

32-620-214-4



32-620-214-4

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE GENIE-CIVIL ET RURAL

THESE DE MAGISTER

Option : CONSTRUCTION

Présentée par :

Tarek NAADIA

THEME

LA QUALITE DU BETON DANS
LES CHANTIERS DE CONSTRUCTION

Devant le jury composé de :

Mr : N. BOURAHLA	Maître de conférence, U. BLIDA	Président.
Mr : M. BOUKENDAKDJI	Maître de conférence, U. BLIDA	Rapporteur.
Mr : B. ACHOUR	Maître de conférence, U. BLIDA	Examineur.
Mr : A. BOUAFIA	Maître de conférence, U. BLIDA	Examineur.
Mr : A. BRAHMA	Chargé de cours, U. BLIDA	Examineur.
Melle : F. KHARCHI	Chargé de cours, U.S.T.H.B	Examineur.

Septembre 1996



DEDICACES

Je dédie ce travail :

A ma mère

A mes frères

A mes amis



REMERCIEMENTS

Il est de mon devoir de remercier tout d'abord mon directeur de thèse **D^r M. BOUKENDAKDI** d'avoir bien su diriger ce travail. Je le remercie surtout pour son entière disponibilité et son apport dans le plan scientifique.

J'adresse mes vifs remerciements à **M^r S. KENAI** aussi bien pour sa proposition de ce sujet que pour ses conseils fructueux.

Ma profonde reconnaissance sera exprimée envers les responsables du C. N. E. R. I. B pour avoir mis à ma disposition tout les moyens humains et matériels nécessaires, ainsi qu'au groupe de recherche du thème: "La qualité du béton" constitué de **M^r H. BATATA** et **M^r M. IDDIR**. Leur aide a été très bénéfique et très encourageante.

Je n'oublierai pas de remercier **M^r H. TAMOUT**, responsable du laboratoire de F. E. R. B pour l'aide qu'il m' a apportée afin de réaliser les essais sur chantiers avoisinants dans leur laboratoire.

Je remercie les responsables du C. T. C cherchell, ERCA, ESCB, ECB, ECC, LNHIC et CTTP pour leur aide et leur compréhension.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger mon travail. Mes remerciements vont également à l'encontre de tous les enseignants de l'institut génie civil et rural.

Ma profonde reconnaissance est enfin vouée à mon très cher ami **M^r B. TABBOUCHE** pour ses encouragements et ses consiels, ainsi qu'au membres de ma famille qui m'ont toujours laissé à l'aise pour accomplir ce travail.

RESUME

L'expérience dans le domaine du contrôle de la qualité des bétons dans les chantiers de réalisation de logements et d'équipements publics a permis de constater qu'à de rares exceptions les bétons produits sont en dessus des spécifications exigées.

Dans cette étude, nous avons tenté de montrer tout les aspects de cette faiblesse par le biais de deux (02) approches. La première est statistique et utilise la résistance à la compression comme un moyen pour déterminer statistiquement les facteurs significatifs de la variation de qualité. La deuxième utilise le diagnostic des matériaux et des compositions utilisées et l'appréciation de qualité du béton en cours de sa mise en oeuvre. En d'autres termes, nous avons essayé de définir des moyens et des critères pour évaluer la qualité et aussi les moyens d'organisation de cette qualité afin de mieux la contrôler et de réduire le risque de ne pas atteindre les performances requises.

Les résultats ont montré que le béton produit est loin d'être économique, la résistance à la compression dans les chantiers court des risques très variables de ne pas atteindre la classe ou la résistance de calcul voulue. Ils ont révélé aussi plusieurs insuffisances dans le contrôle tels que l'insuffisance du nombre d'éprouvettes d'échantillonnage et la défaillance dans le mode de prélèvement. Sur chantiers, nous avons soulevé une mauvaise utilisation des composants et une mauvaise organisation dans la production du béton (approvisionnement, stockage etc.). Parmi les facteurs de variation de la qualité, on a trouvé que la quantité d'eau de gâchage peut être le seul facteur causant les plus larges variations dans la qualité du béton dans nos chantiers.

ABSTRACT

The experience in the field of quality control of concrete on construction sites has shown to some extents that the concrete produced is below the standards required.

In this study, we have tried to show all aspects of this weakness by means of two (02) approaches. The first is statistical and use the compressive strength as a mean to determine statistically the significant factors of quality variation. The second use the diagnostic of the materials and the mixes used and the appreciation of the quality of concrete during its handling. In other words, we tried to define the means and the criteria to evaluate the quality as well as the means to organise it, in order to have a better control and to reduce the risks of concrete performances required.

The results have shown that the concrete produced is far to be economical, the compressive strength on sites runs the risks to be very variable and the desired strength could not be achieved. They have also shown a lack of control such as, small number of test specimen and the way they were taken. On sites, we have noticed a bad use of the materials and a bad organisation in the production of concrete. Among the variation factors of quality we found the quantity of mixing water could be the only factor which causes the largest variations in quality concrete on sites.

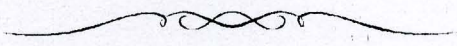
ملخص

التجربة في ميدان مراقبة جودة الخرسانات في ورشات انشاء المساكن و التجهيزات العمومية مكنت من الوقوف على انه الا في الحالات الاستثنائية حيث الخرسانة هي فوق المواصفات المطلوبة.

في هذه الدراسة، حاولنا اظهار كل هيئات هذا النقص عن طريق مقاربتين. الاولى و هي احصائية وتستعمل مقاومة الضغط كوسيلة لتعيين (احصائيا) كل العوامل الفاعلة في تغير الجودة. الثانية تستعمل فحص المواد و الخلطات المستعملة مع تقدير جودة الخرسانة في طريق استعمالها في الورشة. او بالاحرى، حاولنا تعريف الوسائل والمميزات لتقدير الجودة و كذلك وسائل تنظيم هذه الجودة من اجل تسهيل مراقبتها مع تقليص درجة خطورة عدم التمكن من المواصفات المطلوبة.

النتائج اظهرت ان الخرسانة في الورشات ليست اقتصادية فدرجة خطورة عدم التمكن من مقاومة الضغط المطلوبة هي في تغير دائم. هذه النتائج اظهرت كذلك عدة نقائص في المراقبة مثل عدم كفاية العينات لتجربة الانضغاط و كذلك الخلل في طريقة اخذ العينات. في الورشات تبين لنا سوء في استعمال مركبات الخرسانة و سوء في تنظيم انتاج الخرسانة. من بين عوامل التغير في الجودة، تبين لنا ان ماء الخلط قد يكون العامل الوحيد الذي يسبب اكثر و اوسع التغيرات في جودة الخرسانة في ورشاتنا.

SOMMAIRE



Chapitre 1: Introduction : la problématique de la qualité du béton.

1:Généralités.....	01
1.2: La qualité du béton : position du problème.....	02
1.3: Les paramètres de la qualité du béton.....	03
1.4: Les objectifs.....	04
1.5: Le plan du travail.....	05

Chapitre 2: La technologie du béton.

2.1: Généralités.....	06
2.2: Influence des composants sur la qualité.....	07
2.2.1: Qualité des granulats.....	07
2.2.2: Qualité des sables.....	09
2.2.3: Qualité des ciments.....	13
2.2.4: Qualité des adjuvants.....	15
2.2.5: Qualité de l'eau.....	18
2.3: Influence des rapports inter-composants sur la qualité.....	18
2.3.1: Influence du rapport E/C (Eau /Ciment).....	18
2.3.2: Influence du rapport G/C (Granulats/Ciment).....	24
2.3.3: Influence du rapport G/S (Gravier/Sable)	24
2.4: Influence de la mise en oeuvre sur la qualité	26
2.4.1: Le malaxage.....	26
2.4.2: Le transport.....	27
2.4.3: La vibration	28
2.4.4: La cure.....	32
2.5 : Conclusion.....	40

Chapitre 3 : Analyse de la qualité du béton sur chantier

Revue de quelques travaux

3.1: Introduction.....	41
3.2: La qualité du béton sur chantiers en Egypte.....	41
3.3: La qualité du béton sur chantiers en Moyen Orient.....	42

3.4. La qualité du béton sur chantiers en France.....	43
3.5. La qualité du béton sur chantiers en Algérie (Nord).....	44
3.6. La qualité du béton sur chantiers en Algérie (Sud).....	45
3.7. La qualité du béton sur chantiers en Algérie (Sud).....	47
3.8. La qualité du béton sur chantiers en Inde.....	47
3.9. La qualité du béton sur chantiers en Suède.....	49

Chapitre 4: La qualité du béton dans les règlements étrangers

4.1. Introduction.....	52
4.2. Le code modèle CEB.FIP 1978.....	53
4.3. La prénorme Européenne ENV206.....	56
4.4. Le code Britannique BS8110.....	60
4.5. Le code des Etats-Unis ACI 318-77.....	62
4.6. La norme Française AFNOR.....	64
4.7. Le code Allemand DIN1045.....	67
4.8. Le code Egyptien EC 1989.....	70
4.9. Le règlement Algérien: DTR BE2.1.....	72
4.10. L'analyse critique.....	75
4.10.1 Analyse critique de la réglementation étrangère.....	75
4.10.2 Analyse critique de la réglementation Algérienne.....	76
4.11. Conclusion.....	78

Chapitre 5: Méthode d'analyse

5.1. L'approche statistique de l'étude.....	81
5.1.1 : Introduction.....	81
5.1.2 : Notions de statistique.....	81
5.1.2.1. Généralités.....	81
5.1.2.2. La distribution normale	82
5.1.2.3. Les paramètres d'une loi normale.....	85
5.1.2.4. La valeur caractéristique.....	85
5.1.2.5. Le test de conformité.....	86
5.1.2.6. L'estimation statistique.....	87

5.1.3: Récapitulation : résumé de l'analyse statistique.....	91
5.1.4: Les rapports des laboratoires : Exploitation des procès verbaux d'écrasement.....	94
5.1.4.1. Identification des chantiers.....	94
5.1.4.2. Exploitation des résultats.....	95
a- Bases et hypothèses de l'exploitation des P.V.....	97
b- Exploitation globale des P.V d'écrasement.....	101
c- Exploitation des P.V du béton produit pour chaque projet...	106
d- Exploitation des P.V du béton produit par entreprise.....	114
e- Détermination du nombre minimal d'essais.....	118
5.2 Diagnostic des moyens de confection du béton.....	121
5.2.1 Introduction.....	121
5.2.2 Identification des matériaux utilisés.....	121
5.2.2.1 Les granulats.....	122
5.2.2.2 Les ciments.....	140
5.2.2.3 Les adjuvants.....	148
5.2.3 Détermination du niveau de qualité.....	149
5.2.3.1 Appréciations de la composition (ou des compositions) adoptées par le producteur.....	149
a- Le dosage en ciment.....	150
b- Le rapport E/C	151
c- Le rapport G/S.....	153
d- Etude des compositions au laboratoire.....	154
e- Etude d'une opération de convenance.....	155
5.2.3.2. Appréciation du béton frais à la sortie du matériel de production.....	156
a- Variation de la quantité d'eau mélangée.....	157
b- Variation de la granulométrie.....	158
c- Variation de la quantité réelle du ciment.....	165
d- Variation des rapports E/C et G/S.....	165

Chapitre 6: Conclusions générales et recommandations.

6.1: Conclusions générales.....	169
6.2: Recommandations.....	171

Annexes :

Annexe 1 : La distribution des fréquences des résistances dans les 41 chantiers analysés.

Annexe 2 : La relation entre les résistances moyennes et les écarts types par opération de bétonnage dans les 41 chantiers analysés.

Annexe 3 : La fiche technique d'informations.

Annexe 4 : L'appareil de Joisel.



LISTE DES FIGURES

Figure N°	Titre	Page
2.1	Influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance à la compression du béton à 28 jours	08
2.2	Variation de la résistance en compression de la porosité et de l'eau en fonction du module de finesse.	11
2.3	Variation de la plasticité en fonction du module de finesse à dosage en eau constant.	12
2.4	Perméabilité mesurée par écoulement de kérosène	13
2.5	Développement de la résistance du béton fabriqué avec cinq types de ciment différents.	14
2.6	Résistance en compression de deux béton, l'un témoin sans adjuvant l'autre avec fluidifiant.	17
2.7	Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances.	17
2.8	La relation entre la résistance en compression et le rapport E/C.....	19
2.9	La relation entre la résistance et le rapport E/C en fonction de la classe du ciment.	19
2.10	La relation entre la perméabilité et le rapport E/C pour une pâte de ciment 93% hydraté.	22
2.11	Influence du rapport granulats/ciment sur la résistance du béton	24
2.12	La variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction de G/S.	25
2.13	Effet du retempering (ajout d'eau sur chantier) sur la résistance du béton.....	27
2.14	Influence du mode de serrage sur les résistance en fonction des rapports E/C.	28
2.15	Influence du mode de serrage et du temps de vibration sur la densité et la résistance du béton selon sa plasticité.	30
2.16	La relation entre le rapport résistance et le rapport densité	31

2.17	Influence du Slump sur la perte d'air occlus en fonction du temps32	32
	de vibration.	
2.18	Influence des conditions de cure sur la résistance33	33
2.19	Influence de la durée de cure humide sur la résistance du béton avec.....34	34
	E/C=0.5.	
2.20	Perméabilité à l'oxygène à trois jours.....35	35
2.21	Critères adoptés pour définir les risques de fissuration en fonction de35	35
	la température et de l'hydrométrie.	
3.1	L'effet du coefficient de variation de la résistance du béton sur le dosage50	50
	en ciment exigé.	
3.2	Effet du surplus d'eau sur la résistance du béton.....51	51
5.1	La distribution des fréquences d'une loi normale83	83
5.2	La distribution normale.....84	84
5.3	La valeur caractéristique h_c et la marge sécurité 1.6486	86
5.4	La distribution normale d'un échantillon S88	88
5.5	La distribution normale réduite ($\nu=0$ et $\sigma=0$)88	88
5.6	La distribution X^2 (khi-deux).....91	91
5.7	Organigramme résumant la méthode de l'analyse statistique.....93	93
5.8	L'exploitation des P.V.....97	97
5.9	La distribution normale théorique et observée des résistances d'un chantier....98	98
5.10	La répartition des résistances moyennes des P.V.....101	101
5.11	La répartition des écarts types des résistances102	102
5.12	La relation entre les résistances moyennes et les écarts types par opération de bétonnage dans les 4 chantiers types.....104	104
5.13	La distribution des fréquences des écarts types des chantiers observés.....113	113
5.14	La distribution des fréquences des résistances moyennes des chantiers observés.....115	115
5.15	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S1 (sable d'oued), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....124	124
5.16	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S2 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....125	125
5.17	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S3 (sable d'oued), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....126	126

5.18	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S4 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....	127
5.19	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S5 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....	128
5.20	Huit (08) courbes granulométriques d'un sable S6 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.....	129
5.21	Les courbes granulométriques d'un gravier G1 de même classe (3/8) et issues d'une même origine.....	131
5.22	Les courbes granulométriques d'un gravier G1 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.....	132
5.23	Les courbes granulométriques d'un gravier G1 de même classe (15/25) et issues d'une même origine.....	133
5.24	Les courbes granulométriques d'un gravier G2 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.....	134
5.25	Les courbes granulométriques d'un gravier G2 de même classe (15/25) et issues d'une même origine.....	135
5.26	Les courbes granulométriques d'un gravier G3 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.....	136
5.27	Les courbes granulométriques d'un gravier G3 de même classe (15/25) et issues d'une même origine.....	137
5.28	La fréquence du contrôle des ciments par année.....	143
5.29	Comparaison des courbes granulométriques du béton à l'état sec..... (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage) : Entreprise A	161
5.30	Comparaison des courbes granulométriques du béton à l'état sec..... (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage) : Entreprise B	162
5.31	Comparaison des courbes granulométriques du béton à l'état sec..... (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage) : Entreprise C	163
5.32	Comparaison des courbes granulométriques du béton à l'état sec..... (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage) : Entreprise D	164

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Titre	Page
2.1	La relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression20 moyenne du béton soulevé de l'A. C. I 211, 1- 81.	20
2.2	Période de Cure exigée pour produire un degré d'hydratation21 pour lequel les vides capillaires seront discontinus.	21
2.3	Recommandation de A.C.I 318-83 reliant le rapport E/C23 et la résistance aux conditions d'exposition extérieurs.	23
2.4	Recommandations de B. S 8110 partie 1: 1985 pour assurer37 la durabilité sous des conditions d'expositions spécifiques des armatures.	37
2.5	Recommandations de A.C.I 318- 83 pour un enrobage minimum.....38	38
2.6	Recommandation AFNOR pour assurer la durabilité sous des39 conditions d'exposition spécifiques des armatures.	39
3.1	Tableau permettant d'évaluer approximativement la valeur probable.....44 de l'écart type d'une fabrication du béton.	44
4.1	Les valeurs recommandées pour k_1 et k_254	54
4.2	Les valeurs recommandées pour k_1 et k_255	55
4.3	Enrobages minimaux en mm pour les armatures peu sensibles.....56 à la corrosion.	56
4.4	Classes de résistance de béton.....57	57
4.5	Nombre minimal d'échantillons pour le contrôle de conformité.....58	58
4.6	Les valeurs recommandées de λ et k59	59
4.7	Les exigences de durabilité en fonction des conditions d'environnement..... 60	60
4.8	Les différentes classes des résistances (MPa) utilisées dans 61 les chantiers de construction en fonction de l'emploi.	61
4.9	Recommandations de BS8110 pour assurer la durabilité sous62 des conditions d'exposition spécifiques des armatures.	62
4.10	Les recommandations de ACI 318-77 [36] pour enrobage minimum64 pour la protection des armatures.	64
4.11	Les valeurs de k_1 et k_2 en MPa66	66

4.12 Les exigences de la durabilité en fonction des conditions d'environnement.	66
4.13 Les classes de résistance dans le code DIN 1045.	67
4.14 Enrobage minimal (cm) en fonction des conditions d'ambiance.	69
4.15 Enrobage minimal en fonction du diamètre des barres.	69
4.16 Valeurs de l'écart type (S) et le coefficient de variation (V) pour des valeurs minimales de la marge de sécurité ($M=1.64 S$)	70
4.17 Les dosages minimaux des quantités de ciment dans les gâchées du béton pour une durabilité et une résistance meilleure.	71
4.18 Les dosages minimaux en ciment recommandé par le D.T.R Algérien.	74
4.19 Tableau récapitulatif des paramètres comparés.	79
5.1 Tableau récapitulatif des paramètres statistiques	99
5.2 Le risque encouru pour que $f_{m \text{ chantier}} < 250 \text{ bars}$ et $f_{m \text{ chantier}} < 160 \text{ bars}$.	108
5.3 La résistance caractéristique (bars) pour un risque de non atteinte P%.	109
5.4 Les étendues des résistances dans 18 chantiers choisis.	110
5.5 Estimation des paramètres statistiques des bétons produits.	116
5.6 La valeur minimale de prélèvement retenue pour chaque entreprise.	120
5.7 Les proportions probables du sable et du gravier dans une composition granulaire.	139
5.8 Les résultats des résistances à la compression des ciments.	141
5.9 Les pourcentages des essais qui ont la résistance à la compression inférieure à la classe nominale.	143
5.10 Les paramètres statistiques globaux des ciments collectés.	145
5.11 Les valeurs de G.	146
5.12 La résistance attendue du béton confectionné avec les 4 ciments.	147
5.13 Nombre de compositions disponibles sur une centrale d'une entreprise.	150
5.14 Le dosage minimal du ciment dans les normes étrangères.	151
5.15 Classement par intervalle des rapports E/C des 26 compositions collectées.	152
5.16 Le rapport E/C maximum exigé par les normes étrangères.	152
5.17 Classement par intervalle des rapports G/S des 26 compositions collectées.	153
5.18 Résultats des compositions formulées au laboratoire.	154
5.19 Résultats de l'opération de convenance dans les chantiers.	155
5.20 Résultats d'essais sur bétons frais à la sortie des centrales à béton, comparés aux compositions théoriques	157

5.21	Évaluation de la quantité d'eau apportée par le sable des 4 centrales analysées.	158
5.22	La différences des tamisats (entre les 2 courbes granulométriques), au tamis 5 mm pour chaque centrale analysée.	159
5.23	La quantité réelle du ciment par m ³ du béton frais.	165
5.24	Estimation des résistances à la compression d'après le ACI, et la documentation Allemande.	166
5.25	Estimation des coefficients de perméabilité.	167

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités :

Dans les premiers moments en service du béton, le dimensionnement des constructions se faisait par une approche comparative afin d'assurer un facteur de sécurité aux ouvrages en négligeant tout autres aspects de performances.

- Grâce à la mise au point des liants hydrauliques, et au développement de la science des matériaux, l'utilisation du béton a permis une prolifération de performances. En plus de la sécurité, un ouvrage se trouve à un degré donné:
- Durable.
- D'un coût bien étudié (par un choix convenable de la conception, de la technique et des matériaux de base).
- Fonctionnel.
- Assure un certain confort.
- Concorde avec les règlements, normes et codes en vigueur.

La combinaison de ces différents degrés de performances définit ce qu'on appelle communément "la qualité de l'ouvrage".

Dans les ouvrages de bâtiment, il est inéluctable de raisonner sur la qualité d'ouvrage sans soulever celle du matériau béton, outre que, le béton constitue 80% du prix de l'ouvrage et plus de 60% du volume des matériaux [01].

La qualité du béton n'a pas cessé de connaître des progressions dans ses performances à travers le monde. Alors qu'au cours des années 50, le béton le plus résistant utilisé dans la région de Chicago était un béton de 35 MPa, à la fin des années 80 il était possible de fabriquer et de livrer en chantier des bétons ayant une résistance en compression de 70 MPa et 80 MPa au Canada (Toronto), de 85 MPa et 100 MPa et même de 120 MPa aux Etats-Unis pour un béton à haute performance BHP [02]. En Algérie des études de formulation du BHP ont permis d'aboutir à un béton de 60 MPa à 28 jours [03].

Quoique la recherche d'une qualité optimale a su beaucoup de performance, il n'existe pas encore une recette miracle pouvant garantir à n'importe quelle producteur du béton la possibilité de livrer un béton de chantier de 100 MPa mais des lignes directrices qu'il y a lieu de suivre et un certain nombre d'erreurs qu'il est préférable d'éviter.

1.2 La qualité du béton : Position du problème :

La qualité du béton est conçue différemment par un concepteur, un homme de chantier et le maître de l'ouvrage. Pour le premier, cette notion est synonyme d'un certain niveau de performances, généralement mécaniques comme le stipulent les cahiers de charges. Pour le second, le béton de qualité est un béton qui est suffisamment maniable pour la mise en oeuvre, présente une certaine cohésion et un bel aspect. Par contre, pour le maître de l'ouvrage, c'est le confort et surtout une garantie de la sécurité de l'ouvrage pendant le service.

Afin de surpasser cette subjectivité, on utilise la notion qualité introduite initialement dans les industries autres que le bâtiment c'est à dire : définir un niveau de performance en fonction des besoins et réaliser un béton correspondant à cette exigence et d'une fidélité acceptable tout en restant dans un cadre économique. Toutefois, la production du béton (in situ) se caractérise et se différencie des autres industries par :

- La faible répétitivité des conditions de production.
- La faible répétitivité dans la maturation du produit due aux conditions climatiques.
- L'aspect aléatoire des composants naturels.
- L'instabilité de la main d'oeuvre (mobilité des chantiers)
- Diversité des intervenants.

Ces facteurs sont autant des paramètres qui rendent difficilement maîtrisable la qualité comparativement aux produits industriels.

Cette fluctuation ne doit en aucun moment justifier les défaillances de la qualité du béton, il faudra plutôt la prendre en charge par une approche qui doit tenir compte des spécificités du béton, et qui consiste à :

- Définir la notion de qualité des bétons.
- Identifier les paramètres significatifs de cette qualité.
- Définir les moyens d'évaluation de cette qualité.
- Elaboration d'un plan qualité dans lequel seront définis les moyens d'organisation de la qualité : l'organisation de la qualité vise à réduire le risque que les performances requises ne soient pas atteintes.

1.3 Les paramètres de la qualité du béton :

Un bon béton doit satisfaire l'état frais et l'état durci. Du moment que l'état frais représente une exigence pour assurer l'état durci (une consistance du mélange pour que le béton peut être compacté par les moyens disponibles de la mise en oeuvre et une cohésion suffisante pour le déplacer, le transporter et le placer sans ségrégation), donc c'est ce dernier (l'état durci) qui peut contenir les exigences de satisfaire les performances à court et à long terme dans un ouvrage. Et parmi ces performances, on trouve la résistance et la durabilité comme les paramètres de qualité les plus étudiés.

La résistance en compression est invariablement spécifiée car elle est mesurable, en dépit qu'elle ne donne pas la mesure intrinsèque de la résistance du béton dans la structure mais seulement évalue la qualité du béton. D'où, elle peut être le moyen le plus simple pour assurer la conformité avec les spécifications et guider un bon chemin vers le contrôle de qualité.

La durabilité est un paramètre lié à l'altération des constituants du béton par des agents agressifs intérieurs ou extérieurs, qui reste difficile à l'évaluer par des essais simples. De là, on peut dire que la durabilité ne peut pas être le résultat d'un seul facteur, mais l'effet de la perméabilité s'apparaît comme un facteur essentiel afin de rendre le béton plus durable.

Tout de même, l'amélioration de la résistance va de pair avec celle de la durabilité, en plus ces deux paramètres sont les meilleurs représentants de beaucoup de propriétés, du fait qu'ils sont en étroite liaison avec la densité, la perméabilité, la résistance à l'abrasion, la résistance au choc, la résistance à la traction, la résistance aux sulfates et autres.

1.4 Objectifs de la recherche :

L'objectif de l'étude est de faire apparaître une méthodologie d'étude de la qualité du béton dans les chantiers de construction. En d'autres termes, c'est définir les moyens et les critères d'évaluation de la qualité et aussi les moyens d'organisation de cette qualité afin de mieux la contrôler et de réduire le risque que les performances requises ne soient pas atteintes.

L'évaluation de la qualité du béton peut être vue par une approche quantitative (qualité - statistique) qui utilise la résistance à la compression comme un moyen pour déterminer statistiquement les facteurs significatifs de variation de la qualité, et une approche qualitative qui utilise le diagnostic des matériaux et des compositions utilisées et l'appréciation de la qualité du béton en cours de sa mise en oeuvre pour détecter les causes sources de la variation donnée par l'approche quantitative.

En se basant sur la définition d'un béton de qualité qui n'est pas celui qui a une résistance élevée mais plutôt dont le risque de présenter des performances différentes à celles escomptées est le moindre possible, le besoin d'apprécier la sécurité de l'ouvrage réalisé et connaître le risque encouru s'impose. En d'autres mots, c'est détecter statistiquement les facteurs significatifs de variation de la résistance afin d'opposer à l'aspect aléatoire dû aux facteurs de fluctuations.

A partir de la détermination des causes sources de la variation de la qualité, on peut déterminer le niveau de qualité représentée par les deux paramètres (la résistance et la durabilité).

1.5 Plan de travail :

Après l'introduction de la problématique de la qualité au chapitre 1, une synthèse bibliographique sur la technologie du béton est donnée au chapitre 2 à travers l'influence des composants du béton, des dosages des composants et de la mise en oeuvre sur la qualité du béton vue par les deux (02) paramètres choisis (la résistance en compression et la durabilité).

Le chapitre 3 couvre les travaux d'analyse de la qualité du béton sur chantiers à travers quelques pays, pour connaître la manière dont ils décrivent le concept "qualité du béton".

Une revue des règlements étrangers sur la qualité du béton est faite dans le chapitre 4.

