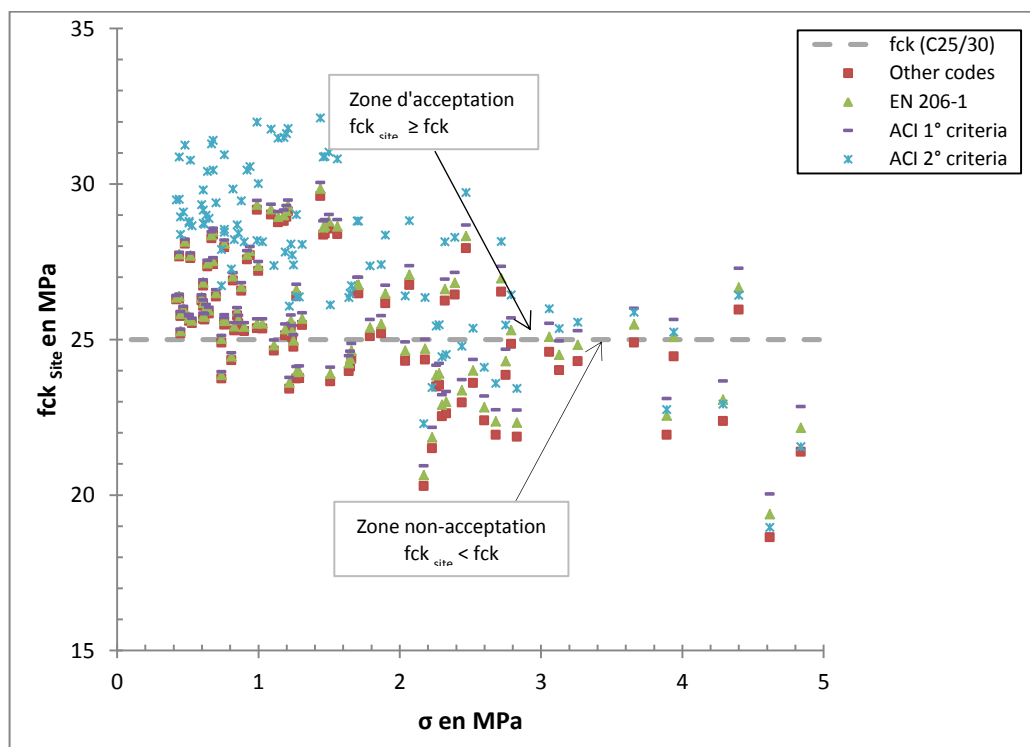


Figure 5. 8 : Critère de conformité du pourcentage maximal des résultats admis selon différents standards.

L'origine de cette classification réside principalement dans la définition de chaque critère et la probabilité du test d'inférence utilisée par chaque norme. Les critères de conformité de l'ACI se basent sur une faible probabilité de l'ordre de  $\alpha = 1\%$  (1 sur 100), tandis que les

autres codes utilisent une probabilité de 5% (1 sur 40). D'un point de vue statistique, un  $\alpha$  plus petit crée une marge plus large pour capturer les résistances, ce qui conduit à des valeurs plus élevées de  $f_{ck \text{ site}}$ .

En plus de l'estimation de la résistance caractéristique sur site, le taux de non-conformité du béton dans le modèle varie entre 28% et 36% pour la classe de béton étudiée C25 / 30 (Tableau 5.4). Le taux le plus bas correspond à la norme ACI, qui présente des valeurs de  $f_{ck \text{ site}}$  plus élevées. Pour le code ACI, la valeur de la résistance caractéristique "sur site" prise en compte dans l'évaluation de la conformité est la valeur minimale donnée par les deux formules. Nous avons également observé que les projets non conformes ont un rapport E/C supérieur à 0,54, et que les valeurs moyennes de résistance correspondantes sont, dans la plupart des cas, inférieures à celles déduites par les codes.

En comparant ce résultat avec d'autres travaux dans le même contexte, nous constatons que les pourcentages de non-conformité du béton déduits se situent pratiquement dans la même plage que les autres travaux (<40%), à l'exception des références ([102], [103]) pour la classe C25 / 30. Ceci est probablement dû à la grande variation des écarts-types dans ces études, qui ont marqué de grandes plages égales à 11,18 et 12,16, respectivement.

La comparaison a également démontré que la conformité du béton est influencée par la classe du béton. Indépendamment des spécifications de chaque étude, il est suggéré que le pourcentage de non-conformité diminue à mesure que la classe du béton augmente.

Le chevauchement des courbes de distribution à 7 et 28 jours a également eu un impact significatif sur le taux de conformité du béton dans notre modèle. En l'absence de chevauchement, et en prenant le cas de la norme NA 16002, 76,00 % des projets ont satisfait aux critères de conformité en matière de qualité du béton, tandis que dans les cas de chevauchement, seulement 40,00 % des projets ont respecté ces critères, ce qui signifie que 60,00 % des projets étaient non conformes. Notre étude a révélé que l'ampleur de la zone de chevauchement n'était pas le facteur déterminant, mais plutôt la position du point d'intersection entre les courbes. L'analyse a montré que, pour tous les projets non conformes en cas de chevauchement, la valeur du point d'intersection était inférieure à 24 MPa. En revanche, pour tous les autres projets, l'intersection de ces courbes se situait à des valeurs de résistance dépassant cette valeur optimale.



Ces résultats soulignent l'importance cruciale de déterminer avec précision le point de chevauchement entre les courbes de distribution à 7 et 28 jours pour garantir la conformité du béton dans des situations pratiques. Des recherches futures pourraient se concentrer sur la détermination de l'intervalle d'interaction critique dans lequel les critères de conformité du béton sont respectés. Cela ouvrirait la voie à des avancées significatives dans la gestion de la qualité du béton en se basant sur l'état de la distribution des données de résistance sur site.

Tableau 5. 4 : Non-conformité du béton pour différents travaux et selon différents codes.

	C16/20			C20/25			C25/30			C40/50			Interval variation of $\sigma$ in MPa	Range of $\sigma$ in MPa
	ACI	EN-206	OC	ACI	EN-206	OC	ACI	EN-206	OC	ACI	EN-206	OC		
Case study							28%	31%	36%				0.42-4.84	4.42
Larrossa et al. [53]										15.6 %	12.5 %	18.75 %	1.87-5.94	4.07
Ashraf Ragab [54]						42.8 %			33.3 %				4.15-7.05 4.5-7.8	C20 :2.9 C25 : 3.3
M.Alazhari and M. Al Shebani [102]							60%		50%				2.31-13.49	11.18
N. Touloum, A. Brara [103]									52%				3.37-15.53	12.16
B.Aguiar et al. [104]			50 %		45 %				7%				/	/
Paulo Cunha et al. [105]		41 %			43 %				34%				/	/

En l'absence d'une variabilité remarquable de la résistance dans les projets étudiés, basée sur les valeurs de l'écart-type, il semble que le problème de mauvaise qualité sur les chantiers, illustré par un taux élevé de non-conformité (un tiers des projets étudiés), soit dû à deux causes principales.

La première cause est liée à la conception initiale de la formulation du béton de référence, qui fixe la résistance moyenne cible du béton. Une comparaison entre la résistance cible et la résistance moyenne sur site, basée sur un échantillon de 23 projets prélevés dans la population, révèle que seuls 5 projets présentent une résistance moyenne sur site ( $f_{cmp}$ )

significativement supérieure à celle du béton de référence (l'étude de la formulation), ce qui représente 21,73 % (Figure 5.9).

Ce problème est probablement dû soit à une erreur dans la formulation du mélange du béton (au lieu de déterminer les dosages des constituants en fonction de la résistance moyenne cible, il a été déterminé en fonction de la résistance caractéristique), soit à un mauvais contrôle du dosage sur site. Le dosage des constituants du béton est d'une grande importance et doit être effectué avec une précision rigoureuse. Une erreur commise à ce niveau est susceptible d'influencer les résultats finaux de la résistance sur site.

La deuxième cause de mauvaise qualité est liée au ralentissement de la cinétique de développement de la résistance sur site, soit en raison d'une absence totale de mise en œuvre du processus de cure du béton, soit en raison d'une mauvaise exécution de la procédure. Rappelons que cette problématique a été étudiée dans le chapitre précédent, d'où nous avons conclu que l'association entre les deux vecteurs à 7 et 28 jours influence de manière significative l'évolution de la résistance.

La Figure 5.10 illustre la relation entre la résistance à la compression à 7 et 28 jours dans le modèle, qui est inférieure à la relation prédite par les codes BAEL et ACI, confirmant ainsi que le processus de cure des éprouvettes n'est pas approprié. Les calculs ont révélé que la résistance  $f_{c28}$  varie entre 1,22 et 1,53 fois la résistance  $f_{c7}$ , avec une moyenne de 1,40. Ces valeurs sont inférieures à celles indiquées par Neville [4], qui suggère que la résistance  $f_{c28}$  varie entre 1,30 et 1,70 fois la résistance  $f_{c7}$ , avec une moyenne de 1,50. Dans de telles conditions, il devient difficile de respecter le critère de conformité du béton, car la résistance moyenne requise est très proche de la résistance caractéristique (par exemple, 48 projets présentent un facteur de biais  $\beta$  inférieur à 1,1).

Par ailleurs, l'impact du niveau de rejet des résultats d'essai sur la conformité du béton a été examiné dans l'étude, et une tendance faible a été observée (Figure 5.11). En effet, l'application d'un niveau de rejet de 5% des résultats d'essai a entraîné une diminution du pourcentage de projets non conformes par rapport à la situation initiale, variant entre 5% et 8% selon le code. Aux niveaux de rejet de 10% et 15%, ce pourcentage diminuait davantage pour atteindre une réduction maximale de 4%. Cependant, avec un niveau de rejet de 20%, les cas de non-conformité du béton sont remontés par rapport aux cas précédents et se sont rapprochés des niveaux initiaux, avec une variation comprise entre seulement 2% et 3%. Par ailleurs, il n'y a pas eu de changement significatif dans les

pourcentages entre les niveaux de 10%, 15% et 20%. Ceci s'explique par l'effet de filtrage discuté dans la section sur la macro-variation, où les pourcentages de projets présentant une variation des résultats étaient très similaires les uns aux autres, soit 29%, 25% et 22% respectivement pour les niveaux de rejet de 10%, 15% et 20%.

En conclusion, l'application du critère de filtrage a réduit le pourcentage de béton non conforme dans les projets. Cela peut être bénéfique en termes de réduction des risques pour le consommateur, en acceptant moins de lots de béton et contribuant ainsi à minimiser les cas de litiges sur site.

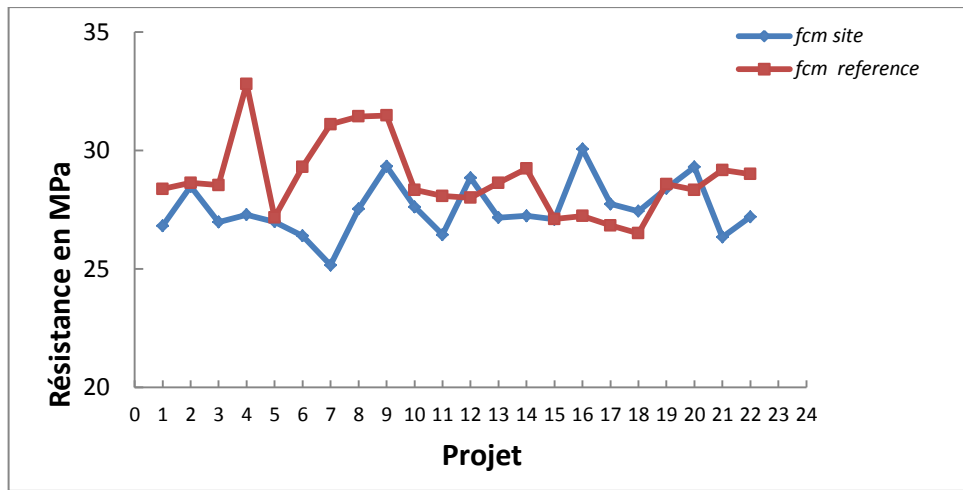


Figure 5. 9 : Comparaisons entre la résistance moyenne sur site et la résistance de référence (cible) pour 23 projets.

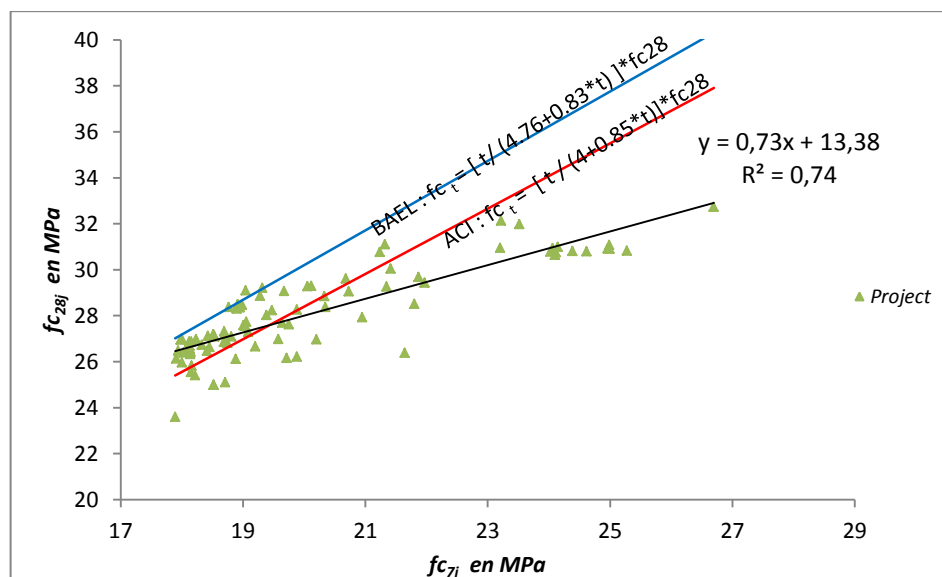


Figure 5. 10 : Corrélation entre les résistances à la compression à 7 et 28 jours.

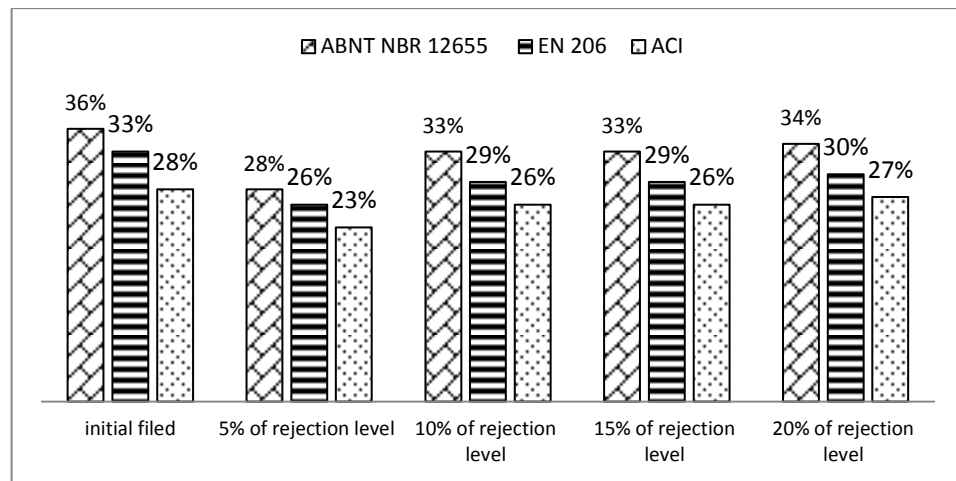


Figure 5. 11 : Effet du niveau de rejet des résultats d'essai sur la non-conformité du béton

5.3.2.2 Est-il possible d'évaluer la conformité du béton à jeune âge ?

Cette section vise à résoudre une problématique rencontrée lors de la collecte des données, à savoir l'indisponibilité des résultats d'essai à 28 jours dans certains projets, ce qui rend difficile l'évaluation de la conformité du béton produit. Ce problème est principalement dû aux méthodes d'archivage classiques des données utilisées dans nos chantiers. Cependant, l'un des avantages de la base de données créée est de préserver les informations pour une utilisation ultérieure, évitant ainsi qu'elles ne soient perdues au fil du temps.

La méthode adoptée pour procéder à la vérification de la conformité du béton à jeune âge consiste à reproduire le critère du pourcentage maximal des résultats acceptables en utilisant les relations déduites lors de l'analyse statistique des données. Cette démarche part de la relation de conformité établie pour les résultats à 28 jours et aboutit à une formule spécifique pour les résultats à 7 jours. Le principe est donc de substituer les paramètres des inégalités traditionnelles de conformité par d'autres paramètres estimés de manière pratique. À titre d'exemple, dans la formule de l'Eurocode, nous remplaçons  $f_{cm_{28j}}$ ,  $\sigma_{28j}$  par  $f_{cm_{7j}}$ ,  $\sigma_{7j}$  en utilisant les formules suivantes :

$$\sigma_{28j} = 0,98 \sigma_{7j} + 0,13 \dots\dots\dots (5.4)$$

$$f_{cm_{28j}} = 0,89 f_{cm_{7j}} + 10,5 \dots\dots\dots (5.5)$$

La formule finale pour la conformité à jeune âge peut s'écrire de la manière suivante :

$$f_{ck\ site\ 7j} = 0.89 * f_{cm_{7j}} - 1,45 \sigma_{7j} + 10,31 \geq f_{ck} \dots\dots\dots (5.6)$$

L'application des nouvelles formules à jeune âge montre que le critère de conformité est similaire à celui à 28 jours dans 33 projets pour le code ACI et dans 31 projets pour les autres codes. De plus, le classement des résultats en termes d'estimation des projets non conformes à jeune âge place toujours le code ACI en dernière position avec 11 projets (Tableau 5.5). Ce résultat confirme que les valeurs de  $f_{ck\ site}$  à 7 jours fournies par le code ACI sont plus élevées que celles des autres codes, ce qui est similaire à la constatation déduite précédemment lors de l'étude de la conformité du béton avec les données à 28 jours. Dans cette comparaison, la plage des valeurs de l'écart type n'a pas dépassé 3,04 MPa pour  $\sigma_{28j}$ , et 2,86 MPa pour  $\sigma_{7j}$ .

Tableau 5. 5 : Comparaison de la conformité du béton entre les deux âges selon différents codes pour un échantillon de 40 projets.

	ACI				EN 206-1				Autres codes			
	conforme		non-conforme		conforme		non-conforme		conforme		non-conforme	
	7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j
Projets avec conformité similaire	29		4		26		5		24		7	
projets avec conformité non similaire	6	1	1	6	7	2	2	7	7	2	2	7

La comparaison a également montré que l'association statistique influence la similarité de conformité du béton entre les deux domaines de résistance. En effet, lorsque l'association statistique est présente, le critère est estimé comme étant similaire à 91,67% selon le code ACI et à 87,5% selon les autres codes (Tableau 5.6). Cela signifie que la conformité du béton à jeune âge suit la même tendance que celle à 28 jours. En revanche, en l'absence d'association statistique, le pourcentage de projets présentant une similarité identique est relativement faible. Le pourcentage le plus élevé est obtenu avec le code ACI, qui atteint 75%. La disparité observée entre les deux âges de l'étude peut être attribuée à l'estimation des variables de l'équation de conformité, notamment l'écart-type et la moyenne. L'examen du tableau 5.7 révèle que les paramètres de dispersion dans le cas de la similarité de conformité sont plus élevés que ceux du cas de non-similarité. Cette constatation suggère que lorsque les valeurs des paramètres de dispersion à 28 jours se rapprochent de celles à

jeune âge, ce qui témoigne d'une corrélation faible entre les deux domaines, le critère de conformité étudié diffère en fonction de l'âge du béton. En outre, l'analyse de la différence de coefficient de variation ( $\Delta Cov$ ) révèle que la distribution normale est mieux respectée dans le cas de la similarité, avec des valeurs de  $\Delta Cov$  proches de zéro. Cette observation démontre que, outre l'effet des paramètres de dispersion, le maintien de l'équilibre dans la distribution normale peut également exercer une influence sur la similarité de conformité entre les deux âges du béton.

Tableau 5. 5 : Effet de l'association statistique sur la similarité de conformité selon différents codes.

		Autre Codes	EN 206-1	ACI
Association statistique	conformité similaire	91,67%	87,50%	87,50%
	conformité non similaire	8,33%	12,50%	12,50%
Pas d'association statistique	conformité similaire	56,25%	62,50%	75,00%
	conformité non similaire	43,75%	37,50%	25,00%

Tableau 5. 6 : Paramètres de dispersion en fonction du respect de la similarité de conformité du béton.

Paramètres	Codes	Non similarité	Similarité
Rapport $f_{cm 28j} / f_{cm 7j}$	ACI	1,41	1,43
	EN 206-1	1,38	1,44
	Autre codes	1,37	1,44
Rapport $\sigma_{28j} / \sigma_{7j}$	ACI	1,08	1,10
	EN 206-1	1,06	1,15
	Autre codes	1,10	1,14
Rapport $E_{28j} / E_{7j}$	ACI	1,07	1,11
	EN 206-1	0,99	1,16
	Autre codes	1,05	1,14
$\Delta Cov = Cov_{28j} - Cov_{7j}$	ACI	-2,78 %	-1,65 %
	EN 206-1	-2,20 %	-1,30 %
	Autre codes	-1,86 %	-1,40 %

### 5.3.2.3 Evaluation de la conformité des résultats individuels *fci*.

#### (i) Selon la norme ACI

Le code américain ACI préconise des corrections de l'écart-type estimé en fonction de la taille de l'échantillon. Cette approche vise à ajuster l'estimation de l'écart-type de la population en tenant compte de l'incertitude de mesure associée à un nombre limité de résultats, notamment lorsque ce nombre est inférieur à 30. En appliquant cette approche, les données de cette partie de l'étude ont été classées en quatre groupes distincts en fonction de la taille de l'échantillon. La procédure suivante a été utilisée pour former ces groupes :

- Groupe 1 : taille de l'échantillon comprise entre 15 et 20 résultats.
- Groupe 2 : taille de l'échantillon comprise entre 20 et 25 résultats.
- Groupe 3 : taille de l'échantillon comprise entre 25 et 30 résultats.
- Groupe 4 : taille de l'échantillon supérieure à 30 résultats.

Cette classification permet de prendre en compte la variation de la taille de l'échantillon dans l'estimation de l'écart-type et de fournir des indications plus précises sur la conformité des résultats en fonction de la taille d'échantillonnage. La figure 5.12 illustre la dispersion des résultats individuels autour de la limite de résistance requise pour les quatre groupes selon ACI.

L'analyse des résultats obtenus souligne une relation étroite entre la satisfaction du premier critère de conformité selon le code ACI et la taille de l'échantillon. À mesure que la taille de l'échantillon augmente, on observe une augmentation simultanée du pourcentage de résultats conformes, comme clairement illustré dans la figure 5.13. Les taux de résultats conformes, qui se situent dans la fourchette de 75 % à 100 %, atteignent leurs niveaux les plus élevés parmi les autres fourchettes. Les taux globaux de conformité pour l'ensemble des projets sont de 76,96 %, 84,68 %, 68,42 % et 92,70 % pour les groupes 1, 2, 3 et 4 respectivement. Cette tendance démontre avec évidence que la taille de l'échantillon exerce une influence significative sur la conformité des résultats, présentant une amélioration progressive au fur et à mesure que la taille de l'échantillon augmente. Ces observations soulignent l'importance cruciale d'une taille d'échantillon adéquate pour garantir des résultats conformes conformément aux critères établis par le code ACI.

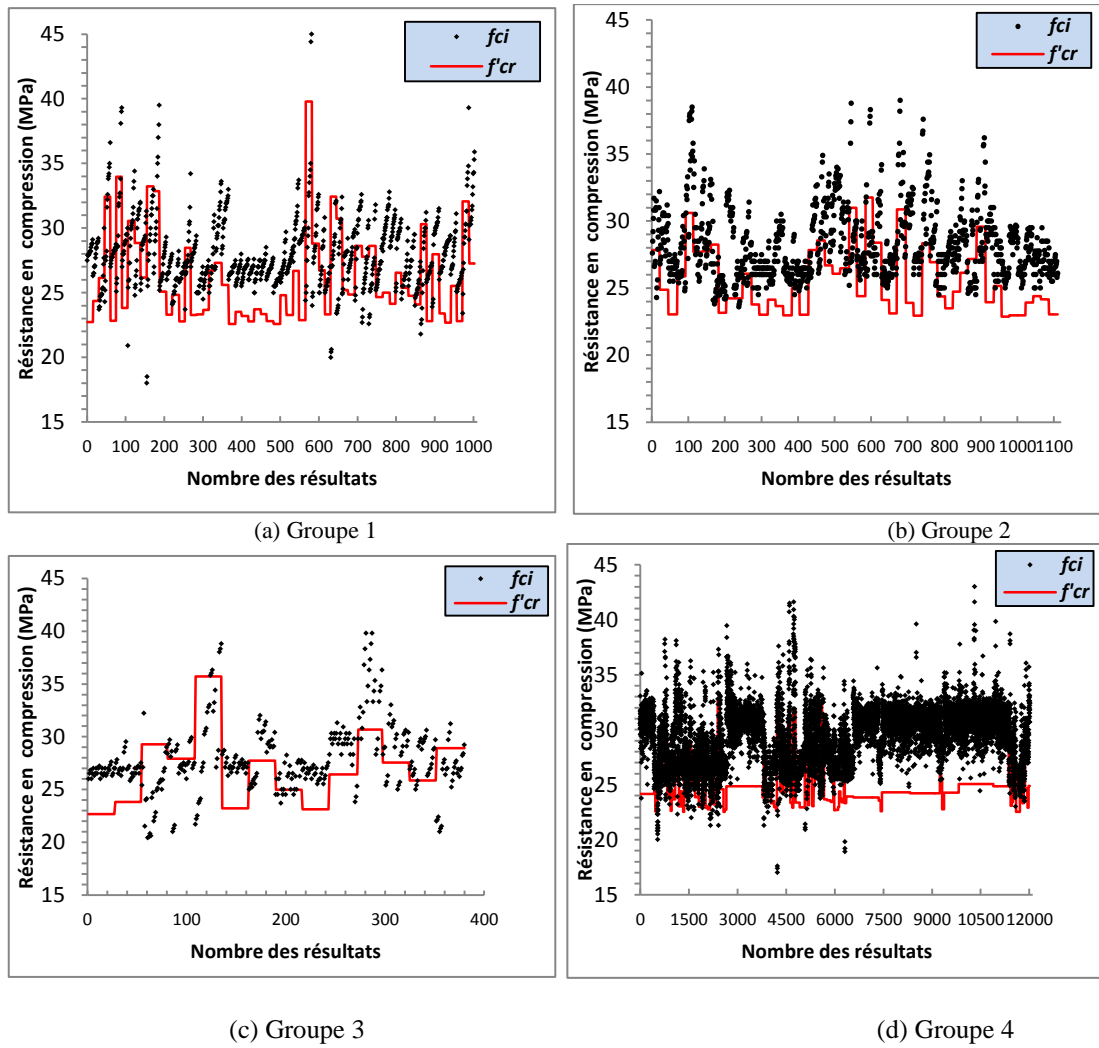


Figure 5. 12 : Dispersion des résultats individuels autour de la résistance requise selon le premier critère de conformité de l'ACI.

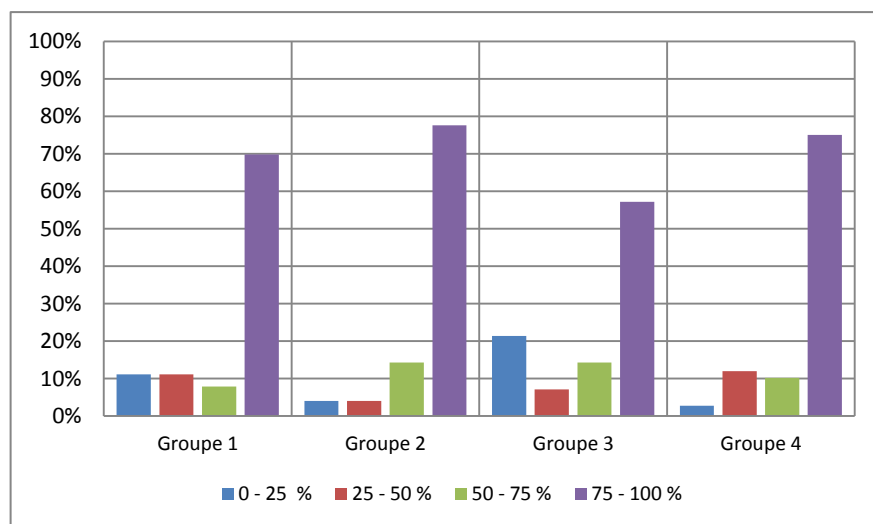


Figure 5. 13 : Répartition du taux des résultats conformes pour les résistances individuels.



Cette observation peut être expliquée mathématiquement par le fait que la formule du critère est principalement influencée par l'estimation de l'écart-type de la population. Étant donné que cette mesure statistique est directement liée au nombre d'échantillons, l'impact de la taille de l'échantillon sur les résultats est donc significatif dans cette analyse. Cependant, le groupe 3 présente une exception à cette tendance, car malgré une augmentation de la taille de l'échantillon, le pourcentage des résultats conformes a diminué de manière inattendue. Cette exception peut être attribuée aux valeurs initiales estimées des écarts type de ce groupe avant l'ajustement de cette statistique.

L'origine à cette rupture observée dans le groupe 3 peut être trouvée en examinant l'historique de réalisation des projets de ce groupe. L'analyse a révélé que la majorité de ces projets ont été exécutés avant 2008, représentant 64,29% des projets du groupe, tandis que pour les autres groupes, le pourcentage le plus élevé n'a pas dépassé 41,27% à cette période, comme illustré dans la figure 5.14. L'analyse a également révélé que les projets de ce groupe ont été réalisés avec des entreprises bénéficiant d'une qualification acceptables. Cette constatation écarte ainsi l'hypothèse selon laquelle le marché de réalisation aurait été attribué à une entreprise non qualifiée. La figure 5.15 met en évidence cette relation, illustrant que les entreprises impliquées dans les projets du groupe 3 ont démontré une expérience et une expertise considérables dans le domaine de la construction (catégorie IV). Par conséquent, la diminution inattendue du pourcentage de résultats conformes dans ce groupe ne peut pas être directement attribuée à une incompétence ou à une qualification insuffisante de l'entreprise responsable.

En outre, en plus de l'influence de la formulation du béton sur sa qualité, il semble qu'il y ait eu un problème de contrôle qualité lors de la réalisation de ces projets à cette époque. En pratique, il est courant de négliger ce paramètre lors de l'évaluation de la qualité du béton en raison de la croyance répandue selon laquelle une mauvaise qualité est uniquement due à une formulation de béton inadéquate. Autrement dit, on attribue souvent les problèmes de qualité uniquement à la formulation du béton, ce qui peut conduire à une interprétation erronée des résultats dans certains cas. Cependant, cette hypothèse est fréquemment remise en question, car une formulation maîtrisée sur le plan théorique et en laboratoire peut ne pas donner les résultats escomptés sur le chantier. Ce phénomène peut être attribué à un contrôle insuffisant sur le site en raison du manque d'expérience de l'organisme de contrôle, de la négligence, de l'incompétence ou de la qualification insuffisante du personnel responsable du contrôle.

Cette interprétation est confirmée dans le cas du groupe 3, où tous les projets ont été confiés à des bureaux d'études ayant une expérience immature ou insuffisante dans le domaine du suivi des constructions par rapport aux autres groupes (Figure 5.16).

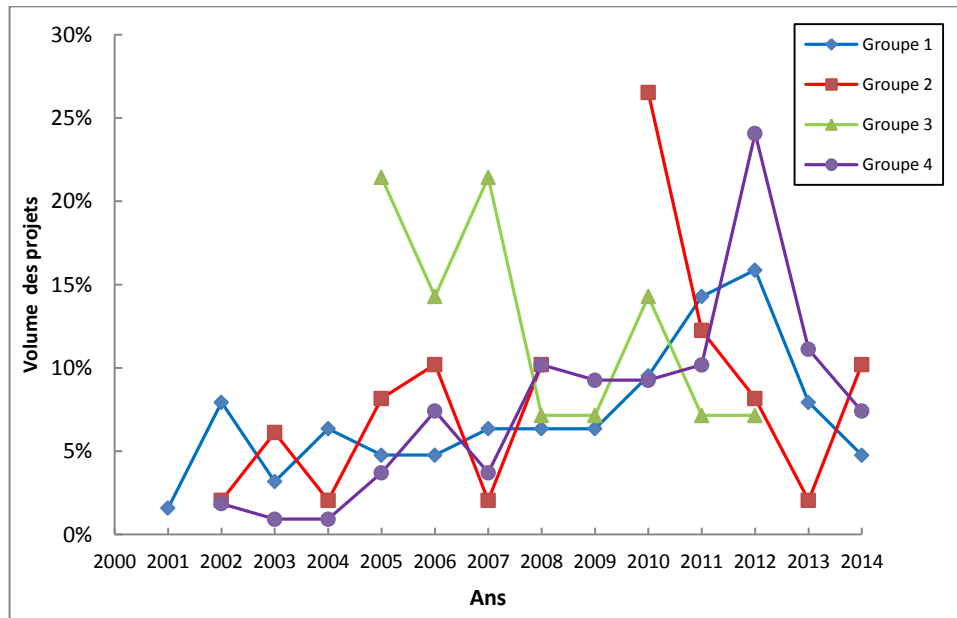


Figure 5. 14 : Répartition des projets en fonction de l'année de réalisation pour les quatre groupes.

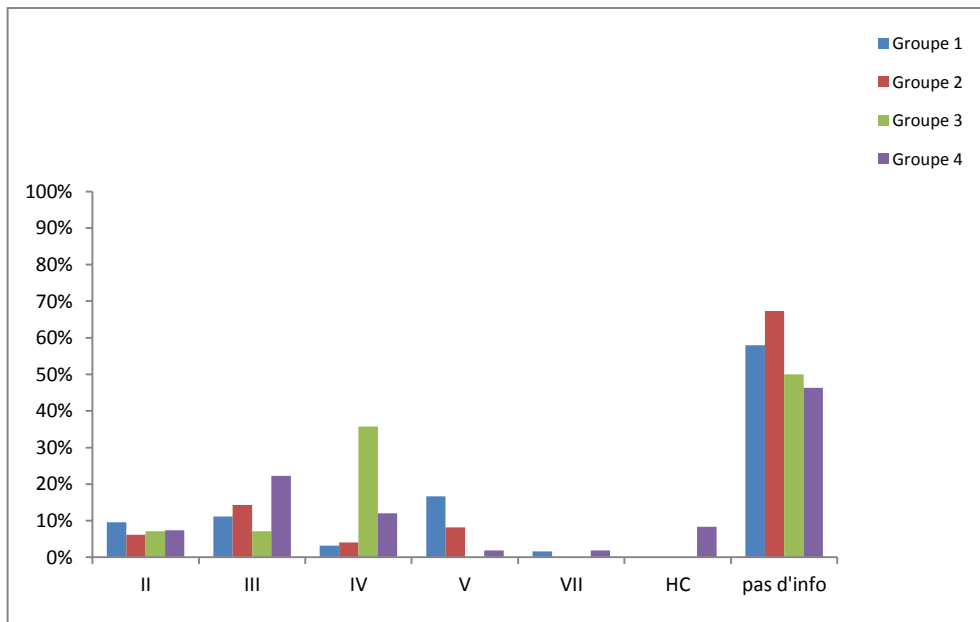


Figure 5. 15 : Répartition des projets en fonction de la qualification des entreprises.

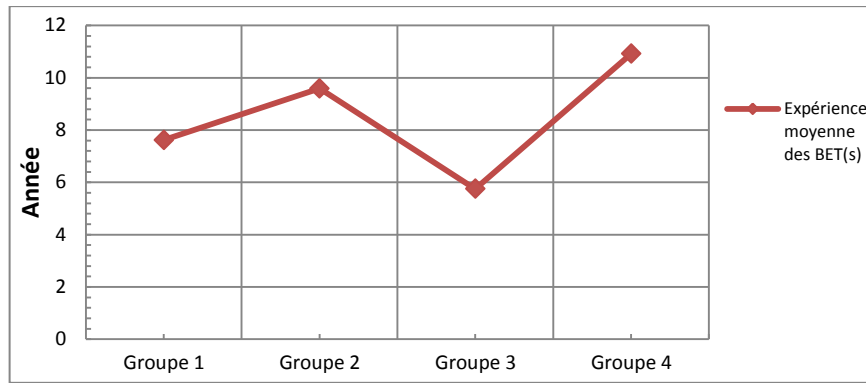


Figure 5. 16 : Variation de l'expérience moyenne de l'organisme de contrôle (BET) pour les quatre groupes.

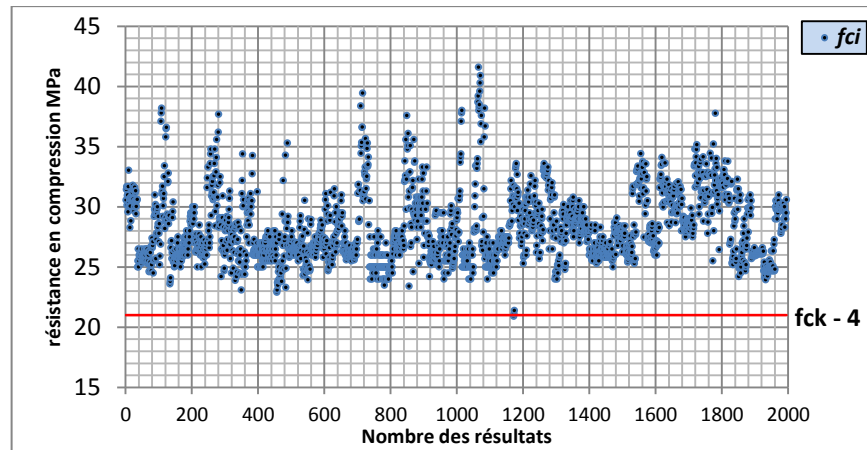
(ii) Selon la norme EN 206-1 et NA 16002

Comme exposé dans le chapitre 1, la norme européenne et algérienne adoptent une approche qui consiste à étudier la conformité du béton à deux périodes de production distinctes : la période de production initiale (PPI) et la période continue (PPC). Au cours de ces deux périodes, l'évaluation de la conformité d'un tel béton est déterminée en fonction de critères spécifiques bien définis.

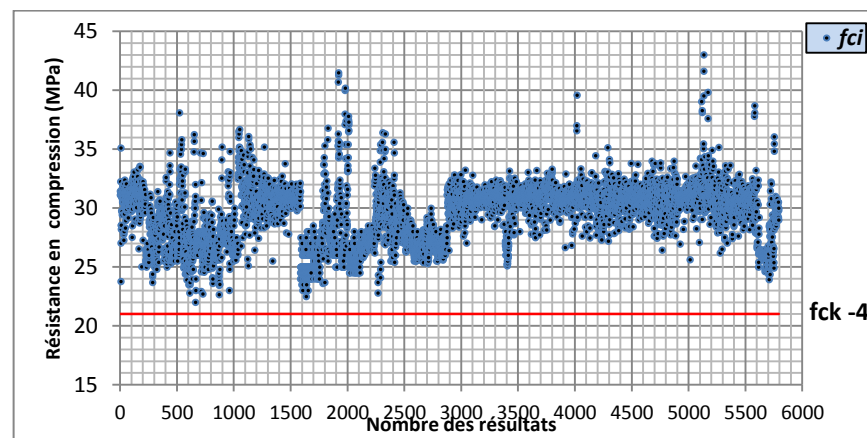
D'après la figure 5.17, il est clairement visible qu'aucun problème de conformité ne se pose au niveau des résultats individuels, que ce soit pour la période initiale de production (PPI) ou pour la période continue (PPC). En effet, 99,95% des résultats sont conformes pour la PPI, tandis que la totalité des résultats sont conformes pour la PPC. Cependant, la seule différence observée réside dans la proximité des résultats à la limite critique dans le cas de la période initiale de production.

Cette différence est principalement due à l'importance des résultats dont les valeurs sont inférieures à la résistance caractéristique de la classe du béton étudié dans le cas de la production initiale. Pour la PPI, 186 sur 1995 résultats sont inférieurs à 25 MPa, ce qui représente 9,32%, tandis que pour la PPC, 230 sur 5793 résultats, soit 3,97%.

Cette observation conduit à une conclusion importante dans l'analyse de la qualité du béton : au démarrage des projets, nos entreprises rencontrent des difficultés pour produire un béton qui soit plus ou moins conforme par rapport au reste de la durée de réalisation.



(a) PPI (période de production initiale)



(b) PPC (période de production continue)

Figure 5. 17 : Critère de conformité des résultats individuels selon EN 206-1 et NA16002.

#### 5.3.2.4 Evaluation de la conformité des résultats de la résistance moyenne $f_{c,mi}$

##### (i) Selon la norme ACI

En appliquant le deuxième critère de conformité relatif aux résistances moyennes, nous avons observé que les enjeux de conformité restent similaires à ceux des résultats individuels, mais avec une légère différence dans la distribution des résultats conformes (Figure 5.18).

Les taux de conformité dans la fourchette supérieurs à 75% restent les plus élevés, mais avec une diminution significative par rapport au premier critère (Figure 5.19). De plus, selon la figure 5.20, le groupe 3 continue de présenter les performances les moins satisfaisantes dans cette analyse, affichant un taux de conformité globale de 57,14%. Par ailleurs, nous avons remarqué que l'écart entre les pourcentages de conformité s'est réduit considérablement d'un groupe à l'autre. Cette observation est cohérente avec le fait que la

formule de l'ACI repose toujours sur la même valeur d'écart type calculée au début de l'analyse de conformité, et que le calcul consécutif de la moyenne a contribué à l'homogénéisation des résultats en atténuant l'impact des résultats aberrants.

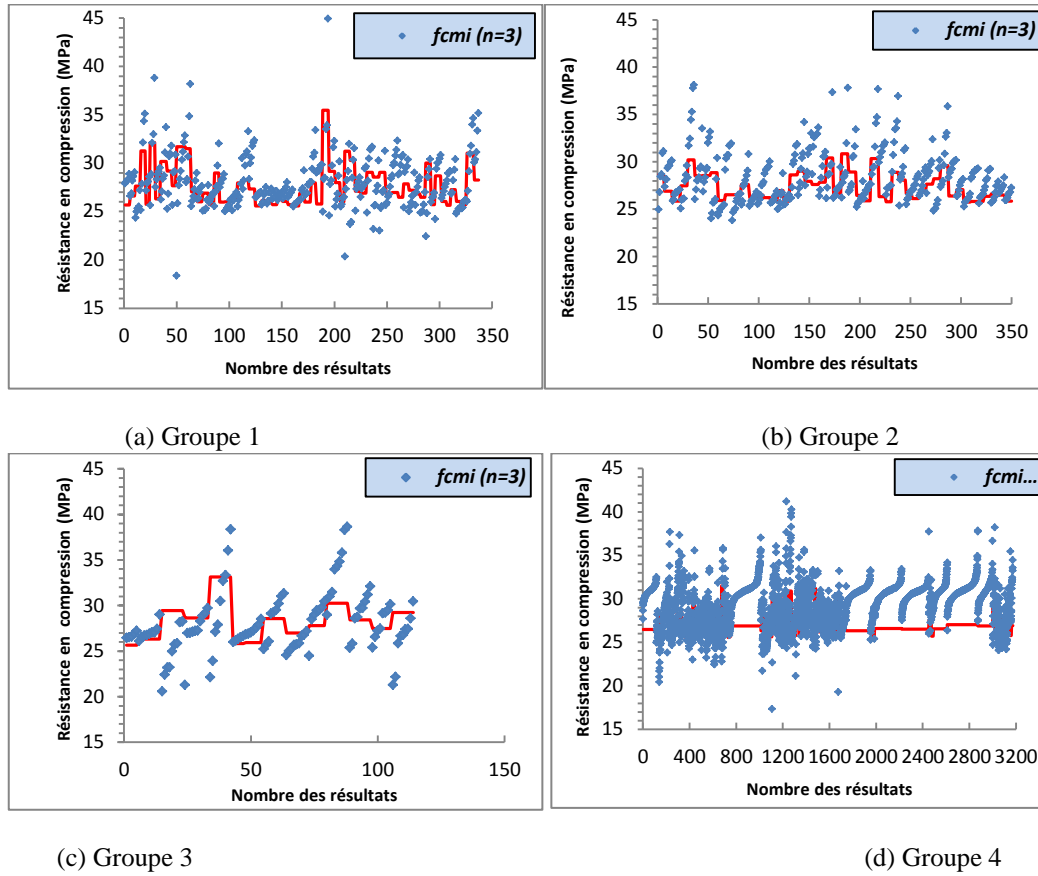


Figure 5. 18 : Dispersion des résultats de la résistance moyenne autour de la résistance requise selon le deuxième critère de conformité de l'ACI

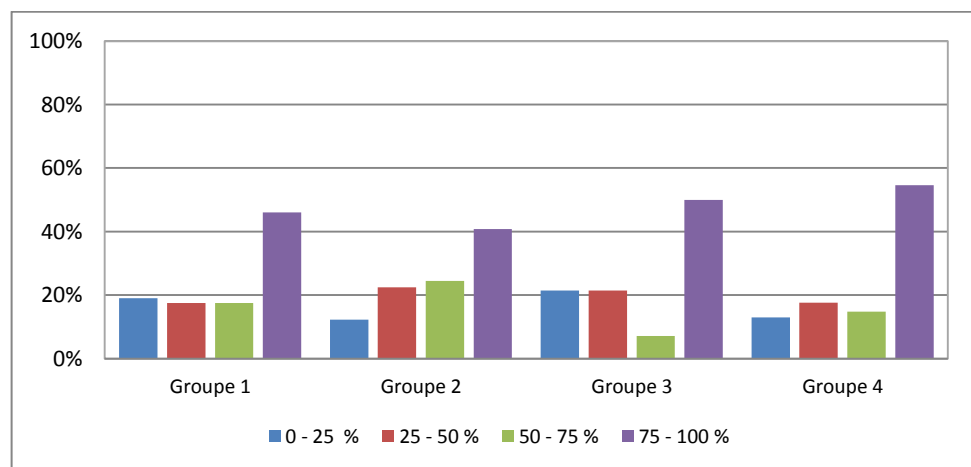


Figure 5. 19 : Répartition du taux des résultats conformes de la résistance moyenne pour les quatre groupes.