Une méthode d'analyse par le biais d'une approche statistique des résistances à la compression, d'un diagnostic des matériaux et des compositions des bétons en cours de leur mise en oeuvre sur chantiers et des exploitations des résultats et leurs interprétations et confrontations avec ceux des chapitres 2,3 et 4 est donnée au chapitre 5.

Et enfin, le chapitre 6 fait état de quelques recommandations et directives pour bien contrôler et organiser la qualité du béton sur chantiers.

CHAPITRE 2

TECHNOLOGIE DU BETON

CHAPITRE 2

LA TECHNOLOGIE DU BETON

2. 1 Généralités :

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle à rechercher pour un béton. Mais l'emploi de plus en plus intensif de ce béton (armé ou précontraint) soulevait le problème de la durabilité de ce matériau par les dégradations observées des éléments. C'est pour cette raison que ces deux critères : la résistance et la durabilité qui représentent l'état durci du béton dans les structures, demeuraient depuis quelques années les critères essentiels de la qualité à court terme et à long terme. En outre, dans certains pays, en Angleterre notamment, les règlements récents (British Standard : B.S) mettent l'accent à la fois sur la résistance et sur la durabilité [04].

Si la résistance est le critère invariablement spécifié par sa mesurabilité, qui reste le résultat de plusieurs facteurs liés en premier lieu à la composition, et à la mise en oeuvre en deuxième lieu, la durabilité est le critère qui ne peut pas être le résultat d'un seul facteur mais l'effet de la perméabilité s'apparaît comme un facteur essentiel en général [05].

Toutes les observations originaires des expériences et de la pratique, se mettent en accord sur le moyen le plus sûr pour avoir un béton de qualité, c'est la bonne qualité des matériaux, une composition étudiée et une bonne mise en oeuvre, de façon à le rendre compact, imperméable, résistant, cohérent et adhérent aux armatures.

Tout cela nous permet de conclure que l'amélioration des résistances va de pair avec celle de la durabilité.

2. 2 Influence des composants du béton sur la qualité :

Le béton est couramment produit en fonction des possibilités du producteur et de la qualité des matériaux disponibles sur place. C'est pour cette raison que l'étude de l'influence de chaque matériau (granulats, ciment, et eau) sur la bonne qualité est nécessaire avant d'aborder l'influence des combinaisons de ces matériaux et l'influence de la mise en oeuvre sur la qualité du béton.

2.2.1 La qualité des granulats :

Du moment que presque, les trois quart du volume du béton est occupé par les granulats, ce n'est pas une surprise que sa qualité est considérablement importante. Non seulement ces granulats peuvent influencer sur la résistance du béton mais aussi peuvent affecter la durabilité et les performances structurelles par leurs propriétés. Enfin, le choix du granulats de qualité doit tenir compte de beaucoup de facteurs : la forme et la texture, la minéralogie, la granulométrie, la résistance en compression et le diamètre maximal. Par leur forme et texture de surface, la présence des particules élongées et écailleuses en excès de 10 à 15 % de la masse des gros granulats est généralement indésirable, car elles affectent la durabilité du béton par leur forme en plan qui favorisent la conservation de l'eau et de l'air en dessous, comme elles affectent l'ouvrabilité qui décroît en augmentant l'angularité. La forme et la texture des granulats influencent aussi considérablement la résistance à la compression qui donne une meilleure adhérence entre les granulats et la pâte du ciment pour le cas de la texture rugueuse et la forme angulaire par la grande surface offerte. L'absorption et la perméabilité des granulats sont conditionnées par leur structures poreuses. Elles influencent l'adhérence entre granulats et pâte du ciment, l'ouvrabilité par la perte du rapport E/C effectif, empêchant ainsi une hydratation complète du liant et provoquant un béton poreux et perméable.

Une granulométrie qui tend vers l'élargissement des grandes dimensions des granulats diminue la quantité d'eau exigée, par la diminution de la surface spécifique et la réduction du rapport E/C d'où l'augmentation de la résistance. Ce qui est montré dans la figure 2.1, dans laquelle on remarque cette influence des grandes dimensions

des granulats sur la résistance à la compression du béton (pour les dimensions allant jusqu'à 38 mm).

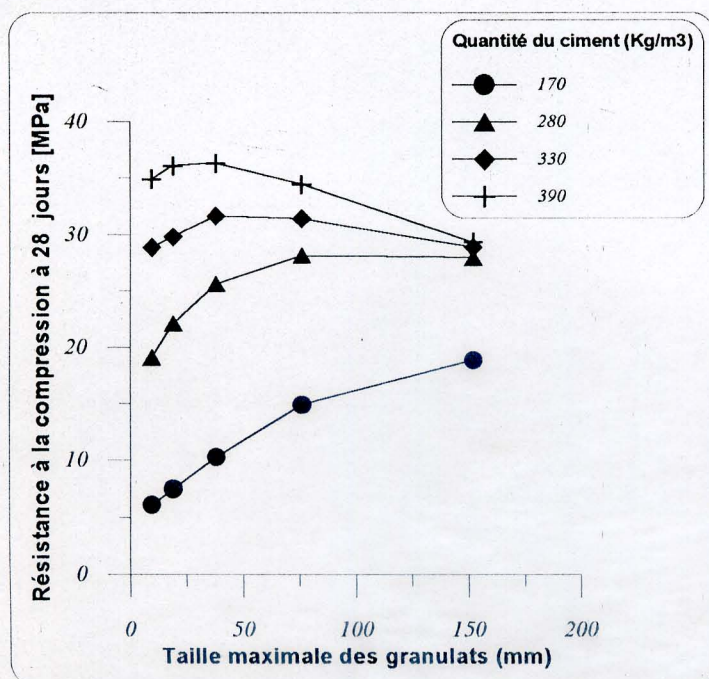


Figure 2.1: Influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance à la compression du béton à 28 jours [06].

Les granulats des roches altérables et ceux susceptibles de réagir au contact du ciment sont à utiliser avec précaution tels que les granulats contenant de la silice, actifs pour une réaction alcalis-silica (alcalis- granulats), les granulats sulfatés ou chlorés, et les granulats contenant de l'argile ou autres matières organiques.

Pour accroître les résistances des bétons, il faut donc choisir des granulats dont la résistance à l'écrasement soit supérieure à la résistance du béton à confectionner (pour éviter la casse des granulats avant le mortier), un module d'élasticité faible afin de minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat-mortier qui pourraient nuire à l'adhérence du mortier avec les granulats. Pour cela, il est exigé au producteur du béton de fournir une analyse pétrographique des granulats qu'il utilise.

Une granulométrie continue est préférable pour la meilleure ouvrabilité qu'elle obtient. Tout de même, la granulométrie discontinue reste recommandée pour les mélanges qui auront une faible ouvrabilité afin d'éviter la ségrégation. Mais un bon compactage, un bon contrôle, une attention à la mise en oeuvre restent très essentiels.

2. 2. 2 La qualité des sables :

La granulométrie d'un sable à béton est une caractéristique importante, laquelle influe sur le dosage en liant qui pourra cimenter le mélange et lui donner une résistance finale suffisante. Elle influe aussi sur le dosage en eau, sur la compacité, et donc sur la durabilité du béton. L'allure de la courbe granulométrique d'un sable nous renseigne sur sa finesse, caractérisée par le module de finesse.

Des études expérimentales ont montré qu'un bon sable donnant les meilleurs résultats des bétons, est celui dont le module de finesse se situe au environ de la valeur de $M_f=2.56$ [07]. La courbe d'un tel sable se dessine au milieu du fuseau recommandé pour la granulométrie des sables à béton de structures dont le domaine de finesse est de 2.2 à 2.8. Un module de finesse d'un sable situant entre 2.5 à 2.6 convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et de bonne résistance, avec des risques de ségrégation limités et une perméabilité optimale. D'après les travaux de DREUX et GORISSE [07], illustrés par les figures 2.2, 2.3 et 2.4, on observe : que dans la figure 2.2, le béton de ce sable demande le moins d'eau pour une même ouvrabilité d'où une meilleure résistance à la compression et une meilleure porosité. Dans la figure 2.3, ce même module de finesse donne une meilleure susceptibilité à la vibration sur le plasticimètre pour une même quantité d'eau. En présence d'un sable grossier (au delà d'un module de finesse 3.12), un ajout d'eau ne changerait pas grand chose dans la vibration (représentée par le plasticimètre) du moment que l'eau en excès essore au travers du mélange, et le béton se trouve non plastique, et a tendance à la ségrégation; d'où une baisse de la résistance même en quantité d'eau constante. La perméabilité mesurée par l'écoulement de Kérosène pendant une heure sous une pression de 20 Bars est représentée sur la figure 2.4 en fonction du module de finesse du sable; le module de finesse 2.56 semble le plus favorable.

En conclusion, quand on est en présence d'un sable trop grossier, on a intérêt pour obtenir un béton de bonne plasticité, à diminuer le module de finesse par un ajout de sable-fin. Tout de même l'idée de l'augmentation du dosage en eau est une mauvaise solution.

L'excès de fines argileuses dans le sable amplifie le retrait ou le gonflement ce qui ne permet pas d'obtenir des bétons de qualité. Un équivalent de sable souhaitable se trouve dans le domaine de 60 à 70%.

L'influence d'un changement de sable, d'un dosage volumétrique (phénomène de foisonnement) et de l'humidité des granulats sur la qualité des bétons sont des facteurs qui doivent être pris en considération spontanément dans la formulation de ces derniers, du moment que cela peut entraîner des modifications sur le rapport E/C effectif, et par la suite sur la résistance requise, sur l'ouvrabilité et la durabilité.

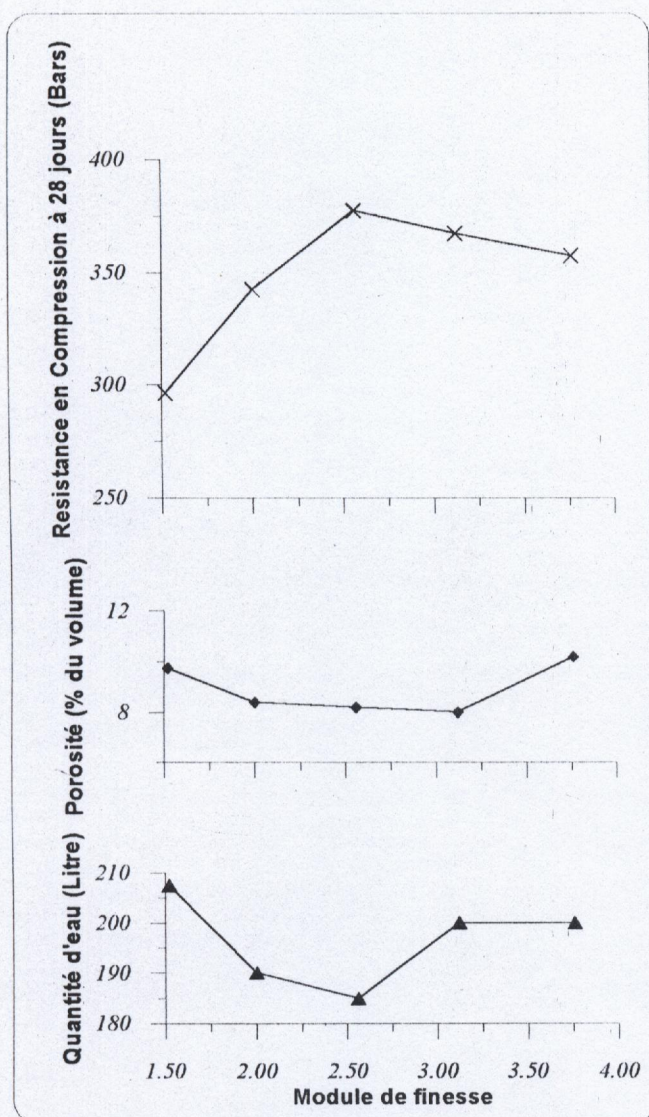


Figure 2.2: Variation de la résistance en compression, de la porosité et de l'eau en fonction du module de finesse [07].

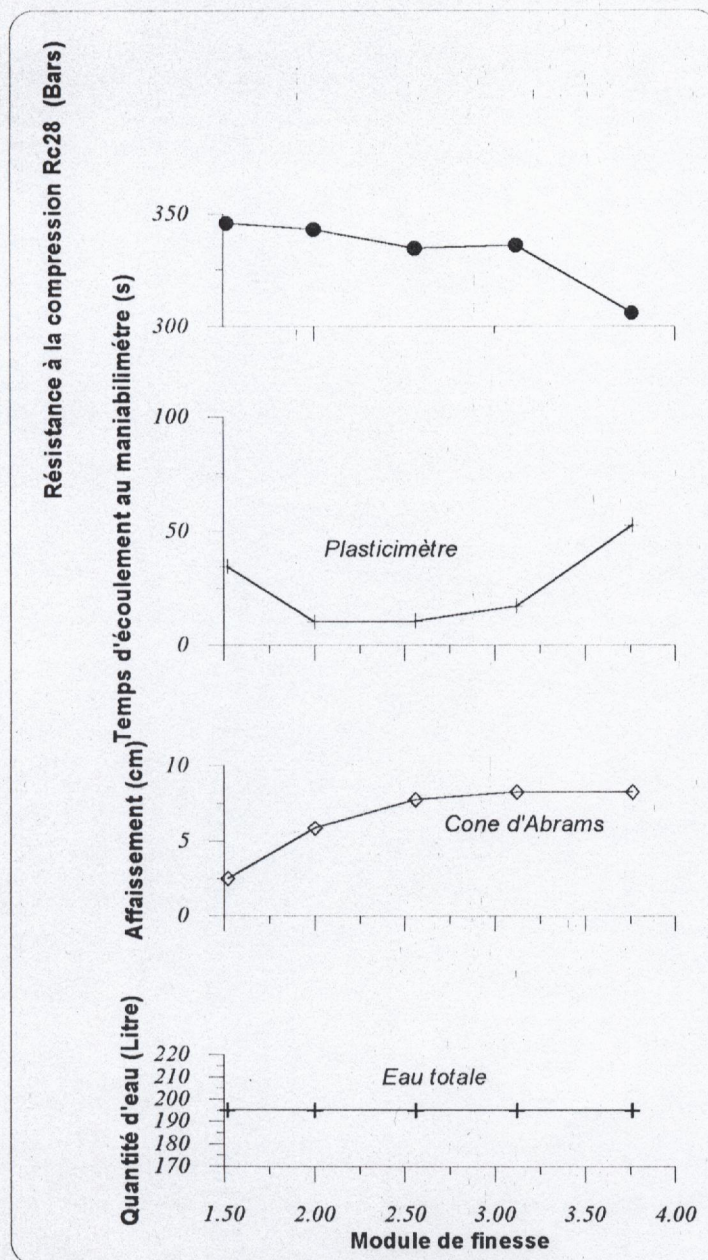


Figure 2.3: Variation de la plasticité en fonction du module de finesse à dosage en eau constant [07].

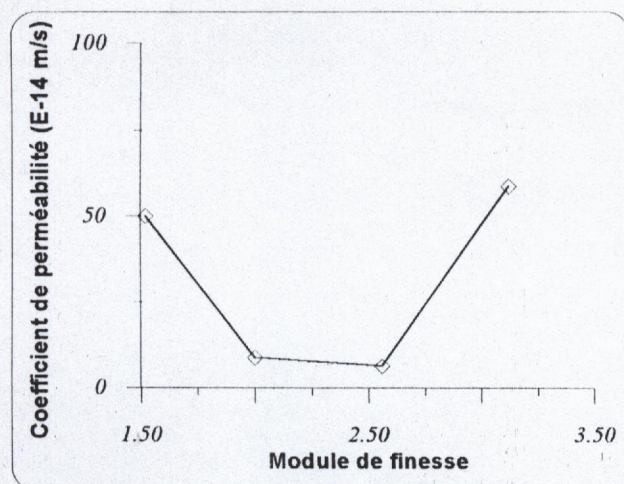


Figure 2.4: Perméabilité mesurée par écoulement de kérozène sous pression (20 bars) et pendant une heure (un dosage en ciment de 350 kg/m³) et un affaissement constant [07].

2. 2. 3 La qualité des ciments :

La variation de la résistance par un kilogramme de ciment dépend de toutes les variables qui influencent la qualité du béton. Si le dosage en ciment d'un mélange est en dessous de l'optimum, on peut améliorer la résistance en utilisant un granulats plus gros, si le dosage en ciment est au delà de l'optimum, on peut obtenir une meilleure résistance en utilisant un granulats plus fin.

Après avoir sélectionné un dosage optimal du ciment pour une série de matériaux donnée, la résistance maximale ne sera pas augmentée par un accroissement du dosage en ciment. Un excès du ciment peut aussi rendre le béton collant et peu ouvrable.

Les ciments portland sont les liants les plus importants et les plus employés dans la construction actuelle. Beaucoup de ciments ont été développés pour assurer une bonne durabilité au béton sous différentes conditions. Cependant, ce n'est pas possible de trouver dans la composition du ciment la réponse complète du problème de la durabilité, du moment que les principales propriétés physiques et mécaniques d'un béton durci, tels que la résistance, la perméabilité sont affectés aussi par les facteurs autres que la composition du ciment, malgré qu'il donne un gain de résistance [06].

Suivant les normes Britanniques B.S [06], il existe plusieurs types de ciment portland, tels que : ciment portland ordinaire (type 1), modifié (type 2), portland à durcissement rapide (type 3), portland à basse chaleur d'hydratation (type 4) et le ciment résistant aux sulfates (type 5). Voir figure 2.5

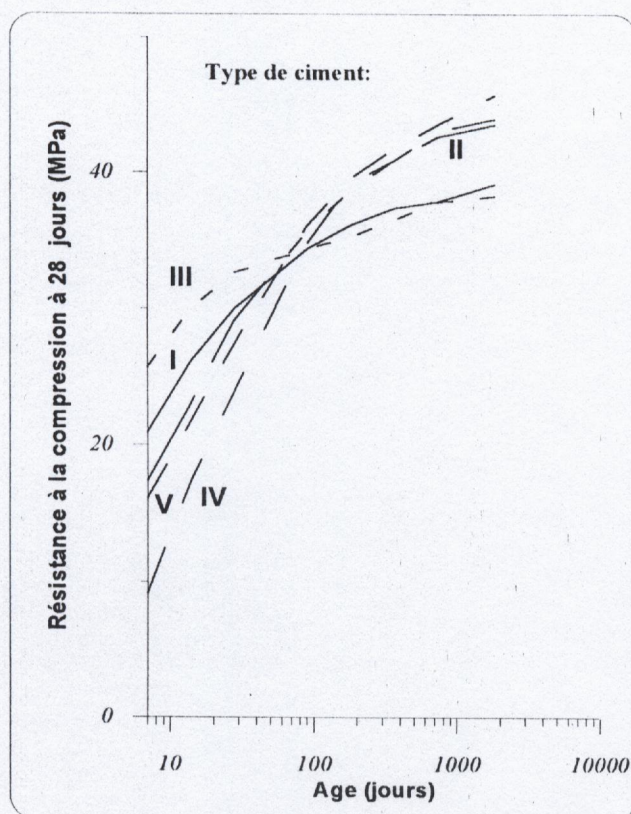


Figure 2.5: Développement de la résistance du béton contenant 335 Kg/m³ de ciment et fabriqué avec 5 types de ciment différents [06] .

La tendance générale est vers les ciments qui ont un taux d'accroissement de durcissement modéré pour atteindre la résistance ultime. Pour les bétons fabriqués à partir des ciments de différents types et pour des taux d'accroissement des durcissements qui varient considérablement, des résistances se trouvent très rapprochées à l'âge de 90 jours. En fait, les différences significatives des principales propriétés physiques des ciments de différents types, sont présentes seulement aux premières étapes de l'hydratation, quand cette dernière est complète, ces différences

sont mineures [06]. En Algérie, le ciment portland artificiel CPA 325 est le ciment le plus utilisé.

La dispersion d'essai en compression sur le ciment, malgré le respect des normes, est relativement importante. Pour une même classe de résistance du ciment par exemple un ciment de classe 45, la résistance réelle différente est dans la fourchette extrême -10 à +10 MPa [04]. Les essais inter-laboratoires (plus de 120 laboratoires y participent) organisés par le C.E.R.I.L. II [08] indiquent une dispersion dans la résistance en compression à 28 jours de l'ordre de plus ou moins 6 MPa en compression sur un même ciment. L'écart type de la résistance d'un ciment portland ordinaire est de 5 MPa pour les ciments fournis de plusieurs usines et de 3 MPa pour les ciments fournis d'un seul usine [09]. Tandis que dans les chantiers allemands [10], l'écart type des résistances des ciments est de 2.2 MPa. Les études de DEVIS [11] sur les ciments de chantiers en Californie montrent que le coefficient de variation des résistances des cubes de mortier fabriqués à partir des ciments de différents origines est inférieur à 10% dans 72% des chantiers.

Les lieux utilisés pour la conservation des ciments doivent être très secs, clos et couverts. En effet, exposé à l'air libre, le ciment absorbe de l'humidité et du dioxyde de carbone (CO_2), ce qui se traduit le plus souvent par une chute de ses performances mécaniques.

2. 2. 4 La qualité des adjuvants :

Les adjuvants sont un moyen d'adaptation des exigences de qualité du béton aux ressources et aux conditions locales.

L'utilisation des adjuvants sur chantiers est très souvent contrainte aux possibilités d'apparition des effets secondaires non recherchés ou même des effets inverses, faute de dosage ou du mode d'introduction, comme pour le cas des fluidifiants dont le mode d'introduction est totalement différent de celui des autres adjuvants tel qu'un plastifiant [12].

Tout les adjuvants influencent la résistance mécanique directement ou indirectement (comme les antigels qui diminuent la résistance), quelques uns seulement peuvent influencer la durabilité par leur rôle de réducteurs d'eau comme les fluidifiants, d'améliorateurs d'homogénéité comme les plastifiants et la présence des chlorures dans le CaCl_2 comme accélérateurs de prise (qui peuvent présenter des dangers de corrosion pour les armatures).

Les figures 2.6 et 2.7 illustrent la modification de la rhéologie du béton qui peut se traduire par une amélioration de la qualité au moment voulu.

La concertation préalable à tout démarrage d'un chantier important s'impose entre le maître d'oeuvre, l'entreprise, le laboratoire, le cimentier et le producteur d'adjuvants.

Donc pour une utilisation correcte des adjuvants, ces dernières permettent de réduire le risque d'une mauvaise qualité du béton sur chantier de façon à le rendre le moins soumis aux aléas de fluctuation tels que l'excès en eau et le manque en vibration.

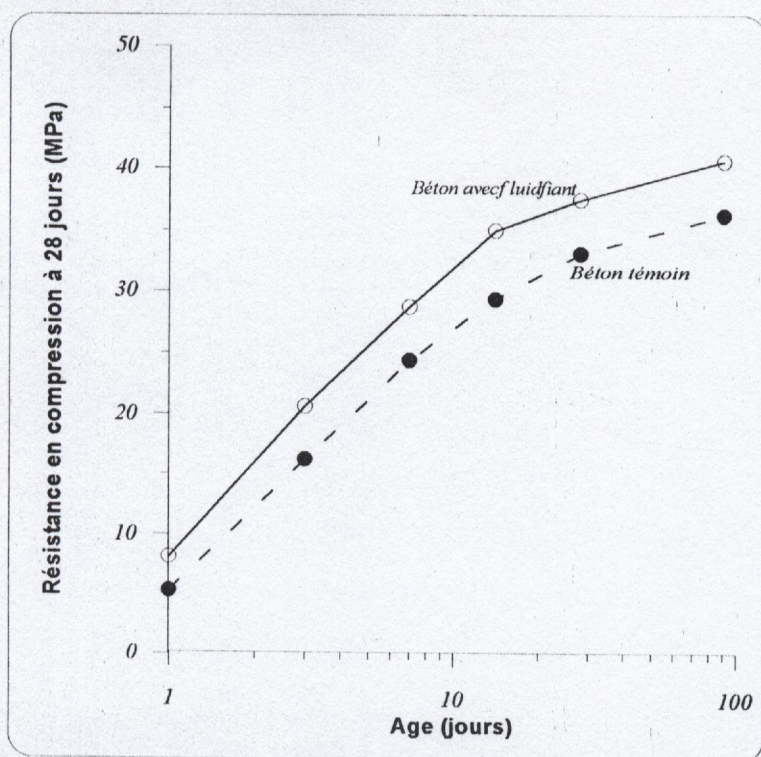


Figure 2.6 : Résistances en compression de 2 bétons, l'un témoin sans adjuvants, l'autre avec fluidifiant [13].

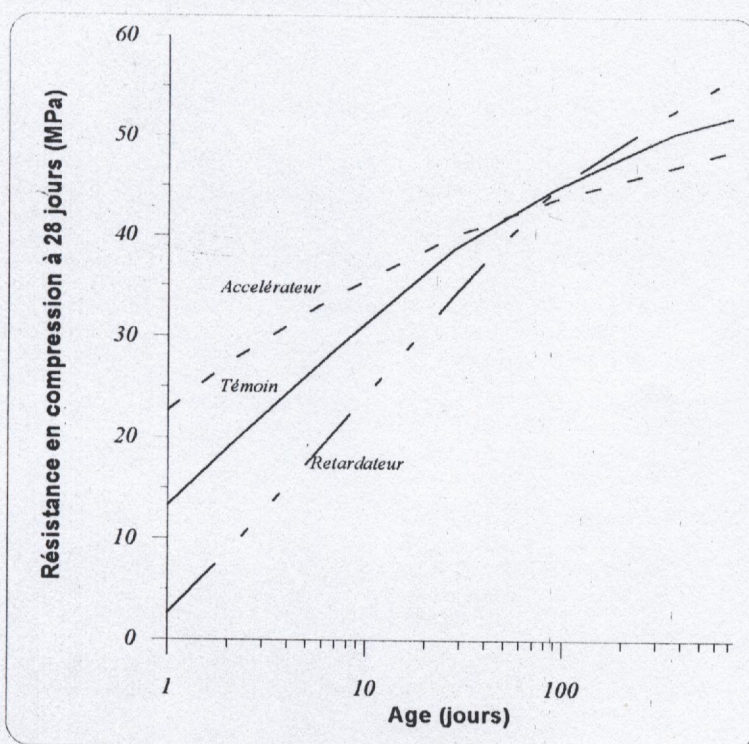


Figure 2.7: Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [13].

2. 2. 5 La qualité de l'eau :

L'eau de gâchage des bétons doit être propre, ne contient pas des matières en suspension au delà de certaines valeurs permises (2 g/ l pour les bétons de qualité, à résistance élevée et à faible perméabilité) [04]. Les éléments critiques à surveiller dans l'eau de gâchage sont les chlorures, les sulfates, le magnésium et les matières organiques. Toute eau douteuse doit être soumise à l'analyse chimique.

Le dosage en eau est un problème assez difficile à le contrôler sur le chantier, vu l'ignorance de la quantité d'eau apportée par les granulats suivant qu'ils sont en état sec ou humide, ce qui peut engendrer une fluctuation remarquable dans la qualité du béton.

2. 3 Influences des rapports inter-composants sur la qualité :

2.3.1 Influence du rapport eau / ciment (E/C) :

Pour une cure et un âge donné, avec une température prescrite, la résistance du béton dépend en premier lieu de deux majeurs facteurs : le rapport E/C et le degré de Compactage. Le rapport E/C détermine la porosité de la pâte du ciment durci aux différentes étapes d'hydratation [06]. Et comme la résistance et la durabilité sont fonction de la porosité (essentiellement les pores capillaires), 2% et 5% des vides peuvent réduire la résistance de 10% et 30% respectivement [14]

La figure 2.8, montre que pour un compactage complet, la résistance à la compression est inversement proportionnel au rapport E/C.