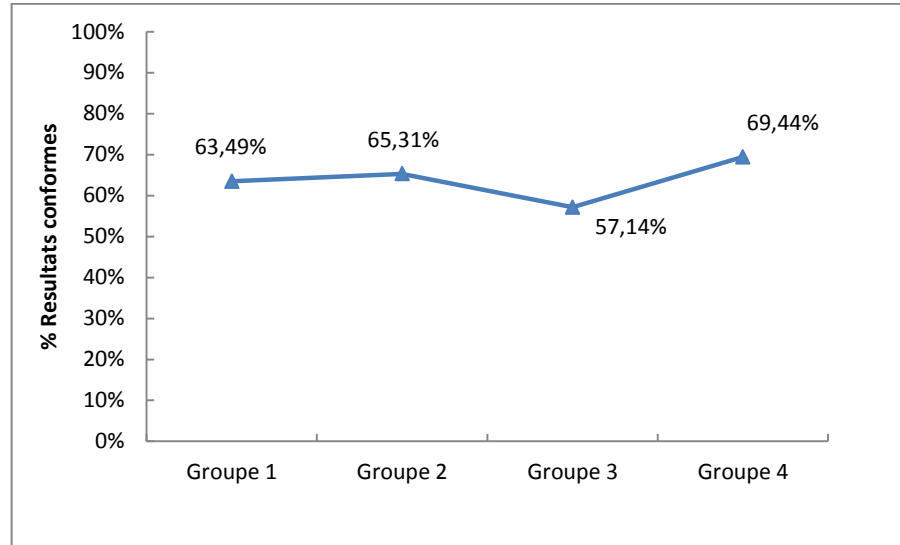
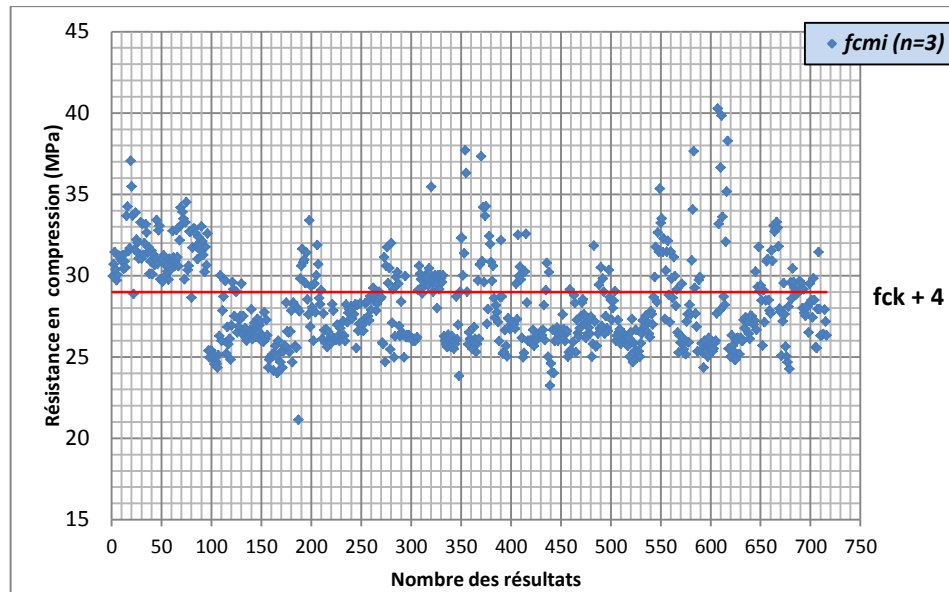


Figure 5. 20 : Taux globaux des résultats conformes de la résistance moyenne pour les quatre groupes.

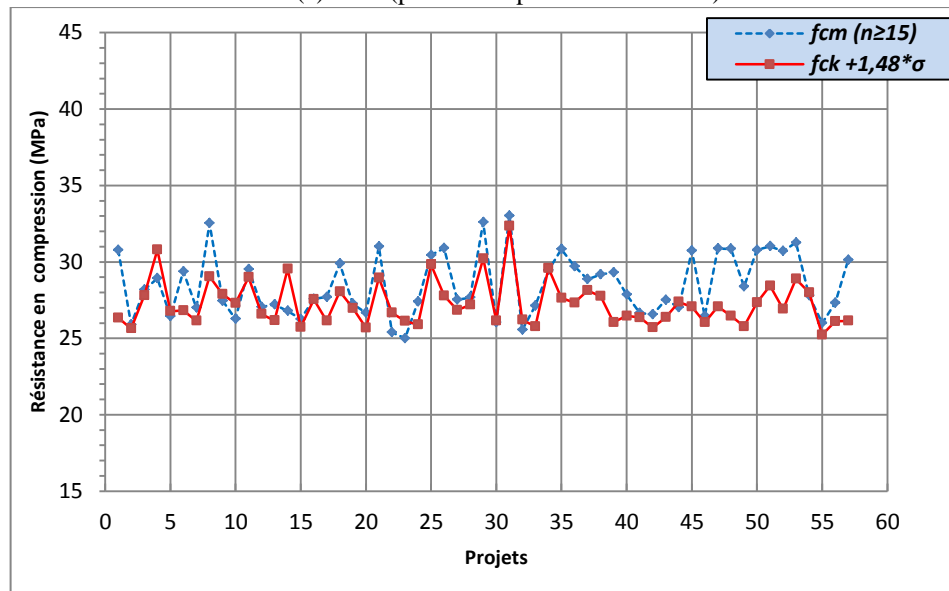
(ii) Selon la norme EN 206-1 et NA 16002

L'analyse de la conformité des résultats selon le deuxième critère de la norme EN206 et NA 16002 confirme les conclusions précédentes obtenues lors du traitement du premier critère. En effet, seulement 35,61% des résultats satisfont aux exigences de conformité pour la production initiale, tandis que 78,95% des résultats se situent au-dessus de la limite recommandée pour la production continue (PPC) (Figure 5.21).

Les causes de cette problématique sont diverses et peuvent être attribuées à différentes circonstances inappropriées. Ces conditions inappropriées peuvent provenir de divers facteurs, tels que des erreurs de formulation du béton, des problèmes de contrôle qualité lors de la production initiale, des variations dans les conditions de production ou des pratiques de mise en œuvre non conformes. Une meilleure compréhension des facteurs influençant la conformité du béton permettra d'améliorer les pratiques de production et de garantir la qualité des ouvrages de construction.



(a) PPI (période de production initiale)



(b) PPC (période de production continue)

Figure 5. 21 : Critère de conformité des résultats de la moyenne de résistance selon EN 206-1 et NA16002.

### 5.3.2.5 Comparaison de la conformité du béton entre les normes

La comparaison entre les différentes normes en ce qui concerne les résultats conformes révèle des variations significatives, notamment pour les résistances individuelles. En effet, les normes EN 206-1 ou NA 16002 présentent généralement des pourcentages de résultats conformes plus élevés que la norme ACI, à l'exception du groupe 4 où le volume des résultats se rapproche de celui de ces deux normes (Figure 5.22).

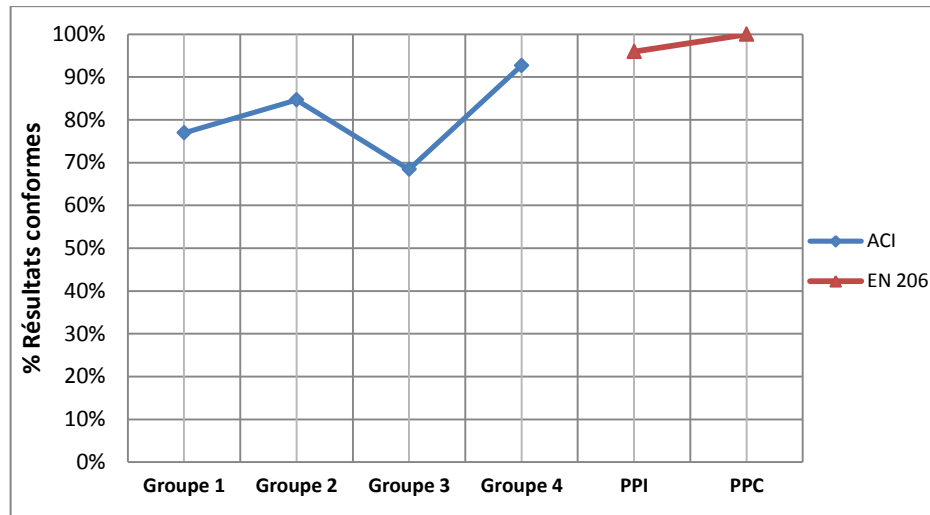


Figure 5. 22 : Comparaison de la conformité des résultats individuels selon différents codes.

Cette observation se vérifie également pour le deuxième critère, à savoir la résistance moyenne, à l'exception de la période de production initiale où le pourcentage de résultats conformes affiche des valeurs plus basses (Figure 5.23).

Cette constatation suggère que la norme ACI présente le taux de conformité des résultats le plus bas, principalement en raison de valeurs de résistance cible plus élevées. Ces valeurs plus élevées peuvent rendre plus difficile l'obtention de résultats conformes selon la norme ACI par rapport aux autres normes. Cette conclusion est similaire à celle obtenue lors de l'analyse du critère de pourcentage maximal des résultats admis.

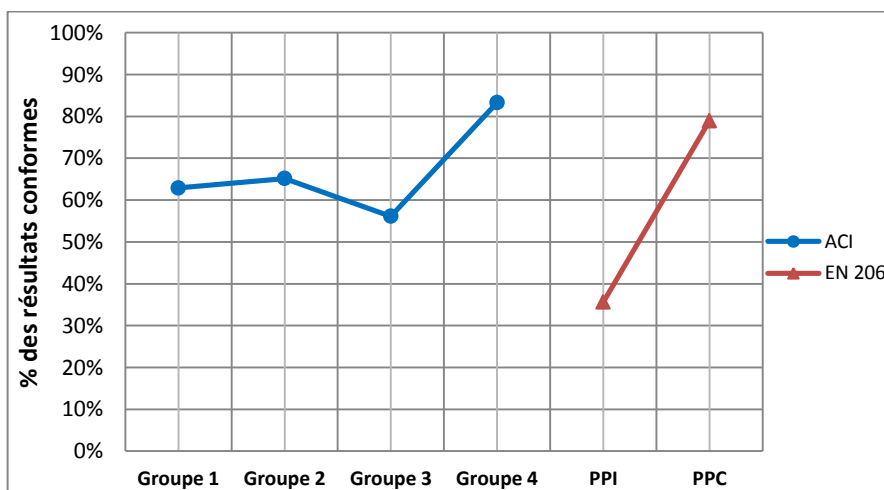


Figure 5. 23 : Comparaison de la conformité des résultats de la moyenne selon différents codes.



#### 5.4 Analyse de la variance (ANOVA) des résultats d'écrasement du béton

L'analyse de l'influence des facteurs liés à la qualité du béton en termes de résistance nécessite une étude statistique approfondie en utilisant des techniques plus avancées telles que l'analyse factorielle ou l'analyse en composantes principales (ACP). Ces méthodes permettent de considérer plusieurs facteurs simultanément et d'explorer les relations complexes entre les variables. Cependant, en raison de la disponibilité limitée des données, l'exploration de ces méthodes dépasse le cadre de cette étude. Néanmoins, nous pouvons compter sur d'autres techniques performantes pour démêler les effets d'un ou de plusieurs facteurs sur la variation de la résistance à la compression du béton sur site.

Dans cette phase de recherche, notre attention est focalisée sur l'application de l'analyse de la variance (ANOVA) afin d'évaluer l'impact des paramètres spécifiques aux projets de construction, des pratiques de mise en œuvre du béton, ainsi que des principaux paramètres de composition du béton sur sa résistance. L'ANOVA, en tant qu'outil statistique avancé, nous permettra de déterminer si ces divers facteurs jouent un rôle significatif dans les fluctuations de la résistance du béton.

##### 5.4.1 Facteurs liés à la mise en œuvre

###### 5.4.1.1 Outils de mise en œuvre du béton

Les outils les plus utilisés pour l'opération de coulage du béton dans les projets de cette base de données sont la pompe à béton et le système de distribution à bras télescopique, également connu sur site sous le nom de girafe. Dans cette étude, nous examinons l'effet de ces deux équipements sur la résistance à la compression du béton, en testant s'il existe une différence significative entre les deux groupes. Nous présentons également les étapes pratiques de l'analyse de la variance uniquement à ce niveau. Pour les autres cas du traitement des données par ANOVA, nous présentons seulement les résultats de calcul.

Tout d'abord, nous allons tester la normalité des données et la signification du test d'homogénéité de la variance. En effet, le test de normalité des données pour le groupe "Girafe" indique que l'échantillon provient très probablement d'une population ayant une distribution normale (Tableau 5.8). En revanche, pour le groupe "pompe à béton", le test montre que la distribution n'est pas normale, mais étant donné le nombre important de données dépassant 100, nous pouvons considérer qu'elle est normalement distribuée. Les tests d'homogénéité non paramétriques ne sont pas significatifs avec une valeur p-valeur supérieure à 5%, ce qui prouve que les variances sont égales (Tableau 5.9).

Le test objet de cette analyse, l'ANOVA, affiche une p-valeur de 0,455, nettement supérieure au seuil de signification de 5% (Tableau 5.10). Cela indique que les moyennes des groupes d'étude ne diffèrent pas statistiquement (Figure 5.24). Autrement dit, le facteur "outils de mise en œuvre du béton" n'a pas d'effet significatif sur la résistance à la compression du béton sur site.

Tableau 5. 7 : Test de normalité pour les deux groupes.

	Mise en œuvre	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
		Statistique	ddl	Signification	Statistique	ddl	Signification
<i>f</i> <sub>cmi</sub>	Girafe	,065	114	,200*	,983	114	,162
	Pompe à béton	,050	1375	,000	,990	1375	,000

\*. Il s'agit d'une borne inférieure de la signification réelle.

a. Correction de signification de Lilliefors

Tableau 5. 8 : Test non paramétrique d'égalité de la variance.

*f*<sub>cmi</sub>

	Statistique <sup>a</sup>	ddl1	ddl2	Sig.
Welch	,727	1	139,841	,395
Brown-Forsythe	,727	1	139,841	,395

a. Distribution F asymptotique.

Tableau 5. 9 Test Anova à un facteur.

*f*<sub>cmi</sub>

	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	,294	1	,294	,559	,455
Intra-groupes	781,040	1487	,525		
Total	781,334	1488			

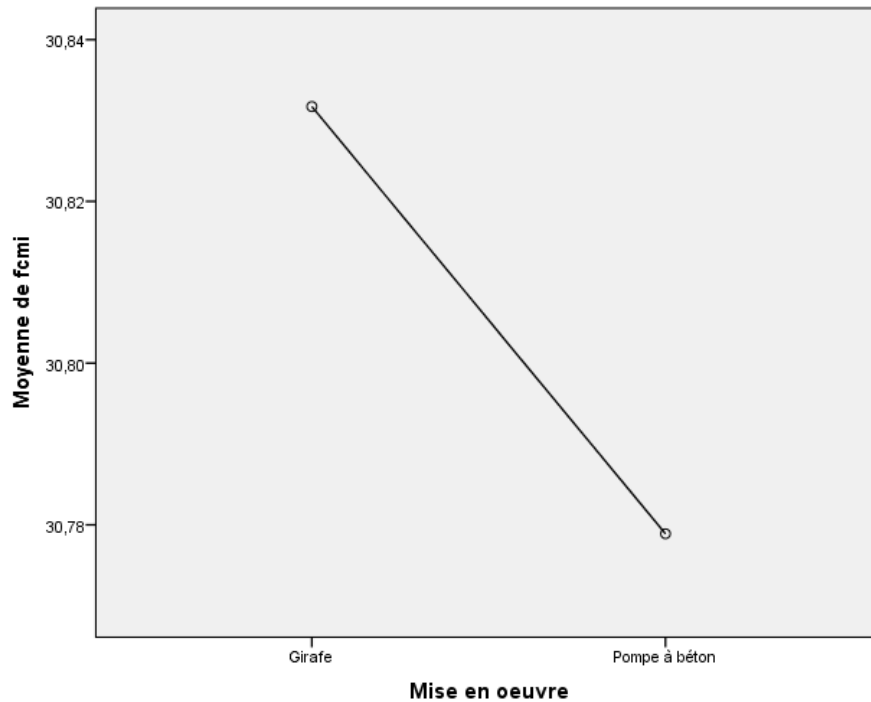


Figure 5. 24 : Influence des méthodes de mise en œuvre sur la résistance moyenne.

#### 5.4.1.2 Mode de malaxage

Contrairement à l'outil de coulage, le mode de malaxage a montré son impact sur les valeurs de la résistance. En effet, le test ANOVA affiche une p-valeur extrêmement inférieure à 5 %, ce qui signifie qu'il existe une différence significative entre les groupes. D'après la figure 5.25, on peut constater cette différence. Les valeurs les plus élevées de résistance sont observées avec les bétons confectionnés par la centrale à béton, tandis que les valeurs les plus faibles sont obtenues avec ceux de la méthode traditionnelle.

L'interprétation de cette différence réside dans la technique de malaxage utilisée par chaque appareil, ainsi que sa capacité à mélanger convenablement le béton en fonction d'affaissement souhaité (sec, plastique, etc.). Dans nos chantiers, il est fréquent de chercher à malaxer le béton le plus rapidement possible, ce qui peut entraîner une sous-estimation du temps de malaxage nécessaire. Cette précipitation peut affecter la qualité du mélange et potentiellement réduire la résistance du béton obtenu. En revanche, la centrale à béton est équipée d'un malaxeur plus efficace et adapté, permettant un malaxage optimal en

prenant en compte les spécificités du béton utilisé, ce qui conduit à des valeurs de résistance plus élevées.

Dans cette optique, l'une des recommandations de cette étude est de généraliser l'utilisation des centrales à béton pour la production de béton, tout en respectant les conditions du chantier et les précautions de transport du béton si celui-ci est éloigné du site de construction. Cette approche devrait permettre d'améliorer la qualité et la résistance du béton utilisé dans les projets de construction, contribuant ainsi à accroître la durabilité et la stabilité des infrastructures.

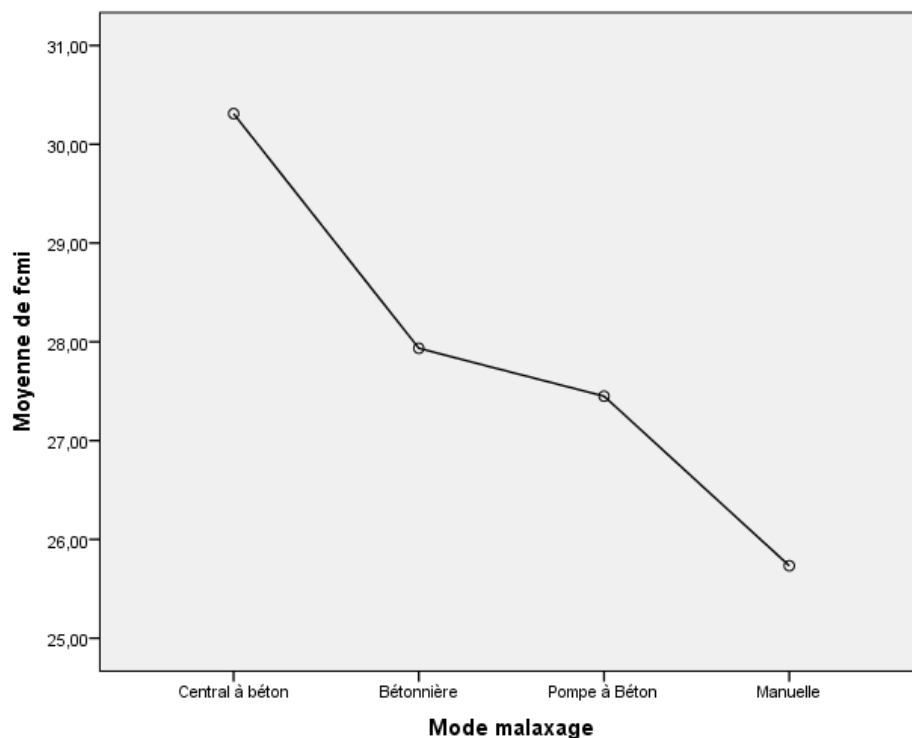


Figure 5. 25 : Effet du mode de malaxage sur la résistance à la compression.