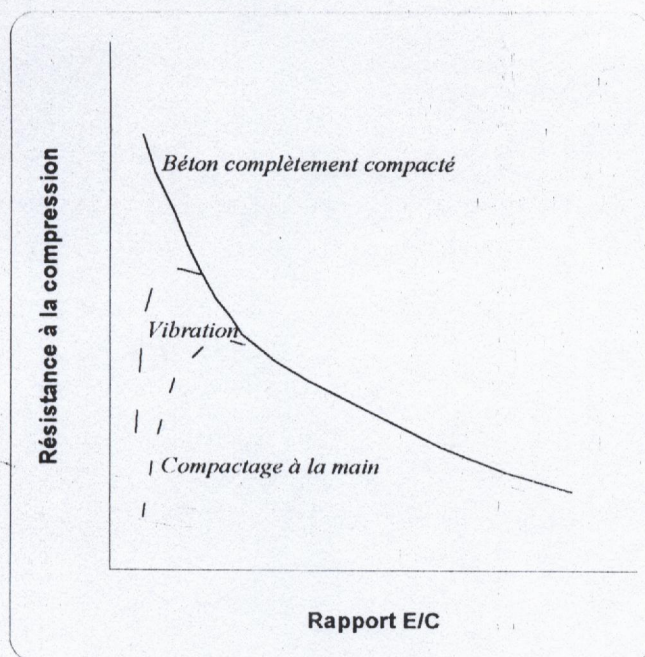


Figure 2.8: La relation entre la résistance en compression et le rapport E/C [14].

Un exemple de résistances d'un béton moyen en fonction de la classe du ciment et du rapport E/C est donné par la figure 2.9 [15].

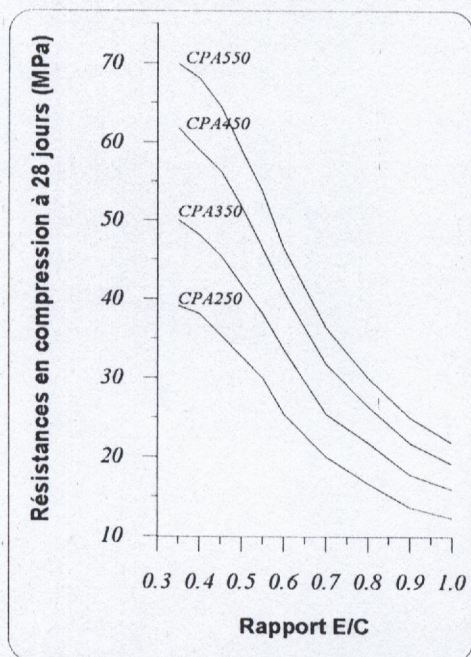


Figure 2.9: La relation entre la résistance et le rapport E/C en fonction de la classe du ciment (d'après une documentation Allemande du V.D.Z, béton 11-1970) [15].

D'après le code American Concrete Institute (A.C.I. 211. 1-81) [06], représenté par le tableau 2.1, pour un béton de granulat maximum de 20 à 25 mm d'un ciment portland ordinaire ne contenant que 2% d'air, une différence de 0.06 en rapport E/C fait perdre la résistance à la compression de 5 MPa pour un béton appartenant à la plage de résistance moyenne de 20 à 45 MPa.

Tableau 2.1 : La relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression moyenne du béton soulevé de l'A. C. I 211. 1- 81. [06]

Résistance à la compression moyenne à 28 jours [MPa]	Rapport E/C effectif (par masse)	
	Pas d'air entraîné dans le béton	Entraînements d'air dans le béton
45	0.38	—
—	0.41	—
40	0.43	—
35	0.48	0.40
30	0.55	0.46
—	0.57	0.48
25	0.62	0.53
—	0.68	0.59
20	0.70	0.61
—	0.80	0.71
15	0.82	0.74

Les valeurs données sont pour un diamètre maximum des granulats de 20 à 25 mm, pour un béton ne contenant pas beaucoup d'air (de 1.5 à 2%), pour un ciment portland ordinaire, et mesurées sur des cylindres standards.

Pour la durabilité, le rapport E/C est un facteur fondamental car il détermine la perméabilité de la pâte du ciment, et donc tout le béton contre toute agressivité extérieure. La figure 2.10 montre que le coefficient de perméabilité, pour un rapport (E/C=0.7), est 4.5 fois plus élevé que celui pour un rapport (E/C=0.6) et 20 fois plus élevé que celui pour un rapport (E/C=0.5).

La perméabilité n'est pas simplement fonction de la porosité, qui est à son tour fonction de rapport E/C et le degré d'hydratation, mais aussi de la structure poreuse (pores capillaires), soit qu'elle est interconnectée ou non. Pour cela, au dessous du rapport $E/C=0.6$, les pores capillaires seront discontinus, à un degré d'hydratation inférieur à 90% et pour une période de cure qui n'est pas trop longue [06]. Voir tableau 2.2. Donc, il faut chercher à réduire le rapport E/C ($E/C < 0.6$), en augmentant l'énergie de mise en oeuvre, et le dosage en ciment qui en soit constitue un plastifiant dans le béton frais, et en utilisant des adjuvants réducteurs d'eau ou des fluidifiants [16]. A cette étape, on peut avoir recours à la cure pour assurer cette continuité d'hydratation du ciment.

Tableau 2.2 : Période de Cure exigée pour produire un degré d'hydratation pour lequel les vides capillaires seront discontinus [06].

Rapport E/C	Degré d'hydratation (%)	Période de Cure exigée
0,4	50	3 jours
0,45	60	7 jours
0,5	70	14 jours
0,6	92	6 mois
0,7	100	1 ans
plus que 0,7	100	impossible

D'après le A.C.I standard 301 - 72 [06], une structure étanche est obtenue pour un rapport ($E/C < 0.48$) si elle est exposée à l'eau et $E/C < 0.44$ si elle est exposée à l'eau de mer.

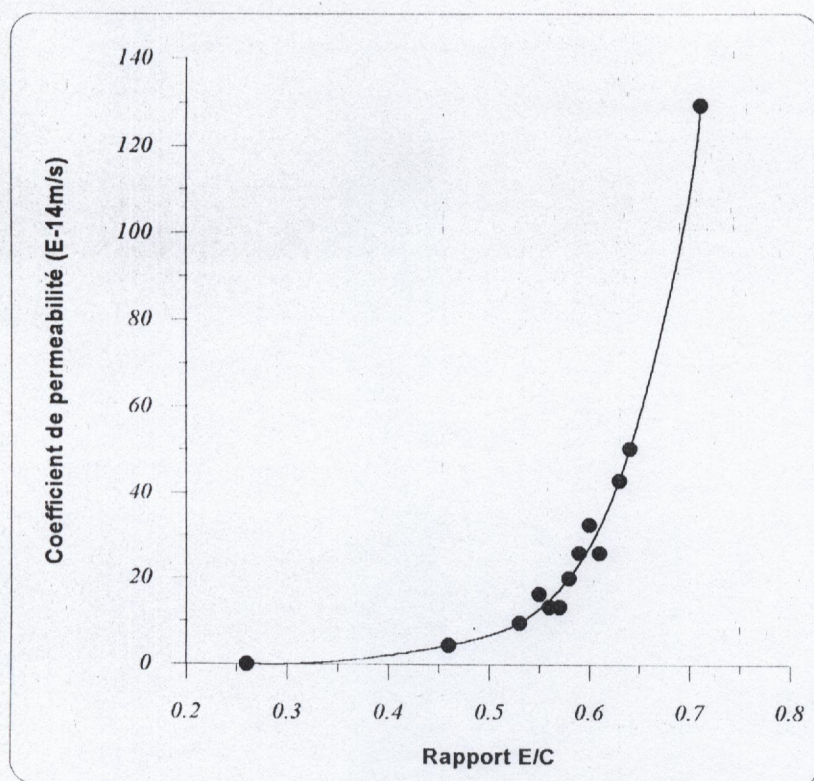


Figure 2.10: La relation entre la perméabilité et le rapport E/C pour une pâte de ciment 93% hydratée [14].

Pour un rapport E/C rassemblant la résistance et des conditions d'exposition extérieurs, des recommandations de A.C.I318-83 [06] sont données par le tableau 2.3

Tableau 2.3 : Recommandation de A.C.I 318-83 reliant le rapport E/C ,et la résistance aux conditions d'exposition extérieurs [06].

Conditions d'exposition	Rapport E/C max pour le béton (granulats de densité normale)	Résistance de calcul minimale (MPa) (granulats de faible densité)
<u>Béton étanche:</u>		
a) Exposé à l'eau fraîche.	0.50	25
b) Exposé à l'eau de mer.	0.45	30
<u>Béton exposé au gel et dégel dans les conditions humides:</u>		
a) Sections minces, bordures des sections.	0.45	30
b) Autres éléments.	0.50	25
c) la présence des sels fondant.	0.45	30
<u>Pour la protection de la corrosion des armatures du béton du à l'eau de mer, etc....</u>	0.40	33

Le D.T.R Algérien (document technique réglementaire) [17] adopte, pour un dosage en ciment de $C=300$ à 400 Kg/m^3 , un intervalle de $0.4 < E/C < 0.6$ avec la valeur moyenne $E/C = 0.5$. Il prend un $E/C < 0.5$ si l'on cherche à réaliser des bétons fermes, ou si le sable présente une granulométrie peu chargée en élément fin ou si le gravier est à majorité de gros éléments et de nature très poreuse ou pour des valeurs du rapport granulats-sable $G/S > 2$, ou encore si l'on emploie un adjuvant (plastifiant ou fluidifiant). Dans les cas contraires on prend $E/C > 0.5$.

2. 3. 2 Influence du rapport granulats/ciments (G/S) :

Une augmentation du rapport granulats/ciment (G/C) provoque une augmentation de la résistance, du fait que pour une faible masse du ciment, la porosité de cette dernière se trouve diminuée, et ainsi la résistance s'accroît avec une durabilité améliorée. Cette influence du rapport granulats/ciment (G/C) peut être représentée par la figure 2.11 qui dessine la relation résistance-rapport E/C pour chaque rapport de G/C variant de 3 à 6. D'après cette dernière figure, on remarque que l'augmentation du dosage en ciment ne signifie pas une augmentation de la résistance. Ce qui pourra justifier l'explication déjà énoncée ci-dessus.

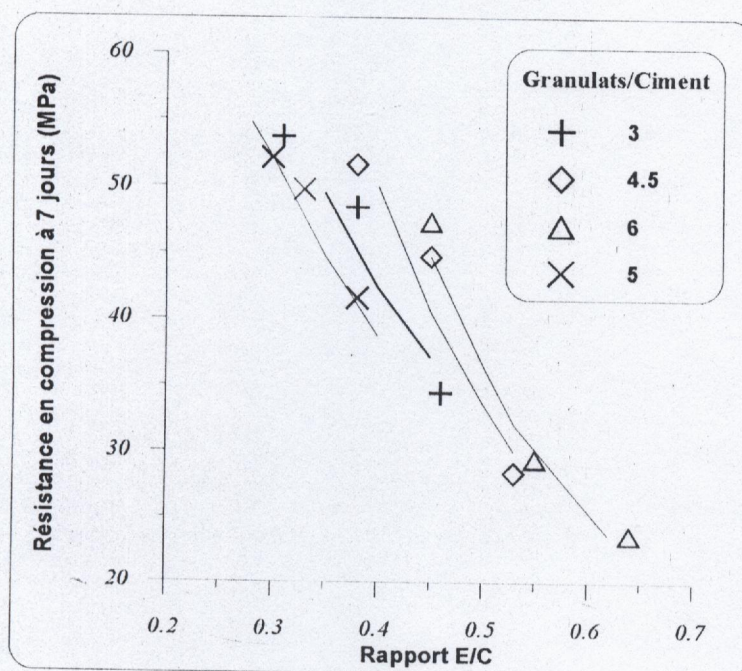


Figure 2.11: Influence du rapport granulats/ciment sur la résistance du béton [14].

2. 3. 3 Influence du rapport gravier/sable (G/S) :

Le rapport gravier-sable (G/S) est un facteur essentiel dans l'ouvrabilité, il représente un potentiel de plasticité et une garantie contre tout aléa d'ouvrabilité (pendant la fabrication, le transport et la mise en oeuvre), d'homogénéité (ségrégation), et de stabilité (ressuage-essorage) dans les chantiers.

En général, l'influence de la composition granulométrique du béton est relativement faible sur la résistance. En effet, l'influence du rapport G/S est relativement faible, tandis que la résistance augmente plus sensiblement pour des valeurs plus élevées de G/S surtout pour les bétons fermes, mais pour des raisons d'ouvrabilité (risque de ségrégation et effet de paroi important) il ne convient pas de dépasser $G/S=2$ à 2.2 pour les bétons courants sauf à prendre des précautions particulières à la mise en oeuvre.

La figure 2.12 montre qu'à partir de $G/S=2$, l'augmentation de la résistance en compression à 28 jours est très sensible. La tendance actuelle est de ne pas dépasser en valeurs de G/S (1.5 à 1.6) [04]. Le document technique réglementaire Algérien (D. T. R) [17] définit ce facteur comme étant une méthode de composition purement expérimentale. Pour un béton normal de structure qui se met facilement en oeuvre et donnant de bonnes résistances, ce document propose le rapport G/S entre 1.8 et 2.

Toutes fois, ce rapport ne peut pas être vérifié directement de la composition par le rapport pondéral des granulats, du moment qu'il existe toujours des interférences granulométriques entre la classe des graviers et la classe du sable.

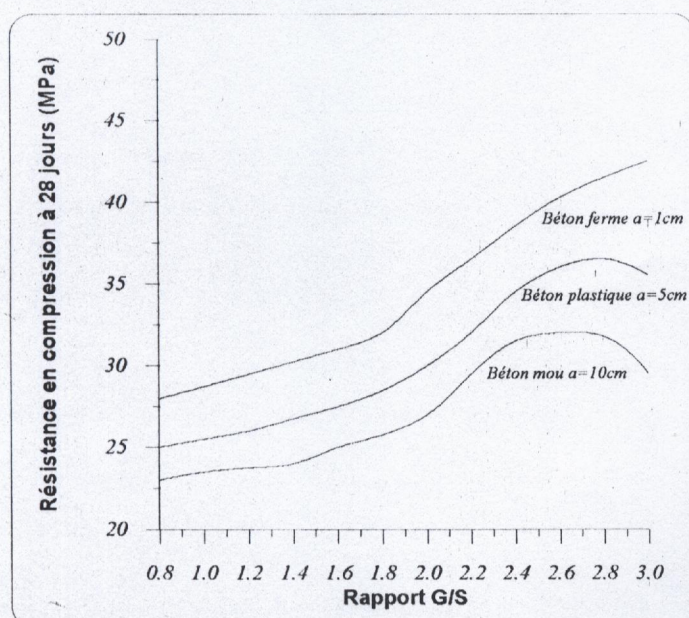


Figure 2.12: La variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction de G/S et pour 3 plasticités différentes (béton à 350kg/m³ de ciment et D_{max}=25mm) [04].

2. 4 Influence de la mise en oeuvre :

Du moment que les propriétés à long terme du béton durci tels que la résistance et la durabilité sont affectées par le degré du compactage, l'ouvrabilité du béton frais est vital pour que ce béton peut être mis en oeuvre (malaxé, vibré, transporté et placé) sans surprises notables tels que la ségrégation et le ressuage .

Le compactage complet et la densité maximale exigent une ouvrabilité suffisante, utilisant une quantité d'énergie raisonnable sous les conditions de mise en oeuvre données (disponibles sur chantiers). L'application des principes donnés pour chaque étape de la mise en oeuvre : malaxage, transport, vibration, enrobage, et cure avec un contrôle régulier sur le chantier devraient permettre à l'utilisateur de confectionner des bétons de structure ouvrables, homogènes et stables à l'état frais et résistants et durables à l'état durci.

2. 4. 1 Le malaxage :

Le béton malaxé dans une centrale à béton ou dans une usine (béton prêt à l'emploi BPE) a l'avantage d'être fabriqué sous les meilleurs conditions de contrôle (fabrication normalisée et automatisée). Un malaxage correctement fait permet d'accroître les résistances mécaniques de l'ordre de 10% [15].

Mais, le problème majeur rencontré est le maintien de l'ouvrabilité du béton (BPE) jusqu'à sa mise en place. Ce béton devient raide avec le temps, cette rigidité peut être aggravée par un malaxage prolongé (un remalaxage périodique jusqu'à 3 à 6 heures est très préjudiciable). Pour cette raison, il est souvent "re-temperé" pour compenser son ouvrabilité par un excès d'eau [14]. Devant cet effet, la résistance se trouve compromise par une chute considérable. D'après la figure 2.13, la perte en résistance peut atteindre 27% à 40% pour une quantité d'eau ajoutée comprise entre 30 et 50 litres dans un (1) mètre cube du béton.

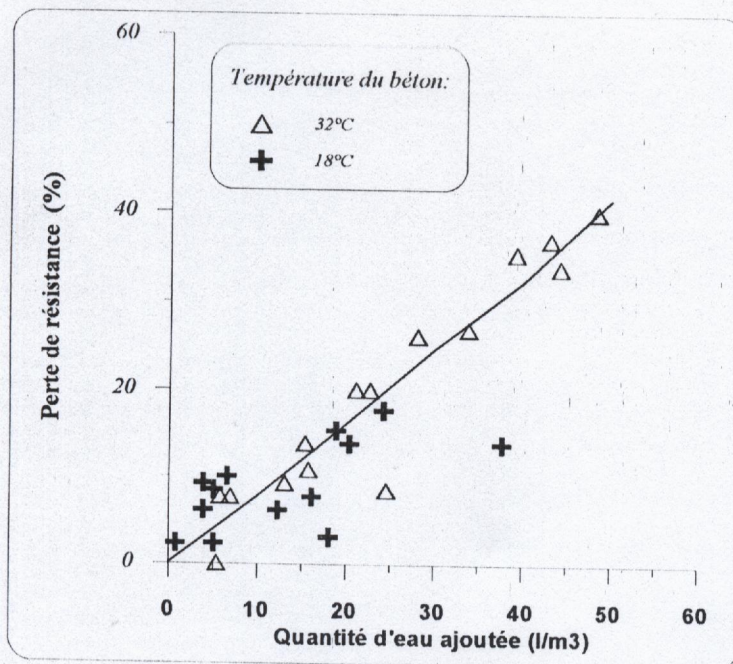


Figure 2.13: Effet du retempering (ajout d'eau sur chantier) sur la résistance du béton [14].

L'utilisation d'une quantité d'eau additionnelle dans les chantiers pour remédier à la perte dans le slump conduit à une augmentation du taux E/C et ainsi à une réduction dans la résistance, à une augmentation dans la porosité capillaire et donc de la perméabilité et la diminution de la durabilité [18]. Selon BURG [19] un excès de 8 à 10% de la quantité d'eau totale peut être ajoutée sans aucune perte significative de la résistance. Alors que pour CORNEILLE [20] une variation de plus ou moins 10 litres sur un béton habituel suffit à modifier sensiblement ses caractéristiques rhéologiques, ceci par rapport à la quantité d'eau nominale voisine de 180 l/m³ (c'est à dire 5,55 %).

2. 4. 2 Le transport

D'une brouette à un camion à benne rotative, l'important est que le mélange reste cohésif et non ségrégable lors de son transport. Le transport du béton de la centrale aux chantiers se fait par camions en bennes rotatives (toupies), assurant l'agitation du mélange et évitant toute ségrégation due aux chocs répétés et aux trépidations pendant le roulage. Au cours du transport, le béton doit être protégé efficacement contre le risque d'évaporation, et ceux du délavage par temps de pluie.

Pour un béton prêt à l'emploi, le délai du transport au lieu d'utilisation, compté à partir de l'introduction du ciment, ne doit pas être supérieur à 1^h 30^{mn}, et à 1 heure pour les camions non munis d'un agitateur.

2. 4. 3 La vibration :

Le recours à la vibration vient par le fait qu'on veut expulser l'air emprisonné, pour que le béton durci aura un minimum du vide et delà une résistance et une imperméabilité satisfaisante. Et comme cette résistance et cette imperméabilité sont fonction du rapport E/C, ce dernier une fois fixé donne le paramètre vibration à utiliser pour s'approcher le plus possible à la courbe du béton théorique (sans vides), du moment que le mode de compactage peut être influencé par la plasticité du béton et le temps de vibration. Un schéma démonstratif est représenté par la figure 2.14.

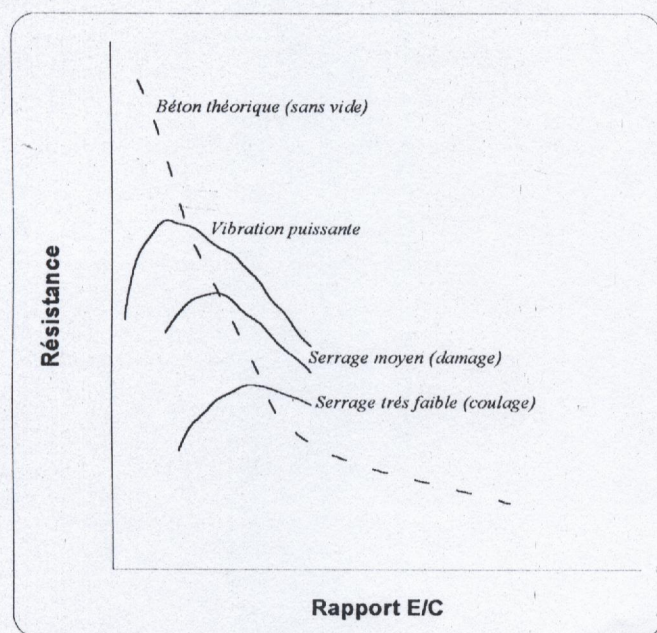


Figure 2.14: Influence du mode de serrage sur les résistances en fonction des rapports E/C [15].

Avec le compactage manuel ou par vibration, on peut produire une bonne qualité du béton comme on peut produire une mauvaise, comme c'est le cas du damage à main où le compactage est inadéquat et le cas de vibration où la sur-vibration peut causer un compactage non uniforme suivi d'une ségrégation.

L'aiguille du vibreur doit être déplacée tel que le béton est vibré tout les 0.5 à 1m pour 5 secondes à 2 minutes suivant la consistance du mélange. La limite de la vibration est indiquée par l'apparence de la surface du béton, soit par l'apparition des formes en nids d'abeilles soit par un excès de mortier. La vibration est sur une profondeur qui ne doit pas être supérieur à la longueur de l'aiguille (cette profondeur est limitée à 60 cm dans le cas le plus courant). On met en place généralement des couches de 40 à 50 cm d'épaisseur. L'inclinaison de l'aiguille ne doit pas être orientée de plus que 45 degrés, et à une place moins de 10 cm des coffrages. Pour les monolithisme du béton et de la vibration, l'aiguille doit être enfoncée rapidement à travers l'épaisseur de la couche à vibrer et à 10 cm dans la couche inférieur si elle est encore plastique. L'aiguille doit être retirée lentement avec une vitesse de 80 mm par seconde.

Afin d'accroître la compacité, en fermant les fissures formées par un certain retrait avant prise et pour assurer un monolithisme entre les couches du béton, on opte généralement pour une revibration de 1 à 2 heures après la mise en place en augmentant la résistance et la compacité de 15%. [15]

D'après les travaux de G. DREUX et F. GORISSE [21], c'est pour les bétons fermes qu'une vibration suffisante est la plus nécessaire. Le risque d'une mauvaise qualité due à la vibration est plus important pour les bétons fermes que pour les bétons plastiques ou mous. Pour les bétons fermes, en passant de la vibration à un compactage par piquage la résistance chute de 20% et la densité du béton décroît de 5% . Pour les bétons plastiques, ce risque est de 12% pour la résistance et de 2% pour la densité. D'où la figure 2.15, qui montre l'influence du serrage et de temps de vibration sur la densité et la résistance du béton selon sa plasticité.

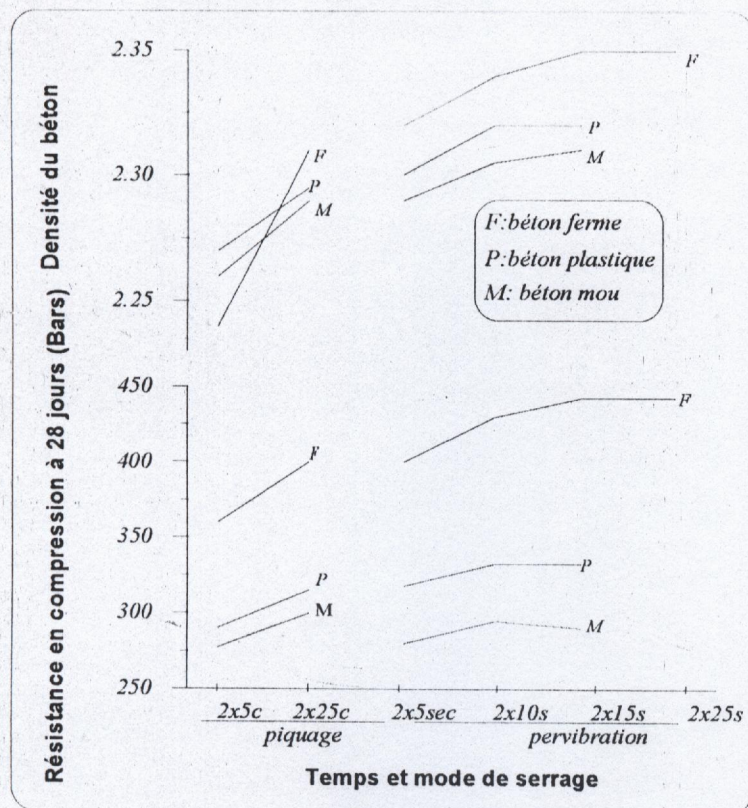


Figure 2.15: L'influence du mode de serrage et du temps de vibration sur la densité et la résistance du béton selon sa plasticité [21] .

Dans la figure 2.16 qui montre la relation entre le rapport résistance (réelle/maximale) et le rapport densité (réelle/maximale), peut apparaître l'effet du compactage sur la résistance. On peut observer que pour un béton 76% compacté, la résistance réelle est à 10% de sa valeur maximale (pour un compactage complet), d'où une perte de 90%, et pour un béton 95% compacté, la résistance est à 67% de sa valeur maximale d'où une perte de 33%.

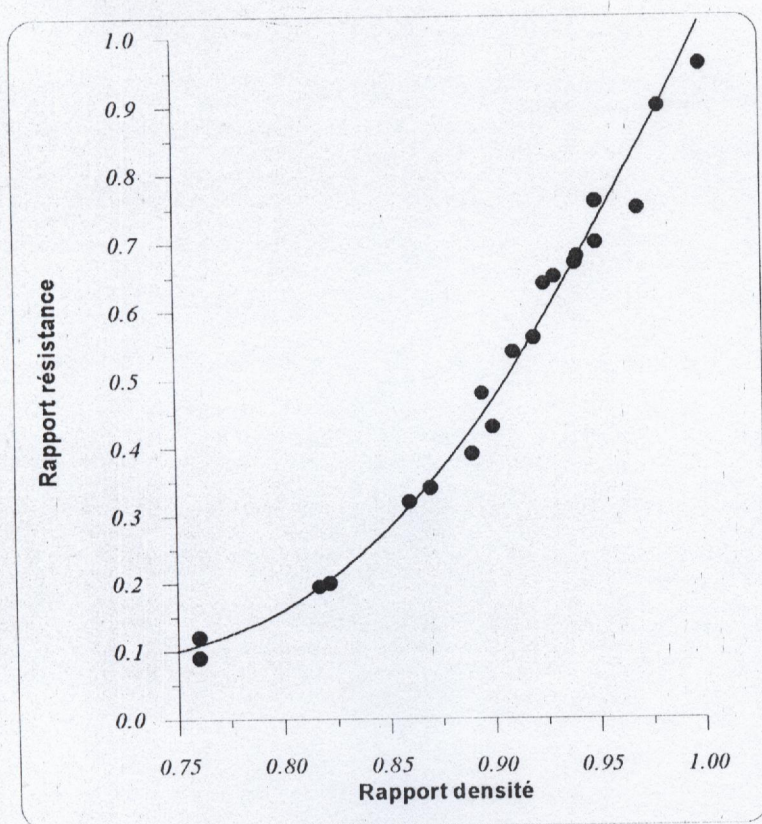


Figure 2.16: La relation entre le rapport résistance et le rapport densité [06].

Les travaux de ELIMO, HIGGINSON et JACI [22], résumés par la figure 2.17, montrent que dans les bétons fermes, le risque d'avoir toujours de l'air occlus après vibration est moins que dans les bétons plastiques ou mous. Dans ces derniers, le temps de vibration est plus critique que pour les bétons fermes afin d'expulser l'air occlus. Ce qui explique le risque d'une perméabilité élevée pour les bétons plastiques et mous malgré leur vibration facile à l'encontre d'un éventuel ajout d'eau sur chantier.

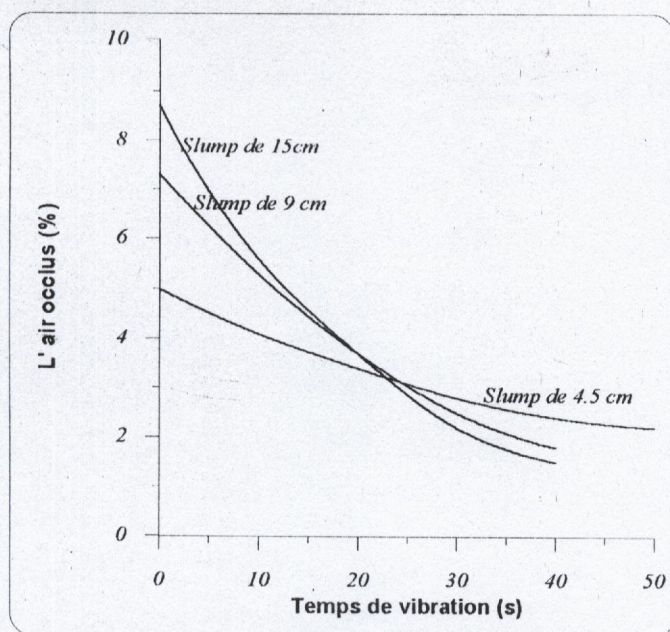


Figure 2.17: Influence du slump sur la la perte d'air occlus en fonction du temps de vibration (Granulats:0/40mm,E/C=0.53 et une teneur variable en adjuvant) [22].

2. 4. 4 La cure :

La mise en oeuvre doit être suivie par une cure dans un environnement convenable (température et humidité) durant le jeune âge du durcissement du béton afin de promouvoir l'hydratation du ciment et le développement de la résistance et de la durabilité. Une cure inadéquate peut résulter en un très fragile et poreux matériau à la surface du béton, laquelle est vulnérable à la pénétration des différentes substances nocives de l'environnement. la couche comprise entre 30 et 50 mm est la plus affectée à cause de l'évaporation de l'eau de la surface du béton. Ceci a pour conséquence, la formation d'une couche poreuse, perméable et fragile à cause d'une hydratation insuffisante.

La méthode et la durée sont les paramètres essentiels de la cure. La figure 2.18 [06] compare le développement de la résistance du cylindre de béton couvert avec la toile de jute à un béton dont la surface est immergée d'eau. On remarque que la différence est plus élevée à faible rapport E/C.

Le manque de cure dans une région méditerranéenne peut engendrer une diminution de la résistance à la compression d'environ 44% par rapport à une cure d'humidification par immersion (20°C +100% H.R.) et d'environ 49% par rapport à une cure de toile de jute mouillée après 7 jours de cure [23].

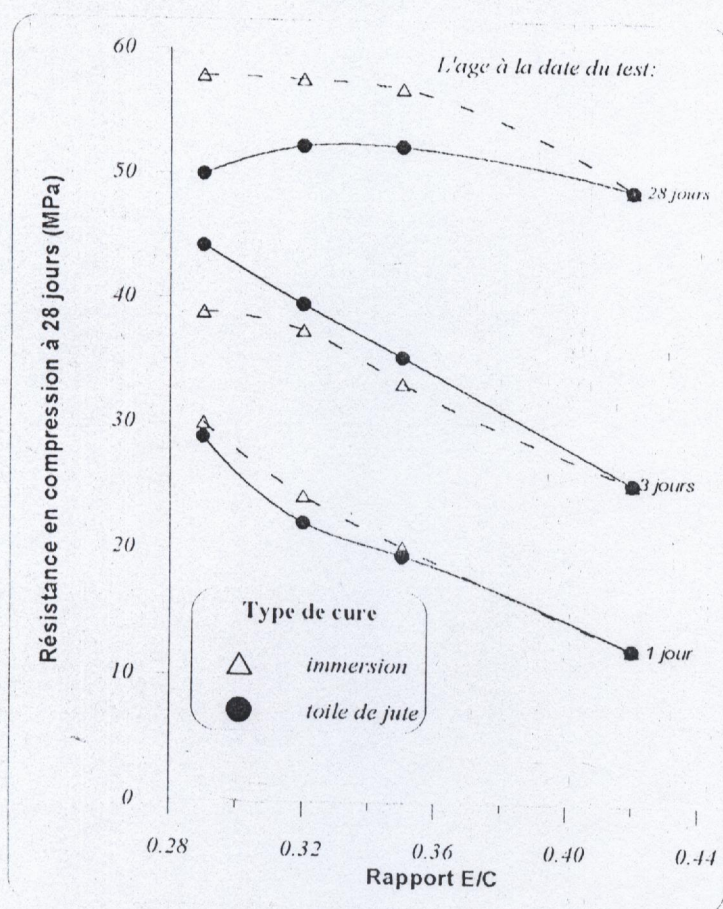


Figure 2.18: Influence des conditions de cure sur la résistance [06].

La figure 2.19 [24] donne l'influence de la durée de cure humide sur la résistance du béton avec $E/C=0.5$.

CABRERA et AL. [25] ont montré que la perméabilité à l'oxygène de la surface du béton non curée peut être 8 à 9 fois plus élevée que celle du béton bien curé voir figure 2. 20. L'augmentation de la durée de cure diminue la perméabilité du béton. D'après NEVILLE [14], la perméabilité à la vapeur après 1 jour de cure est 2 fois supérieur à celle de 3 jours de cure et 15 fois supérieur à celle mesuré après une année de cure. CHARONNAT [26] définit dans la figure 2.21 les risques de fissuration

en fonction de la température et l'hygrométrie comme critères essentiels de la nécessité de la cure.

Dans la zone méditerranéenne, la perméabilité des éprouvettes à l'air libre est 4 fois supérieur à ceux conservées dans l'eau [27].

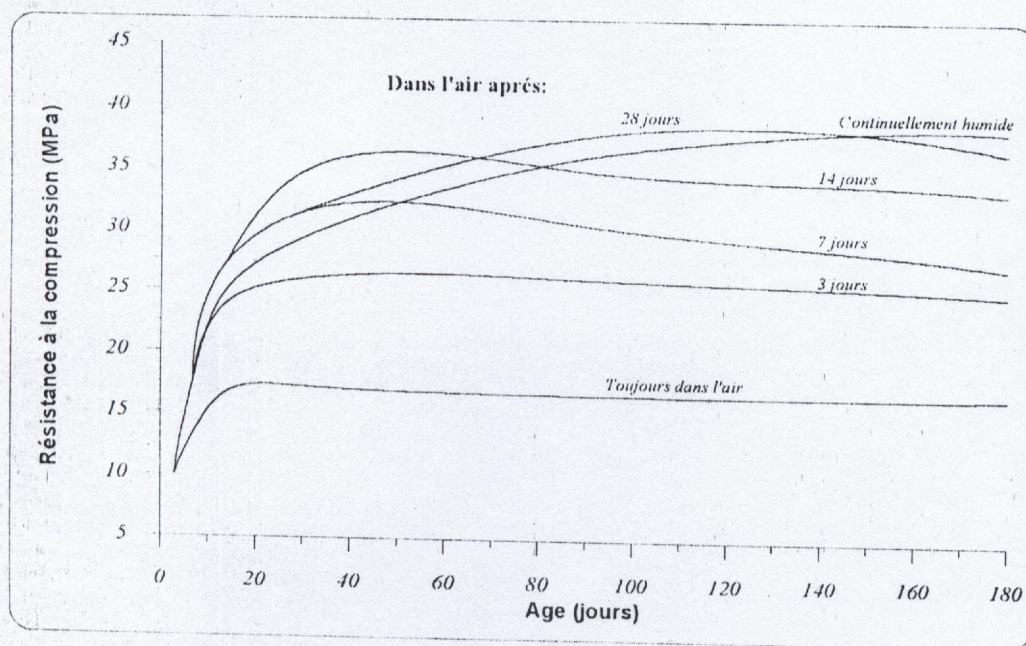


Figure 2.19: Influence de la durée de cure humide sur la résistance du béton avec $E/C=0.5$ [24].

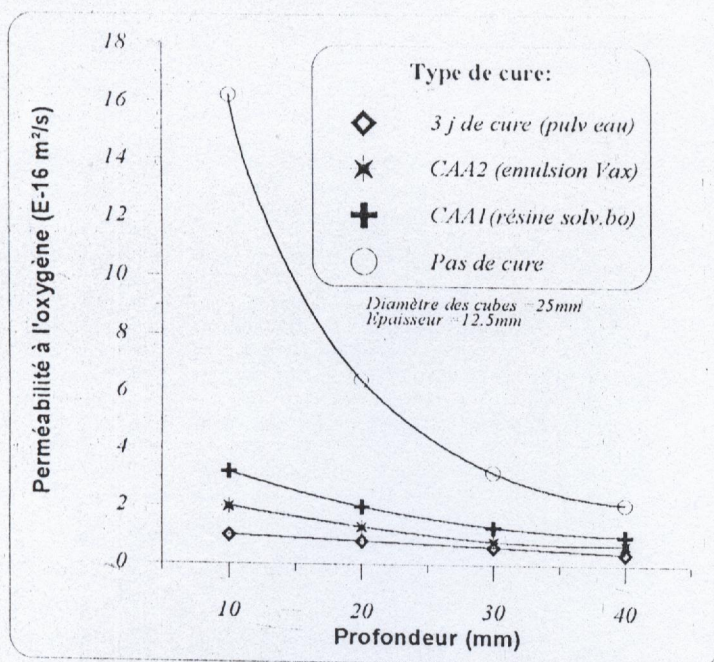


Figure 2.20: Permeabilité à l'oxygène à 3 jours selon le profil des dalles de mortier (35°C +45% H.R, vent de 3m/s) [25].

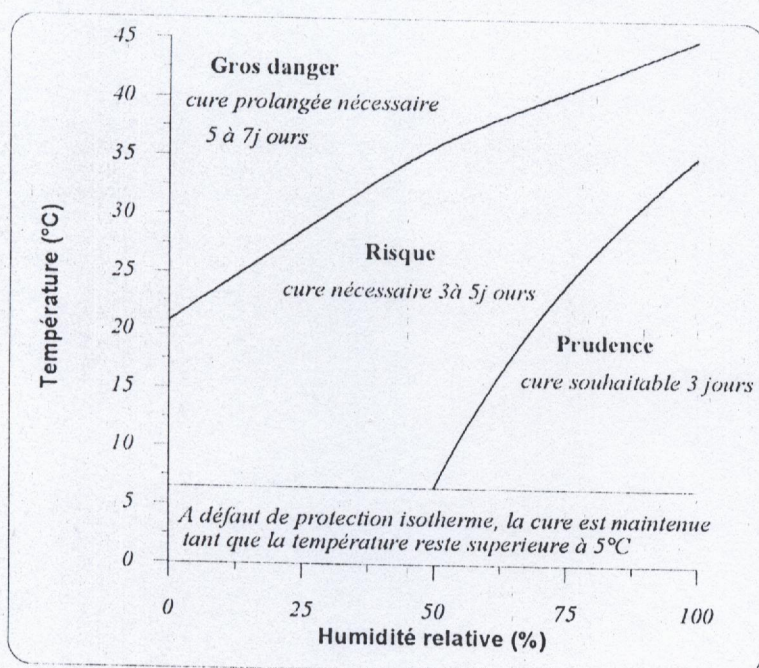


Figure 2.21: Critères adoptés pour définir les risques de fissuration en fonction de la température et de l'hygrométrie [26].

La plus grande perte d'eau intervient au niveau des 30 à 50mm à partir de la surface du béton [26]. Or cette zone d'enrobage des armatures est la plus importante car elle donne la protection nécessaire aux armatures et donc assure la durabilité des structures, en limitant la pénétration de l'acide carbonique, des chlorures, d'oxygène et de l'eau qui tous réagissent différemment pour diminuer l'alcalinité du Ca(OH)_2 et détruisent la couche protectrice formée par l'oxyde de fer sur la surface de l'acier.

La qualité du béton d'enrobage est caractérisée par la quantité effective du rapport E/C, la quantité minimale du ciment et la résistance en compression caractéristique minimale dans une condition d'exposition donnée. Pour cela, les recommandations des codes British standard (BS) et l'Américain Concrete Institute (ACI) illustrées par les tableaux 2.4 et 2.5 prennent en considération ces trois (3) critères en relation avec l'enrobage.

En plus que l'enrobage est lié à l'environnement et au type d'ouvrage pour lesquels on doit choisir un béton contrôlé en rapport E/C, un dosage minimale du ciment et une résistance caractéristique, il est lié aussi à la mise en oeuvre où la relation liant l'enrobage à la dimension maximale des granulats doit être respectée. Pour cela, des études systématiques de la composition locale du béton à divers emplacement par rapport aux armatures ont montré que pour avoir une homogénéité et une compacité satisfaisante au droit des armatures, l'épaisseur (e) d'enrobage est essentiellement liée à la dimension maximale du granulats (D) et que la relation suivante devrait être satisfaisante: $e > 1.8 D$. Pour cette raison, on trouve la réglementation française (AFNOR) traite cette partie du béton à travers le dosage minimal en ciment ($C_{\min}$) associé à la dimension maximale des granulats (D). Voir le tableau 2.6.

Tableau 2.4: Recommandations de B. S 8110 partie 1: 1985 pour assurer la durabilité sous des conditions d'expositions spécifiques des armatures avec des granulats normaux D=20mm [38].

Conditions d'exposition	Enrobage nominal du béton (mm)				
Légère	25	20	20	20	20
Modéré	-	35	30	25	20
Sévère	-	-	40	30	25
Très sévère	-	-	50	40	30
Extrême	-	-	-	60	50
Rapport E/C maximal	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
Quantité maximal du ciment (kg/m ³)	275	300	325	350	400
Résistance caractéristique minimale (MPa)	30	35	40	45	50

Tableau 2.5: Recommandations de A.C.I 318- 83 pour un enrobage minimum afin de protéger les armatures [36].

Conditions d'expositions	Enrobage min en (mm)		
	Béton armé fabriqué	Béton préfabriqué	Béton précontraint
Béton en contact du sol Exposition permanent	70	-	70
Béton exposé au sol ou les intempérés			
- panneau de mur.	40-50	20-40	30
- Dalle ou poutres transversales	40-50	-	30
- Autres éléments.	40-50	30-50	40
Béton non exposé au intempérés ou en contact avec le sol.			
- Dalle-mur-voile-poutres transversaux	20-40	15-30	20
- Poutres - poteaux.	40	10-40	20-40
- Voiles-éléments plats.	15-20	10-15	10
- Armatures non précontraintes	-	-	20
Béton exposé aux sels, eaux salées, eau de mer			
-mur et dalle	50	40	-
- Autres éléments	60	50	-

Figure 2.6: Recommandation AFNOR pour assurer la durabilité sous des conditions d'exposition spécifiques des armatures [41].

	C_{min} (Kg/m ³)	Enrobage (mm)	
		Eurocode	Règles française
Ouvrage ou parties non exposés (non sévères)	$\frac{250 + 10 f_{ck}}{\sqrt[3]{D}}$	15	10
Ouvrage ou parties exposés à un milieu sans agressivité particulière (modérément sévère)	$\max\left(\frac{250 + 10 f_{ck}}{\sqrt[3]{D}}, \frac{550}{\sqrt[3]{D}}\right)$	25	20
Ouvrages ou parties exposés à des conditions (sévères).	$\max\left(\frac{250 + 10 f_{ck}}{\sqrt[3]{D}}, \frac{700}{\sqrt[3]{D}}\right)$	35	40

C_{min} : Dosage minimal du ciment

D : dimension maximale du granulat (mm)

f_{ck} : Résistance caractéristique du béton (MPa)

CHAPITRE 3

ANALYSE DE LA QUALITE DU BETON
SUR CHANTIERS
REVUE DE QUELQUES TRAVAUX

CHAPITRE 3

ANALYSE DE LA QUALITE DU BETON SUR CHANTIERS

RECIT DE QUELQUES TRAVAUX

3.1 Introduction :

La majorité des études consultées qui décrivent le concept "qualité du béton" montrent qu'il peut être remplacé par une seule propriété qui est la résistance à la compression. En d'autres termes, elles proposent des descriptions statistiques de la résistance du béton en compression afin de déterminer les critères adéquats pour le contrôle et l'appréciation de la qualité.

Ces études se basent sur une définition commune de la qualité qui est quelques travaux qui traitent la qualité par son aspect qualitatif à travers quelques le respect de la classe de résistance requise. Voir [28, 29, 30, 31, 32, et 35]. Néanmoins, on trouve facteurs qui sont indispensables pour l'amélioration de toutes les propriétés du béton. Voir [34]

3.2 La qualité du béton sur chantier en Egypte: [38]

Cette étude propose des descriptions statistiques de la résistance du béton en compression et une étendue de valeurs de l'écart type dans la pratique.

Dans cette étude, 30 projets ont été analysés par le biais de leurs résultats de résistance en compression.

L'objectif de l'étude est l'évaluation du critère de détermination de la résistance de calcul exigée pour le contrôle de la qualité. En d'autres termes, c'est l'estimation de l'écart type et le coefficient de variation de la résistance du béton, ainsi la vérification de l'exactitude de la relation entre la résistance du calcul "caractéristique" et la valeur moyenne.

Les conclusions tirées de cette étude peuvent être résumées par:

- La distribution des probabilités des résultats des tests de la résistance en compression peut être décrite par une distribution normale.
- Les valeurs de la dispersion (écart type) qui peuvent être escomptées d'un essai de résistance en compression des projets sujets à un excellent, très bon, bon, assez bon et mauvais contrôle de qualité sont moins que 30 kg/cm², 30 à 40 kg/cm², 40 à 50 kg/cm², 50 à 60 kg/cm² et plus que 60 kg/cm² respectivement. (1 MPa = 10 Kg/cm²)
- Un béton de haute classe de résistance exige un haut degré de contrôle de qualité qu'un degré normal en pratique pour assurer une petite variation des résultats.
- Il est suggéré qu'une séparation des spécifications doit être faite pour évaluer les résultats des tests des résistances en pratique en faisant inclure les analyses des données des résistances.
- Le coefficient de variation peut être estimé comme 21% pour la classe inférieur à 20 MPa (200 bars), 14.5% pour un béton de classe de 20 à 30 MPa (200 à 300 bars) et 12% pour un béton de classe de 30 à 35 MPa (300 à 350 bars).
- Enfin, l'équation du code Egyptien (E.C 1989) [40] $f_m = f_{cu} + m$ peut être utilisée satisfaisement pour estimer la résistance moyenne du mélange du béton exigée en Egypte.

3.3 La qualité du béton sur chantiers en moyen Orient : [29]

Dans cette étude, il a été analysé 32 chantiers et 14 centrales du béton près à l'emploi avec plus de 30000 observations en tout.

Les relations entre l'écart type, le coefficient de variation et la résistance à la compression du béton varient selon qu'on considère les valeurs globales ou journalières. Dans le cas des valeurs globales c'est l'écart type qui est pratiquement indépendant de la résistance moyenne et devrait être utilisé lorsqu'on pratique le contrôle de qualité en conséquence.

Les chantiers sont classés dans trois (3) groupes en concordance avec le degré du contrôle de qualité: "excellent", "bon", "mauvais" et un quatrième groupe qui est le béton "ready mixed concrete" ou "BPE", le tout forme 46 sources.

Les conclusions tirées de cette étude peuvent être résumées par:

- La variation de la résistance est indépendante au degré de contrôle de qualité (écart type constant).
- Une conformité stricte à une série de prescriptions nominales n'est pas une condition suffisante pour obtenir le degré de contrôle voulu et une variation prédéterminé de la résistance du béton.
- Donc, cette variation dépend beaucoup plus du niveau réel de surveillance des opérations que la méthode de production elle même, de l'appareillage utilisé etc....
- L'écart type global moyen est d'environ de 6 MPa quelque soient les conditions formelles de la production de béton.

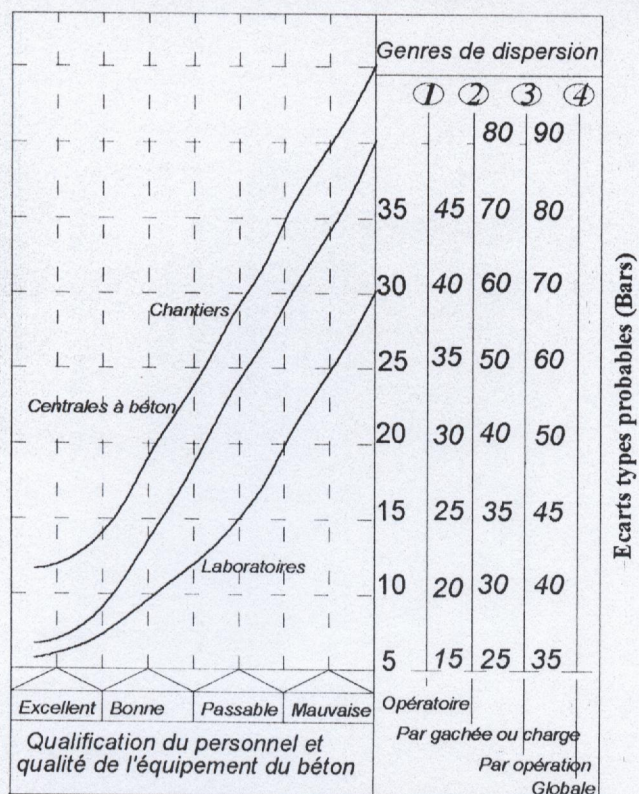
3.4 La qualité du béton sur chantiers en France: [30]

Les auteurs ont proposé la référence à l'écart type pour caractériser la dispersion en plus de la moyenne.

L'étude se penche vers l'estimation du béton pour bien le contrôler dans l'avenir, tout en se basant sur les résultats de mesure dont la répartition est supposée "gaussienne". Elle définit quatre (4) genres de dispersion qu'il y a lieu de considérer dans l'exploitation statistique des contrôles de béton à savoir; la dispersion opératoire, par gâchée ou charge, par opération de bétonnage ou journalière et la dispersion globale. Pour chaque genre de dispersion, de nombreux résultats statistiques sont donnés et commentés pour trois (3) lieux de fabrication: laboratoire, centrale à béton et chantier.

En conclusion, il est proposé un abaque reliant les quatre (4) genres de dispersion aux trois types de fabrication et permettant l'évaluation de l'écart type probable en fonction de la qualité de la fabrication. A défaut d'élément d'appréciation du paramètre "qualité", il sera prudent de se placer dans la zone "passable". Voir le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Tableau permettant d'évaluer approximativement la valeur probable de l'écart type d'une fabrication du béton.



3.5 La qualité du béton sur chantiers en Algérie (nord): [31]

L'étude est basée sur une analyse statistique des données réelles provenant de certains organismes (CTTP, LTPC). Dans ces données, il est signalé les valeurs de résistance à la compression F_{c28} du béton conçu au laboratoire et des valeurs de F_{c28} du même béton produit sur chantier. L'étude dégage une différence entre les deux paramètres, et montre que F_{clab} est rarement atteinte sur chantier, d'ailleurs la plupart des valeurs de F_{chant} sont en dessous de F_{clab} .

- Béton de $C=400 \text{ Kg/m}^3$, 83.7% des valeurs de F_{chant} sont inférieurs à F_{clab} .
- Béton de $C=420 \text{ Kg/m}^3$, 87.1% des valeurs de F_{chant} sont inférieurs à F_{clab} .
- Béton de $C=450 \text{ Kg/m}^3$, 84.7% des valeurs de F_{chant} sont inférieurs à F_{clab} .

Les résultats des résistances des bétons fabriqués aux chantiers sont très dispersés, et en majeure partie sont moins que ceux fabriqués aux laboratoires, sachant que ces derniers sont exigés sur la base d'une résistance caractéristique dite de calcul, afin de trouver une composition du béton permettant de l'atteindre. Cela

montre que non seulement la composition du laboratoire n'est pas respectée mais qu'il y a eu aussi un problème de reproduction, c'est à dire qu'on ne produit pas le même béton pour les mêmes éléments de la structure.

Sachant que le maître d'oeuvre demande au laboratoire une composition de béton permettant d'obtenir la résistance caractéristique (résistance de calcul voulue), et si on suppose que F_{Clab} est la résistance de calcul voulue, et qui doit être dépassée au moins par 95% des résistances fabriquées au chantier F_{Cchant} , alors, on remarque qu'au moment où on cherche qu'au moins 95% des valeurs de F_{Cchant} alors, on remarque qu'au moment où on cherche qu'au moins 95% des valeurs de F_{Cchant} soient supérieur à F_{Clab} , on a seulement 16.3%; 12.9% et 15.3% respectivement pour les trois (3) bétons étudiés.

Les conclusions tirées de cette étude peuvent être résumées par:

- Il reste beaucoup à faire pour maîtriser la production sur chantiers.
- La mauvaise qualité des bétons de chantier ne semble pas nuire à la résistance des ouvrages à très courts termes. En d'autres termes, elle ne conduit pas toujours à la rupture immédiate de l'élément considéré mais elle se fait sentir à long terme (la durabilité), par des processus physico-chimiques (infiltration d'eau, corrosion, carbonatation, etc...) conduisant à la destruction du matériau lui même et par la suite à la perte de la résistance de la structure.
- Toute l'attention doit être portée sur la qualité réelle des matériaux utilisés, et le suivi du chantier doit être plus rigoureux avec des dispositions réglementaires plus strictes notamment le contrôle de la fabrication du béton.

3.6 La qualité du béton sur chantiers en Algérie (sud) : [32]

Comme la qualité du béton (matériau et mise en oeuvre) dans les chantiers peut être une des causes principales des cas pathologiques de construction, il est cependant nécessaire de connaître sa répercussion sur des éventuels désordres.

Cette étude traite 52 cas pathologiques dans le sud Algérien durant la période 87-93.

L'analyse de la qualité du béton est traitée de la base de 268 rapports de laboratoire couvrant 93 projets.