#### 5.4.2 Facteurs propre au projet

##### 5.4.2.1 Variation par année

Cette section a pour objectif de répondre à l'une des questions posées dans la problématique de l'étude : existe-t-il une amélioration de la résistance du béton au fil du temps dans nos chantiers ?

La figure 5.26 représente la variation de la moyenne de la résistance à la compression  $f_{cmi}$  en fonction des années. Les années qui ne figurent pas dans la courbe ont été éliminées en raison de la non-normalité des données. L'analyse de la figure révèle trois phases de

variation distinctes. La première, entre 2002 et 2007, montre une diminution de la moyenne de la résistance à la compression. Cette période est suivie d'une autre phase évolutive croissante entre 2007 et 2009, puis d'une dernière période similaire à la première, où l'on observe également une baisse significative. Ces fluctuations soulèvent des interrogations sur la stabilité de la production de béton avec des résistances différentes d'une année à l'autre.

Les causes de l'abaissement et de l'augmentation de la résistance au fil du temps restent abstraites à ce niveau, mais il est clair que l'instabilité de produire une résistance du béton similaire d'une année à l'autre est présente. Ce résultat a été discuté précédemment lors de l'analyse de la variation à l'échelle macroscopique. En revanche, l'évolution de la résistance observée dans la seconde période est probablement due à la contribution des entreprises étrangères qui ont amélioré la qualité du béton en termes de résistance grâce à leur système de gestion de la qualité structuré. Les résultats de la résistance du béton de ces entreprises sont concentrés durant cette période. Cette influence des entreprises étrangères sur l'amélioration de la qualité du béton est un élément intéressant à prendre en compte et pourrait nous inciter à revoir notre plan de contrôle de qualité pour mieux résoudre cette problématique. Il nous semble qu'il existe une forte corrélation entre le plan de qualité mis en place par l'entreprise et la qualité du béton produite. Cette constatation met en évidence l'importance d'un plan de qualité solide pour garantir la performance du béton dans nos projets de construction.

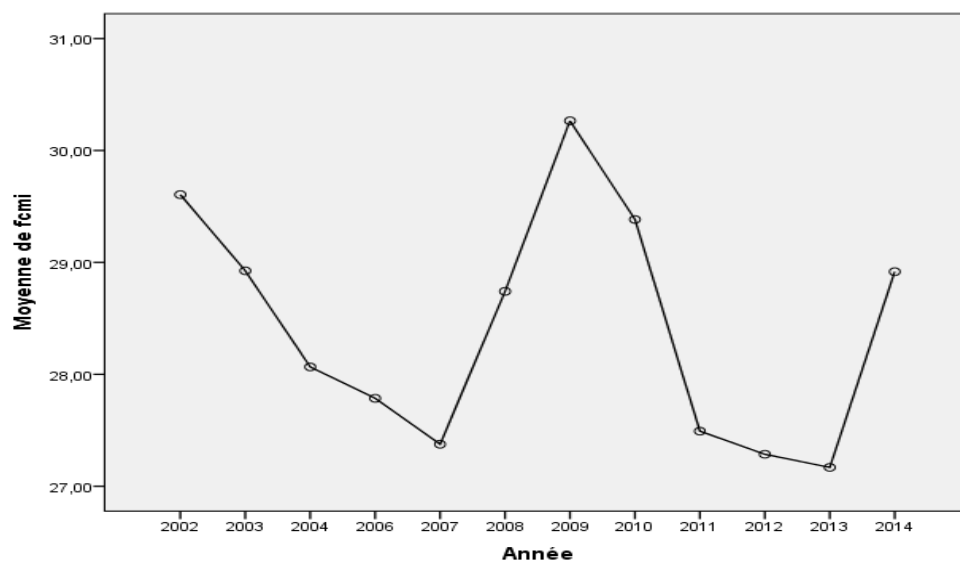


Figure 5. 26 : Évolution de la résistance du béton au fil du temps.

### 5.4.2.2 Variation par catégorie des entreprises

L'analyse de la variance de la résistance en fonction de la qualification ou de la catégorie de l'entreprise révèle une relation directe entre ce paramètre et les résultats de la résistance à la compression (Figure 5.27). Le test ANOVA a démontré qu'il existe une différence significative entre les groupes. Les entreprises de faible ou moyenne catégorie ont montré des résistances plus faibles par rapport à celles de qualification élevée. Le test post-hoc a révélé l'existence de quatre sous-ensembles homogènes dont les moyennes ne diffèrent pas statistiquement (Tableau 5.11). Cette constatation suggère que la qualification de l'entreprise peut jouer un rôle crucial dans la résistance du béton produit sur site, et des mesures peuvent être prises pour améliorer les performances des entreprises de moindre qualification.

Sur le plan pratique, ce paramètre doit être pris en considération par les autorités publiques ou même par le secteur privé lors de l'attribution des marchés de réalisation aux entreprises durant la phase de soumission. Le dossier technique de la qualité devrait comporter, en plus du respect des normes de qualité, l'historique de l'entreprise dans la production du béton. Un barème devrait être établi pour noter la capacité de chaque entreprise à produire un béton de résistance adéquate, homogène et stable. En prenant en compte ces critères de qualité, les décideurs pourront favoriser la sélection des entreprises les plus aptes à fournir un béton de haute qualité, ce qui contribuera à garantir la durabilité et la fiabilité des infrastructures .

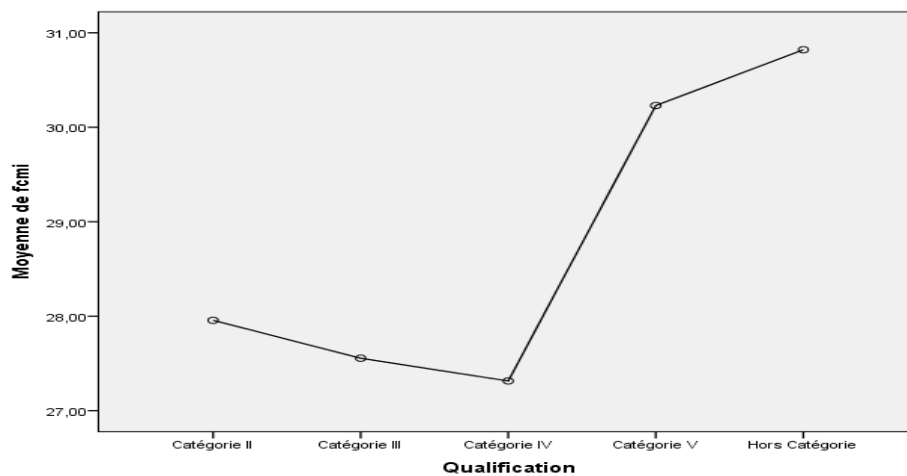


Figure 5. 27 : Variation de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction de la qualification des entreprises.

Tableau 5. 10 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction de la qualification.

Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
1	2	3	4
II	III	IV	V
III	II	V	Hors catégorie
	IV		

#### 5.4.2.3 Variation par équipe de production

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'effet du nombre d'équipes de travail sur la résistance du béton produit sur site. Notre étude vise à déterminer s'il existe une variation significative d'un bloc à l'autre au sein du même projet. Le tableau 5.12 récapitule le pourcentage des projets selon le critère d'égalité de la moyenne de  $f_{cmi}$ .

L'analyse du tableau indique que le nombre d'équipes de travail utilisées dans un projet n'a pas d'effet significatif sur la résistance du béton produit. Les cas où les moyennes de résistance ne sont pas égales sont présents dans tous les scénarios, sauf dans le cas des projets comportant 4 blocs. Il est important de noter que le faible pourcentage avec différence significative entre blocs détecté dans certains projets peut être attribué à d'autres facteurs, tels que la qualité des matériaux utilisés, les conditions de mise en œuvre, ou d'autres variables qui influencent cette distribution.

Tableau 5. 11 : Effet du nombre des équipes sur la variation de la résistance.

	Egalités de la moyenne entre blocs (pas différence significative)	différence significative entre blocs
projets avec 2 blocs	84,38%	15,63%
projets avec 3 blocs	90,00%	10,00%
projets avec 4 blocs	100,00%	-
projets avec 5 blocs et plus	81,82%	18,18%

#### 5.4.2.4 Variation par niveau d'avancement des travaux

Dans cette partie d'analyse, nous cherchons à répondre à une autre question évoquée au début de l'étude : "Est-ce que le niveau correspondant au stade d'avancement du projet affecte la moyenne de la résistance ?" Pour cela, nous examinerons l'évolution de la

résistance à la compression en fonction des différentes phases d'avancement du projet, afin de déterminer s'il existe des variations significatives liées à ces stades.

L'analyse a montré qu'il existe une différence significative entre les groupes de l'étude (p-valeur du test ANOVA =  $0.000 < 0.05$ ). De plus, une évolution croissante de la résistance à la compression a été observée au fur et à mesure que l'on avance dans la réalisation du projet (Figure 5.28). Le test post-hoc a révélé que certaines paires de moyennes sont statistiquement identiques (Tableau 5.13). Ces résultats suggèrent que le niveau d'avancement du projet a un impact significatif sur la résistance du béton produit sur site, et que certaines phases d'avancement peuvent conduire à des valeurs de résistance similaires.

Par ailleurs, ce point important discuté précédemment lors de l'analyse de conformité a été confirmé par cette étude. En effet, nous avons conclu auparavant que nous sommes incapables de produire un béton de qualité au début des travaux sur nos chantiers. Ce constat est corroboré ici, car les deux premiers stades de réalisation ont donné les résistances les plus faibles par rapport au reste. Ces résultats soulignent l'importance d'améliorer les pratiques de mise en œuvre du béton dès le début des travaux afin de garantir une meilleure qualité et résistance du matériau tout au long de la durée de réalisation. Il est primordial de mettre en place des procédures de contrôle strictes dès le début pour assurer des performances optimales du béton sur le chantier.

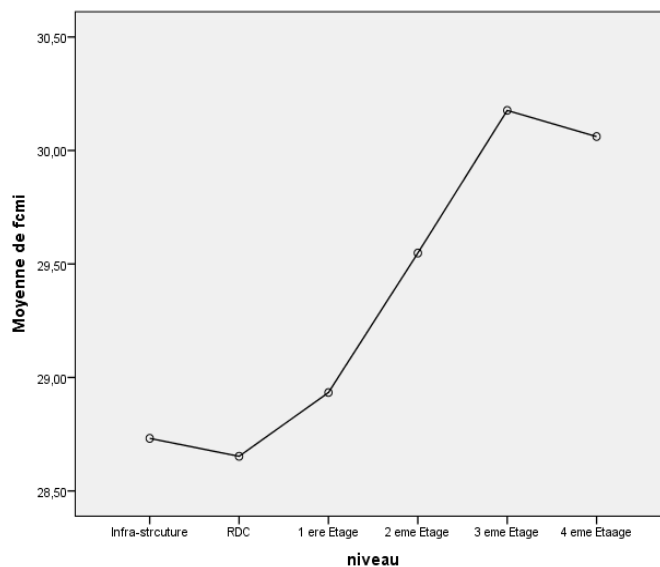


Figure 5. 28 : Variation de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction du stade d'avancement du projet



Tableau 5. 12 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction du stade d'avancement des travaux.

Sous-ensemble pour alpha = 0.05			
1	2	3	4
Infrastructure	2 <sup>eme</sup> étage	3 <sup>eme</sup> étage	4 <sup>eme</sup> étage
RDC	4 <sup>eme</sup> étage	4 <sup>eme</sup> étage	2 <sup>eme</sup> étage
1 <sup>er</sup> étage			3 <sup>eme</sup> étage

#### 5.4.2.5 Variation par type d'éléments

Nous terminons notre analyse de l'effet des facteurs du projet sur la variance de résistance en examinant si la résistance à la compression dépend du type d'élément dans un projet. Les résultats de l'analyse indiquent également que le type d'élément affecte significativement les valeurs de résistance de manière différenciée. En effet, à l'exception de l'élément voile périphérique, tous les éléments de l'infrastructure ont donné des valeurs relativement faibles par rapport à ceux de la superstructure, avec l'élément escalier présentant une particularité (Figure 5.29). Le test post-hoc a permis de classer les résultats en six sous-ensembles identiques (Tableau 5.14). Il semble que la cause de cette répartition en groupes homogènes soit due au stade d'avancement des travaux plutôt qu'au type d'élément. Cette distribution peut entraîner d'importants problèmes en termes de comportement dynamique de l'ouvrage, en particulier en ce qui concerne la rigidité globale de la structure.

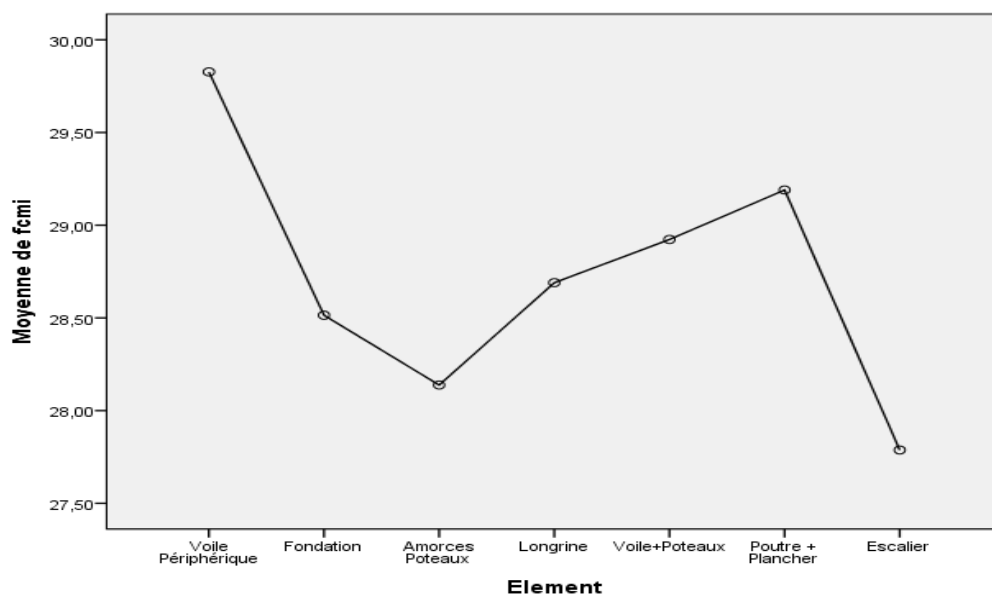
Figure 5. 29 : Variation de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction du type d'élément.

Tableau 5. 13 : Sous-ensembles homogènes de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction du type d'élément.

Sous-ensemble pour alpha = 0.05					
1	2	3	4	5	6
Voile périph	Fondation	A. Poteaux	Longrine	Voile+ Poteau	Poutre + plancher
	A. Poteaux	Fondation	Fondation	Longrine	
	Longrine	Escalier	Voile +Poteau		
	Escalier		Escalier		

### 5.4.3 Facteurs liés à la formulation du béton

#### 5.4.3.1 Le rapport E/C

Étant donné que le rapport (E/C) représente l'un des paramètres les plus importants pour la qualité du béton, il est essentiel de connaître sa contribution à la variance des données dans cette étude. En effet, le test ANOVA confirme sans aucun doute l'effet bien connu de ce rapport sur la résistance du béton. La p-valeur calculée est très faible, 0,000, bien en dessous du seuil de 5%, ce qui indique une influence significative de ce facteur. La figure 5.30 illustre clairement cet effet, montrant que la moyenne de la résistance à la compression diminue à mesure que le rapport E/C augmente.

Le test post-hoc a permis de dégager deux grands sous-ensembles homogènes. Le premier concerne les rapports E/C compris entre 0,42 et 0,54, dont les moyennes ne présentent pas de différences statistiquement significatives. Le deuxième sous-ensemble, avec des rapports E/C allant de 0,54 à 0,61, forme le second groupe homogène.

Ce résultat renforce notre observation mentionnée précédemment, où nous avons constaté que la majorité des projets non-conformes ont un rapport E/C supérieur à 0,54. Cette analyse met en évidence un rapport E/C optimal, pour lequel les résistances à la compression sur site ne se différencient pas statistiquement.

L'analyse confirme ainsi l'importance cruciale du rapport E/C dans la détermination de la résistance du béton. Elle souligne la nécessité impérieuse de contrôler soigneusement ce paramètre lors de la production du béton afin de garantir des résultats de qualité et une résistance appropriée du matériau. Un suivi attentif du rapport E/C contribuera donc à améliorer la fiabilité et la performance des structures en béton utilisées dans nos projets de construction.

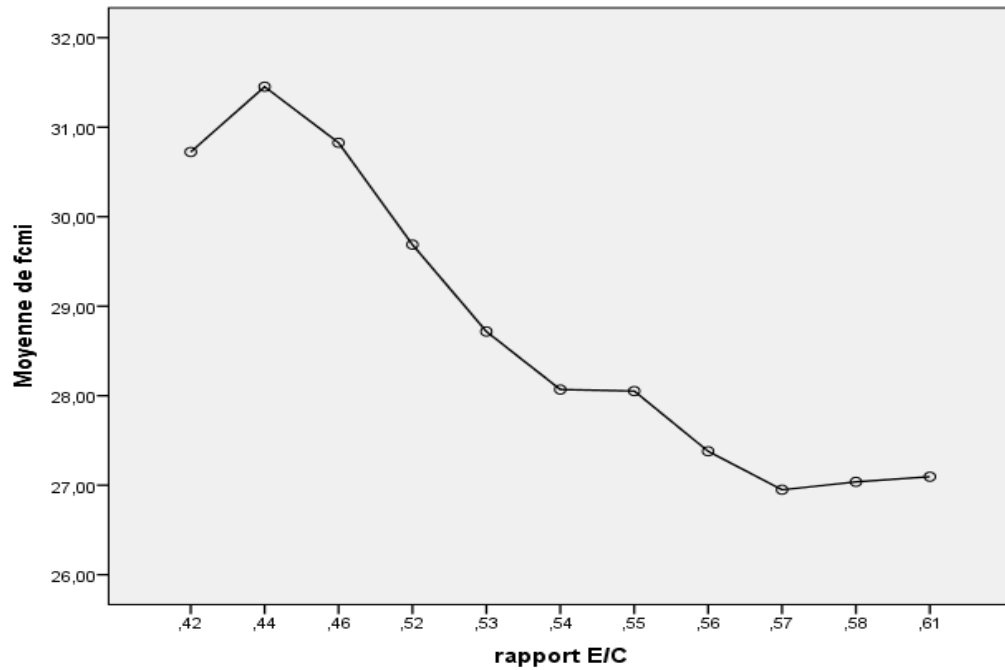


Figure 5. 30 : Évolution de la moyenne de  $f_{cmi}$  en fonction du rapport E/C.

#### 5.4.3.2 Le dosage d'adjuvants

L'effet du dosage des adjuvants sur la variance de la résistance est étudié dans cette recherche. Le test Fisher de l'ANOVA révèle une valeur significativement faible, confirmant ainsi l'impact significatif de ce facteur. Parallèlement, la moyenne de la résistance à la compression varie en fonction du dosage de l'adjuvant (Figure 5.31). Le test post-hoc identifie également trois sous-ensembles où les moyennes ne présentent pas de différences statistiquement significatives (Tableau 5.15).

L'analyse de la figure 5.31 montre une relation positive entre le dosage de l'adjuvant et la résistance à la compression jusqu'à un seuil d'environ  $4,81 \text{ kg/m}^3$ . Au-delà de cette valeur, on observe une chute significative de la résistance. Il est connu que le dosage de l'adjuvant influence positivement la résistance du béton, mais il doit être contrôlé de manière appropriée. Dans le dernier groupe, avec un dosage de  $5,24 \text{ kg/m}^3$ , il semble qu'un excès de dosage, dépassant les recommandations de la fiche technique du produit, ait eu un impact négatif sur la résistance du béton.

À la lumière de ces résultats, il semble recommandé de généraliser l'utilisation des adjuvants sur nos chantiers en raison des gains en termes de résistance observés.

Cependant, le choix du type d'adjuvant et leur dosage doivent être étudiés avec précision en fonction des spécifications du béton, des conditions de mise en œuvre et des conditions météorologiques du site.

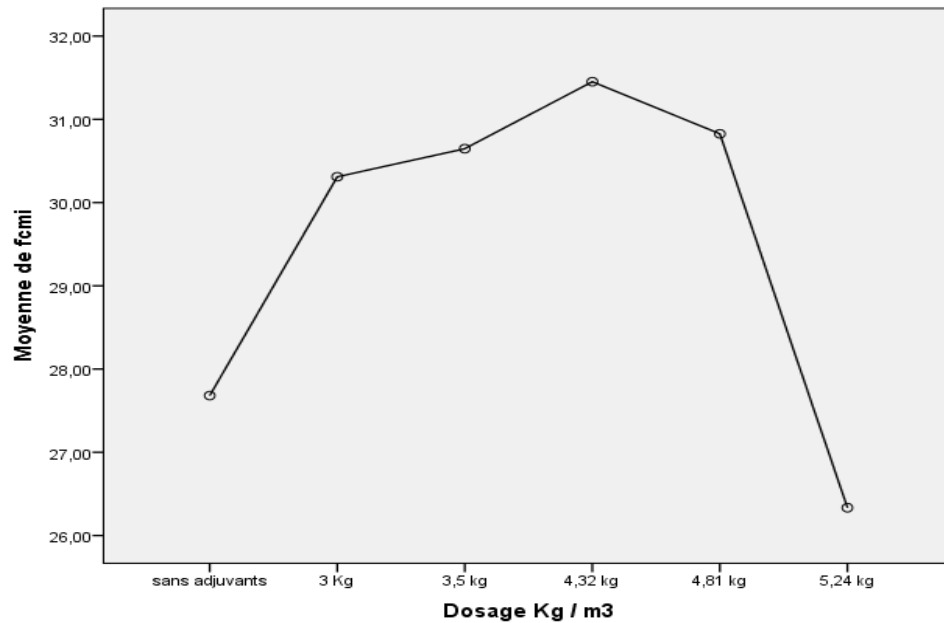


Figure 5. 31 : Effet du dosage de l'adjuvant sur la moyenne de  $f_{cmi}$

Tableau 5. 14 : Sous- ensembles homogènes pour le dosage des adjuvants

Sous-ensemble pour $\alpha = 0.05$		
1	2	3
Sans adjuvants	Dosage 3 kg/ m <sup>3</sup>	Dosage 5,24 kg/ m <sup>3</sup>
Dosage 3 kg/ m <sup>3</sup>	Dosage 3,5 kg/ m <sup>3</sup>	
	Dosage 4,32 kg/ m <sup>3</sup>	
	Dosage 4,81 kg/ m <sup>3</sup>	

#### 5.4.3.3 Systèmes ou squelette granulaire du béton

Le schéma granulaire des compositions de béton provenant de la base de données comporte deux configurations distinctes : le premier inclut les granulats de tailles 3/8, 8/15 et 15/25, tandis que le deuxième est constitué des granulats 8/15 et 15/25.