L'aspect recensif de l'étude nous a permis de conclure les conclusions suivantes:

- La mise en oeuvre, le sol et la qualité des matériaux sont les causes principales des désordres dans le sud.
- La source la plus fréquente des désordres est celle liée à la mise en oeuvre avec plus de 45% des cas, et les problèmes liés au matériau compte pour 16% des cas liés à la mise en oeuvre. Ces résultats sont comparables aux autres à savoir: le B.R.A.S en Angleterre où 35% sont dus à l'exécution et mise en oeuvre défectueux et 12% aux matériaux, et à l'étude du bureau sécuritas en France, où 51% des désordres sont dus à l'exécution et 45% sont dus aux matériaux.
- La qualité du béton est jugée en dessous de la moyenne dans environ 43% des cas. Des études de compositions appropriées, une meilleure qualité des matériaux, utilisation des plastifiants et application de la cure peuvent améliorer la qualité du béton.
- Le pourcentage des cas donnés par la qualité du béton en dessous de la moyenne peut justifier la proportion des désordres liée à la mise en oeuvre, vu que les deux nombres sont comparables.
- L'utilisation excessive d'eau de gâchage, avec un rapport E/C supérieur à 0.5 qui atteint parfois 0.74, l'absence d'utilisation d'adjuvants plastifiant pour réduire le rapport E/C, et l'absence de cure du béton contribuent à la mauvaise qualité du béton en été pour atteindre 31.4% des cas par rapport à 22.4% en hiver.
- Les projets d'habitation ont un pourcentage le plus élevé parmi les projets qui ont une très faible qualité du béton avec 43%, bien que les constructions à usages administratifs et scolaires se montrent comme les plus touchés par les cas pathologiques.

Malgré l'aspect recensif de cette étude, et la non représentativité des échantillons, on peut baser notre étude sur ces résultats par le fait que les erreurs provenant de la qualité du béton (matériaux et mise en oeuvre) représentant les causes majeures des désordres.

3.7 La qualité du béton sur chantiers en Algérie (sud): [33]

Cette étude essaye de trouver des corrélations entre la qualité du béton au sud et la spécificité de la région (climat) à travers l'étude de la qualité des composants (ciments, sable, graviers et eau) et l'analyse statistique sur la résistance en compression en mettant en évidence l'évolution des résistances suivant les saisons et suivant la variation du coefficient d'âge.

L'étude dégage une constatation; que deux (2) facteurs essentiels influent sur la qualité des bétons dans le sud Algérien.

- La granulométrie des sables à béton et leur propreté.
- Le climat chaud et sec.

L'étude de la qualité des composants confirme l'excès des particules fines dans le sable par un module de finesse moyen de 1.8 contre celui préconisé pour 2.5, et un excès de fines argileuses avec un équivalent de sable moyen de 60%, tout cela ne permet pas d'obtenir des bétons de qualité.

L'analyse statistique montre une tendance à la baisse des résistances à 28 jours pendant les saisons des grandes chaleurs par rapport aux autres saisons avec des coefficients d'âge propres à la région du sud, très différents de ceux des bétons mise en oeuvre dans les régions à climat tempéré. Toutes ces difficultés doivent être gérées par une cure systématiquement soignée et contrôlée des bétons jeunes. En revanche l'évolution de la résistance mécanique des bétons au cours des trois années [91 à 93], montre que la prise en charge de ces contraintes par les entrepreneurs a été efficace à partir du moment où tout le monde a prit conscience de la nécessité d'établir un auto-contrôle permanent sur les chantiers. Les résultats de cette étude montrent aussi qu'un effort supplémentaire doit être fourni pour respecter les recommandations concernant le bétonnage par temps chaud.

3.8 La qualité du béton sur chantiers en Inde:[34]

L'étude a été faite sur un ensemble de structure: hôtel constitué de deux blocs, une institution pour plus de 2500 élèves et une colonie de maison.

Cette étude se rapporte aux pratiques des constructions et leur comparaison avec les spécifications des codes. Ces pratiques de construction ont été analysées à travers plusieurs aspects tels que la conception, la qualité du béton et le ferrailage.

La qualité du béton dans la pratique est traitée par la composition du béton (les rapports: eau/ciment (E/C) et gravier /sable (G/S)), le compactage, le coffrage et la cure. Tandis que le ferrailage est traité par des détails tels que: la longueur des barres, l'espacement et l'enrobage.

Dans la qualité du béton, la composition utilisée est 1:2:4 (ciment:sable:gravier), mais elle n'est jamais bien respectée. Les rapports du ciment, sables et graviers diffèrent largement des spécifications et même d'une gâchée à l'autre, avec une moyenne de 1:3. 4:3. 9.

Le rapport G/S: La proportion du sable est souvent la même que celle des graviers, alors que le code Indien (Indian standard IS 456)[34] se situe dans la marge de 1:1.5 à 1:2.5 (sable: gravier).

Le rapport E/C: Les valeurs observées varient de 0.52 à 0.98 avec une moyenne de 0.65, alors que les valeurs nominales exigées sont de 0.5. L'étude note que, les conducteurs des travaux ne sont pas conscients du rapport spécifié E/C, ils contrôlent la qualité d'eau adéquate visuellement. L'augmentation du rapport E/C est justifiée par cette large proportion des éléments fins (sables).

La vibration : Il est exigé un compactage adéquat qui devra être achevé même sans le vibreur.

La cure : Une cure adéquate du béton est assurée généralement du moment qu'elle est faite pendant 14 jours, alors qu'un minimum est de 7 jours spécifié par le code Indien (I S 456).

L'enrobage : L'enrobage minimal spécifié par IS 456 pour les dalles est de 15 mm avec un écart maximum de 5mm. L'enrobage se trouve trop élevé pour les armatures inférieures et petit pour les armatures supérieures dans plus de 90% des cas.

Les résultats des données présentées dans l'étude peuvent être résumés comme suit:

- La composition du mélange (proportions des composants et le rapport E/C) doit être spécifiée convenablement et surveillée sur le chantier.
- Le béton doit être compacté convenablement.
- Un enrobage inadéquat est l'origine de toutes défections trouvées dans toutes les structures étudiées.
- Les conducteurs des travaux doivent être conscients des significations des spécifications des codes.

Enfin, les résultats de l'étude indiquent une large différence entre les spécifications des codes et la pratique.

3.9 La qualité du béton en Suède : [35]

L'étude décrit le concept "qualité du béton" et montre qu'il peut être remplacé par une seule propriété qui est la résistance à la compression. Le concept "classe de résistance" est aussi décrit et montre que la résistance moyenne du béton doit augmenter pour des raisons de sécurité, quand la variation de la résistance du béton est élevée.

La qualité du béton est définie comme étant une propriété complexe composée de plusieurs propriétés de base tels que la résistance à la compression et à la traction, la perméabilité, la rigidité, la durabilité face aux différents agents agressifs. En général, beaucoup de propriétés sont améliorées quand le rapport E/C est faible. Mais statistiquement parlant, la qualité du béton dans cette étude peut être définie par le respect de la classe de résistance requise. Donc la résistance moyenne doit augmenter quand la variation de la résistance du béton est élevée afin de maintenir la classe voulue ou requise.

Dans cette étude, la variation de la qualité du béton et de la résistance, la qualité du ciment, la qualité des granulats et la variation dans le dosage de la composition sont les facteurs analysés, ainsi leurs effets sur la consommation du ciment. Le but de cette étude est de réduire la variation dans la résistance du béton.

Parmi les conclusions tirées de cette, étude on peut citer:

1- Il est extrêmement important que la variation de la résistance du béton soit réduite, du moment qu'elle influe sur la résistance moyenne pour une classe de résistance spécifiée. Plus la variation augmente plus la résistance moyenne doit être élevée pour atteindre la classe voulue. Ce qui nous demande plus de ciment pour garantir cette augmentation. La quantité de ciment peut être réduite de plus de 25% si le coefficient de variation est réduit de 25% à 10%. Cela veut dire que la réduction de la quantité de ciment peut dépasser 100 Kg/m³ du béton. La figure 3.1 montre l'effet du coefficient de variation de la résistance du béton sur le surplus du ciment exigé.

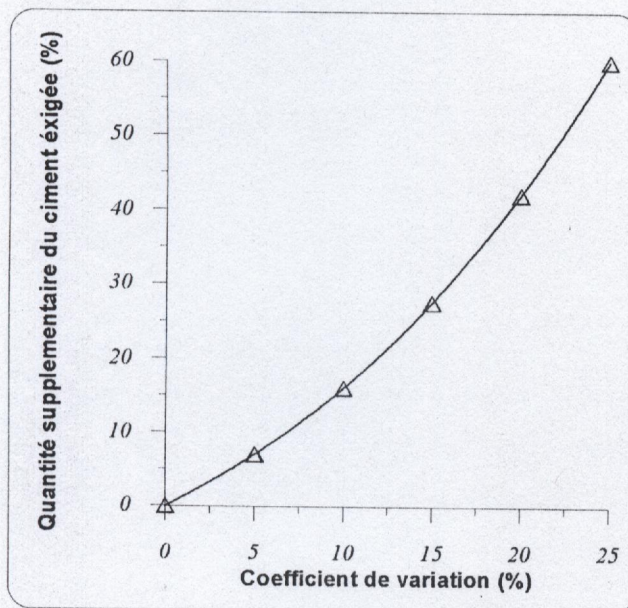


Figure 3.1: L'effet du coefficient de variation de la résistance du béton sur le dosage en ciment exigé [35].

2- Le ciment doit être certifié. Il doit avoir une classe de résistance élevée et une variation de résistance réduite.

3- La qualité des granulats doit être testée chaque fois qu'il y a un nouvel approvisionnement. Si la granulométrie varie d'une livraison à une autre, alors la quantité d'eau exigée varie aussi, approximativement de ± 25 l/m³, c'est à dire ± 10 % à ± 15 % de la quantité d'eau totale. Si la densité des granulats varie, cela aussi peut induire une variation. Donc, la composition du béton doit être changée pour chaque

nouvelle livraison de granulats afin de garder la variation de la résistance aussi bien réduite.

4- Quelques variations peuvent exister lors du dosage. Ces variations ne doivent pas dépasser $\pm 5\%$ pour les granulats et ciments et $\pm 2\%$ pour la quantité d'eau.

5- La variation dans la quantité d'eau est le paramètre principal causant une large variation de la résistance du béton et donc une grande quantité de ciment pour atteindre la classe requise. L'humidité des granulats, spécialement du sable, doit être mesurée régulièrement en la compensant dans la composition. La figure 3.2 montre l'effet de cette variation d'eau sur la résistance du béton. Cette négligence a pour effet d'une consommation de ciment estimé à 20% au moins. Aucune quantité d'eau ne peut être ajoutée quand le béton est sur le chantier pour compenser la perte de slump. La réduction de la résistance due à cette négligence peut atteindre 25 à 35 %.

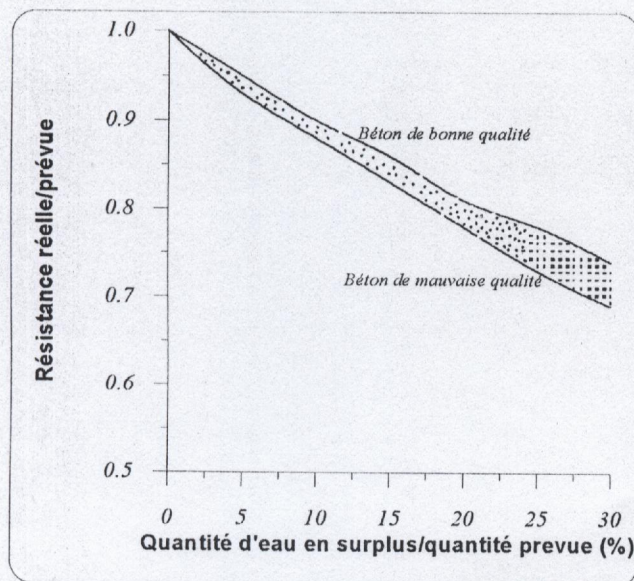


Figure 3.2: Effet du surplus d'eau (quantité d'eau imprévue) sur la résistance du béton [35].

CHAPITRE 4

LA QUALITE DU BETON DANS
LES CODES ETRANGERS

CHAPITRE 4

LA QUALITE DU BETON DANS

LES CODES ETRANGERS

4.1 Introduction

La réglementation est un moyen juridique permettant d'exiger et d'imposer une certaine qualité (seuil minimal).

Une revue des règlements étrangers sur la qualité du béton nous permet de faire un premier constat; c'est que peu de nations possèdent des règlements qui leurs sont propres. Parmi les règlements de références cités dans la bibliographie, nous citerons essentiellement:

- - Le code modèle CEB-FIP 1978
- - La prénorme Européenne ENV206
- - Le code Britannique BS 8110
- - Le code Américain ACI 318-77
- - La norme Française AFNOR
- - La norme Allemande DIN 1045
- - Le code Egyptien E.C 1989
- - Le D.T.R Algérien D.T.R .BE 2-1

Une revue exhaustive des différents règlements nous permettent de remarquer que dans le contrôle de qualité, deux aspects reviennent souvent : le contrôle de la production et le contrôle de conformité. Le premier porte sur l'ensemble de décision et d'actions précises pendant la production de manière à maîtriser l'exécution et à obtenir une assurance raisonnable que le béton aura une qualité satisfaisante. Le deuxième concerne toute action et décision visant à vérifier la conformité du produit avec les spécifications en adoptant la résistance à la compression comme critère représentatif de la qualité du béton.

L'aspect probabiliste de la résistance du béton est décrit par une distribution normale (loi de Gauss), admettant une résistance minimale, qui désigne la classe de ce béton, dite résistance caractéristique. En fonction de l'emploi, le béton est spécifié par cette classe.

La durabilité du béton dans les règlements récents est conçue pour protéger le ferrailage contre la corrosion et avoir une performance satisfaisante dans les conditions d'exposition pendant la vie de la structure. Pour ce faire, les différents codes prennent en compte cette durabilité par un enrobage minimal, un dosage minimal en ciment, un rapport E/C maximal et une résistance caractéristique minimale dans une condition d'ambiance donnée.

4.2 Le code modèle CEB- FIP 1978: [36]

Ce code est considéré par de nombreux pays comme des textes de références.

a) Résistance caractéristique à la compression :

Le code modèle est basé sur la résistance à la compression à 28 jours d'âge, mesurée sur des cylindres de 150 X 300 mm conservés dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La résistance caractéristique f_{ck} est définie comme la valeur de la résistance au dessous de laquelle on peut s'attendre à trouver 5% de la population de toutes les mesures possibles de résistance du béton spécifié.

b) Classes :

Un projet donné doit se référer à une classe de béton correspondant à une valeur spécifiée de la résistance caractéristique.

Neuf (09) classes du béton (résistance f_{ck} en MPa) ont été définies :

C12 C16 C20 C25 C30 C35 C40 C45 C50

A l'exécution, le béton est réputé avoir la résistance spécifiée requise s'il vérifie un critère de conformité défini au contrôle de qualité.

c) Le contrôle de qualité du béton :

Soit N le nombre de gâchées constituant un lot à contrôler. On effectue dans n gâchées prises au hasard un prélèvement permettant de fabriquer trois (3) éprouvettes. On mesure la résistance à la compression de chacune des trois (3) éprouvettes appartenant à un même prélèvement et on fait la moyenne arithmétique.

On dispose ainsi de n résultats d'essais, c'est à dire autant que de prélèvement et donc de gâchées. Soit $\bar{x}_i$ la moyenne des trois (3) résultats d'essais correspondant à un prélèvement i quelconque.

Le code modèle distingue 2 cas :

$$a) n=3 \quad (\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \bar{x}_3)$$

Le lot est déclaré conforme si à la fois :

$$\bar{m}_3 = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3}{3} \geq f_{ck} + k_1$$

$$\bar{x}_1 \geq f_{ck} - k_2$$

Où f_{ck} : est la résistance caractéristique spécifiée.

$\bar{x}_1$: est la résistance minimale.

Tableau 4.1 : Les valeurs recommandées pour k_1 et k_2 .

	k_1 (MPa)	k_2 (MPa)
Début de la production		
1 ^{er} lot et 2 ^{ème} lot	5	1
3 ^{ème} et 4 ^{ème} lots	4	2
Pleine production : lots suivants	3	3

$$b) n \geq 15 \left(\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \dots < \bar{x}_i < \dots < \bar{x}_n \right)$$

Le lot est déclaré conforme si, à la fois:

$$\bar{m}_n - \lambda S_n \geq f_{ck}$$

$$\bar{x}_1 \geq f_{ck} - k_2$$

Avec:
$$\begin{cases} \bar{m}_n = \text{moyenne} \\ S_n = \text{écart type} \end{cases}$$

Les valeurs recommandées pour λ et k_2 : $\lambda=1,4$ et $k_2=4$ MPa.

En France, on pose $\bar{x}_1 = f_{c1}$, $\bar{x}_2 = f_{c2}$ etc ... ; donc la résistance caractéristique f_{c28} est supposée atteinte si :

$$f_{cm} \geq f_{c28} + k_1$$

$$f_{c1} \geq f_{c28} - k_2$$

k_1 et k_2 prenant, dans le cas où $f_{c28} \leq 25$ MPa, les valeurs (en MPa) indiquées dans le tableau suivant (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Les valeurs recommandées pour k_1 et k_2

n		3	6	9	12
Béton agréé fabriqué à l'usine	k1	1	1,5	1,8	2
	k2	3,5	3,5	3,5	3,5
Autre béton s'il n'y a pas eu d'essais préalable	k1	4	3,5	3,2	3,0
	k2	1	1	1	1

d) La durabilité:

En vue beaucoup plus d'une durabilité, des valeurs minimales des enrobages ont été fixées dans le tableau 4.3, en relation avec les classes des bétons et les conditions d'ambiance.

Tableau 4.3: Enrobages minimaux en mm pour les armatures peu sensibles à la corrosion

Conditions d'ambiance	Classes de béton					
	C ₁₂ ,C ₁₆ ,C ₂₀		C ₂₅ ,C ₃₀ ,C ₃₅		C ₄₀ ,C ₄₅ ,C ₅₀	
	Cas général	Dalles voiles	Cas général	Dalles voiles	Cas général	Dalles voiles
Non sévères	20	15	15	15	15	15
Modérément sévères	30	25	25	20	20	15
Sévères	40	35	35	30	30	25

4.3 La prénorme Européenne ENV 206 :[37]

La qualité dans la prénorme ENV206 est assurée par des exigences concernant le béton frais (la composition et l'ouvrabilité), le béton durci par la résistance en compression exprimé par sa valeur caractéristique et la durabilité en imposant la sélection des composants du béton selon les milieux et les conditions de conservation.

a) Résistance à la compression:

La résistance à la compression du béton est exprimée en terme de résistance caractéristique définie comme étant la valeur de la résistance en dessous de laquelle 5% au plus de l'ensemble de toutes les mesures de résistance possible du béton spécifié, doivent se situer.

La résistance doit être déterminée conformément à l'ISO4012 en forme de cube de 15 cm d'arête et en forme de cylindre de (15X30)cm de 28 jours d'existence.

b) Classes:

Le béton est classé suivant sa résistance à la compression comme indiqué au tableau 4.4.

Tableau 4.4: Classes de résistance de béton:

Classe	C _{12/15}	C _{16/20}	C _{20/25}	C _{25/30}	C _{30/37}	C _{35/45}	C _{40/45}	C _{45/55}	C _{50/60}
f_c (cylindre) (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_c (cube) (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

c) Le contrôle de la qualité du béton :

Le plan d'échantillonnage et le contrôle de conformité considèrent le cas d'un béton prêt à l'emploi et le cas d'un béton mélangé sur le site. Dans le premier cas, deux options sont possibles. Le choix de l'option dépend des normes et règlements en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton ou si de tels règlements n'existent pas, d'un accord. La première option, considère la conformité fondée sur l'échantillonnage par lots. Quand la conformité du béton prêt à l'emploi livré a déjà été vérifiée par un organisme de certification et quand la vérification a été faite sur la base d'au moins 15 résultats d'essais, alors pour la vérification de la conformité sur le site, la valeur de λ est égale à 1,48 pour tout nombre d'échantillon $n \geq 06$ en utilisant le critère 1 du contrôle de conformité de la résistance. Dans le cas de trois (3) essais, utilisation du critère 2, la résistance doit satisfaire les conditions suivantes : $\bar{x}_3 \geq f_{ck} + 3$ et $x_{min} \geq f_{ck} - 1$

f_{ck} : est la résistance caractéristique spécifiée (MPa).

$\bar{x}_3$: la moyenne des trois (03) résistances

x_{min} : c'est la résistance minimale.

La deuxième option, considère la conformité fondée sur la certification agréée du béton où aucun échantillonnage ni essai de conformité n'est nécessaire sur chantier. Le prélèvement du béton prêt à l'emploi est pratiqué sur le volume total ou sur toute la durée de la production du béton comme indiqué sur le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Nombre minimal d'échantillons pour le contrôle de conformité:

Classe de résistance	Nombre minimal d'échantillons	
$\leq C_{20/25}$	1 par 150 m ³	1 par jour
$> C_{20/25}$	1 par 75 m ³	1 par jour

Dans le cas du béton mélangé sur le site, il convient de prélever au moins 6 échantillons indépendants. La conformité est atteinte si les résultats d'essais satisfont les deux critères de conformité. Le volume total d'un lot soumis au contrôle ne peut en aucun cas dépasser 450 m³. Pour les deux (2) cas de béton, la conformité est atteinte si les résultats d'essais satisfont :

- Le critère 1 qui s'applique quand la conformité est vérifiée d'après les résultats de résistance de six (6) échantillons ou plus consécutifs, les valeurs de résistance étant $x_1, x_2, \dots, x_n$.

La résistance doit répondre aux conditions suivantes :

$$\bar{x}_n \geq f_{ck} + \lambda S_n$$

$$x_{min} \geq f_{ck} - K$$

Où :

x_{min} : est la valeur la plus basse de l'ensemble des échantillons.

$\bar{x}_n$: est la valeur moyenne de l'ensemble des échantillons

S_n : est l'écart type d'un ensemble de résultats sur un échantillon.

f_{ck} : est la résistance caractéristique spécifiée du béton.

λ et K sont des valeurs données au tableau 4.6 en fonction du nombre d'échantillons.

Tableau 4.6 : Les valeurs recommandées de λ et k.

n	λ	K (MPa)
6	1,87	3
7	1,77	3
8	1,72	3
9	1,67	3
10	1,62	4
11	1,58	4
12	1,55	4
13	1,52	4
14	1,50	4
15	1,48	4

- Et le critère 2 qui s'applique quand la conformité est vérifiée d'après les résultats de trois (3) échantillons, ayant des résistances de x_1 , x_2 et x_3 .

La résistance doit répondre aux conditions suivantes :

$$\bar{x}_3 \geq f_{ck} + 5$$

$$x_{min} \geq f_{ck} - 1$$

Où : $\bar{x}_3$: est la résistance moyenne de trois (3) éprouvettes

d) La durabilité :

Les exigences de durabilité sont données par rapport aux conditions d'environnement a travers le rapport maximum Eau/ciment et la teneur minimale en ciment.

Le tableau 4.7 donne les valeurs limites de composition et de caractéristique d'un béton armé.

Tableau 4.7: Les exigences de durabilité en fonction des conditions d'environnement.

EXIGENCES	CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT								
	Environnement Sec	Environnement humide		Environnement humide avec gel et produit dégivrant	Environnement marin		Environnement présentant une agressivité chimique		
		sans gel	avec gel		sans gel	avec gel	Faible	modéré	forte
Rapport max eau/ciment	0.65	0.60	0.55	0.50	0.55	0.50	0.55	0.50	0.45
Teneur min en ciment (Kg/m ³)	260	280	280	300	300	300	280	300	300

4.4 Le code Britannique BS 8110: [38]

a) Résistance caractéristique à la compression:

La résistance caractéristique à la compression, notée f_{cu} , est spécifiée sur la base d'essais à 28 jours d'âge de cube de 15 cm d'arête. Conservés et essayés conformément à la norme BS 8110 [38]. La composition du béton doit être étudiée de manière que la résistance moyenne notée f_{cm} , à l'âge de référence de 28 jours satisfait à la condition:

$$f_{cm} \geq f_{cu} + 1,64 S$$

avec S: l'écart type et 1,64 S : la marge courante.

Pour $10 < n < 100$, la marge courante peut être majorée par un coefficient K

$$K = (0.86 + (2/n)^{1/2}) ; \text{ pour } n \geq 100, K=1.$$

b) Classes:

En fonction de f_{cu} (MPa), les classes sont définies de la façon montrée dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 : Les différentes classes des résistances (MPa) utilisées dans les chantiers de construction en fonction de l'emploi.

7	10	15	20	25	30	40	50	60
				Structure en béton armé : Granulats Normaux				
			Structure en béton armé : Granulats légers					
Béton non armé								

c) Le contrôle de qualité du béton:

Le nombre d'échantillonnage et d'essais dépend de la nature du travail à exécuter et du volume de béton à couler, par exemple, ce nombre est très élevé pour les éléments fortement sollicités de même qu'au début de toute exécution afin de pouvoir établir rapidement le niveau de qualité.

Pour chaque classe du béton utilisé, il est requis de faire au moins un prélèvement par jour.

Chaque résultat d'essai est la moyenne des résultats de deux (2) cubes, tirés à partir d'un même échantillon. La conformité à la résistance caractéristique requise f_{cu} est réputée obtenue si à la fois:

- La résistance moyenne de tout groupe de 4 résultats consécutifs est telle que:

$$f_{cm} \geq f_{cu} + 2 \text{ MPa} \quad \text{pour} \quad 7.5 \text{ MPa} < f_{cu} < 15 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} \geq f_{cu} + 3 \text{ MPa} \quad \text{pour} \quad f_{cu} \geq 20 \text{ MPa}$$

- Chaque résultat individuel f_{ci} est tel que :

$$f_{ci} \geq f_{cu} - 2 \text{ MPa} \quad \text{pour} \quad 7.5 \text{ MPa} < f_{cu} < 15 \text{ MPa}$$

$$f_{ci} \geq f_{cu} - 3 \text{ MPa} \quad \text{pour} \quad f_{cu} \geq 20 \text{ MPa}$$

d) La durabilité :

Pour assurer la durabilité sous des conditions d'exposition spécifique des armatures, le BS8110 [38] propose des enrobages nominaux du béton liés au dosage minimal en ciment, au rapport E/C maximal et à la classe minimale du béton utilisée. Voir tableau 4.9.

Tableau 4. 9 : Recommandations de BS8110 [38] pour assurer la durabilité sous des conditions d'exposition spécifiques des armatures avec des agrégats normaux (dimension maximale D=20 mm).

Conditions d'exposition	Enrobage nominal du béton (mm)				
Légère	25	20	20	20	20
Modéré	-	35	30	25	20
Sévère	-	-	40	30	25
Très sévère	-	-	50	40	30
extrême	-	-	-	60	50
Rapport E/C maximal	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
Quantité minimal du ciment (Kg/m ³)	275	300	325	350	400
Résistance caractéristique minima (MPa)	30	35	40	45	50

4.5 Le code des Etats Unis ACI 318-77: [36]

a) La résistance à la compression :

Le béton est défini par sa résistance à la compression spécifiée f_{0c} . Cette résistance est déduite d'essais effectués à 28 jours d'âges sur des cylindres de (15x30 cm).

résistance moyenne f'_{cm} déterminée par des essais d'au moins 30 éprouvettes consécutifs de manière à respecter la condition:

$$f'_{cm} \geq f'_c + K$$

K: étant une grandeur fonction de la valeur de l'écart type S déduite des essais ($n \geq 30$ éprouvettes).