L'analyse de la variance révèle des moyennes de résistance à la compression  $f_{cmi}$  significativement différentes entre les deux systèmes, mettant ainsi en évidence l'impact marqué de ce paramètre. La p-valeur calculée du test ANOVA est remarquablement faible, s'établissant à 0.000, renforçant ainsi la pertinence de cette conclusion et conduisant au rejet de l'hypothèse nulle de l'égalité des moyennes des groupes. Il est essentiel de noter que le premier système se distingue par une moyenne supérieure à celle du second système (Figure 5.32).

Une distribution adéquate des granulats, incluant des tailles variées, favorise une meilleure compaction de la matrice de béton. Cette situation conduit à une plus grande densité apparente ainsi qu'à une amélioration de la cohésion entre les granulats et la pâte de ciment. Une compacité satisfaisante contribue à la réduction des espaces vides à l'intérieur de la matrice, ce qui à son tour renforce la résistance à la compression. Cette affirmation est corroborée par l'analyse effectuée dans cette étude, où il est observé que la majeure partie des bétons du premier système présentent une densité supérieure à  $2400 \text{ kg/m}^3$ , tandis que tous les bétons du second système affichent une masse volumique inférieure à cette valeur de référence (Figure 5.33).

En considérant ces constatations, il semble judicieux de préconiser l'utilisation d'un squelette granulaire continu composé de trois fractions granulaires au lieu des deux habituelles. Cette adaptation pourrait contribuer à résoudre l'un des problèmes associés à la qualité du béton sur les chantiers de construction.

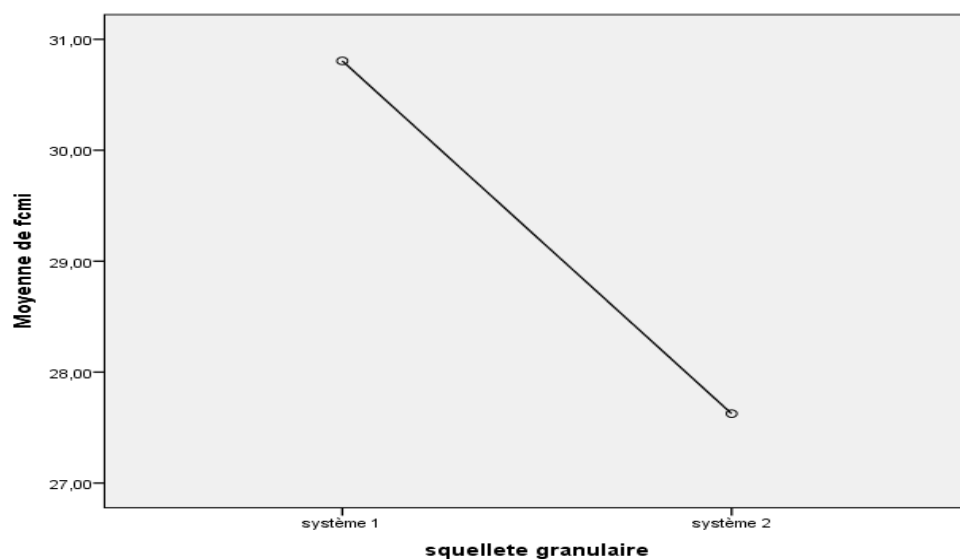
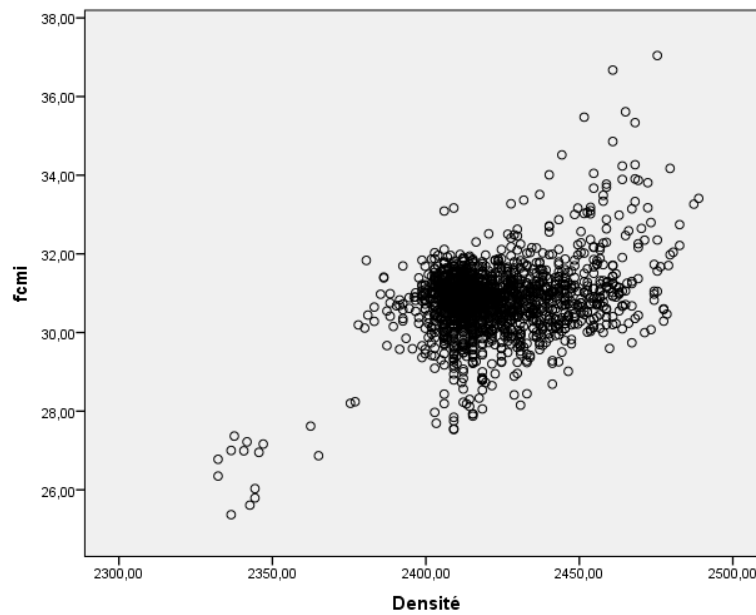
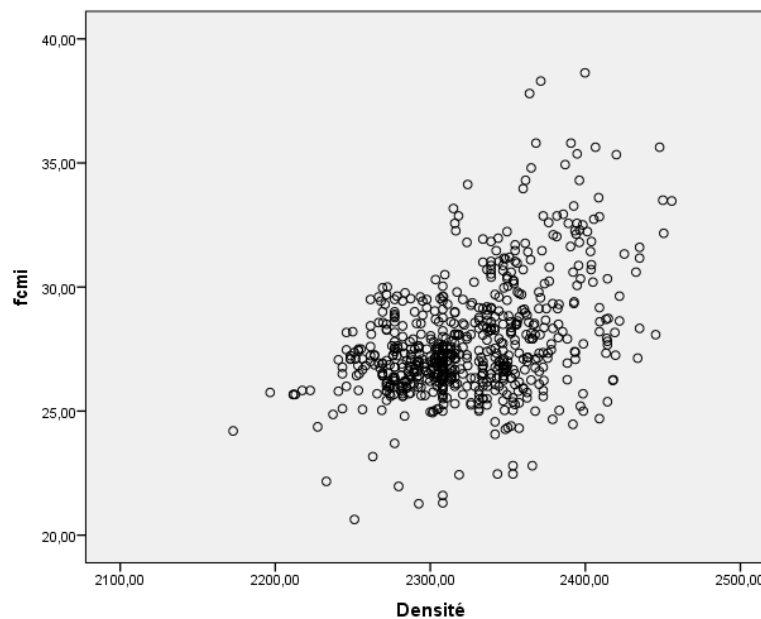


Figure 5. 32 : Effet du système granulaire sur la moyenne de  $f_{cmi}$ .



(a) : système (1) avec trois fractions granulaires



(b) : système (2) avec deux fractions granulaires

Figure 5. 33 : Variation de la résistance  $f_{cmi}$  en fonction de la densité.

#### 5.4.3.4 Qualité du sable

Dans cette section, notre démarche se focalise sur une enquête visant à établir la relation existante entre le type de sable répertorié dans la base de données et la résistance à la

compression du béton. Notre objectif est d'identifier le sable le plus adapté pour garantir la qualité du béton. À cette fin, nous employons une Analyse de la Covariance (ANCOVA) dans le but de déterminer aussi si le dosage de sable l'influence statistiquement la résistance du matériau.

(i) Sable concassé

Outre les conditions inhérentes à l'application de l'ANOVA, une autre condition substantielle préalable à l'accomplissement de l'ANCOVA doit être remplie. Cette condition consiste à examiner la présence d'une régression linéaire entre les variables indépendantes impliquées, à savoir le dosage et le type de sable. En effet, l'observation de la courbe reliant la résistance à la compression au dosage de sable démontre une relation entre ces deux variables, bien que cette corrélation se révèle de faible intensité, elle demeure présente (Figure 5.34).

L'effet inter-sujet mis en évidence par le test indique que l'effet du dosage n'est pas significatif sur la résistance, tandis que la provenance du sable demeure significative. En outre, la comparaison par paires met en évidence l'existence de deux sous-ensembles homogènes dont les moyennes sont équivalentes (Tableau 5.16).

La figure 5.35 illustre la variation de la moyenne de la résistance à la compression  $f_{cmi}$  en fonction des différentes carrières.

En l'absence d'informations précises concernant la nature des fillers, il est observé que la densité apparente du sable ainsi que le module de finesse ont joué un rôle significatif dans la variation des moyennes de la résistance à la compression  $f_{cmi}$ . Une densité apparente plus élevée du sable peut exercer une influence positive sur la résistance à la compression du béton, en améliorant la compaction, la distribution des charges et la cohésion globale de la matrice cimentaire. Il est pertinent de noter que les échantillons de sable provenant de Tizi-Ouzou et d'El-Hachimia présentent les densités apparentes les plus élevées, comme indiqué dans le tableau 5.17.

Simultanément, un module de finesse (MF) plus bas suggère une distribution granulométrique plus étroite, caractérisée par une quantité réduite de fines particules. Dans le contexte de notre étude, à l'exception du sable de Keddara, les valeurs de MF pour le premier sous-ensemble homogène sont systématiquement inférieures à celles du deuxième

sous-ensemble. Cette observation implique que le sable du premier sous-ensemble présente une distribution granulométrique plus restreinte, une caractéristique qui pourrait avoir contribué à ses performances supérieures en termes de résistance à la compression.

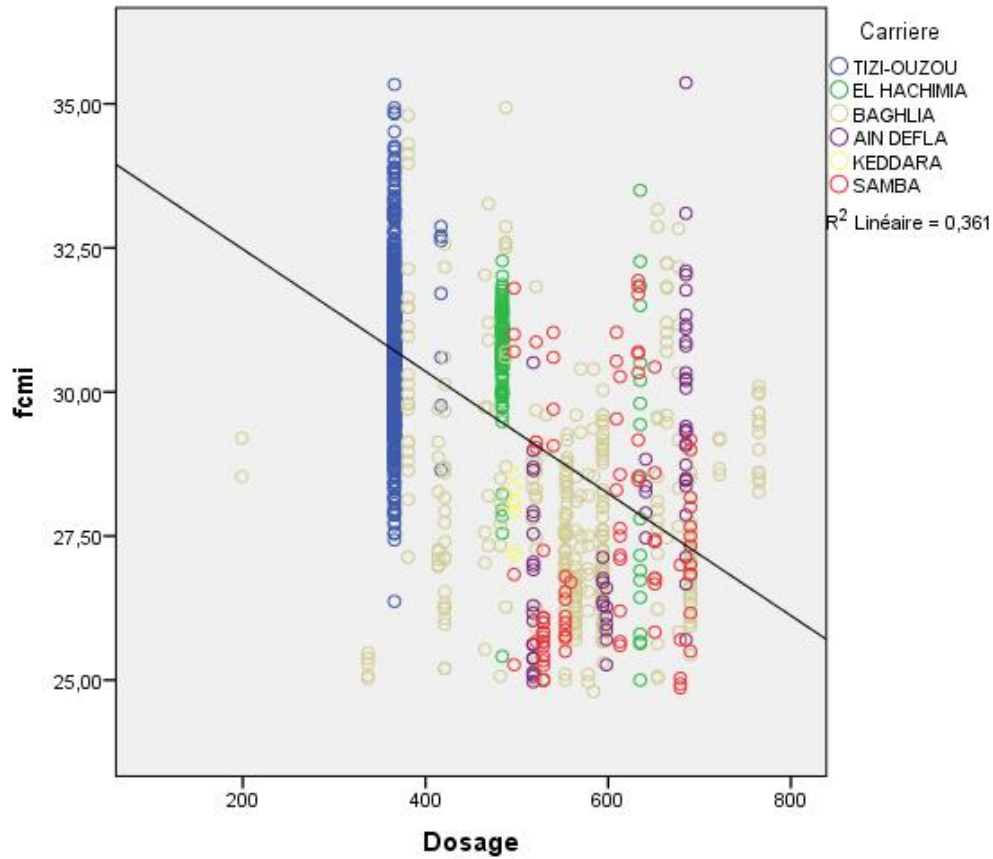


Figure 5. 34 : Corrélation entre le dosage du sable normale est la résistance  $f_{cmi}$ .

Tableau 5. 15 : Sous- ensembles homogènes pour la provenance de sable normale.

Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
1	2
Tizi-Ouzou	Baghlia
El-Hachimia	Ain Defla
	Keddara
	Samba



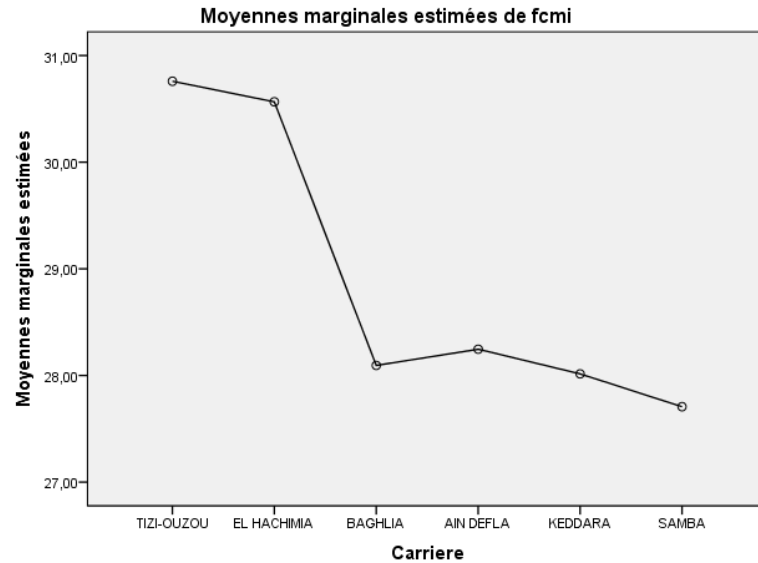


Figure 5. 35 : Variation de la moyenne de  $f_{cmi}$  selon la provenance du sable concassé.

Tableau 5. 16 : Propriétés du sable concassé.

	Densité Apparente	M F	E S	% fines $\leq 80 \mu\text{m}$
Tizi-Ouzou	1,71	3,39	73,84%	
El-Hachimia	1,75	3,14	54,81%	
Samba	1,54	3,50	87,64%	0,77%
Ain Defla	1,47	3,76	76,47%	1,00%
Baghlia	1,49	3,51	79,00%	0,83%
Keddara	1,52	3,22		2,50%

(ii) Sable fin

Dans ce contexte, nous avons suivi les mêmes procédures que pour le sable concassé. En examinant la relation entre le dosage du sable fin et la résistance, nous constatons qu'il n'existe pas de corrélation entre ces deux variables ( $R^2=0.04$ ). Par conséquent, l'utilisation de l'analyse de covariance (ANCOVA) n'est pas pertinente dans ce cas spécifique.

En revenant à l'analyse de variance (ANOVA), nous confirmons qu'il existe une association significative entre le type de sable fin et la résistance à la compression (Figure 5.36). Les tests post-hoc révèlent des différences significatives dans les moyennes de

résistance à la compression entre les trois sources de sable fin. Notamment, le béton fabriqué avec le sable provenant de Boussaâda présente les valeurs de résistance les plus élevées par rapport aux autres. Cette tendance s'explique par la propreté supérieure de ce sable, caractérisé par un équivalent de finesse ES de 78,42 %. Ces propriétés en font un choix adapté pour les bétons de haute qualité (Tableau 5.18).

De plus, la résistance accrue obtenue avec ce sable peut également être attribuée à son faible module de finesse MF, qui est de 0,50. Il est à noter que la densité des sables comparés dans cette étude est pratiquement identique.

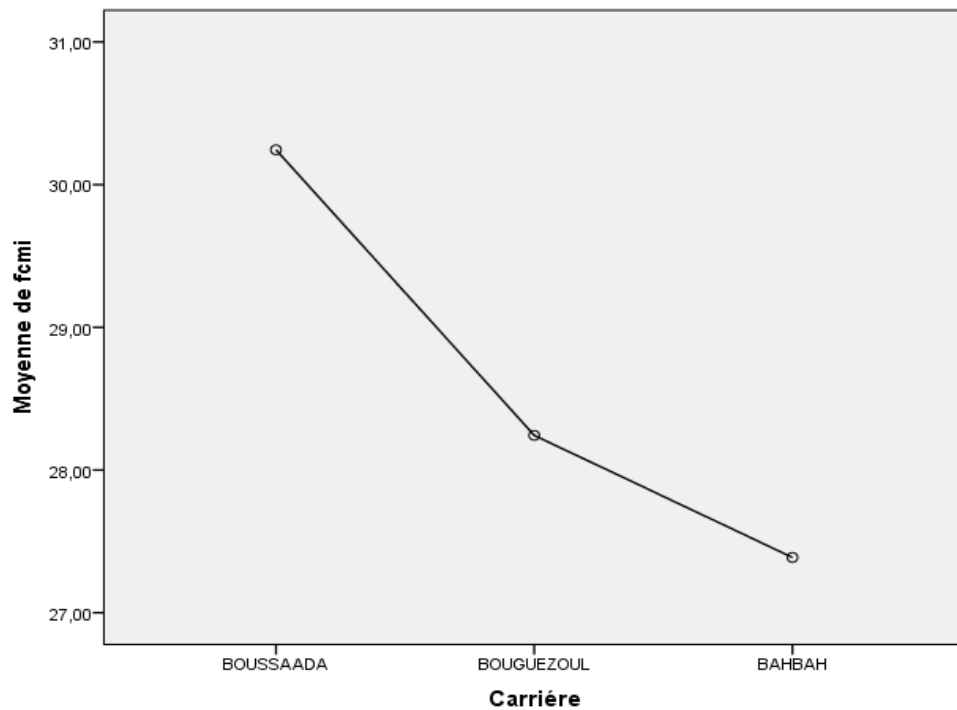


Figure 5. 36 : Variation de la moyenne de  $f_{cmi}$  selon la provenance du sable fin.

Tableau 5. 17 : Propriétés du sable fin.

	Densité Apparente	MF	ES
Boussaâda	1,49	0,52	78,42%
Bougezoul	1,49	1,45	70,71%
Bahbah	1,45	1,06	72,96%

### 5.5 Conclusion

L'étude menée a conduit à plusieurs conclusions concernant l'évaluation de la qualité du béton. Tout d'abord, il a été observé que même si la classe de béton examinée est uniforme dans tous les projets, la production de béton a présenté une variabilité significative. Cette observation suggère une certaine instabilité dans le processus de production du béton d'un projet à l'autre. Cependant, appréhender cette variabilité de manière globale peut s'avérer complexe et être influencé par des éléments subjectifs. Cette constatation souligne donc la nécessité d'adopter une approche plus rigoureuse pour analyser avec précision ce phénomène.

De plus, il a été relevé que le niveau de rejet des résultats d'essai a un impact sur la configuration du champ de résistance à la compression dans un projet. Les résultats ont démontré que le taux de rejet de 15% semble constituer le taux optimal où le champ de résistance ajusté reflète au mieux la résistance effective sur le site.

En parallèle, il a été constaté que la norme ACI présente généralement des valeurs de résistance caractéristique sur site supérieures à celles des autres normes. Cependant, au-delà d'un certain seuil de l'écart type, les valeurs de l'ACI se placent en deuxième position, cédant la première place aux valeurs calculées selon la norme EN 206-1 et NA 16002. Cette tendance indique que l'ACI est moins exigeante en termes de conformité du béton, particulièrement en ce qui concerne les écarts types plus élevés.

Une autre observation majeure porte sur la qualité du béton et son contrôle sur le chantier. Malgré un taux élevé de non-conformité du béton dans certains projets, il a été constaté que généralement, la production de béton était soumise à un contrôle adéquat au sein de chaque projet. Cette constatation remet en question l'idée répandue selon laquelle les problèmes de qualité du béton sont uniquement imputables à sa formulation, soulignant ainsi l'importance d'une surveillance appropriée sur le site.

En ce qui concerne la conformité du béton, la comparaison entre les différentes normes a révélé des variations dans les résultats conformes, avec des taux généralement plus élevés pour les normes EN 206-1 et NA 16002 par rapport à l'ACI. Ces conclusions mettent en lumière la complexité et la pluralité des facteurs influant sur la qualité du béton, allant des

paramètres de formulation aux procédures de contrôle sur le chantier, et appellent à une approche globale pour garantir une qualité optimale dans les projets de construction.

En fin, l'analyse de la variation de la résistance par l'ANOVA a mis en évidence l'impact de ces facteurs sur cette variabilité. Plusieurs résultats ont été discutés en vue de structurer la problématique de la qualité du béton sur les chantiers. Ces conclusions ont conduit à des recommandations visant à améliorer la résistance à la compression sur site.

## **CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

La présente thèse a exploré en profondeur les divers aspects liés à la qualité du béton dans les projets de construction, en mettant l'accent sur l'importance d'un modèle structuré de collecte de données pour résoudre les problèmes inhérents à cette qualité. L'étude a révélé des constatations cruciales qui contribueront à l'amélioration globale de la qualité du béton dans l'industrie de la construction.

La première phase de l'étude a mis en lumière les avantages significatifs du modèle structuré de collecte de données développé dans cette recherche. Ce modèle offre un enregistrement organisé et systématique des informations liées aux projets, garantissant ainsi une collecte cohérente et exhaustive de données, même par des non-spécialistes. De plus, il assure la traçabilité des données, simplifiant le suivi de leur origine et pertinence. L'intégrité des données est maintenue grâce à des critères d'intégrité et des vérifications intégrés au modèle. Les données sont regroupées pour des analyses statistiques et des comparaisons, offrant une vue d'ensemble de la qualité du béton et permettant des décisions informées. Les représentations graphiques facilitent la compréhension des résultats.

En résumé, ce modèle complet de collecte de données constitue une solution solide pour la gestion de la qualité du béton dans les projets de construction, en garantissant un enregistrement précis, une analyse approfondie et une évaluation efficace.

Les conclusions découlant de la deuxième phase de l'étude exposent de manière éclairante les éléments essentiels liés aux distributions de résistance dans le modèle analysé. Les résultats ont démontré un chevauchement limité entre les distributions des différentes variables de résistance, suggérant une maîtrise possible de la formulation du béton. Néanmoins, une certaine instabilité a été détectée dans la forme de la distribution des résistances, principalement entre les données à 7 jours et celles à 28 jours. Malgré cela, la configuration platykurtique a montré une stabilité relative. Les analyses ont confirmé une dispersion plus élevée des données à 28 jours, potentiellement due à divers facteurs tels que la composition du béton, les techniques d'échantillonnage et les conditions de conservation en laboratoire.

L'analyse statistique a mis également en évidence une tendance à la normalité des données à 28 jours par rapport à jeune âge. La méthode de test de Spearman a révélé des corrélations significatives entre les résistances à différents âges pour certains projets, tandis que d'autres n'ont montré aucune corrélation notable.

La troisième partie de l'étude a ciblé la variation et la conformité des résultats, révélant une diversité notable des valeurs de résistance malgré l'utilisation d'une seule classe de béton. L'analyse de cette variation en fonction du niveau de rejet a mis en évidence des tendances significatives, soulignant l'impact de l'ajustement des courbes de distribution des données sur la valeur moyenne de résistance des projets. L'évaluation de la conformité selon divers codes a révélé des variations intrigantes. Par exemple, les résultats du critère de conformité selon l'ACI diffèrent des autres codes, et sont attribuables aux probabilités d'inférence et aux définitions de chaque critère de conformité.

En ce qui concerne la conformité à jeune âge, une similarité notable entre les résultats à 7 jours et à 28 jours a été observée, particulièrement en présence d'une corrélation statistique. Cependant, divers facteurs, tels que l'estimation des paramètres de dispersion et le maintien de la distribution normale, peuvent influencer cette similitude.

L'application d'analyses statistiques avancées a permis d'examiner en détail l'effet de multiples facteurs sur la résistance à la compression du béton dans divers contextes, générant des conclusions significatives. Parmi les facteurs étudiés, citons les outils de coulage, le mode de malaxage, la qualification de l'entreprise, le nombre d'équipes de travail, le stade d'avancement du projet, le type d'élément, le rapport E/C (eau/ciment), le dosage des adjuvants et le type de sable. L'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse de covariance (ANCOVA) ont été employées pour établir si ces facteurs exercent une influence significative sur la résistance du béton fabriqué sur site.

Ces analyses ont généré plusieurs conclusions de grande importance. Par exemple, l'utilisation de centrales à béton pour la production a été recommandée, favorisant l'amélioration de la qualité et de la résistance du matériau.

Le choix judicieux du type et du dosage d'adjuvants, ainsi que la distribution granulométrique des granulats, ont également été identifiés comme des éléments critiques pour garantir la qualité du béton. Il a été remarqué que des densités apparentes plus élevées

et des modules de finesse plus bas sont corrélés à de meilleures performances en termes de résistance.

En outre, l'analyse a mis en évidence que le stade d'avancement du projet et le type d'élément de construction influencent également la résistance du béton, soulignant l'importance de la mise en place précoce de procédures de contrôle pour optimiser les performances du béton sur le chantier.

### Perspectives et recommandations

Cette étude a été limitée à une seule wilaya, et à une période allant de 2000 à 2014. Nous recommandons de poursuivre cette étude par :

- 1- Une analyse similaire pour d'autres régions du pays.
- 2- Réalisation d'une analyse factorielle complète ou une analyse à composante principale basée sur des observations normalisées afin d'examiner la contribution de chaque facteur dans la qualité de béton en termes de résistance statistiquement, et permettre la détermination des taux optimaux pour qu'il n'ait pas une différence significative de la moyenne du champ de résistance dans un projet.
- 3- Proposer une deuxième version du modèle de la base des données pour permettre d'intégrer d'autres options dans le but d'améliorer le traitement des données liées à la qualité du béton. A titre d'exemple, ajouter les fonctions gérant la loi de distribution des données à l'intérieure de la base, personnaliser le traitement et la visualisation des résultats pour chaque projet, mettre en place des rubriques spéciales pour analyser les différents type de béton (Béton de haute performance, auto-plaçant, béton à base des agrégats recyclés).
- 4- Développer une application sur web ou sur téléphone-mobile pour permettre aux ingénieurs de contrôle d'effectuer un calcul préliminaire rapide de l'indice de la qualité du béton selon les informations et les conditions du chantier. Cela permet une surveillance constante de la qualité du béton et facilite la détection précoce des problèmes potentiels.



- 5- Mettre en œuvre une approche pour l'estimation de l'indice de la qualité du béton dans un projet. Cette approche repose sur les analyses de données citées plus-haut pour déterminer les facteurs les plus déterminants qui affectent la résistance à la compression dans un projet. Sur la base de cette estimation, nous pouvons construire une échelle gradué de la qualité qui permette de classer la qualité du béton à temps réelle et à n'importe quel stade d'avancement des travaux.
  
- 6- L'utilisation de l'intelligence Artificielle pour analyser de grandes quantités de données de qualité du béton et identifier des modèles complexes. Elle peut aider à prévoir les performances à long terme du béton en fonction de divers facteurs tels que les conditions environnementales et les méthodes de production.

---

## Références

- [1] A. Kazaz, S. Ulubeyli, and F. Turker, “The quality perspective of the ready-mixed concrete industry in Turkey,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 11, pp. 1349–1357, 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.03.010.
- [2] P. D. Rwelamila and G. T. Wiseman, “Concrete quality management: a research study of the general contractor in South Africa,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 9, no. 3, pp. 173–183, 1995, doi: 10.1016/0950-0618(95)00034-D.
- [3] S. Donatello, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, “Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 38, pp. 12–20, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.001.
- [4] A. M. Neville, “Propriétés des bétons,” Eyrolles.2000, p. 806.
- [5] S. K. Benyahia, Ali, Mohamed Ghrici, “Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique,” in *XXVIIIe Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Bourboule, 2010, pp. 1–11.
- [6] R. L. Day and C. Shi, “Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, no. 8, pp. 1485–1491, 1994, doi: 10.1016/0008-8846(94)90162-7.
- [7] B. Felekoğlu, S. Türkel, and H. Kalyoncu, “Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash - Portland cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 2053–2061, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.024.
- [8] F. Sajedi and H. A. Razak, “Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2036–2045, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.043.
- [9] I. B. Celik, “The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development,” *Powder Technol.*, vol. 188, no. 3, pp. 272–276, 2009, doi: 10.1016/j.powtec.2008.05.007.
- [10] M. Hraste and A. Bezjak, “A new approach to the study of the influence of cement fineness on the strength of cement mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 915–923, 1974, doi: 10.1016/0008-8846(74)90025-8.
- [11] J. Hu, Z. Ge, and K. Wang, “Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 657–663, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011.
- [12] P. Mounanga, “Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermo-physiques,” *Thèse de Doctorat*, Université de Nantes, 2004, p. 11.
- [13] R. Şahin, R. Demirboğa, H. Uysal, and R. Gül, “The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 8, pp. 1245–1249, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00048-6.

- 
- [14] Y. P. Song, L. Y. Song, and G. F. Zhao, “Factors affecting corrosion and approaches for improving durability of ocean reinforced concrete structures,” *Ocean Eng.*, vol. 31, no. 5–6, pp. 779–789, 2004, doi: 10.1016/j.oceaneng.2003.07.006.
- [15] M. Richardson, V. A. Dodd, J. J. Lenehan, S. Conaty, and P. O’Kiely, “The influence of cement content and water/cement ratio on the durability of portland cement concretes exposed to silage effluent,” *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 72, no. 2, pp. 137–143, 1999, doi: 10.1006/jaer.1998.0355.
- [16] J. F. G. Dreux, “Nouveau guide de béton et ces constituants,” Eyrolles.1998.
- [17] D. Mounsif, “Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques , mécaniques et rhéologiques des bétons,” *Thèse de Doctorat*, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018, p. 8.
- [18] F. Lollini, E. Redaelli, and L. Bertolini, “Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, pp. 32–40, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.10.016.
- [19] S. Tsivilis, E. Chaniotakis, E. Badogiannis, G. Pahoulas, and A. Ilias, “A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 2, pp. 107–116, 1999, doi: 10.1016/S0958-9465(98)00031-6.
- [20] H. Yildirim, T. Ilica, and O. Sengul, “Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1282–1288, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023.
- [21] J. M. Ortega, I. Sánchez, and M. A. Climent, “Durability related transport properties of OPC and slag cement mortars hardened under different environmental conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 176–183, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.064.
- [22] A. Kiliç C.D. Atis, A. Teymen, O. Karahan ,F.Ozcan, C. Bilim ,M.O zdemir., “The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 4, pp. 290–296, 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011.
- [23] M. Uysal, “The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 533–540, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.085.
- [24] J. Il Sim, K. H. Yang, and J. K. Jeon, “Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 716–725, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.066.
- [25] A. BENTATA, “Etude expérimentale d’un béton avec le sable de dune,” *Mémoire de Magister*, Université de Ouargla, 2004.
- [26] M. S. Meddah, S. Zitouni, and S. Belâabes, “Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 4, pp. 505–512, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009.

- 
- [27] C. F. Jin, Q. C. He, and J. F. Shao, “An energy-based analysis for aggregate size effect on mechanical strength of cement-based materials,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 102, pp. 207–217, 2013, doi: 10.1016/j.engfracmech.2013.02.013.
- [28] MM. Le Roux et Z. Unikowsk, “Mise en évidence de l’ influence des fines argileuses dans les granulats à béton,” *Bull, liaison Labo. P. Ch*, vol. réf. 2514, pp. 101–108, 1980.
- [29] R. Rabot, C. Coulon, and J. Hamel, “Contribution à l’amélioration de l’essai d’équivalent de sable,” *Bull. Liaison Labo P. Ch*, vol. Réf. 1136, pp. 109–120, 1972.
- [30] B. Felekoğlu, “A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 646–654, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.007.
- [31] A. S. Al-Harthy, M. A. Halim, R. Taha, and K. S. Al-Jabri, “The properties of concrete made with fine dune sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 8, pp. 1803–1808, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.053.
- [32] F. J. Luo, L. He, Z. Pan, W. H. Duan, X. L. Zhao, and F. Collins, “Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 131–137, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005.
- [33] A. G. F.Sadhouari, N. Goufi, “Valorisation de l’utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons,” in *SBEIDCO – 1 st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET*, Oran (Algeria), pp. 247–254.
- [34] S. K. Lim, C. S. Tan, K. P. Chen, M. L. Lee, and W. P. Lee, “Effect of different sand grading on strength properties of cement grout,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 348–355, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.030.
- [35] O. A. El-Nawawy and S. Ahmad, “Use of treated effluent in concrete mixing in an arid climate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 13, no. 2, pp. 137–141, 1991, doi: 10.1016/0958-9465(91)90009-7.
- [36] H. Ouahhabi and A. Hadj Mostfa, “Influence de la granularité du béton hydraulique sur le ressuage,” « *Nat. Technol.* ». *A- Sci. Fondam. Eng.*, vol. 8, pp. 23–26, 2013.
- [37] M.Drissi, B. Mezghiche, and M. L. K. Khouadjia, “Influence des paramètres de composition du béton sur sa résistance de compression,” *Courr. du Savoir*, vol. 20, no. December, pp. 73–77, 2015.
- [38] E. Yaşar, Y. Erdogan, and A. Kiliç, “Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength,” *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 5, pp. 772–777, 2004, doi: 10.1016/j.matlet.2003.06.004.
- [39] B. Felekoğlu, S. Türkel, and B. Baradan, “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 4, pp. 1795–1802, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.01.012.

- 
- [40] F. Falade, "Influence of water/cement ratios and mix proportions on workability and characteristic strength of concrete containing laterite fine aggregate," *Build. Environ.*, vol. 29, no. 2, pp. 237–240, 1994, doi: 10.1016/0360-1323(94)90073-6.
- [41] X. Chen and S. Wu, "Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 804–812, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058.
- [42] I. Bouallaga, "Etude de la carbonatation des bétons à base des ciments algériens," *Mémoire de Magister*, Université. Blida 1, 2007.
- [43] U. S. Yilmaz and H. Turken, "The effects of various curing materials on the compressive strength characteristic of the concretes produced with multiple chemical admixtures," *Sci. Iran.*, vol. 19, no. 1, pp. 77–83, 2012, doi: 10.1016/j.scient.2011.11.038.
- [44] N. Hyvert, "Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton," *These de Doctorat*, U. de Toulouse, 2009.
- [45] F. Sajedi, H. A. Razak, H. Bin Mahmud, and P. Shafigh, "Relationships between compressive strength of cement-slag mortars under air and water curing regimes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 188–196, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.056.
- [46] I. Plečaš and S. Dimovic, "Curing time effect on compressive strength and incremental leaching rates of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  in cement immobilized sludge," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 48, no. 7, pp. 629–633, 2006, doi: 10.1016/j.pnucene.2006.06.012.
- [47] A. A. Ramezani pour and V. M. Malhotra, "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 17, no. 2, pp. 125–133, 1995, doi: 10.1016/0958-9465(95)00005-W.
- [48] H. Yazici, "The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 5, pp. 2083–2089, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.03.013.
- [49] B. Ozer and M. H. Ozkul, "The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 13–18, 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00185-6.
- [50] C. D. Atiş, F. Özcan, A. Kiliç, O. Karahan, C. Bilim, and M. H. Severcan, "Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete," *Build. Environ.*, vol. 40, no. 12, pp. 1678–1683, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.12.005.
- [51] M. Ibrahim, M. Shameem, M. Al-Mehthel, and M. Maslehuddin, "Effect of curing methods on strength and durability of concrete under hot weather conditions," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 41, pp. 60–69, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.04.008.

- 
- [52] H. J. Chen, S. S. Huang, C. W. Tang, M. A. Malek, and L. W. Ean, “Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1063–1070, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.052.
- [53] M. C. Larrossa, M. V. Real, C. R. R. Dias, and F. C. Magalhães, “Statistical analysis and conformity testing of concrete in port construction work,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 7, no. 3, pp. 468–497, 2014, doi: 10.1590/s1983-41952014000300007.
- [54] A. R. A. Mohamed, “Assessment of the current acceptance criteria for concrete compressive strength,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 79–89, 2004.
- [55] J. Jasiczak, M. Kanoniczak, and T. Smaga, “Stochastic identity of test result series of the compressive strength of concrete in industrial production conditions,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 584–592, 2015, doi: 10.1016/j.acme.2014.06.009.
- [56] G. Gasparini, S. Silvestri, T. Trombetti, and C. Ceccoli, “Statistical analysis towards the identification of accurate probability distribution models for the compressive strength of concrete,” *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [57] ACI committee 214, “Guide to evaluation of strength test results of concrete,” 2011.
- [58] ACI committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11)*. 2011.
- [59] BS EN 206:2013:, “BSI Standards Publication Concrete — Specification , performance , production and conformity,” May, 2013.
- [60] NA 16002, “specification, performances, production and conformity,” *Alger. Stand. Concr.*, no. 2, 2007.
- [61] R. Caspeele and L. Taerwe, “Probabilistic evaluation of conformity criteria for concrete families,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 44, no. 7, pp. 1219–1231, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9694-5.
- [62] D. P. Doane and L. E. Seward, “Measuring skewness: A forgotten statistic?,” *J. Stat. Educ.*, vol. 19, no. 2, pp. 1–18, 2011, doi: 10.1080/10691898.2011.11889611.
- [63] Yadolah Dodge, “Statistique Dictionnaire encyclopédique.” 2007.
- [64] R. Veysseyre, *Aide-mémoire Statistique et probabilités pour l’ingénieur*, 2 ° éditio. Dunod, 2006.
- [65] M. Lejeune, *Statistique La théorie et ses applications*, 2 ° éditio. Springer, 2010.
- [66] J. Raison, “Quelques généralités paramétriques références bibliographiques,” *Rev. la Stat. appliquée*, vol. 7, no. 1, pp. 83–106, 1959.
- [67] K. Matsuda *et al.*, “Design paper: Japan Endoscopy Database (JED): A prospective, large database project related to gastroenterological endoscopy in Japan,” *Dig. Endosc.*, vol. 30, no. 1, pp. 5–19, 2018, doi: 10.1111/den.12964.

- [68] M. H. Hubler, R. Wendner, and Z. P. Bažant, “Comprehensive database for concrete creep and shrinkage: Analysis and recommendations for testing and recording,” *ACI Mater. J.*, vol. 112, no. 4, pp. 547–558, 2015, doi: 10.14359/51687452.
- [69] A. Jayasuriya, E. S. Shibata, T. Chen, and M. P. Adams, “Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, no. April 2020, p. 105121, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105121.
- [70] A. Masi, A. Digrisolo, and G. Santarsiero, “Analysis of a large database of concrete core tests with emphasis on within-structure variability,” *Materials*, vol. 12, no. 12, 2019, doi: 10.3390/ma12121985.
- [71] B. Hennemuth, S. Bender, K. Bülow, N. Dreier, P. Hoffmann, E. Keup-Thiel, C. Mudersbach., “Collecting Statistical Methods for the Analysis of Climate Data as Service for Adaptation Projects,” *Am. J. Clim. Chang.*, vol. 04, no. 01, pp. 9–21, 2015, doi: 10.4236/ajcc.2015.41002.
- [72] M. Alexander, “*Microsoft Access 2007 data analysis*, ” vol. 129. 2007. [Online]. Available: <http://www.best-seller-books.com/microsoft-access-2007-data-analysis.pdf>
- [73] B. Pollet, V. and Dooms, “Evaluate concrete on site in case of a dispute,” *CT Gros Œuvre CSTC*, vol. 4, no. 6, pp. 1–4, 2008.
- [74] C. Gruau, “Conception d’une base de données,” *Support de cours*, 2006, pp. 1–44.
- [75] J. Hainaut, *Bases de données et modèles de calcul: Outils et méthodes pour l'utilisateur*, 4<sup>o</sup> éditio. Dunod, 2005.
- [76] B. S. Chissom, “Interpretation of the Kurtosis Statistic,” *Am. Stat.*, vol. 24, no. 4, pp. 19–22, 1970.
- [77] N. J. and H. J. N. Cox, “Speaking Stata: The limits of sample skewness and kurtosis,” *Stata J.*, vol. 10, no. 3, pp. 482–495, 2010, doi: 10.1177/1536867x1001000311.
- [78] A. Ghasemi and S. Zahediasl, “Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians,” *Int. J. Endocrinol. Metab.*, vol. 10, no. 2, pp. 486–489, 2012, doi: 10.5812/ijem.3505.
- [79] P. Čisar and S. M. Čisar, “Skewness and kurtosis in function of selection of network traffic distribution,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 7, no. 2, pp. 95–106, 2010.
- [80] L. T. DeCarlo, “On the meaning and use of kurtosis.,” *Psychol. Methods*, vol. 2, no. 3, pp. 292–307, 1997, doi: 10.1037//1082-989x.2.3.292.
- [81] A. Celikoglu and U. Tirnakli, “Skewness and kurtosis analysis for non-Gaussian distributions,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 499, no. December 2014, pp. 325–334, 2018, doi: 10.1016/j.physa.2018.02.035.
- [82] M. K. Cain, Z. Zhang, and K. H. Yuan, “Univariate and multivariate skewness and kurtosis for measuring nonnormality: Prevalence, influence and estimation,” *Behav. Res. Methods*, vol. 49, no. 5, pp. 1716–1735, 2017, doi: 10.3758/s13428-016-0814-1.

- 
- [83] P. H. Westfall, “Kurtosis as Peakedness, 1905–2014. R.I.P.,” *Am. Stat.*, vol. 68, no. 3, pp. 191–195, 2014, doi: 10.1080/00031305.2014.917055.
- [84] F. S. Nahm, “Nonparametric statistical tests for the continuous data: The basic concept and the practical use,” *Korean J. Anesthesiol.*, vol. 69, no. 1, pp. 8–14, 2016, doi: 10.4097/kjae.2016.69.1.8.
- [85] A. A. Baghban, S. Younespour, S. Jambarsang, M. Yousefi, F. Zayeri, and F. A. Jalilian, “How to test normality distribution for a variable: a real example and a simulation study,” *J. Paramed. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 71–75, 2013.
- [86] A. Desgagné and P. Lafaye de Micheaux, “A powerful and interpretable alternative to the Jarque–Bera test of normality based on 2nd-power skewness and kurtosis, using the Rao’s score test on the APD family,” *J. Appl. Stat.*, vol. 45, no. 13, pp. 2307–2327, 2018, doi: 10.1080/02664763.2017.1415311.
- [87] B. W. Yap and C. H. Sim, “Comparisons of various types of normality tests,” *J. Stat. Comput. Simul.*, vol. 81, no. 12, pp. 2141–2155, 2011, doi: 10.1080/00949655.2010.520163.
- [88] A. JO, G. K. BM, and G. F, “Performances of several univariate tests of normality: An empirical study,” *J. Biom. Biostat.*, vol. 07, no. 04, 2016, doi: 10.4172/2155-6180.1000322.
- [89] Z. Hanusz and J. Tarasińska, “Normalization of the Kolmogorov–Smirnov and Shapiro–Wilk tests of normality,” *Biometrical Lett.*, vol. 52, no. 2, pp. 85–93, 2015, doi: 10.1515/bile-2015-0008.
- [90] H.-Y. Kim, “Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis,” *Restor. Dent. Endod.*, vol. 38, no. 1, p. 52, 2013, doi: 10.5395/rde.2013.38.1.52.
- [91] A. Kabir, M. Hasan, and K. Miah, “Predicting 28 days compressive strength of concrete from 7 days test result,” *Proc. Conf. Adv. Des. Constr. Struct.*, no. January, pp. 18–22, 2012.
- [92] S. T. Yousif and W. M. Hasan, “New model for predicting concrete compressive strength with age using ANN,” *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 12, pp. 1128–1140, 2018.
- [93] BAEL91, “Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites,” 2000.
- [94] H. A. Kasani, “On the strength prediction in concrete construction based on earlier test results: Case studies,” *Concr. Res. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 123–131, 2016, [Online]. Available: [www.crl.issres.net](http://www.crl.issres.net)
- [95] M. M. Hasan and A. Kabir, “Prediction of compressive strength of concrete from early age test result,” *4th Annu. Pap. Meet 1st Civ. Eng. Congr.*, no. December 2011, pp. 978–984, 2011.
- [96] A. V. Chopane and D. A. S. Wayal, “Evaluation of quality of concrete road project based on statistical quality control techniques,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 05, pp. 88–92, 2016, doi: 10.9790/1684-1305058892.