K=2.8 pour $S < 2.1$ MPa

K=3.8 Pour $2.1 \leq S < 2.8$ MPa

K=4.8 pour $2.8 \leq S < 3.5$ MPa

K=6.2 pour $3.5 \leq S < 4.1$ MPa

K=8.3 pour $S > 4.1$ MPa

b) Classes :

Le code ACI [36] ne définit aucune classe du béton, les valeurs usuelles de f'_c sont : 27.6 MPa pour les bâtiments.

34.6 MPa pour les ouvrages d'art.

c) Le contrôle de qualité du béton:

Le code ACI demande:

- Un prélèvement au moins par jour;
- Mais pas moins que tous les 115 m³
- Et pas moins d'une fois tous les 465m³ pour les dalles ou les murs.

Si les prélèvements ne permettent pas d'avoir plus de cinq (5) essais de résistance (moyenne de 2 cylindres de même prélèvement) on prend 5 gâchées.

Un béton n'est réputée conforme que si, à la fois:

- $f'_{cm} \geq f'_c$ (f'_{cm} : moyenne de 3 essais consécutifs)
- $f'_{ci} \geq f'_c - 3.45$ MPa (f'_{ci} : résistance individuelle, moyenne de 2 éprouvettes)

d) La durabilité :

En fonction des conditions d'exposition des éléments en béton, le code ACI 318-77[36] fixe des enrobages minimaux en vue d'une meilleure durabilité. Voir le tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Les recommandations de ACI 318-77 [36] pour enrobage minimum pour la protection des armatures

Béton coulé en place	L'enrobage minimal (mm)
a) Béton coulé contre et au contact permanent avec la terre	76
b) Béton au contact de la terre ou exposé aux intempéries:	
- Barre ($\geq \phi 20$)	50
- Barre et fils $\leq \phi 16$	38
c) Béton ni au contact de la terre ni exposé aux intempéries	
- Dalle et murs ($\geq \phi 40$)	38
($\leq \phi 36$)	19
- Poutre, poteau.	38
Toutes armatures (longitudinales ou transversales)	

4.6 La norme française AFNOR:[39]

La notion de qualité du béton dans la réglementation française a été cernée par un contrôle de production et un contrôle de conformité. Tout deux présentés dans un contexte organisationnel représenté sous forme d'un document contractuel appelé " plan d'assurance qualité ". Ce plan prévoit un suivi continu durant tout le processus de fabrication du béton (conception, formulation, mise en oeuvre) afin de garantir que le produit fini répond bien aux spécifications requises et atteint le niveau de qualité escompté.

a) Résistance caractéristique.

La résistance des bétons est mesurée en compression sur éprouvettes cylindriques réalisées et essayées selon la normalisation en vigueur pour les essais du contrôle.

La résistance caractéristique f_{ck} applicable à un lot de béton est celle pour laquelle on ne peut pas trouver plus de $p\%$ de valeurs inférieurs à cette valeur, et on ne peut trouver aucune valeur inférieure à une valeur minimale f_{cmin} fixée. Le pourcentage maximal $p\%$ des valeurs inférieurs à f_{ck} est ainsi choisi:

pour $f_{ck} < 30 \text{ MPa}$ $p = 10\%$

et $f_{ck} \geq 30 \text{ MPa}$ $p = 5\%$

La valeur minimale f_{cmin} est fixée à $f_{cmin} = 0.8 f_{ck}$ sans descendre en dessous de $f_{ck} - 5 \text{ MPa}$.

b) Classes:

Les valeurs usuelles des résistances caractéristiques sont les suivantes en MPa: 12-16-20-25-30-35-40-45-50.

c) Le contrôle de la qualité du béton:

Le nombre "n" de prélèvement conduit à l'effectif "n" de l'échantillon. L'effectif "n" est normalement égal à trois ($n=3$) si la partie d'ouvrage à bétonner requiert moins de 100 m^3 de béton. Dans le cas contraire, il sera normalement égal à trois plus un pour cent mètre cube supplémentaire à bétonner.

Trois cas sont envisagés en ce qui concerne la fiabilité de la qualité du béton, le béton homologué, avec références, et sans références.

Les critères qui sont à satisfaire sont :

$$\bar{f}_c \geq f_{ck} + k_1 \quad \bar{f}_c : \text{la résistance de } n \text{ résultats}$$

$$f_{cmin} \geq f_{ck} - k_2 \quad f_{cmin} : \text{la résistance minimale des résultats}$$

f_{ck} : la résistance caractéristique spécifiée

Avec pour k_1 et k_2 les valeurs indiquées dans le tableau 4.11.

Tableau 4.11: Les valeurs de k_1 et k_2 en MPa

Béton	Homologué				Avec références				Sans références			
f_{ck}	< 30		≥ 30		< 30		≥ 30		< 30		≥ 30	
n	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
3	1	3.5	2	3	1.5	3.5	2.7	3	4	3	6	0
6	1.5	3.5	3	3	2	3.5	3.4	3	3.5	3	5.5	0
9	1.8	3.5	3.3	3	2.2	3.5	3.7	3	3.2	3	5.2	0
12	2	3.5	3.5	3	2.5	3.5	3.8	3	3	3	5	0
≥ 15	0.85S	3.5	1.2S	3	0.95S	3.5	1.3S	3	1.3S	3	1.9S	1

S : l'écart type des résultats

d) La durabilité:

Les exigences de la durabilité sont données par rapport aux conditions d'environnement à travers le rapport maximum eau/ciment, le dosage minimal en ciment et l'enrobage des armatures. Voir Tableau 4.12

Tableau 4.12: Les exigences de la durabilité en fonction des conditions d'environnement.

Niveau d'agressivité	Moyennement agressif	Fort agressif	Très fortement agressif
Dosage minimal en ciment (Kg/m ³)	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$
E/C max	0.55	0.50	0.50
Enrobage des armatures (mm)	≥ 30	≥ 40	≥ 40
Protection supplémentaire	Non nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire

D: Dimension maximale des granulats (mm)

4.7 Le code Allemand DIN 1045: [36]

a) Résistance à la compression :

La résistance à la compression d'un béton est rapportée à des essais sur cubes de 200 mm d'arête, à l'âge du 28 jours. On distingue:

- La résistance nominale B_{WN} définie comme la valeur minimale des résistances à la compression B_{W28} de chaque cube.
- La résistance de série B_{WS} définie comme la valeur minimale admissible pour la résistance moyenne de chaque série de cubes.

b) Classes :

Le code DIN [36] définit, en fonction de l'emploi prévu, sept (7) classes de résistances. Voir tableau 4.13

Tableau 4.13 : Les classes de résistance dans le code DIN 1045 [36]

	Groupe de béton	Classe de résistance	Résistance nominale B_{WN} (MPa)	Résistance de série B_{WS} (MPa)	Emploi
1	Béton B_I	B_5	5	8	Béton non armé
2		B_{10}	10	15	
3		B_{15}	15	20	Béton armé et non armé
4		B_{25}	25	30	
5	Béton B_{II}	B_{35}	35	40	
6		B_{45}	45	50	
7		B_{55}	55	60	

c) Le contrôle de qualité du béton :

En fonction du groupe de béton (I ou II), le nombre de prélèvement à effectuer pour les essais:

- Groupes BI : les séries sont de trois (3) éprouvettes par 500 m³ de béton ou par étage de bâtiment ou par semaine de travail.

-Groupes BII: (béton spéciaux et BPE en plus); des séries doivent être de six (06) éprouvettes (pour les mêmes volumes ou durée que ceux indiqués pour le groupe BI).

En appelant B_{wm} la résistance moyenne de chaque série de cubes et B_{wi} la résistance d'une éprouvette i quelconque, un béton est réputé conforme lorsqu'à la fois:

$$B_{wm} \geq B_{ws}$$

$$B_{wi} \geq B_{wn}$$

Si, pour un béton de composition et de fabrication données, une éprouvette sur neuf est telle que $B_{wi} \geq 0.8 B_{wn}$, l'exigence de résistance est néanmoins considérée comme satisfaite, à condition que pour n'importe laquelle des séries de trois éprouvettes, on ait : $B_{wm} \geq B_{ws}$.

d) La durabilité:

Le code DIN 1045 [36] propose des mesures de protection des armatures par des enrobages minimaux en fonction des conditions d'ambiance. Voir le tableau 4.14 en fonction du diamètre des barres, cet enrobage minimal peut être modifié d'après le tableau 4.15

Tableau 4.14: Enrobage minimal (cm) en fonction des conditions d'ambiance.

Conditions d'ambiance	Béton coulé en place et éléments préfabriqués				Elément préfabriqués en usine ≥ B35
	B15		B25		
	En général	Eléments minces	En général	Eléments minces	
1- Eléments dans des locaux fermés.	2	1.5	1.5	1	1
2- Eléments à l'extérieur et ceux aux quels l'air extérieur à constamment accès.	2.5	2	2	1.5	1.5
3- Eléments dans des locaux fermés mais fréquemment exposés à une très haute humidité et à la température normale ambiante.	3	2.5	2.5	2	2
4-Eléments exposés à des conditions particulièrement corrosives.	4	3,5	3,5	3	3

Tableau 4.15 : Enrobage minimal en fonction du diamètre des barres.

Diamètres des barres (mm)	Enrobage (cm)
≤ 12	1.0
14-16-18	1.5
20-22	2
25-28	2.5
> 28	3.0

4.8. Le code Egyptien EC 1989: [40]

a) La résistance à la compression :

La résistance caractéristique du béton f_{cu} est définie comme la résistance à la compression au dessous de laquelle il n'y a pas plus de 5% des résultats des tests. La résistance à la compression est déterminé à l'âge de 28 jours, en utilisant les cubes de 15x15x15 cm.

Le code EC spécifie que le mélange du béton doit être étudié pour avoir une résistance moyenne f_m tel que:

$$f_m = f_{cu} + 1.64 S$$

S: est l'écart type

M= 1,64 S : la marge de sécurité

Le code spécifie aussi les valeurs minimales de la marge de sécurité

M=1,64 S, dépendant du degré de contrôle de la qualité voulu. Voir tableau 4.16

**Tableau 4.16 : Valeurs de l'écart type (S) et le coefficient de variation (V)
pour des valeurs minimales de la marge de sécurité (M=1.64 S)**

f_{cu} kg/cm ²	> 100 test			50-100 résultats de test			Pas de test		
	M_{min}	S	V	M_{min}	S	V	M_{min}	S	V
< 200	0.2 f_{cu}	0.1 f_m	0.1	0.4 f_{cu}	0.174 f_m	0.174	0.6 f_{cu}	0.228 f_m	0.228
200	50 Kg/ cm ²	30,5	0.122	100	61	0.203	120	73.2	0.229
250			0.102			0.174			0.198
300			0.087			0.152			0.174
350			0.076			0.136			0.154
400			0.068			0.122			0.141
450			0.061			0.111			0.128

b) Classes:

La classe du béton est définie par une résistance caractéristique à la compression qui varie entre 10 à 45 MPa.

$$f_{cm} \geq f_{cu} + 30 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{pour } f_{cu} \geq 200 \text{ kg/cm}^2.$$

$$f_{cm} \geq f_{cu} + 20 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{pour } f_{cu} < 200 \text{ kg/cm}^2.$$

- Chaque résultat individuel f_{ci} est tel que : $f_{ci} \geq f_{cu}$

- L'étendue des résultats est telle que :

$$f_{ci \text{ max}} - f_{ci \text{ min}} \leq 0.2 f_{cm}$$

d) La durabilité :

Pour des conditions d'ambiance sévères, le code EC 1989 [40] exige une diminution du rapport E/C et/ou une augmentation du dosage du ciment dans les limites données par le tableau 4.17

Tableau 4.17 : Les dosages minimaux des quantités de ciment dans les gâchées du béton pour une durabilité et une résistance meilleure.

Conditions d'exposition	Dosage minimale du ciment (kg/m³)				E/C maximal
	Agrégats maximale -D- (mm)				
	40	30	20	15	
Normale: béton protégé des conditions d'expositions sévères	300	350	350	350	0.6
Moyenne: béton non exposé ou exposé au conditions sévères mais enterré sous l'eau.	300	350	350	400	0.5
Mauvaise: béton exposé au conditions sévères (l'eau de mer, gel et dégel et aux gaz)	350	350	400	450	0.4;0.5 pour un dosage en ciment de 400 et 350 respectivement.

4.9 Le règlement Algérien D.T.R- B.E. 2-1 : [17]

a) La résistance caractéristique :

Le béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise (ou spécifiée). Celle ci notée f_{c28} , est choisie à priori compte tenu des possibilités locales et des règles de contrôle qui permettent de vérifier qu'elle est atteinte. La résistance à la compression est déterminée sur les cylindres de (16 X 32 cm).

b) Classes :

Le code Algérien D.T.R ne définit aucune classe du béton, en relation avec l'emploi.

c) Le contrôle de la qualité du béton :

La nature du contrôle de la qualité est en fonction de la catégorie du chantier. Dans un chantier de moyenne importance (catégorie C), R+10 au plus (3000 m³) ou le groupe d'usage 2 pour le R.P.A (règles parasismiques Algériennes), les mesures de résistance se font par des essais de compression par une série de trois (3) cylindres, chaque cylindre est prélevé sur une gâchée.

Ces essais ont lieu avant le début des opérations puis après 300 m³, puis tout les 500 m³ pour les ouvrages à technicité moyenne. Dans un chantier de grande importance (catégorie D), (le groupe d'usage 1 pour le R.P.A), les mesures de résistance sont obtenues à partir d'essais de compression effectués sur 3 séries de 3 cylindre, chaque série est prélevée dans une même gâchée de même fréquence que celle de la catégorie C.

Trois modes sont envisagées en ce qui concerne la conformité à la résistance caractéristique requise. Le premier mode concerne le cas où les essais portent sur trois séries de trois (3) cylindres, chaque série étant prélevée dans la gâchée. La résistance caractéristique déduite de ces essais est :

- $f_c \geq \min (f_m - 4, f_{\min} + 1)$ si f_c choisi est inférieur à 30 MPa.

- $f_c \geq \min (f_m - 6, f_{\min} + 0)$ si $f_c \geq 30$ MPa.

Où f_c : est la résistance caractéristique

f_m : est la résistance moyenne

Le deuxième mode concerne le cas où les essais portent sur une série de trois (3) cylindres prélevés sur trois (3) gâchées différentes, les trois (3) prélèvements étant effectués au cours d'une période d'un mois au plus. La résistance caractéristique déduite de ces essais est :

- $f_c \geq \min (f_m - 8, f_{\min} - 2)$ si $f_c \leq 30$ MPa.

Le troisième mode concerne le cas où les essais portent sur deux série de trois (3) cylindres prélevés sur six gâchées différentes. La résistance caractéristique déduite de ces essais est :

- $f_c \geq \min (f_m - 8, f_{\min} - 1)$ si $f_c \leq 30$ MPa.

d) La durabilité :

Les dosages minimaux en ciment des ouvrages en béton sont à choisir suivant les critères de résistance donnés dans les règles de conception et de calcul de ces ouvrages et suivant les critères de durabilité, compte tenu des risques de détérioration des bétons et armatures. Voir tableau 4.18

Tableau 4.18 : Les dosages minimaux en ciment recommandé par le D.T.R Algérien [17].

Conditions d'ambiance	Dosages minimal (Kg/m ³)		
	Dimension max des granulats (mm)		
Ouvrages intérieurs des bâtiments	25	20	12.5
	Dosages résultant des performances mécaniques requises		
Ouvrages exposés mais sans agressivité particulière	$550/\sqrt[3]{C_g}$ en 290	ciment CPA ou 300	C L K 330
Ouvrages exposés à des conditions agressives sévères	$700/\sqrt[3]{C_g}$ 370	en ciment CPA 385	ou C L K 420

C_g : dimension maximale des granulats en (mm)

CPA : Ciment portland artificiel

CLK : Ciment portland avec constituants secondaires.

En vue d'une meilleure durabilité, le D.T.R Algérien [17] et même le CBA93 [41] proposent un enrobage minimal en fonction des conditions d'exposition de la structure.

4 cm : Pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillard salins.

3 cm : Pour les parois non coffrées.

2 cm : Pour les parois exposées aux intempéries ou au contact d'un liquide.

1 cm : Pour les parois qui seraient situées dans les locaux couverts et clos.

4.10 Analyse critique :

4.10.1 Analyse critique de la réglementation étrangère :

Les différents règlements traitent la qualité du béton par deux aspects. Le premier porte sur l'organisation et le contrôle de la production. Cette organisation consiste en une classification des unités de production, des chantiers et du béton afin d'établir les degrés de contrôle adéquats. Le deuxième aspect porte sur le contrôle adéquat dit "contrôle de conformité ou d'acceptance du béton". Cette conformité est avec les caractéristiques requises, en adoptant la résistance en compression comme critère essentiel.

Tout les règlements s'accordent à utiliser comme critère de conformité deux inégalités imposant une fois une valeur minimale de la résistance moyenne obtenue sur une série d'essais d'écrasement d'éprouvettes dont le nombre et la taille varient d'un pays à un autre et une autre fois une valeur minimale des résistances obtenues dans ces séries.

Ces critères de conformité sont élaborés en choisissant certains paramètres tel que le risque accepté d'être à tort quand à la représentativité d'un échantillonnage du béton, en prenant en compte certaines données spécifiques au pays, par exemple le degré de maîtrise de la technologie de production et de fabrication du béton, et en fonction de certaines dispositions à prendre ou/et à imposer. Ce qui explique le fait que certains règlements paraissent plus sévères que d'autres.

Les deux inéquations utilisées comme critères d'acceptance ou de refus d'un lot de béton sont de la forme suivante:

- $f_m \geq f_c + k_1$ f_c : La classe du béton visée.
- $f_{min} \geq f_c + k_2$ f_m : La résistance moyenne de n tests
- f_{min} : La résistance minimale des tests.

Les paramètres qui régissent les critères de conformité peuvent être résumés en :

- La taille de l'échantillon.

- Les risques admis à ne pas atteindre la classe voulue.
- La dispersion des bétons déjà existant.

Aussi d'autres paramètres sont considérés lors de l'élaboration des critères de conformités tels que :

- Le lotissement.
- L'échantillonnage
- La fréquence des prélèvements
- La classification des chantiers.
- La classification du béton.
- Le type de contrôle utilisé.

Le tableau récapitulatif 4.19 présente les différentes valeurs de ces paramètres pour l'élaboration des critères de conformité dans les différents règlements.

Donc, la qualité du béton dans la réglementation étrangère n'est pas la performance. C'est à partir d'une classe requise, garantir un risque minimum de non atteinte à cette classe dans un bétonnage. D'où le béton est classé de façon à assurer son utilisation rationnelle dans le chantier.

La classe ou résistance caractéristique est définie avec un risque, qui est pris dans la majorité des codes égal à 5%. Quelques règlements, comme l'ACI où le risque est lié à l'importance de la dispersion des résistances, pour de faible dispersion, il permet un risque élevé jusqu'à 9%, et comme la réglementation française où le risque est lié à l'importance de la classe du béton, pour des classes inférieure à 30 MPa, on permet un risque de 10%.

4.10.2 Analyse critique de la réglementation Algérienne DTR-BE 2-1 [17]:

A la lecture du document, nous retrouvons les mêmes étapes de fabrication et de contrôle du béton que ceux des autres normes consultées. Toutefois, le terme qualité n'apparaît pas.

Les critères de conformité dépendent du mode de prélèvement et ne font pas apparaître le type de l'ouvrage, son importance et le type de béton (béton fabriqué en usine, béton prêt à l'emploi et au chantier). C'est à dire ne sont pas fonction d'une classification précise.

Les critères de conformité se résument en une seule inégalité et qui imposent une limite supérieure de la résistance moyenne à obtenir lors des essais. Alors que dans les règlements étrangers comme nous l'avons noté les critères de conformité sont exprimés par une double inégalité.

En plus, le règlement ne définit pas la gâchée, le lot, et ne précise pas la fréquence des prélèvements.

Dans le règlement Algérien; pour les deux premiers modes de contrôle, la période des prélèvements pour une série peut aller jusqu'à un mois et la période séparant deux séries consécutives dans le 3^e mode est au plus égale à 6 mois. Donc une question se pose, sera t-il possible d'apprécier la qualité d'un béton produit dans un chantier donné, à partir d'un prélèvement de trois (3) éprouvettes étalées sur un mois? En d'autres termes pouvant nous affirmer que ces prélèvements sont représentatifs du béton produit?

4.11 Conclusion :

Les règlements consultés s'accordent à considérer que le secret de la qualité du béton réside en premier lieu dans l'organisation de la production et en second lieu dans le contrôle de celle-ci. L'organisation porte sur une classification des unités de production, des chantiers, du béton et du contrôle. Etant la classification faite, on peut établir des degrés de contrôle de la production ou de la conformité adéquats afin d'assurer une utilisation rationnelle des matériaux et des matériels.

Donc un béton de qualité est le résultat d'une certaine organisation schématisée et structurée par les cahiers des charges, des textes réglementaires et normatifs.

Les règlements étrangers se caractérisent d'un pays à un autre en fonction de certaines considérations économiques (coût du contrôle), techniques (maîtrises ou non de la technologie de production) et autres propres à chacun d'eux, ce qui leur permet d'élaborer des critères d'acceptance (de conformité) stricts dans la mesure où les fluctuations des matériaux de base sont contrôlées.

En Algérie, il paraît évident que la mise en place des règlements similaires est nécessaire. Cependant, leur élaboration et application ne sont possibles et efficaces qu'en tenant compte des conditions technico-économiques existantes propres au pays.

Tableau 4.19 :

Tableau récapitulatif

Codes Paramètres Comparés	CEB FIP 1978	ENV 206	BS 8110	ACI 318-77
Résistance caractéristique f_c :	$f_c = f_m - 1,64\sigma$	$f_c = f_m - 1,64\sigma$	$f_c = f_m - 1,64\sigma$	$f_c = f_m - K$ K est fonction de l'écart type σ
Le risque permis dans la détermination de la résistance caractéristique ou le risque de la non atteinte (résistance caractéristiques)	5%	5%	5%	variable en fonction de l'écart type $r < 10\%$
Les classes du béton C_{MPa}	09 classes: C_{MPa} $C_{12}-C_{16}-C_{20}-C_{25}$ $C_{30}-C_{35}-C_{40}-C_{45}$ C_{50}	09 classes: $C_{cyl/cub}$ $C_{12/15}-C_{16/20}-C_{20/25}$ $C_{25/30}-C_{30/37}-C_{35/45}$ $C_{40/45}-C_{45/55}-C_{50/60}$	06 classes: $C_{20}-C_{25}-C_{30}$ $C_{40}-C_{50}-C_{60}$	Pas de classes seulement 27,6MPa pour les bâtiments
Contrôle de la qualité du béton	Pas moins d'un prélèvement par 100 m³ *Un prélèvement comporte trois résultats (n=3) ou (n≥15) résultats (chaque résultat est la moyenne des résultats de 3 cylindres reparties sur n gachée) Critères de conformité *n=3 résultats $f_m \geq f_c + k_1$ $f_{min} \geq f_c - k_2$ *n≥15 résultats $f_m - \lambda \sigma_n \geq f_c$ $f_{min} \geq f_c - k_2$	1 prélèvement par 150m³ pour les classes ≤ C_{20/25} et 1 par 75 m³ pour les classes ≥ C_{20/25}, en aucun cas ne peut dépasser 450 m³ *Un prélèvement comporte n échantillons (n=3,6,7 à 15) Critères de conformité *n= 3 échantillons $f_m \geq f_c + 5 \text{ MPa}$ $f_{min} \geq f_c - 1$ *n ≥6 échantillons $f_m \geq f_c + \lambda \sigma_n$ $f_{min} \geq f_c - k$	Pas moins d'un prélèvement tous les 10m³ (pour les éléments soumis à des contraintes élevées et tous les 20 à 50m³ (éléments soumis à des contraintes faibles). *Un prélèvement comporte 4 résultats d'essai (chaque résultat est la moyenne des résultats de 2 cubes) à partir d'une gachée prise au hasard. Critères de conformité *n=4 résultats $7,5 \text{ MPa} < f_c < 15 \text{ MPa}$ $f_m \geq f_c + 2 \text{ MPa}$ $f_{min} \geq f_c - 2 \text{ MPa}$ $20 \text{ MPa} \leq f_c$ $f_m \geq f_c + 3 \text{ MPa}$ $f_{min} \geq f_c - 3 \text{ MPa}$	Pas moins d'un prélèvement tous les 115m³ (et 465m³ pour les dalles et les murs) *Un prélèvement comporte 3 résultats d'essai (chaque résultats est la moyenne de 2 cylindres de même prélèvement) Critères de conformité *n=3 résultats $f_m \geq f_c$ $f_i \geq f_c - 3,45 \text{ MPa}$

des paramètres comparés

AFNOR: NF	DIN 1045	EC1989	D.T.R: B.E 2.1
$f_c = f_m \cdot \lambda_s$ λ est fonction du P% permis de valeurs inférieures à f_c	Non définie	$f_c = f_m - 1,64\sigma$	Non définie
$f_c < 30 \text{ MPa } r=10\%$ $f_c \geq 30 \text{ MPa } r=5\%$		5%	
09 classes $C_{12}-C_{16}-C_{20}-C_{25}$ $C_{30}-C_{35}-C_{40}-C_{45}$ C_{50}	07 classes $C_5-C_{10}-C_{15}-C_{25}$ $C_{35}-C_{45}-C_{55}$	06 classes $C_{20}-C_{25}-C_{30}-C_{35}$ $C_{40}-C_{45}$	Aucune classe n'est requise
1 prélèvement par 100m^3	1 prélèvement par 500m^3		1 prélèvement tout les 300m^3 puis après tout les 500m^3
*Un prélèvement comporte 3 cylindres +1 cylindre pour chaque 100m^3 supplémentaires	*Un prélèvement comporte 3 cubes pour les classes (C_5 à C_{25}) et 6 cubes pour les classes (C_{35} - C_{45})	*Un prélèvement comporte 3 cubes	*Un prélèvement comporte 3 cylindres chaque cylindre est prélève sur une gachée
Critère de conformité *n=3 éprouvettes $f_m \geq f_c + k_1$ $f_{\min} \geq f_c - k_2$ *n>15 éprouvettes $f_m \geq f_c + \lambda_s$ $f_{\min} \geq f_c - k_2$	Critères de conformité *n=3 cubes (B_5 à B_{25}) n=6 cubes (B_{35} à B_{55}) $f_m \geq f_c + 5\text{MPa}$ $f_{\min} \geq f_c$	Critères de conformité *n=3 cubes $f_c < 20\text{MPa}$ $f_m \geq f_c + 2\text{MPa}$ $f_c \geq 20\text{MPa}$ $f_m \geq f_c + 3\text{MPa}$ $f_{\min} \geq f_c$ $f_{\max} - f_{\min} \leq 0,2f_m$	Critères de conformité *n=3 cylindres $f_c \geq \min(f_m - 8, f_{\min} - 2)$ si $f_c \leq 30\text{MPa}$

CHAPITRE 5

METHODE D'ANALYSE

CHAPITRE 5

METHODE D'ANALYSE

L'évaluation de la qualité du béton dans les chantiers Algériens est analysée par une approche statistique des résistances à la compression et par un diagnostic des matériaux et des compositions des bétons en cours de leur mise en oeuvre sur chantiers.

5.1 L'approche statistique de l'étude:

5.1.1 Introduction :

La variation de la résistance du béton est une source majeure qui cause l'aspect probabiliste de la qualité, du moment que les sources de variation sont nombreuses: variation des composants du mélange, changement dans la confection et la mise en oeuvre du béton et aussi les erreurs de contrôle etc....

La connaissance de la variation est exigée afin d'interpréter toute valeur de la résistance à la compression et de détecter statistiquement les changements significatifs de cette résistance pour opposer dans l'avenir contre tout facteur de fluctuation probable. Pour cela, l'estimation des paramètres statistiques est très importante pour une étude efficace du béton des structures.