- 
- [97] R. K. Biswas, M. S. Masud, and E. Kabir, "Shewhart control chart for individual measurement: An application in a weaving mill," *AJ. BSSIT*, vol. 2, no. 2, pp. 89–100, 2016, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/316275789>
- [98] NM. 10.1.008, " Béton :Spécifications, performances, production et conformité," *Norme Marocaine*, pp. 1–61, 2007.
- [99] Standard. Hong Kong, "Code of practice for structural use of concrete," 2013, pp. 1–207.
- [100] R. Caspeele and L. Taerwe, "Numerical Bayesian updating of prior distributions for concrete strength properties considering conformity control," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 1, no. 1, pp. 85–102, 2013, doi: 10.12989/acc.2013.1.1.085.
- [101] R. Caspeele, "Influence of conformity control on the safety level of concrete structures," 2015.
- [102] M. S. Alazhari and M. M. Al Shebani, "Assessment of concrete quality in Libya," *Procedia Eng.*, vol. 54, pp. 117–126, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.011.
- [103] N. Touloum and A. Brara, "Qualité du béton produit sur des chantiers de l'Algérie : Analyse statistique de la banque de données du CNERIB et référents réglementaires," in *1 st International Conference on Civil Engineering, 8-9 May 2012, Laghouat University, Algeria*, 2012, pp. 8–9.
- [104] J. Luís, B. Aguiar, and P. Oliveira, "Statistical analysis of compressive strength of concrete specimens," in *ICPCM - A New Era of Building, Cairo, EGYPT, Feb. 18-20, 2003*, 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277072676>
- [105] P. Cunha, J. Aguiar, P. Oliveira, A. Camões, P. Cunha, and P. Oliveira, "Using conformity control of concrete compressive strength for construction site classification," *Bulltin de institut polytechnique IAŞI*, no 5., 2014, p 156-169.
- [106] S.Kenai, et al., "Analyse de quelques cas pathologiques de construction dans le Sud Algérien", *Actes du Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud*, 22-24 Mars 1994, Ghardaia, Algérie, p. 146-155.
- [107] M.Lechani, et al., "Contrôle de la qualité des bétons: cas de la wilaya de Tizi Ouzou", *Algérie Equipement*, n°21, 1995, p. 23-30.
- [108] A.Laribi, "Pathologie et qualité des constructions dans l'Ouest Algérien – Etude de cas", *Mémoire de Magister en Génie Civil*, Université de Blida, Algérie, 1999.
- [109] F. Kharchi and S. Boutamine, "Etude critique de bétons fabriqués dans les chantiers Algériens", *Actes du Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud*, 22-24 Mars 1994, Ghardaia, Algérie, p. 173-181.

## Annexe A

## Paramètres de l'analyse descriptive (modèle 1)

N°	Projet	Taille	fci min		fci max		fcm		Ecart-type (σ)		Etendu E		Cov		Asymétrie				Aplatissement				SES	SEK
			7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j	Pearson		Fisher		Pearson		Fisher			
															7j	28j	7j	28j	7j	28j	7j	28j		
1	P11	198	15,27	24,10	22,23	31,93	19,38	28,02	1,261	1,724	6,97	7,83	6,51%	6,15%	-0,193	-0,256	-0,197	-0,262	1,002	-0,784	1,179	-0,750	0,295	0,582
2	P15	93	16,10	25,43	24,00	28,97	19,58	26,99	2,066	0,811	7,90	3,53	10,55%	3,00%	0,721	0,571	0,758	0,600	-0,396	-0,017	-0,246	0,202	0,421	0,821
3	P16	24	18,27	25,47	22,57	30,80	20,23	27,85	1,580	1,603	4,30	5,33	7,81%	5,76%	0,281	0,177	0,351	0,221	-1,509	-0,601	-1,770	0,139	0,752	1,481
4	P19	21	16,63	25,00	20,00	28,77	18,01	26,33	0,986	1,190	3,37	3,77	5,47%	4,52%	0,711	0,857	0,922	1,110	-0,018	-0,079	1,758	1,610	0,794	1,587
5	P20	12	18,97	28,57	19,40	29,20	19,17	28,90	0,187	0,286	0,43	0,63	0,98%	0,99%	0,093	-0,040	0,162	-0,070	-1,847	-1,933	-4,849	-5,497	1,014	2,619
6	P22	39	15,70	25,30	21,75	29,17	18,00	27,01	1,600	1,273	6,05	3,87	8,89%	4,71%	0,909	0,209	1,032	0,238	0,153	-1,464	0,888	-1,581	0,616	1,191
7	P24	72	18,03	26,00	26,23	31,87	21,35	29,27	2,572	1,620	8,20	5,87	12,05%	5,53%	0,574	-0,474	0,613	-0,506	-1,042	-0,710	-0,998	-0,585	0,472	0,918
8	P28	15	18,13	25,07	18,77	28,50	18,55	27,33	0,233	1,198	0,63	3,43	1,26%	4,38%	-0,860	-1,119	-1,283	-1,669	-0,624	-0,223	1,504	3,106	0,913	2,000
9	P30	18	18,07	25,37	23,67	31,40	20,79	29,09	2,135	2,016	5,60	6,03	10,27%	6,93%	0,401	-0,621	0,549	-0,850	-1,416	-0,568	-1,631	0,844	0,845	1,741
10	P32	18	18,00	26,50	21,00	29,63	18,97	28,04	1,004	1,127	3,00	3,13	5,30%	4,02%	1,130	0,312	1,548	0,428	0,014	-1,336	2,540	-1,397	0,845	1,741
11	P35	21	18,23	27,00	19,83	28,67	19,07	27,79	0,567	0,602	1,60	1,67	2,97%	2,16%	0,009	0,116	0,011	0,150	-1,524	-1,463	-1,857	-1,712	0,794	1,587
12	P36	12	19,40	26,40	22,67	29,00	20,78	27,55	1,190	1,055	3,27	2,60	5,73%	3,83%	0,585	0,230	1,013	0,399	-0,971	-1,630	1,719	-3,224	1,014	2,619
13	P38	21	19,50	26,70	23,93	32,37	21,01	29,31	1,783	1,599	4,43	5,67	8,48%	5,45%	0,825	0,373	1,070	0,484	-1,157	-0,057	-0,977	1,663	0,794	1,587
14	P42	24	16,90	24,83	20,77	30,17	18,28	26,36	1,474	1,993	3,87	5,33	8,07%	7,56%	0,915	1,107	1,141	1,380	-0,881	-0,604	-0,450	0,132	0,752	1,481
15	P43	24	20,60	27,33	28,50	35,83	23,95	30,61	2,840	2,851	7,90	8,50	11,86%	9,32%	0,344	0,450	0,429	0,562	-1,399	-1,027	-1,537	-0,756	0,752	1,481
16	P45	12	15,17	20,33	20,83	27,33	17,79	25,04	2,200	2,859	5,67	7,00	12,36%	11,42%	0,190	-0,859	0,329	-1,489	-1,518	-0,954	-2,386	1,847	1,014	2,619
17	P48	15	19,27	28,80	21,03	30,83	19,98	29,80	0,610	0,838	1,77	2,03	3,06%	2,81%	0,613	0,011	0,913	0,016	-0,778	-1,709	0,887	-2,837	0,913	2,000
18	P49	15	18,80	25,40	21,03	30,37	19,89	28,80	0,921	1,751	2,23	4,97	4,63%	6,08%	-0,214	-1,284	-0,320	-1,914	-1,693	-0,010	-2,773	3,959	0,913	2,000
19	P52	30	18,03	26,33	22,10	32,17	20,12	29,29	1,283	1,563	4,07	5,83	6,38%	5,33%	0,050	-0,211	0,060	-0,251	-1,039	-0,218	-0,873	0,579	0,687	1,334
20	P54	24	18,03	25,80	23,33	32,10	20,62	29,53	2,034	1,789	5,30	6,30	9,86%	6,06%	0,100	-0,666	0,125	-0,831	-1,710	0,001	-2,191	1,403	0,752	1,481
21	P55	21	16,67	26,33	21,67	28,17	18,36	27,35	1,502	0,691	5,00	1,83	8,18%	2,53%	1,216	-0,262	1,576	-0,340	0,688	-1,504	3,451	-1,810	0,794	1,587

22	P58	21	17,27	25,27	18,10	26,60	17,63	25,97	0,285	0,393	0,83	1,33	1,61%	1,51%	0,070	-0,188	0,091	-0,243	-1,129	-0,512	-0,910	0,571	0,794	1,587
23	P66	15	17,97	26,37	19,10	27,83	18,55	27,10	0,392	0,528	1,13	1,47	2,11%	1,95%	-0,081	0,000	-0,121	0,000	-1,180	-1,384	-0,719	-1,534	0,913	2,000
24	P67	12	18,47	27,57	19,17	28,13	18,92	27,88	0,267	0,202	0,70	0,57	1,41%	0,72%	-0,961	-0,366	-1,665	-0,634	-0,785	-0,970	3,110	1,725	1,014	2,619
25	P70	15	18,07	26,83	21,17	30,40	19,70	28,34	1,114	1,367	3,10	3,57	5,65%	4,82%	-0,235	0,283	-0,351	0,422	-1,366	-1,420	-1,462	-1,681	0,913	2,000
26	P75	18	17,50	25,60	18,23	26,60	17,80	26,14	0,258	0,399	0,73	1,00	1,45%	1,53%	0,527	-0,439	0,722	-0,601	-1,174	-1,504	-0,924	-1,886	0,845	1,741
27	P76	12	16,87	24,60	18,23	26,07	17,38	25,48	0,519	0,541	1,37	1,47	2,99%	2,12%	0,859	-0,713	1,488	-1,235	-0,876	-0,921	2,432	2,096	1,014	2,619
28	P78	27	18,03	25,40	20,80	30,13	19,06	27,91	0,914	1,534	2,77	4,73	4,80%	5,50%	0,703	-0,068	0,852	-0,083	-0,709	-1,353	-0,208	-1,434	0,717	1,400
29	P79	18	19,37	26,03	27,13	34,63	23,22	30,76	2,949	3,212	7,77	8,60	12,70%	10,44%	-0,617	-0,303	-0,845	-0,415	-1,290	-1,430	-1,262	-1,669	0,845	1,741
30	P80	12	17,50	27,67	18,08	28,17	17,85	27,94	0,223	0,180	0,58	0,50	1,25%	0,65%	-0,657	-0,323	-1,138	-0,560	-1,099	-1,076	0,758	0,928	1,014	2,619
31	P82	60	17,47	24,70	24,57	38,20	20,68	29,62	1,691	3,003	7,10	13,50	8,18%	10,14%	0,403	0,690	0,437	0,747	-0,005	1,245	0,366	1,996	0,512	0,992
32	P83	21	18,20	27,00	19,47	29,27	18,90	28,30	0,503	0,833	1,27	2,27	2,66%	2,94%	-0,237	-0,271	-0,307	-0,352	-1,658	-1,419	-2,178	-1,605	0,794	1,587
33	P84	36	18,17	27,33	19,63	29,33	18,91	28,50	0,465	0,605	1,47	2,00	2,46%	2,12%	-0,021	-0,323	-0,024	-0,371	-1,273	-1,042	-1,289	-0,922	0,637	1,232
34	P88	30	16,67	24,07	20,07	28,87	18,13	26,49	1,143	1,641	3,40	4,80	6,30%	6,20%	0,341	0,001	0,404	0,001	-1,140	-1,363	-1,051	-1,445	0,687	1,334
35	P109	24	15,87	20,43	21,50	26,63	17,89	23,60	1,793	2,271	5,63	6,20	10,02%	9,63%	0,768	0,073	0,958	0,091	-0,532	-1,464	0,282	-1,675	0,752	1,481
36	P119	27	17,53	26,00	18,20	27,30	17,94	26,49	0,219	0,352	0,67	1,30	1,22%	1,33%	-0,615	1,118	-0,746	1,355	-0,758	0,701	-0,300	2,477	0,717	1,400
37	P121	15	19,53	25,63	31,07	38,80	23,03	31,67	3,891	4,409	11,53	13,17	16,89%	13,92%	0,161	0,287	0,240	0,428	-1,009	-0,892	-0,036	0,430	0,913	2,000
38	P125	12	17,77	28,43	19,57	29,50	19,01	29,02	0,725	0,383	1,80	1,07	3,81%	1,32%	-1,081	-0,373	-1,873	-0,646	-0,724	-1,025	3,570	1,310	1,014	2,619
39	P130	27	14,37	20,57	21,47	28,23	17,34	24,70	2,090	2,449	7,10	7,67	12,05%	9,91%	0,635	-0,010	0,769	-0,012	-0,626	-1,042	-0,050	-0,843	0,717	1,400
40	P132	15	18,03	25,27	21,73	31,80	20,17	29,12	1,275	2,580	3,70	6,53	6,32%	8,86%	-0,548	-0,458	-0,817	-0,683	-0,945	-1,565	0,221	-2,259	0,913	2,000
41	P133	18	19,77	25,00	25,90	28,27	21,64	26,39	2,001	0,995	6,13	3,27	9,24%	3,77%	1,407	0,639	1,926	0,875	0,581	-0,232	4,194	1,823	0,845	1,741
42	P134	30	17,60	26,27	28,00	34,93	23,15	30,99	2,863	2,490	10,40	8,67	12,37%	8,03%	-0,983	-0,391	-1,165	-0,463	0,404	-0,766	1,679	-0,389	0,687	1,334
43	P137	42	19,13	29,50	24,07	33,20	21,32	31,10	1,304	1,103	4,93	3,70	6,12%	3,55%	0,473	0,295	0,532	0,332	-0,506	-1,000	-0,157	-0,886	0,597	1,154
44	P138	15	18,43	24,02	24,29	30,40	20,21	26,56	2,189	2,390	5,86	6,38	10,83%	9,00%	1,083	0,516	1,614	0,769	-0,433	-1,272	2,268	-1,089	0,913	2,000
45	P139	30	17,77	26,23	19,10	27,63	18,53	27,10	0,389	0,488	1,33	1,40	2,10%	1,80%	-0,513	-0,660	-0,608	-0,783	-0,534	-0,965	0,021	-0,742	0,687	1,334
46	P140	30	17,70	26,37	18,80	27,60	18,23	26,98	0,296	0,317	1,10	1,23	1,63%	1,18%	0,162	0,056	0,193	0,066	-0,431	-0,002	0,203	0,961	0,687	1,334
47	P141	63	18,70	25,20	26,67	32,57	20,95	27,93	1,865	2,071	7,97	7,37	8,90%	7,42%	1,313	0,755	1,417	0,814	1,824	-0,319	2,698	-0,060	0,501	0,972
48	P142	12	18,20	26,53	19,67	28,77	18,73	27,73	0,594	0,821	1,47	2,23	3,17%	2,96%	0,683	-0,235	1,184	-0,407	-1,147	-1,230	0,399	-0,229	1,014	2,619
49	P147	111	16,97	25,61	21,20	29,68	18,69	26,85	1,029	0,852	4,23	4,07	5,51%	3,17%	0,779	1,299	0,813	1,355	0,546	2,171	0,809	2,677	0,388	0,759
50	P149	21	18,21	24,31	20,43	25,47	19,43	25,04	1,038	0,380	2,22	1,16	5,34%	1,52%	-0,273	-0,734	-0,354	-0,952	-1,899	-0,653	-2,758	0,234	0,794	1,587

51	P151	18	15,43	23,90	26,80	38,37	22,62	30,98	3,961	4,627	11,37	14,47	17,51%	14,93%	-0,721	0,011	-0,987	0,015	-0,834	-0,908	0,066	-0,147	0,845	1,741
52	P152	30	16,63	24,10	20,37	29,50	17,91	26,13	1,003	1,403	3,73	5,40	5,60%	5,37%	1,231	1,005	1,460	1,192	1,003	0,879	2,737	2,519	0,687	1,334
53	P153	18	17,60	25,53	20,23	28,97	18,96	27,10	0,974	1,188	2,63	3,43	5,14%	4,38%	-0,104	0,261	-0,143	0,357	-1,591	-1,270	-2,141	-1,203	0,845	1,741
54	P154	15	17,87	26,30	19,50	27,60	18,80	26,95	0,662	0,539	1,63	1,30	3,52%	2,00%	-0,265	-0,059	-0,395	-0,087	-1,621	-1,716	-2,484	-2,864	0,913	2,000
55	P155	12	18,60	28,53	19,03	29,20	18,78	28,97	0,161	0,257	0,43	0,67	0,85%	0,89%	0,693	-0,971	1,200	-1,681	-0,957	-0,794	1,819	3,042	1,014	2,619
56	P159	15	17,43	23,80	18,13	26,60	17,81	25,76	0,270	1,021	0,70	2,80	1,51%	3,96%	-0,046	-1,220	-0,068	-1,819	-1,519	-0,134	-2,077	3,463	0,913	2,000
57	P164	30	18,50	25,33	19,33	26,83	18,88	26,12	0,269	0,435	0,83	1,50	1,43%	1,67%	0,077	-0,346	0,091	-0,410	-1,107	-0,709	-0,993	-0,289	0,687	1,334
58	P165	33	18,17	26,17	19,17	26,67	18,79	26,38	0,267	0,144	1,00	0,50	1,42%	0,54%	-0,614	0,295	-0,716	0,344	0,464	-0,533	1,607	-0,054	0,661	1,279
59	P167	15	18,30	26,87	19,00	28,10	18,61	27,37	0,261	0,401	0,70	1,23	1,40%	1,46%	0,341	0,783	0,508	1,167	-1,474	-0,326	-1,897	2,695	0,913	2,000
60	P168	21	17,20	25,53	19,33	27,67	18,13	26,39	0,731	0,804	2,13	2,13	4,03%	3,05%	0,512	0,605	0,663	0,784	-1,104	-1,242	-0,850	-1,181	0,794	1,587
61	P171	24	18,03	26,83	19,67	28,53	18,72	27,44	0,531	0,534	1,63	1,70	2,83%	1,95%	0,311	0,774	0,388	0,965	-1,061	-0,357	-0,829	0,649	0,752	1,481
62	P173	21	17,87	27,87	19,80	30,03	18,82	29,14	0,697	0,634	1,93	2,17	3,70%	2,18%	-0,065	-0,766	-0,085	-0,993	-1,561	-0,060	-1,946	1,656	0,794	1,587
63	P174	15	17,50	27,67	18,67	29,00	18,10	28,47	0,429	0,488	1,17	1,33	2,37%	1,71%	0,025	-0,569	0,038	-0,849	-1,451	-1,167	-1,804	-0,666	0,913	2,000
64	P175	21	17,83	25,17	18,67	26,17	18,29	25,52	0,330	0,326	0,83	1,00	1,80%	1,28%	-0,264	0,712	-0,342	0,923	-1,454	-0,416	-1,690	0,802	0,794	1,587
65	P176	12	17,20	26,13	18,60	27,00	18,12	26,63	0,553	0,317	1,40	0,87	3,05%	1,19%	-0,888	-0,575	-1,538	-0,996	-0,909	-1,000	2,181	1,500	1,014	2,619
66	P179	12	20,80	29,07	22,33	31,03	21,48	30,10	0,613	0,766	1,53	1,97	2,85%	2,55%	0,263	-0,127	0,456	-0,221	-1,568	-1,559	-2,764	-2,695	1,014	2,619
67	P182	42	17,17	25,00	19,17	27,25	18,52	25,74	0,451	0,554	2,00	2,25	2,44%	2,15%	-1,672	1,039	-1,879	1,169	3,236	1,465	5,371	2,755	0,597	1,154
68	P184	18	19,50	28,33	22,00	32,33	21,10	30,85	0,867	1,407	2,50	4,00	4,11%	4,56%	-0,814	-0,628	-1,114	-0,860	-0,749	-0,918	0,316	-0,177	0,845	1,741
69	P185	24	19,40	27,30	26,30	35,80	23,22	32,13	2,541	3,043	6,90	8,50	10,94%	9,47%	-0,178	-0,296	-0,222	-0,369	-1,567	-1,409	-1,891	-1,558	0,752	1,481
70	P188	57	16,33	24,37	24,10	33,50	20,35	28,37	2,151	2,651	7,77	9,13	10,57%	9,34%	-0,057	0,308	-0,061	0,335	-1,163	-1,118	-1,142	-1,082	0,524	1,014
71	P189	84	17,50	25,87	20,77	30,33	19,01	27,58	1,085	1,179	3,27	4,47	5,71%	4,28%	0,242	0,428	0,256	0,453	-1,472	-0,844	-1,524	-0,768	0,441	0,858
72	P191	39	17,70	25,80	19,23	27,27	18,41	26,47	0,453	0,456	1,53	1,47	2,46%	1,72%	0,245	0,129	0,278	0,147	-0,920	-1,050	-0,751	-0,948	0,616	1,191
73	P202	12	17,00	24,13	18,23	26,33	17,55	24,87	0,460	0,886	1,23	2,20	2,62%	3,56%	0,357	0,887	0,618	1,536	-1,245	-0,922	-0,340	2,083	1,014	2,619
74	P203	12	17,33	24,17	18,67	24,67	17,83	24,38	0,500	0,182	1,33	0,50	2,80%	0,75%	0,889	0,652	1,540	1,129	-0,815	-0,903	2,889	2,227	1,014	2,619
75	P204	33	17,50	27,50	22,00	29,83	20,33	28,85	1,095	0,759	4,50	2,33	5,39%	2,63%	-1,205	-0,487	-1,404	-0,568	1,645	-0,894	3,574	-0,657	0,661	1,279
76	P205	45	16,57	21,73	22,67	30,70	19,20	26,66	1,854	2,539	6,10	8,97	9,65%	9,52%	0,383	-0,062	0,427	-0,069	-1,186	-1,010	-1,165	-0,911	0,580	1,121
77	P207	210	16,17	23,67	20,33	28,00	18,21	25,41	0,774	0,886	4,17	4,33	4,25%	3,49%	-0,047	0,269	-0,048	0,275	0,511	0,259	0,640	0,369	0,287	0,566
78	P208	21	19,47	26,07	24,90	31,87	22,85	28,86	1,896	2,151	5,43	5,80	8,30%	7,46%	-0,615	-0,121	-0,797	-0,157	-1,025	-1,557	-0,659	-1,937	0,794	1,587
79	P209	15	17,90	26,33	19,47	28,00	18,71	27,21	0,545	0,554	1,57	1,67	2,91%	2,04%	-0,127	-0,182	-0,189	-0,272	-1,209	-0,906	-0,836	0,375	0,913	2,000