5.1.2 Notions de statistique:

5.1.2.1 Généralités :

Les statistiques est une notion ayant pour but essentiel l'analyse d'observation, afin de déduire une loi de variation en fonction des paramètres définis au préalable.

Ces informations pourront être exploitées pour prédire le comportement futur de la propriété étudiée et évaluer aussi la sécurité et le risque qu'un tel phénomène puisse surgir.

Dans notre cas, ces observations porteront sur les résistances d'écrasement des éprouvettes de dimension $16\phi 32$ après 28 jours de cure, et le sujet de prédiction et d'estimation, c'est la résistance des bétons produits.

Le collecte des résultats relatifs aux ouvrages s'effectue sur une fraction de la population dite échantillon, ce dernier qui est choisi de façon à être représentatif afin que les informations recueillies puissent être étendues à l'ensemble de la population.

Le choix des échantillons est fait selon les techniques de sondage connues, soit par un choix raisonné ou aléatoirement. Dans notre cas, le sondage est raisonné pour le choix des entreprises et des chantiers et aléatoire pour le choix des valeurs de résistance en compression. On doit choisir entre un petit échantillon ($n \leq 30$) qui ne permet pas d'effectuer certaines approximations et un grand échantillon ($n > 30$) qui au contraire les rend légitimes.

5.1.2.2 La distribution normale :

Les phénomènes qui peuvent être considérés comme engendrés par un grand nombre de causes élémentaires de fluctuation agissant de façon indépendante (tels que la résistance, la largeur et l'épaisseur d'un matériel) seront généralement susceptibles d'être représentés par la loi normale. Cette loi est l'une des plus importantes distribution continue des probabilités.

Les travaux de Rush, Sell et Reckwiz [43], confirment dans une étude réalisée sur 629 chantiers, que 93% des cas, la résistance en compression suit une distribution continue et répond bien à une loi normale. Exception faite à certain cas qui correspond à un béton provenant de centrales différentes donnant des résistances moyennes différentes et par conséquent des courbes à deux (2) sommets ou bien des

courbes asymétriques. Une autre étude analogue [28] faite sur 30 chantiers dont 27 chantiers suit cette distribution normale avec une proportion de 90%.

Donc le modèle mathématique de la loi de distribution des probabilités des résistances à la compression, dans un béton mis en oeuvre, supposé de même composition et de même qualité est une loi normale. La distribution normale s'exprime par la fonction :

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (5.1)$$

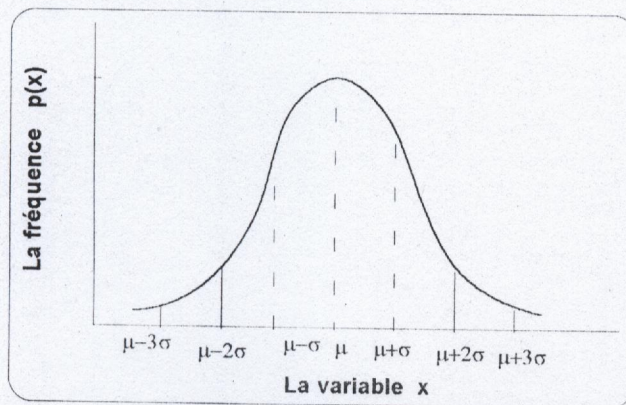


Figure 5.1: La distribution des fréquences d'une loi normale.

La courbe d'une distribution normale a pour propriétés:

- La courbe est symétrique par rapport à la moyenne μ .
- L'aire totale de la courbe est égale à 1.
- 68,26% de la surface totale de la courbe se trouve dans l'intervalle:

$$\mu - \sigma < x < \mu + \sigma$$

- 95,44% de la surface totale de la courbe se trouve dans l'intervalle:

$$\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma$$

- 99,74% de la surface totale de la courbe se trouve dans l'intervalle:

$$\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$$

La probabilité pour qu'une variable x se situe entre 2 points x_a , x_b est donnée par :

$$p(x_a < x < x_b) = \int_{x_a}^{x_b} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \dots\dots\dots(5.2)$$

Afin d'évaluer cette équation pour tout les valeurs de la moyenne μ et de l'écart type

σ , une variable z est utilisée : $z = \frac{x - \mu}{\sigma} \dots\dots\dots(5.3)$

Cette variable réduite z suit une loi normale de moyenne centrée à $z=0$ et d'écart type unitaire $\sigma = 1$. Ou encore z peut représenter la quantité de l'écart type entre laquelle une variable x peut s'écarter de la moyenne μ , comme c'est montré par la figure (5.2).

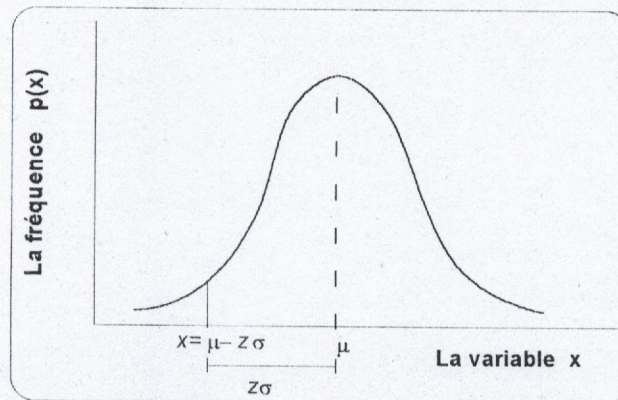


Figure 5.2: La distribution normale

Avec une variable normale réduite z fixée, correspond à une probabilité P (sécurité) pour qu'une variable aléatoire se situe à l'intérieur.

La courbe normale nous permet deux modes de lecture :

- Soit de chercher la probabilité de trouver une résistance inférieure à R_0 .
- Soit de chercher la valeur de la résistance R_0 dont la probabilité d'avoir des résistances moindre est P , fixée au préalable.

5.1.2.3 Les paramètres d'une loi normale :

Les paramètres d'une loi normale, comme toute autre loi, sont au nombre de deux :

- La moyenne des résultats, sert de référence pour situer un résultat quelconque.
- La dispersion, aussi importante que la moyenne, bien que moins connue, exprime l'étalement des résultats possible autour de la moyenne.

La moyenne pour les résultats qui sont groupés par classes est:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i x_i \dots \dots \dots (5.4)$$

avec x_i : le centre de la classe i

n_i : le nombre des résultats de la classe i

La dispersion est généralement désignée par deux (2) orientations: l'écart type et le coefficient de variation.

$$\text{L'écart type : } \sigma_{ech} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \dots \dots \dots (5.5)$$

$$\text{Le coefficient de variation : } V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \% \dots \dots \dots (5.6)$$

SOROKA [29] recommande l'utilisation de l'écart-type lorsqu'on considère les valeurs globales comme c'est le cas de notre étude, car l'écart type est pratiquement indépendant de la résistance moyenne, du moment qu'il dépend du soin apporté à la fabrication et à la mise en oeuvre du béton et au degré de contrôle de ces opérations.

5.1.2.4 La valeur caractéristique :

La résistance caractéristique correspond à la probabilité de n'obtenir, dans une distribution normale des résultats d'essais de contrôle que 5% des résultats

en dessous de la valeur ainsi fixée. En d'autres termes, la résistance caractéristique, c'est la classe requise d'un béton avec un risque égal à 5%.

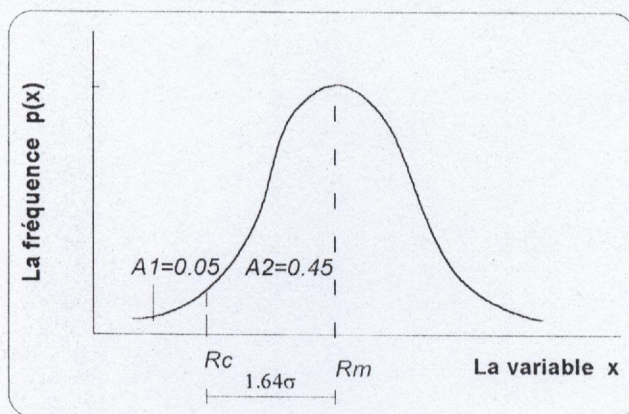


Figure 5.3 : La valeur caractéristique R_c et la marge de sécurité 1.64σ

$$P(R < R_c) = 0.05$$

$$P(R_c < R < R_m) = 0.45 \rightarrow z = -1.64 = \frac{R_c - R_m}{\sigma} \Rightarrow R_c = R_m - 1.64 \sigma \dots \dots \dots (5.7)$$

5.1.2.5 Le test de conformité :

L'hypothèse de normalité est généralement vérifiée par la valeur de χ^2 (chi-deux) qui détermine l'agrément entre les fréquences théoriques et observées.

$$\chi^2 \text{ est donnée par : } \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \dots \dots \dots (5.8)$$

o_i : Fréquences observées de la $i^{\text{ème}}$ classe

e_i : Fréquences théoriques de la $i^{\text{ème}}$ classe

Comme variable, χ^2 (chi-deux) doit suivre la distribution de PEARSON χ^2 avec v degré de liberté ($v = n - 1$, n : nombre de classe).

Pour tester la conformité, à un niveau de risque α , on doit comparer la valeur de χ^2 avec $\chi^2_{1-\alpha}$ et χ^2_{α} (donnés par la distribution tabulée de PEARSON pour un degré de

liberté correspondant. [42]. Dans notre cas, on teste la conformité à un niveau de risque 5% tel que $P_r(\chi^2 > \chi_{0.95}^2) = 5\%$.

Pour caractériser le degré de cette conformité, on a choisi trois (3) degrés : Très bonne, bonne et mauvaise conformité.

Si $\chi^2 < \chi_{0.95}^2 < \chi_{0.05}^2$: la conformité est très bonne.

Si $\chi_{0.05}^2 < \chi^2 < \chi_{0.95}^2$: la conformité est bonne.

Si $\chi^2 > \chi_{0.95}^2 > \chi_{0.05}^2$: la conformité est mauvaise.

5.1.2.6 L'estimation statistique :

C'est l'utilisation des échantillons statistiques pour estimer les paramètres de toute la population.

a. La distribution des moyennes des échantillons :

Soit une population théoriquement infinie, des échantillons de taille n sont pris à partir de la population, et chaque échantillon a une moyenne $\bar{x}_i$. La distribution des fréquences des moyennes des résistances par exemple (moyennes des échantillons) est approximativement normale avec une moyenne $\mu_{\bar{x}}$ et un écart type $\sigma_{\bar{x}}$, avec $\mu_{\bar{x}} = \mu$

$$\text{et } \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

μ : moyenne de la population.

σ : Ecart type de la population

n : taille des échantillons.

Donc si la distribution de la population est normale alors la distribution des moyennes des échantillons est normale pour les grands et petits échantillons.

b. Les intervalles de confiance :

Lorsque l'estimation d'une population est donnée par deux (2) valeurs entre lesquelles un paramètre peut se situer, on l'appelle intervalle d'estimation de paramètre.

Par hypothèse, la distribution des fréquences d'un échantillon S d'une population est normale avec une moyenne μ_s et un écart type σ_s

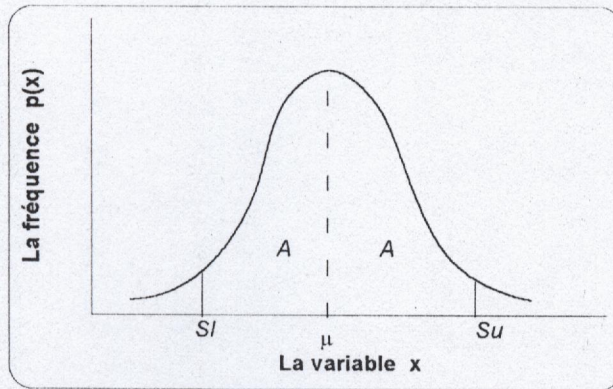


Figure 5.4: La distribution normale d'un échantillon S .

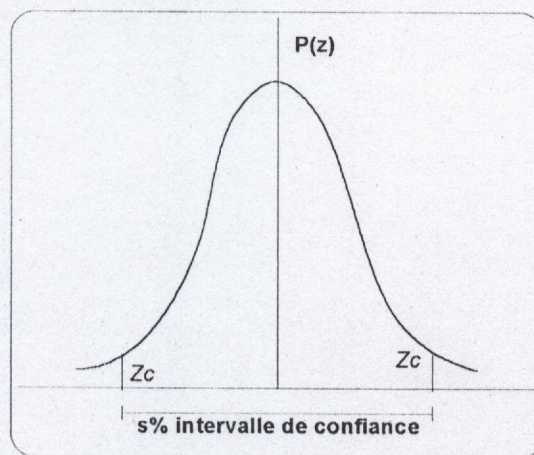


Figure 5.5: La distribution normale réduite ($\mu=0, \sigma=1$)

$s\%$ est le pourcentage des valeurs de l'échantillon S , qui se trouvent dans l'intervalle $S_L < S < S_u$ d'où $P(S_L < S < S_u) = s\%$.

$$\text{D'où : } \begin{cases} S_u = \mu_s + z_c \sigma_s \\ S_L = \mu_s - z_c \sigma_s \end{cases} \dots\dots\dots (5.9)$$

Pour une valeur quelconque de S on peut conclure que:

$$S - z_c \sigma_s < \mu_s < S + z_c \sigma_s \dots\dots\dots (5.10)$$

d'où $\mu_s = S \pm Z_c \sigma_s$.

Pour une estimation de la population, la moyenne de cette dernière μ est la même que celle de l'échantillon :

D'où : $\mu = S \pm Z_c \sigma_s$.

Donc $(S \pm Z_c \sigma_s)$ est l'intervalle d'estimation de la population à un niveau de confiance $s\%$.

$$S - Z_c \sigma_s < \mu < S + Z_c \sigma_s \dots\dots\dots(5.11)$$

c . L'intervalle de confiance de la moyenne d'une population :

L'estimation d'une population de paramètre (μ, σ) à partir d'un échantillon de moyennes de paramètre $(\mu_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{x}})$ avec $\mu_{\bar{x}} = \mu$, et $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$.

D'où pour une estimation de la population, on peut conclure:

$$\mu = \bar{x} \pm z_c \sigma_{\bar{x}} \Rightarrow \mu = \bar{x} \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(5.12)$$

Pour un échantillon quelconque d'une population:

$$\bar{x} - z_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(5.13)$$

Comme σ est généralement dans la pratique, difficile à calculer, donc σ est remplacé par un écart type estimé:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(5.14)$$

$$\text{D'où } \bar{x} - z_c \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_c \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(5.15)$$

Cela veut dire qu'il y a $s\%$ de chances pour que la moyenne de la population soit dans cet intervalle.

Mais il faut noter que cette estimation n'est valide que pour des échantillons de grande taille seulement. Pour les petits échantillons pris d'une population ($n \leq 30$) qui

a une distribution de probabilité normale, la quantité variable réduite $\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}}$ ne suit

pas la loi normale mais la loi de Student-Fisher avec une variable réduite $t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}}$

avec "v" le nombre de degré de liberté $v=n-1$ où n est la taille de l'échantillon. On note que si n augmente ($n \geq 30$ et plus), la distribution de Student-Fisher: "t" coïncide avec la loi normale d'où "t" est l'analogue de "z" pour $n \leq 30$, et pour $n \geq 30$ t et z sont confondus.

D'où l'intervalle de confiance pour l'estimation de la moyenne d'une population de moyenne pour un échantillon de petite taille devient :

$$\bar{x} - t_c \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_c \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots(5.16)$$

Les valeurs de t_c sont celles de la distribution de la variable t de Student à ($v = n-1$) degré de liberté.

d- Intervalle de confiance de la variance de la population :

Considérant une population infinie de mesures qui sont normalement distribuées avec une variance σ^2 , des échantillons de petites ou grandes tailles sont tirés de cette population et la moyenne de chaque échantillon est alors calculée $\bar{x}$. Alors pour chaque échantillon, la quantité χ^2 est calculée.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma^2} \quad \dots\dots\dots(5.17)$$

x_i ($i=1, n$) sont les mesures individuelles de l'échantillon.

$$\text{Comme } S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad S^2 \text{ est la variance de l'échantillon alors } \chi^2 = \frac{nS^2}{\sigma^2}.$$

La distribution de χ^2 est une (chi-deux) avec une fonction de densité de probabilité qui dépend de ν (degré de liberté).

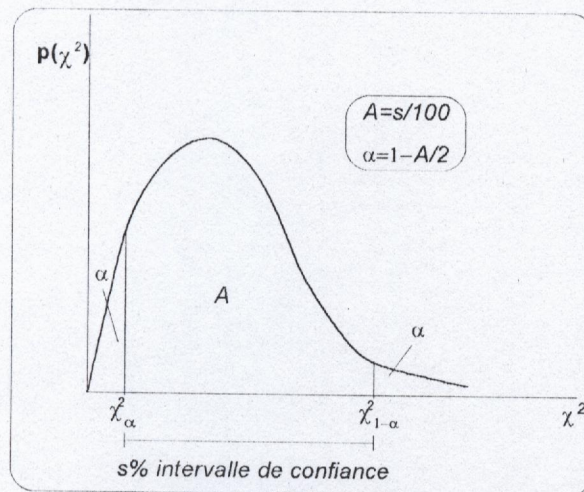


Figure 5.6: La distribution de χ^2 (chi-deux).

Le niveau de sécurité "s" étant déterminé, on utilise la distribution de χ^2 à ν degré de liberté.

$$\chi_{1-\alpha}^2 < \chi^2 < \chi_{\alpha}^2$$

$$\chi_{1-\alpha}^2 < \frac{ns^2}{\sigma^2} < \chi_{\alpha}^2$$

$$\frac{ns^2}{\chi_{\alpha}^2} < \sigma^2 < \frac{ns^2}{\chi_{1-\alpha}^2}$$

$$\sqrt{\frac{ns^2}{\chi_{\alpha}^2}} < \sigma < \sqrt{\frac{ns^2}{\chi_{1-\alpha}^2}} \quad \dots\dots\dots(5.18)$$

5.1.3 Résumé de l'analyse statistique :

Une fois définis, les échantillons feront l'objet d'étude statistique qui consiste à:
 1/ Rechercher la fonction de distribution de la variable (il s'agit de la résistance). La loi des grands nombres et la continuité de la variable nous orientent doré et déjà vers la loi normale.

2/ Ajuster la loi théorique à la variation réelle des fréquences et évaluer la concordance entre ces deux courbes. Pour cela plusieurs techniques existent et on adoptera l'une d'elles (loi de chi-deux). En pratique cette concordance est jugée satisfaisante à un risque de 5%.

3/ Estimer les paramètres de la population d'origine. Pour ce faire, on procédera par :

- Une estimation de la qualité du béton pour un chantier pour chaque entreprise.

- Une estimation de la qualité du béton pour chaque entreprise.

- Une estimation de la qualité du béton produit de façon générale.

Donc, l'analyse statistique des résultats est menée conformément à la méthode présentée sur l'organigramme de la figure 5.7 :

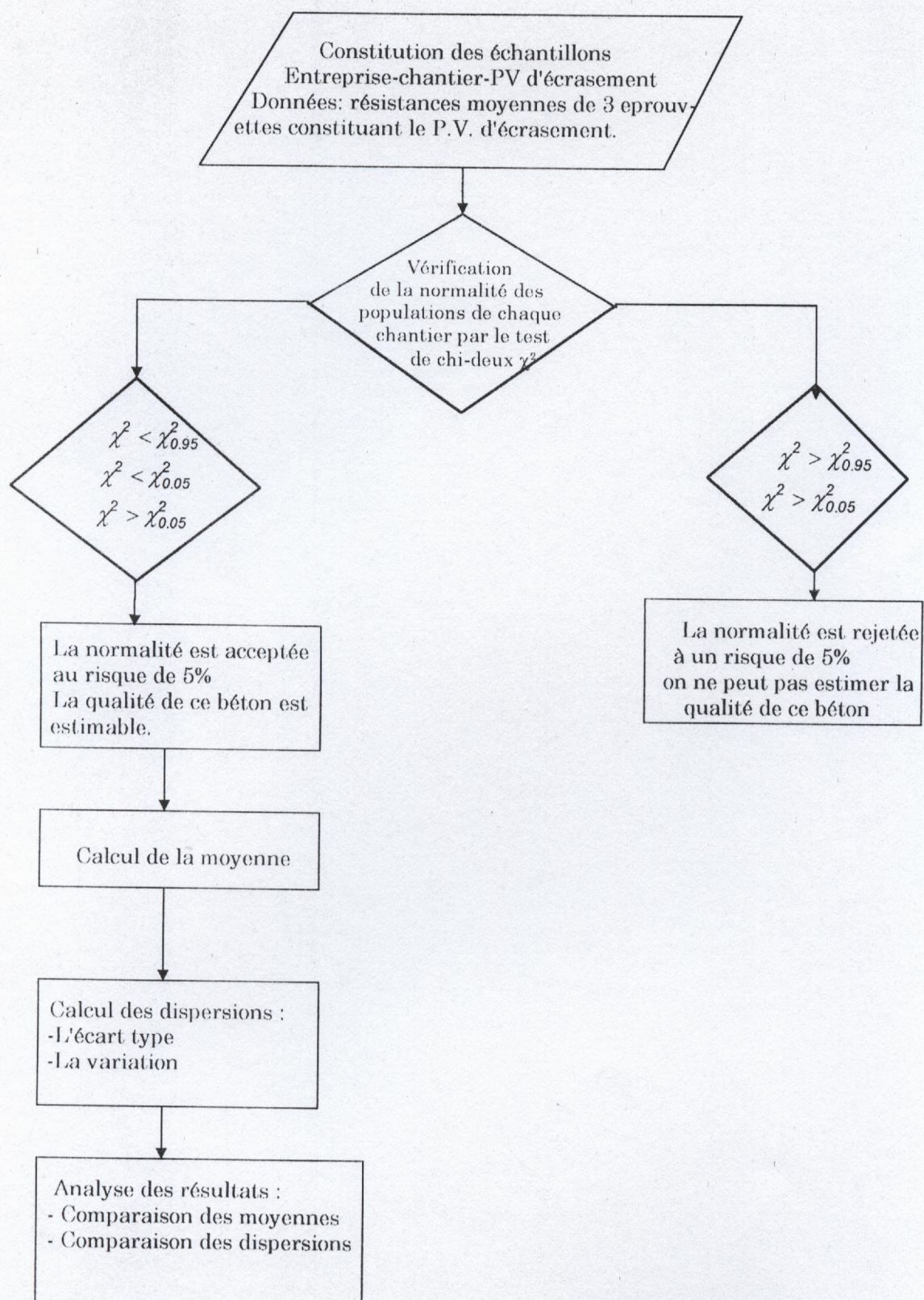


Figure 5.7 : Organigramme résumant la méthode de l'analyse Statistique

5.1.4 Rapports des laboratoires: Exploitation des procès verbaux d'écrasement

5.1.4.1 Identification des chantiers :

Un certain nombre de chantiers opérant dans la région du centre et en particulier à Alger, Blida et Tipaza sera choisi de façon à ce que cet ensemble soit le plus représentatif possible de la région en matière de production du béton.

Pour orienter ce choix, conformément au principe classique de sondage, deux paramètres sont retenus, l'ouvrage et l'entreprise. Le choix de l'ouvrage sera régi par la cadence de production relevée des documents "bilans" élaborés par le ministère de l'habitat. Par contre, le choix des entreprises sera régi quand à lui par un document élaboré par le CNAI (Centre National de l'Animation Technique)[45], dans ce même document, les entreprises sont classées par catégorie de I à VI selon les chiffres d'affaire.

Pour l'étude huit (08) entreprises ont été retenues. Il demeure que l'activité de ces entreprises est assez importante et elle couvre la plus grande partie des réalisations en béton. Donc constituer une "banque de donnée" pour l'étude statistique à partir de ces chantiers ne doit pas affecter la représentativité de l'échantillon.

Cette banque de donnée est constituée de 41 projets dont 26 projets de logement recouvrant 10.000 logements et 15 projets d'équipement.

Les paramètres retenus pour le choix de projets sont :

- a- Catégorie de l'entreprise.
- b- Type de l'ouvrage.
- c- Lieu.
- d- Période de contrôle (1987-1994).

a- Type d'entreprise :

- 54% des projets sont réalisés par les entreprises de catégorie III.
- 12% des projets sont réalisés par les entreprises de catégorie IV.
- 12% des projets sont réalisés par les entreprises de catégorie V.
- 07% des projets sont réalisés par les entreprises de catégorie privé.
- 15% des projets sont réalisés par les entreprises de catégorie VI.

b- Type d'ouvrage :

- 63% de projets sont des logements.
- 37% de projets sont des équipements.

c-Lieu :

- 29% des projets réalisés à Alger
- 32% des projets réalisés à Blida
- 39% des projets réalisés à Tipaza.

5.1.4.2 Exploitation des résultats :

Les résultats d'écrasement réalisés dans les chantiers retenus ont été donnés par le biais des laboratoires agréés, dans le cadre du contrôle de la résistance à la compression à 28 jours.

Les mesures de la résistance du béton de l'ouvrage sont faites par un essai conventionnel sur "n" éprouvettes. Le nombre "n" retenu pour les chantiers est de trois (03) éprouvettes par bétonnage, ce qui constitue un procès verbal (P.V.) d'écrasement.

La banque de donnée qui englobe 2300 P.V. recouvrant les 41 chantiers retenus, a été analysé par le logiciel "STATGRAF".[51]

En réalité les procès verbaux d'écrasement, pris tels qu'ils sont, ne permettent d'exprimer que le béton produit avant qu'il soit introduit dans le coffrage, nous considérons que la mise en oeuvre a eu lieu selon les règles de l'art.

La résistance obtenue lors d'un essai de compression doit avoir plusieurs sens:

- Elle exprime la résistance en compression simple du béton du quel elle a été prélevée.
- Elle donne une idée sur la résistance du béton dans la structure moyennant certaines dispositions constructives et pratiques prises lors de la mise en oeuvre du béton.
- Elle permet aussi de donner une idée sur la durabilité du béton dans la mesure où les conditions de cure et d'environnement sont connues.
- D'où elle permet d'estimer la qualité potentielle d'un béton avant qu'il soit soumis aux conditions de mise en place et de maturité.

C'est dans ce sens que devront profiter les valeurs de résistances obtenues des procès verbaux d'écrasement des éprouvettes en compression simple.

L'objectif de cette partie est d'essayer d'exploiter les résultats d'écrasement pour en tirer ce type d'informations et d'estimer les paramètres statistiques pour caractériser et classer notre béton.

L'exploitation des résultats se fera en trois (3) niveaux que l'on définira comme suit :

Niveau 1: Exploitation globale des P.V. d'écrasement.

Niveau 2: Exploitation des P.V. du béton produit pour chaque projet retenu.