80	P210	15	16,93	26,47	17,03	26,97	16,98	26,73	0,045	0,180	0,10	0,50	0,27%	0,67%	0,211	-0,076	0,315	-0,113	-1,770	-1,322	-3,081	-1,288	0,913	2,000
81	P211	36	17,87	26,23	19,37	28,90	18,52	27,16	0,478	0,768	1,50	2,67	2,58%	2,83%	0,613	0,876	0,705	1,007	-0,867	-0,269	-0,643	0,305	0,637	1,232
82	P213	30	17,47	26,00	18,80	27,27	18,13	26,70	0,452	0,352	1,33	1,27	2,49%	1,32%	0,127	-0,330	0,151	-0,391	-1,254	-0,582	-1,253	-0,065	0,687	1,334
83	P216	30	17,03	26,00	20,60	29,77	18,51	27,19	1,016	1,116	3,57	3,77	5,49%	4,10%	0,530	0,977	0,628	1,158	-0,527	0,232	0,032	1,374	0,687	1,334
84	P219	69	17,40	25,47	24,07	29,53	19,64	27,21	1,721	1,081	6,67	4,07	8,76%	3,97%	1,077	0,295	1,154	0,316	0,307	-0,825	0,700	-0,723	0,481	0,935
85	P224	159	17,33	24,83	19,17	27,67	18,15	25,55	0,395	0,591	1,83	2,83	2,18%	2,31%	0,501	1,132	0,516	1,165	0,362	1,510	0,521	1,785	0,327	0,644
86	P225	159	17,53	26,03	19,43	28,10	18,42	27,12	0,434	0,500	1,90	2,07	2,35%	1,85%	0,212	-0,179	0,219	-0,184	-0,393	-0,450	-0,310	-0,373	0,327	0,644
87	P226	30	17,33	24,57	19,50	27,17	18,16	25,83	0,620	0,776	2,17	2,60	3,41%	3,00%	0,615	0,199	0,729	0,236	-0,175	-0,918	0,656	-0,659	0,687	1,334
88	P227	18	17,33	25,50	18,10	26,10	17,72	25,83	0,251	0,194	0,77	0,60	1,42%	0,75%	0,056	-0,251	0,077	-0,343	-1,079	-0,872	-0,648	-0,045	0,845	1,741
89	P228	21	20,47	27,50	25,33	33,00	22,97	30,20	1,483	1,821	4,87	5,50	6,46%	6,03%	-0,168	-0,053	-0,217	-0,069	-0,813	-1,286	-0,151	-1,285	0,794	1,587
90	P229	15	20,57	26,20	22,23	29,23	21,38	27,25	0,590	1,104	1,67	3,03	2,76%	4,05%	0,051	0,823	0,076	1,226	-1,297	-0,620	-1,189	1,521	0,913	2,000
91	P231	90	17,27	25,70	26,67	35,63	21,41	30,05	2,164	2,196	9,40	9,93	10,11%	7,31%	0,647	0,633	0,682	0,667	0,188	0,612	0,454	0,958	0,427	0,833
92	P235	12	21,10	30,20	22,25	31,73	21,69	30,91	0,439	0,589	1,15	1,53	2,02%	1,91%	-0,061	0,208	-0,106	0,361	-1,483	-1,469	-2,124	-2,018	1,014	2,619
93	P236	24	18,50	26,37	24,97	31,03	20,69	29,30	1,849	1,730	6,47	4,67	8,94%	5,90%	1,227	-0,569	1,530	-0,710	0,931	-1,263	3,356	-1,251	0,752	1,481
94	P243	39	18,01	24,40	21,49	29,35	19,71	26,16	1,000	1,616	3,48	4,95	5,07%	6,18%	0,094	0,763	0,107	0,867	-0,959	-0,488	-0,810	-0,091	0,616	1,191
95	P245	57	16,43	24,27	23,93	33,17	19,06	27,74	1,657	2,387	7,50	8,90	8,69%	8,61%	1,138	0,718	1,238	0,781	1,659	0,161	2,593	0,610	0,524	1,014
96	P255	18	18,70	24,57	26,87	32,27	21,69	29,03	3,083	2,578	8,17	7,70	14,21%	8,88%	0,725	-0,388	0,993	-0,531	-1,236	-0,901	-1,106	-0,129	0,845	1,741
97	P256	15	18,10	25,50	21,70	30,17	19,74	27,48	1,418	1,704	3,60	4,67	7,18%	6,20%	0,177	0,448	0,264	0,668	-1,610	-1,291	-2,439	-1,165	0,913	2,000
98	P257	30	18,87	28,30	19,80	29,50	19,28	28,87	0,275	0,389	0,93	1,20	1,43%	1,35%	0,401	0,272	0,475	0,323	-0,744	-1,035	-0,351	-0,865	0,687	1,334
99	P260	21	17,60	26,00	19,47	27,27	18,13	26,58	0,625	0,422	1,87	1,27	3,45%	1,59%	1,202	0,201	1,559	0,261	0,191	-1,106	2,259	-0,854	0,794	1,587
100	P263	42	18,43	28,17	20,17	30,33	19,05	29,10	0,507	0,690	1,73	2,17	2,66%	2,37%	0,593	0,482	0,667	0,542	-0,613	-0,975	-0,314	-0,849	0,597	1,154
101	P264	18	17,10	25,23	19,50	27,93	17,86	26,16	0,827	0,868	2,40	2,70	4,63%	3,32%	1,095	1,151	1,500	1,577	-0,197	0,158	1,925	2,962	0,845	1,741
102	P272	21	20,73	29,93	23,13	32,03	21,67	31,13	0,826	0,703	2,40	2,10	3,81%	2,26%	0,427	-0,351	0,553	-0,455	-1,051	-1,120	-0,723	-0,889	0,794	1,587
103	P274	15	17,90	26,50	19,00	27,50	18,59	27,19	0,367	0,362	1,10	1,00	1,97%	1,33%	-1,011	-1,142	-1,508	-1,702	-0,213	-0,222	3,147	3,113	0,913	2,000
104	P275	117	16,80	25,60	23,50	28,60	18,85	27,14	1,336	0,766	6,70	3,00	7,09%	2,82%	1,661	-0,126	1,728	-0,131	3,348	-0,590	3,991	-0,502	0,378	0,741

## Annexe B

## Résultats du test de corrélation de Spearman du modèle

N°	Projet	Statistique de Spearman	p-value	Observation
1	P11	0,513	<b>0,000</b>	ASS
2	P15	0,318	0,082	PAS ASS
3	P16	0,286	0,501	PAS ASS
4	P19	0,883	<b>0,012</b>	ASS
5	P20	0,200	0,917	PAS ASS
6	P22	0,652	<b>0,018</b>	ASS
7	P24	0,689	<b>0,000</b>	ASS
8	P28	0,359	0,517	PAS ASS
9	P30	0,986	<b>0,003</b>	ASS
10	P32	0,029	1,000	PAS ASS
11	P35	0,571	0,200	PAS ASS
12	P36	0,200	0,917	PAS ASS
13	P38	0,500	0,267	PAS ASS
14	P42	0,970	<b>0,000</b>	ASS
15	P43	0,952	<b>0,065</b>	ASS
16	P45	0,949	0,083	PAS ASS
17	P48	-0,100	0,950	PAS ASS
18	P49	0,667	0,233	PAS ASS
19	P52	0,957	<b>0,000</b>	ASS
20	P54	0,595	0,132	PAS ASS
21	P55	-0,270	0,556	PAS ASS
22	P58	0,775	<b>0,048</b>	ASS
23	P66	0,800	0,133	PAS ASS
24	P67	0,949	0,083	PAS ASS
25	P70	0,900	0,083	PAS ASS
26	P75	0,928	<b>0,017</b>	ASS
27	P76	1,000	<b>0,000</b>	ASS
28	P78	0,837	<b>0,008</b>	ASS
29	P79	0,314	0,564	PAS ASS
30	P80	0,800	0,333	PAS ASS
31	P82	0,905	<b>0,000</b>	ASS
32	P83	1,000	<b>0,000</b>	ASS
33	P84	0,861	<b>0,000</b>	ASS
34	P88	0,790	<b>0,010</b>	ASS
35	P109	0,036	0,935	PAS ASS
36	P119	0,802	<b>0,014</b>	ASS
37	P121	1,000	<b>0,000</b>	ASS
38	P125	0,800	0,333	PAS ASS
39	P130	0,250	0,521	PAS ASS

40	P132	0,900	0,083	PAS ASS
41	P133	0,600	0,242	PAS ASS
42	P134	0,794	<b>0,009</b>	ASS
43	P137	0,931	<b>0,000</b>	ASS
44	P138	0,100	0,333	PAS ASS
45	P139	0,498	0,142	PAS ASS
46	P140	0,790	<b>0,010</b>	ASS
47	P141	0,634	<b>0,003</b>	ASS
48	P142	0,800	0,333	PAS ASS
49	P147	0,113	0,504	PAS ASS
50	P149	0,685	0,110	PAS ASS
51	P151	1,000	<b>0,000</b>	ASS
52	P152	0,939	<b>0,000</b>	ASS
53	P153	0,657	0,175	PAS ASS
54	P154	1,000	<b>0,000</b>	ASS
55	P155	-0,200	0,750	PAS ASS
56	P159	0,500	0,450	PAS ASS
57	P164	0,388	0,263	PAS ASS
58	P165	0,513	0,108	PAS ASS
59	P167	0,300	0,683	PAS ASS
60	P168	0,919	<b>0,007</b>	ASS
61	P171	0,952	<b>0,001</b>	ASS
62	P173	0,679	0,110	PAS ASS
63	P174	0,200	0,783	PAS ASS
64	P175	-0,231	0,595	PAS ASS
65	P176	-0,800	0,333	PAS ASS
66	P179	-0,600	0,417	PAS ASS
67	P182	0,179	0,536	PAS ASS
68	P184	1,000	<b>0,000</b>	ASS
69	P185	0,929	<b>0,002</b>	ASS
70	P188	0,863	<b>0,000</b>	ASS
71	P189	0,905	<b>0,000</b>	ASS
72	P191	0,894	<b>0,000</b>	ASS
73	P202	0,400	0,750	PAS ASS
74	P203	-0,500	0,417	PAS ASS
75	P204	0,579	0,065	PAS ASS
76	P205	0,854	<b>0,000</b>	ASS
77	P207	0,050	0,682	PAS ASS
78	P208	0,629	0,078	PAS ASS
79	P209	0,700	0,233	PAS ASS
80	P210	0,162	0,783	PAS ASS
81	P211	0,533	0,076	PAS ASS
82	P213	0,314	0,369	PAS ASS
83	P216	0,976	<b>0,000</b>	ASS
84	P219	-0,198	0,365	PAS ASS

85	P224	-0,037	0,794	<b>PAS ASS</b>
86	P225	0,691	<b>0,000</b>	<b>ASS</b>
87	P226	0,187	0,598	<b>PAS ASS</b>
88	P227	0,600	0,242	<b>PAS ASS</b>
89	P228	0,964	<b>0,003</b>	<b>ASS</b>
90	P229	0,800	0,133	<b>PAS ASS</b>
91	P231	0,861	<b>0,000</b>	<b>ASS</b>
92	P235	0,400	0,750	<b>PAS ASS</b>
93	P236	0,898	<b>0,005</b>	<b>ASS</b>
94	P243	0,620	0,065	<b>PAS ASS</b>
95	P244	0,879	<b>0,002</b>	<b>ASS</b>
96	P255	0,771	0,103	<b>PAS ASS</b>
97	P256	0,900	0,083	<b>PAS ASS</b>
98	P257	0,697	<b>0,029</b>	<b>ASS</b>
99	P260	0,857	<b>0,024</b>	<b>ASS</b>
100	P263	0,265	0,354	<b>PAS ASS</b>
101	P264	0,886	<b>0,033</b>	<b>ASS</b>
102	P272	0,071	0,906	<b>PAS ASS</b>
103	P274	0,800	0,133	<b>PAS ASS</b>
104	P275	0,312	0,053	<b>PAS ASS</b>

NB :

- **ASS** : association entre les champs.
- **Pas ASS** : pas d'association entre les champs.



## Annexe C

## Données du modèle 2 (conformité du béton)

P	n	fck	fcm	$\sigma$ overall	$\beta=fcm/fck$	Cov	P-value normality test	w/c	Number of laboratory testing used	Number of mixer used	fcm of concrete reference
1	<b>369</b>	25	30,81	1,09	1,232	3,52%	<b>0,001</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
2	30	25	26,82	1,25	1,073	4,67%	0,984	0,57	1	1	28,37
3	54	25	25,93	0,45	1,037	1,74%	0,083	/	1	/	
4	42	25	23,85	2,17	0,954	9,12%	0,905	/	1	/	
5	<b>189</b>	25	28,04	1,79	1,121	6,38%	<b>0,041</b>	/	1	/	
6	72	25	29,65	3,26	1,186	10,99%	0,308	/	/	/	
7	48	25	26,46	1,11	1,059	4,21%	0,106	/	/	/	
8	36	25	25,88	1,29	1,035	4,98%	0,114	/	/	/	
9	30	25	26,50	0,45	1,060	1,71%	0,571	/	1	2	
10	48	25	28,48	1,27	1,139	4,47%	0,090	0,61	2	1	28,63
11	60	25	26,74	0,90	1,070	3,35%	0,063	0,53	1	1	
12	63	25	31,98	2,47	1,279	7,74%	0,948	/	1	/	
13	30	25	26,67	1,64	1,067	6,16%	0,300	/	1	/	
14	30	25	30,99	2,72	1,240	8,78%	0,981	0,57	/	1	
15	42	25	31,10	1,21	1,244	3,90%	0,756	/	1	/	
16	39	25	26,97	0,63	1,079	2,34%	0,724	/	1	/	
17	33	25	26,97	0,42	1,079	1,56%	0,547	0,61	1	1	28,53
18	66	25	27,93	2,18	1,117	7,81%	0,555	0,54	2	1	
19	54	25	29,15	3,13	1,166	10,75%	0,216	/	2	2	
20	<b>111</b>	25	26,83	1,65	1,073	6,15%	<b>0,001</b>	/	1	2	
21	30	25	27,28	2,28	1,091	8,34%	0,077	/	1	1	32,80
22	93	25	26,99	0,99	1,079	3,67%	0,147	0,56	1	1	27,17
23	30	25	26,13	1,51	1,045	5,78%	0,518	/	2	2	
24	36	25	26,81	0,76	1,072	2,82%	0,296	/	1	/	
25	39	25	29,35	0,67	1,174	2,29%	0,582	/	1	1	
26	51	25	26,52	2,83	1,061	10,66%	0,247	/	1	/	
27	36	25	28,40	0,64	1,136	2,25%	0,871	/	/	/	
28	30	25	26,12	0,74	1,045	2,83%	0,068	0,57	1	1	
29	72	25	26,39	0,53	1,056	1,99%	0,261	0,61	1	1	29,30
30	36	25	25,16	2,23	1,006	8,85%	0,644	0,57	1	1	31,10
31	66	25	26,97	2,44	1,079	9,04%	0,738	0,57	1	2	
32	81	25	27,53	0,70	1,101	2,53%	0,925	0,61	1	1	31,43
33	36	25	29,33	4,84	1,173	16,49%	0,568	0,61	1	1	31,47
34	57	25	28,37	2,75	1,135	9,70%	0,374	0,55	1	1	
35	81	25	27,61	1,31	1,105	4,74%	0,053	/	3	1	28,33
36	42	25	27,04	0,44	1,082	1,61%	0,605	/	2	1	
37	45	25	26,44	0,51	1,058	1,94%	0,508	0,61	1	1	28,07
38	<b>912</b>	25	31,02	1,50	1,241	4,84%	<b>0,000</b>	0,42 ;	1	2	

								0,46			
39	33	25	28,85	1,00	1,154	3,48%	0,566	/	1	/	28,00
40	45	25	26,66	2,60	1,067	9,74%	0,474	/	1	/	
41	<b>159</b>	25	25,42	1,22	1,017	4,80%	<b>0,000</b>	/	1	/	
42	69	25	24,96	0,74	0,998	2,97%	0,101	/	1	/	
43	36	25	27,16	0,85	1,087	3,13%	0,470	0,61	1	1	28,63
44	57	25	27,24	0,60	1,089	2,19%	0,615	/	1	1	29,23
45	30	25	26,70	0,47	1,068	1,76%	0,324	/	1	1	
46	45	25	29,42	4,29	1,177	14,59%	0,051	/	1	1	
47	66	25	30,90	3,66	1,236	11,86%	0,956	0,54	1	2	
48	33	25	27,09	1,19	1,084	4,41%	0,274	/	1	1	
49	54	25	30,15	2,07	1,206	6,86%	0,397	0,65	1	1	
50	84	25	27,11	1,24	1,084	4,59%	0,715	/	2	2	
51	60	25	27,10	1,66	1,084	6,14%	0,194	/	1	/	
52	69	25	30,92	3,94	1,237	12,73%	0,337	0,54	1	3	
53	30	25	26,65	0,62	1,066	2,32%	0,913	/	1	/	
54	72	25	33,18	4,40	1,327	13,26%	0,228	/	1	/	
55	<b>111</b>	25	25,66	0,81	1,026	3,17%	<b>0,000</b>	/	1	/	
56	120	25	27,08	0,61	1,083	2,27%	0,147	/	1	/	27,10
57	30	25	25,83	1,27	1,033	4,91%	0,139	0,53 ; 0,55	1	2	
58	93	25	29,43	2,79	1,177	9,47%	0,175	/	1	/	
59	45	25	29,49	0,68	1,179	2,31%	0,802	0,61	1	1	
60	90	25	30,05	2,32	1,202	7,73%	0,685	0,55	1	1	27,23
61	45	25	26,90	0,65	1,076	2,43%	0,425	0,61	1	2	
62	33	25	30,77	1,46	1,231	4,74%	0,436	0,60	1	1	
63	36	25	28,27	1,87	1,131	6,61%	0,897	0,56	2	2	
64	72	25	29,27	1,70	1,171	5,82%	0,521	/	1	2	
65	54	25	30,36	2,39	1,214	7,86%	0,297	/	1	1	
66	36	25	26,30	2,30	1,052	8,75%	0,069	/	1	1	
67	30	25	26,22	4,62	1,049	17,63%	0,101	/	1	1	
68	57	25	27,74	2,52	1,109	9,08%	0,437	0,55	1	1	26,83
69	96	25	29,25	0,94	1,170	3,20%	0,359	/	/	/	
70	99	25	28,01	0,88	1,120	3,16%	0,124	/	/	/	
71	78	25	26,65	0,83	1,066	3,12%	0,064	/	1	1	
72	30	25	28,87	0,48	1,155	1,68%	0,577	/	1	1	
73	72	25	26,48	0,51	1,059	1,91%	0,217	/	1	1	
74	36	25	26,66	0,61	1,067	2,30%	0,545	/	1	/	
75	36	25	27,43	1,23	1,097	4,47%	0,751	0,56	1	1	26,50
76	48	25	29,09	0,92	1,164	3,17%	0,355	/	1	/	
77	30	25	28,31	3,89	1,132	13,75%	0,717	/	1	/	
78	42	25	29,21	0,76	1,168	2,59%	0,500	0,45	1	1	
79	<b>198</b>	25	27,04	1,03	1,081	3,82%	<b>0,010</b>	/	2	2	
80	<b>714</b>	25	30,80	0,99	1,232	3,22%	<b>0,001</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
81	66	25	26,92	0,86	1,077	3,18%	0,405	/	1	1	

82	42	25	28,39	0,44	1,136	1,55%	0,661	/	1	2	28,57
83	<b>801</b>	25	30,74	1,18	1,230	3,85%	<b>0,000</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
84	<b>798</b>	25	30,64	1,14	1,225	3,73%	<b>0,000</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
85	39	25	29,28	1,90	1,171	6,47%	0,602	/	1	1	
86	30	25	29,29	1,71	1,172	5,85%	0,672	/	1	1	28,33
87	60	25	28,47	0,52	1,139	1,83%	0,455	/	1	3	
88	<b>387</b>	25	30,92	1,20	1,237	3,87%	<b>0,040</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
89	<b>879</b>	25	30,95	1,56	1,238	5,05%	<b>0,000</b>	0,42 ; 0,44 ; 0,46	1	3	
90	<b>402</b>	25	30,82	1,47	1,233	4,78%	<b>0,050</b>	0,42 ; 0,46	1	2	
91	30	25	26,33	2,68	1,053	10,18%	0,130	0,60	1	1	29,17
92	60	25	29,62	3,06	1,185	10,33%	0,320	/	1	2	
93	33	25	28,53	0,68	1,141	2,37%	0,461	/	1	1	
94	33	25	28,25	0,82	1,130	2,89%	0,485	/	1	1	
95	51	25	27,66	2,04	1,106	7,37%	0,476	/	2	/	
96	39	25	27,20	2,26	1,088	8,32%	0,829	0,58	2	1	29,00
97	36	25	26,72	0,76	1,069	2,86%	0,879	/	/	/	
98	42	25	26,45	2,33	1,058	8,81%	0,408	/	/	/	
99	30	25	27,73	0,61	1,109	2,19%	0,513	/	/	/	
100	39	25	31,98	1,44	1,279	4,50%	0,896	/	/	/	

**NB** : 13 projets (en gras) ont montré un échec en ce qui concerne le test de normalité. Cela est dû à la grande taille de l'échantillon de ces projets, qui dépasse 100 résultats. En statistique, on peut considérer que l'échantillon est distribué normalement lorsque la taille devient suffisamment grande.  $\beta$  est un facteur de biais.