Niveau 3: Exploitation des P.V. du béton produit par entreprise

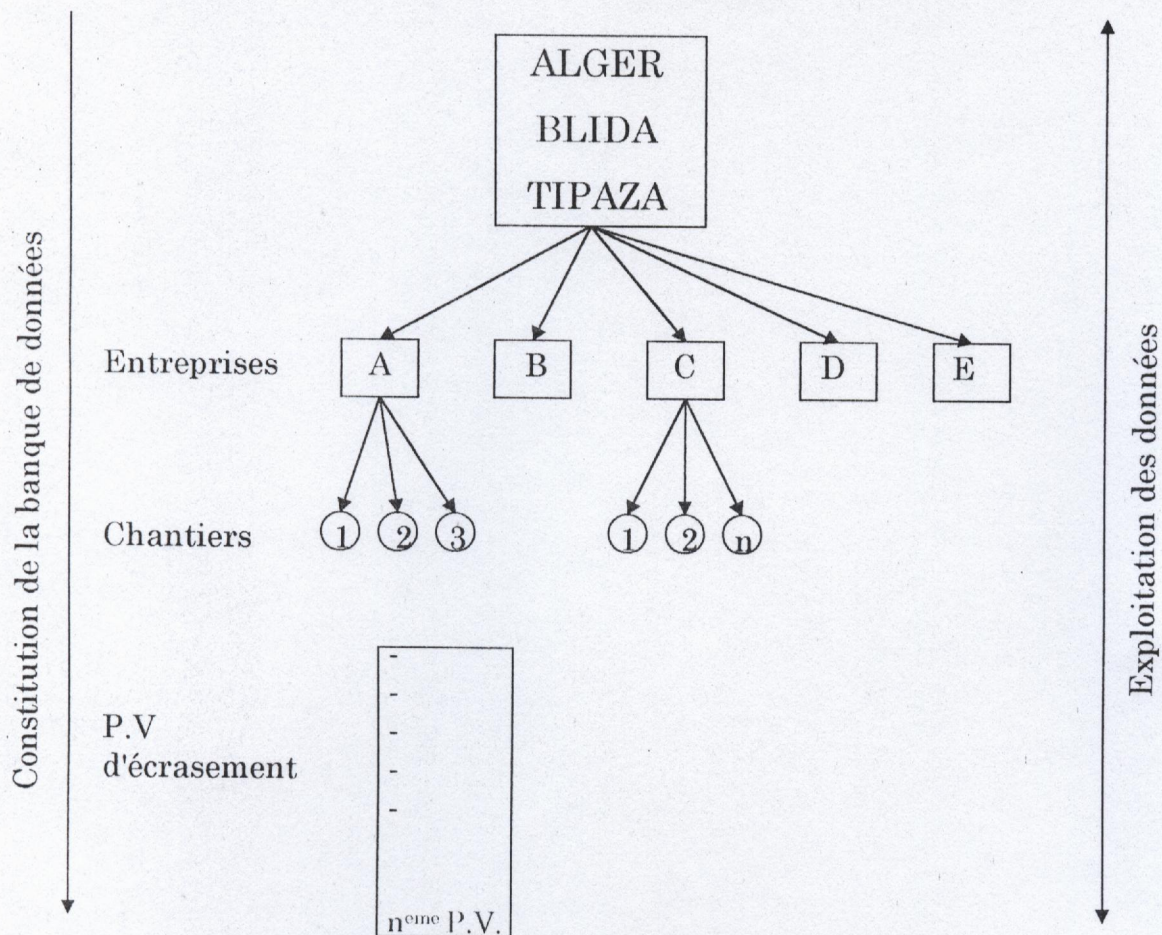


Figure 5.8: L'EXPLOITATION DES P.V.

a- Bases et hypothèses de l'exploitation des P.V.:

La distribution normale théorique "loi de Gauss" est le modèle le plus adéquat pour représenter la distribution des probabilités des résistances observées dans nos chantiers, du moment que 83,0% des chantiers observés sont conformes à cette loi normale et ce qui est comparable aux travaux [28 et 43]. Voir le tableau 5.1.

La figure 5.9 donne un exemple d'un projet type parmi les 41 projets retenus. Consulter l'annexe 1.

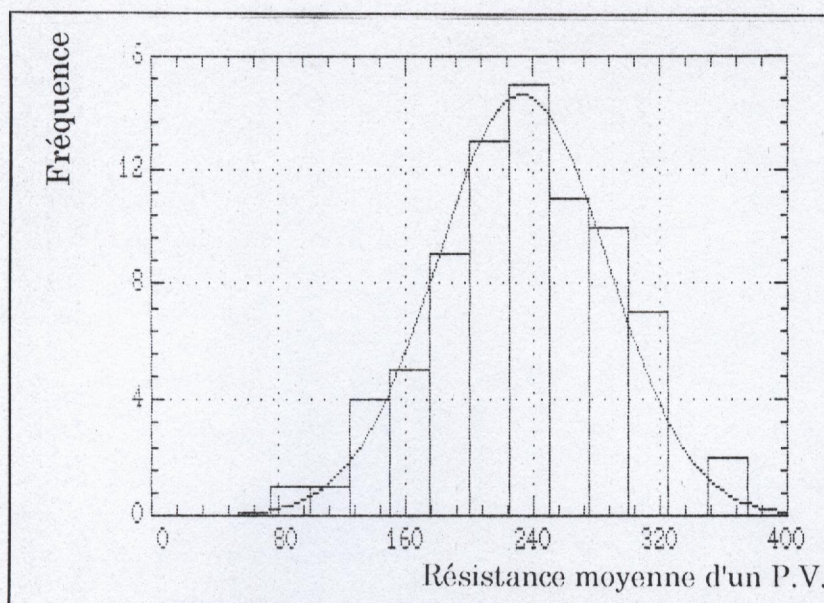


Figure 5.9: La distribution normale théorique et observée des résistances d'un chantier.

La résistance caractéristique qui représente la classe réelle du béton produit dans les 41 chantiers retenus varie entre 50 et 230 bars. Voir Tableau 5.1.

Etant la résistance caractéristique est une valeur théorique, le pourcentage réel des résistances de chantier qui sont inférieurs à cette résistance varie du pourcentage souhaité (5%). Ce pourcentage réel représente le niveau de risque réel pour qu'une résistance soit inférieure à la valeur caractéristique. Dans notre cas, 64,41% des pourcentages réels des résistances en dessous de la résistance caractéristique sont inférieurs à 5%. Voir tableau 5.1. D'où on peut dire que pour une classe donnée du béton, il y a une assez bonne conformité entre le risque théorique 5% et le risque réel.

Donc sur la base de ces deux hypothèses, la conformité à la loi normal et la conformité du risque, on peut dire que la résistance en compression dans nos chantiers peut être estimée, et les exploitations qui en suivent peuvent être justifiées.

Tableau 5.1: Tableau récapitulatif des paramètres statistiques des données de chantiers

Entreprise	Numéro du Projet	Nombre des Procès verbaux (P.V.)	Résistance moyenne à 28 jours (bars)	Ecart type (bars)	Coefficient de variation V (%)	Résistance caractéristique (bars) Rc
A	1	71	129,44	48,37	37,5	50
	2	93	206,92	61,00	29,5	107
	3	203	233,73	58,28	25	138
	4	66	185,62	49,75	27	104
	5	78	233,16	53,19	23	146
	6	88	267,22	54,33	20,3	178
	7	112	191,08	47,88	25	113
B	8	33	172,68	30,78	18	122
	9	63	183,51	45,46	25	109
	10	31	202,93	38,76	19	139
	11	68	205,11	44,27	22	133
	12	51	274,00	32,60	12	221
	13	61	228,30	42,78	19	158
C	14	57	212,56	49,82	23	131
	15	37	193,70	54,27	28	105
	16	38	195,93	44,67	23	123
	17	61	200,43	55,83	28	109
	18	17	196,30	48,31	25	117
D	19	43	216,70	43,61	20	145
	20	75	263,25	72,97	28	144
	21	18	294,17	79,49	27	164
E	22	35	242,89	10,14	4	226
	23	44	250,89	13,09	5	229
	24	34	245,15	9,39	4	230
	25	81	243,74	8,36	3	230
	26	32	240,66	7,05	3	229
	27	66	245,38	9,02	4	231
	28	34	244,15	8,14	3	231
	29	53	250,60	12,45	5	230
	30	37	244,92	9,05	4	230
	31	38	192,49	51,09	27	109
F	32	26	207,30	51,49	25	123
G	33	149	229,95	24,76	11	189
	34	38	208,68	40,95	20	142
	35	27	236,23	32,53	14	183
	36	55	243,66	62,56	26	141
	37	41	222,14	57,78	26	127
	38	32	248,54	12,04	5	229
H	39	47	252,59	82,30	33	118
	40	16	289,20	72,26	25	171
	41	47	280,27	70,18	25	165

Pourcentage réel des valeurs en dessous de Rc	Test de Chi-deux X^2 (degré de liberté)	Conformité à la loi normal.
2,82	2,44(8)	Très bonne (T.B)
3,22	6,32(9)	Bonne (B)
5,42	14,26(16)	Bonne
0	12,66(7)	Bonne
6,41	0,64(6)	T.B
6,82	8,27(7)	B
7,14	12,59(9)	B
3,02	0,056(2)	T.B
3,17	2,79(7)	B
3,22	6,16(3)	B
5,88	7,00(7)	B
0	20,11(5)	Mauvaise (M)
6,56	5,80(6)	B
7,01	0,93(6)	T.B
0	3,86(3)	B
2,63	4,66(4)	B
0	5,44(4)	B
5,88	1,39(1)	B
4,65	6,20(4)	B
9,46	8,85(8)	B
5,55	0,54(1)	B
0,00	7,78(3)	M
0	2,21(4)	B
0	0,15(2)	B
2,47	20,94(9)	M
0	2,98(3)	B
0	12,98(6)	M
0	2,78(3)	B
3,77	7,33(6)	B
0	4,85(3)	B
2,63	6,59(4)	B
3,85	1,52(3)	B
8,05	60,69(16)	M
5,26	3,85(4)	B
0	3,13(2)	B
1,82	10,83(4)	M
7,32	2,14(4)	B
3,13	1,70(3)	B
2,13	7,68(3)	M
6,25	0,99(1)	B
6,38	6,66(5)	B

7 chantiers sont d'une mauvaise conformité.
 34 chantiers sont d'une bonne et très bonne conformité
 c'est à dire: **83%**

b- Exploitation globale des P.V. d'écrasement :

A ce niveau, on s'intéresse aux résistances moyennes, et aux écart types obtenus dans chaque opération de contrôle, effectuée sur trois (3) éprouvettes, lors d'une opération de bétonnage.

Résistances moyennes :

La résistance moyenne de chaque P.V. varie de 100 à 300 bars dont la répartition est comme suit :

18% des moyennes sont inférieurs à 160 bars.

21% des moyennes sont comprises entre 160 et 200 bars.

38% des moyennes sont comprises entre 200 et 250 bars.

23% des moyennes sont supérieurs à 250 bars.

La figure 5.10 montre que 39% des résistances moyennes obtenues dans chaque opération de bétonnage sont inférieurs à 200 bars. On note que cette répartition des résistances est faite avec un risque de non atteinte égal à 05%.

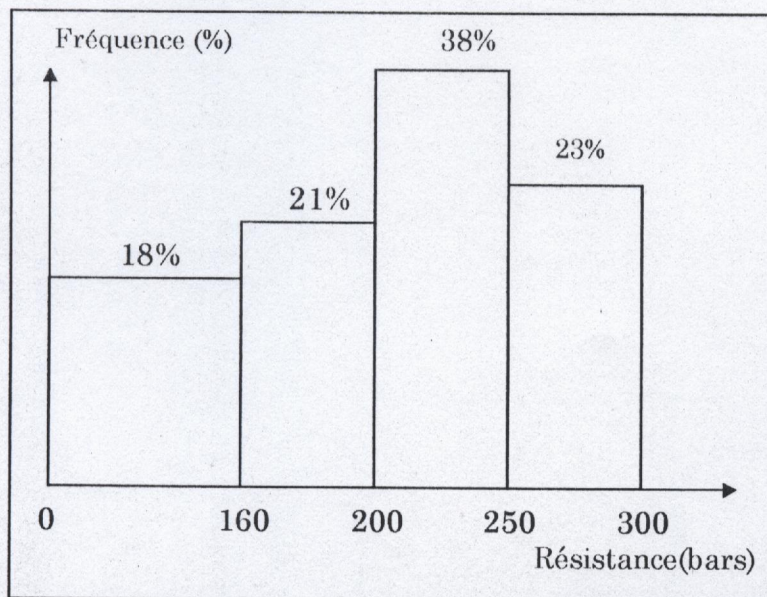


Figure 5.10: La répartition des résistances moyennes des P.V. d'écrasement pour les 41 chantiers retenus.

Ecart types :

Les écart types varient et se répartissent comme suit :

30% des écart types sont inférieurs à 10 bars .

17% des écart types sont compris entre 10 et 15 bars .

13% des écart types sont compris entre 15 et 20 bars .

12% des écart types sont compris entre 20 et 25 bars .

07% des écart types sont compris entre 25 et 30 bars .

21% des écart types sont supérieurs à 30 bars.

La figure 5.11 montre que 47% des écart types dans chaque opération de bétonnage sont inférieurs à 15 bars.

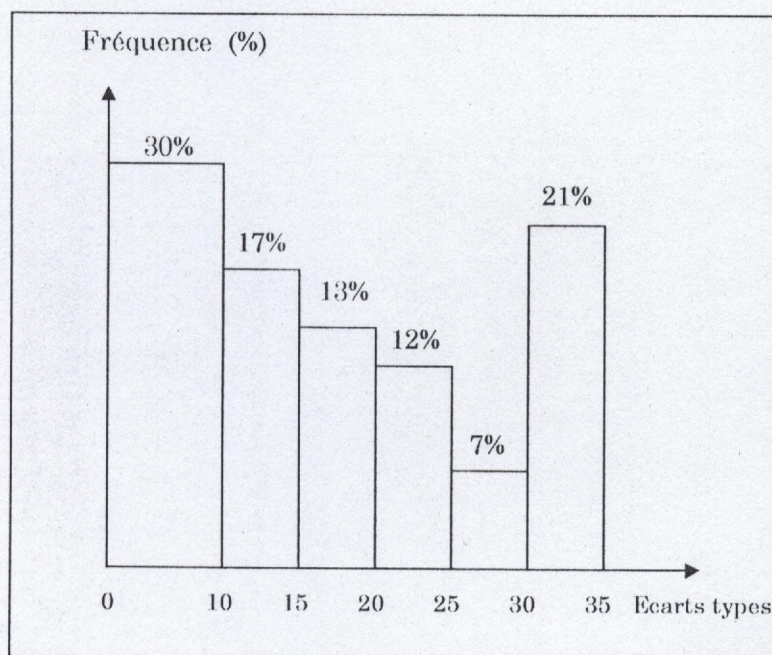


Figure 5.11: La répartition des écart types des résistances des P.V. pour les 41 chantiers retenus.

Relation résistances moyennes-écart types :

La consultation des graphes résistance moyenne-écart type (f_c, σ) obtenus dans chaque opération de bétonnage montre une indépendance totale entre ces deux grandeurs. Consulter l'annexe 2.

La figure 5.12 montre la relation entre les résistances moyennes et les écarts types par opération de bétonnage dans quelques chantiers types.

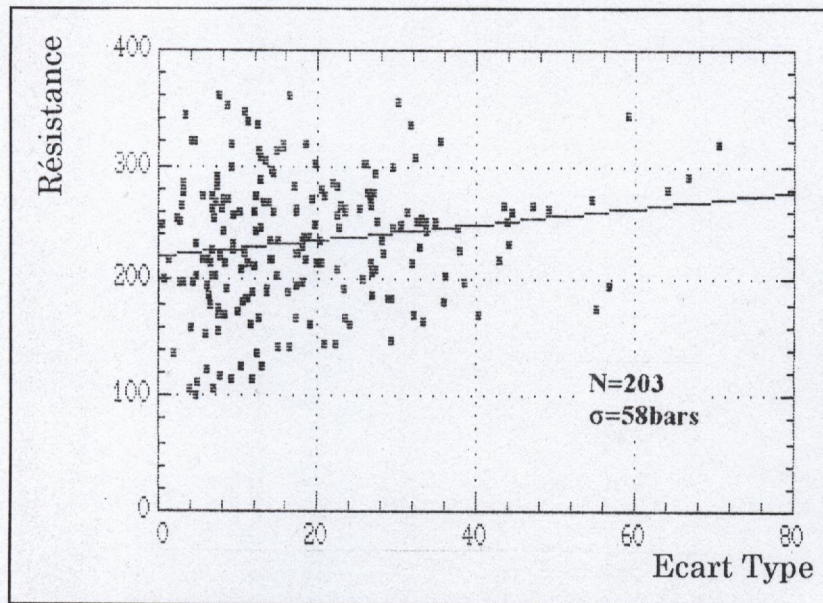


Figure 5.12-a

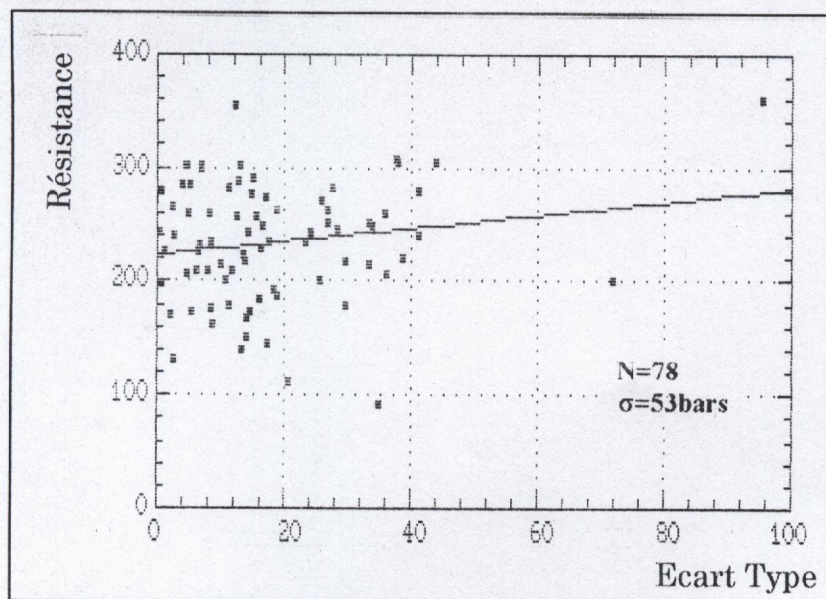


Figure 5.12-b

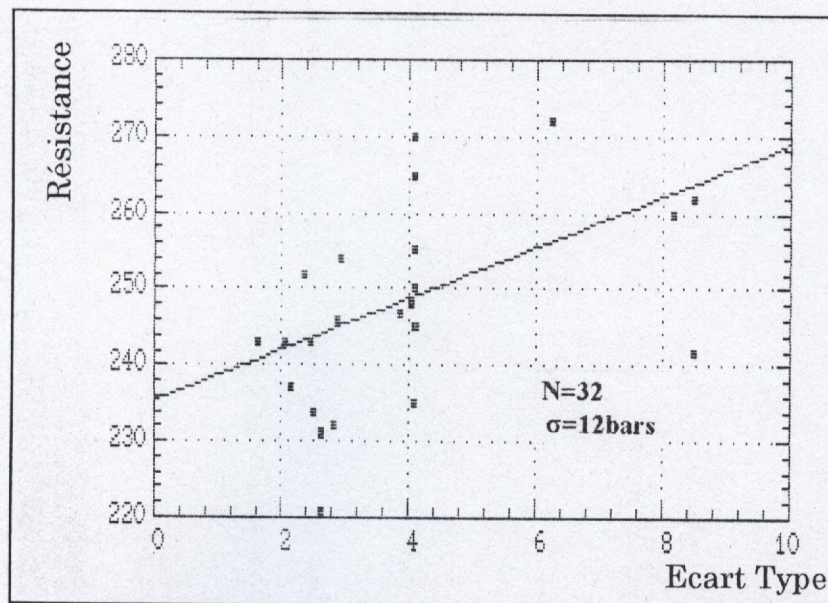


Figure 5.12-c

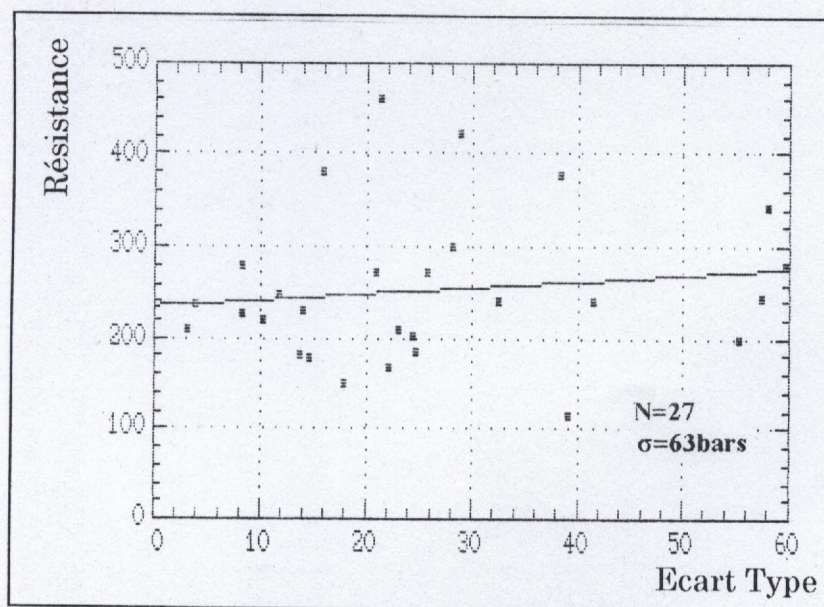


Figure 5.12-d

Figure 5.12: La relation entre les résistances moyennes et les écarts types par opération de bétonnage dans 4 chantiers types.

Ces mêmes graphes représentent une concentration zonale plus prononcée à partir de la valeur de N (nombre de P.V.) supérieur à 45, pour des valeurs de l'écart type par projet inférieur à 60 bars. Voir figure 5.10.a et 5.10.b. Dans le cas où N est inférieur à 45, cette concentration apparaît pour des valeurs de l'écart type par projet inférieur à 35 bars. Voir figure 5.10.c. Pour des valeurs de N inférieur à 15 et pour des valeurs de l'écart type par projet supérieurs à 60 bars, les dispersions sont assez importantes pour faire apparaître une certaine concentration. Voir figure 5.10.d. Cette idée mérite une investigation plus approfondie pour définir le nombre minimal de contrôle afin de déterminer la classe du béton produit par une entreprise donnée indépendamment des aléas journaliers de production (main d'oeuvre et matériaux).

Résultats :

La consultation des procès verbaux d'écrasement d'éprouvettes fait remarquer que les résistances sont uniformément réparties dans l'intervalle 100-300 bars et les écarts types sont relativement faibles pour une dispersion entre gâchées. Ce qui pourrait nous permettre de conclure que les prélèvements de contrôle sont effectués sur une seule gâchée.

Aussi, les courbes des relations entre les résistances moyennes et les écarts types par bétonnage (figure 2.12 et annexe 2) montrent qu'il est possible d'affecter à chaque entreprise un facteur qui désigne le couple (f_m, σ) indépendamment des fluctuations des matériaux et de la main d'oeuvre. Ces paramètres pourront exprimer la faculté que présente une entreprise à surpasser les aléas du chantier et à produire un béton bien défini c'est à dire "classé". Donc ces paramètres pourraient être un excellent critère de classification des entreprises.

c- Exploitation des P.V. du béton produit pour chaque projet :

A ce stade, on s'intéresse aux résistances moyennes et leurs écarts types du béton de l'ouvrage. Ces résistances sont données par chantier à partir d'un nombre N de P.V. obtenu durant la vie de ce chantier.

Résistances moyennes :

Pour chaque chantier, les P.V. d'écrasement sont consultés pour estimer la résistance du béton de l'ouvrage. L'exploitation des résistances moyennes d'un ouvrage peut se faire de deux manières :

- Si nous considérons que notre béton est déjà défini c'est à dire nous connaissons la moyenne et l'écart type. Quelle est la probabilité d'avoir la résistance moyenne journalière supérieurs à f_c et quel est le risque encouru pour qu'elle soit inférieur à f_c .
- Si nous voulons chercher le risque adéquat, à quel risque devons nous travailler pour garantir $P\%$ de valeur supérieur à la valeur caractéristique.

Au début, on voulait comparer les résistances à 270 bars qui est la résistance moyenne visée dans les chantiers, avec une résistance caractéristique correspondante égale à 250 bars, la valeur qui est généralement retenue pour les calculs des éléments structurels. Or les valeurs obtenues dans le tableau 5.2 nous ont dirigé vers 160 bars comme résistance qui peut être proche à une résistance caractéristique dans les chantiers retenus. Le tableau 5.2 montre que 60% des chantiers ont un risque supérieur à 5% d'avoir une résistance moyenne inférieure à 160 bars, alors que dans les règlements étrangers en aucun cas on doit être au dessus de 5%. Voir chapitre 4.

La répartition des risques est comme suit :

- 45% des chantiers ont un risque inférieur à 10%
- 25% des chantiers ont un risque compris entre 10 et 20%
- 20% des chantiers ont un risque compris entre 20 et 30%
- 10% des chantiers ont un risque supérieur à 30%.

Donc, même si on permet une résistance caractéristique de 160 bars (16 MPa) dans nos chantiers, il paraît qu'en appliquant les règlements étrangers, 60% des

chantiers observés sont des cas hors normes. La question qui peut être posée est : est ce que le risque de 5% peut être atteint par nos chantiers, et quel risque maximum devons nous fixer tout en préservant l'aspect économique ?.

La résistance caractéristique augmente proportionnellement au risque toléré. Le tableau 5.3 montre qu'en passant de 2,5 à 5 à 10 à 15% de risque, le taux des chantiers qui ont une résistance caractéristique inférieur à 160 bars passe de 66% à 59% à 46% à 32% respectivement. Cette baisse insuffisante des chantiers "hors normes" en augmentant le risque accepté est due au fait que les dispersions inter-bétonnage sont relativement excessives par rapport à la moyenne qui est elle même assez faible. Une simple comparaison avec les travaux d'ELDOSOKY, de SOROKA, et de DREUX [28,29 et 30] nous fait remarquer que des valeurs équivalentes de l'écart type sont obtenues pour des résistances moyennes de l'ordre de 300 bars.

Tableau 5.2 : Le risque encouru pour que $f_{m \text{ chantier}} < 250$ bars et $f_{m \text{ chantier}} < 160$ bars.

Entreprise	N° du projet	résistance moyenne (bars)	L'écart type (bars)	$k = \frac{R_f - 250}{\sigma}$	P($R_i < 250b$) risque encouru pour $R_c = 250b$ (%)	$k = \frac{R_f - 160}{\sigma}$	P($R_i < 160b$) risque encouru pour $R_c = 160b$ (%)
A	1	129	48	-2.5	99	-0.64	74
	2	207	61	-0.71	76	0.77	22
	3	234	58	-0.28	61	1.27	10
	4	186	50	-1.29	90	0.51	31
	5	233	53	-0.32	63	1.38	08
	6	267	54	+0.32	37	1.97	03
	7	191	48	-1.23	89	0.65	26
B	8	173	31	-2.51	99	0.41	34
	9	184	45	-1.46	93	0.52	30
	10	203	39	-1.21	89	1.11	13
	11	205	44	-1.01	84	1.02	15
	12	274	33	+0.74	23	3.5	00
	13	228	43	-0.51	70	1.6	05
C	14	213	50	-0.75	77	1.05	15
	15	194	54	-1.04	85	0.62	27
	16	196	45	-1.21	89	0.80	21
	17	200	56	-0.89	81	0.72	24
	18	196	48	-1.11	87	0.75	23
D	19	217	44	-0.76	78	1.30	10
	20	263	73	+0.18	43	1.41	08
	21	294	79	+0.56	29	1.69	05
E	22	243	10	-0.70	76	8.17	0
	23	251	13	+0.07	47	6.94	0
	24	245	09	-0.52	70	9.07	0
	25	244	08	-0.75	77	10.02	0
	26	241	07	-1.32	91	11.44	0
	27	245	09	-0.51	70	9.47	0
	28	244	08	-0.72	76	10.34	0
	29	251	12	+0.048	48	7.28	0
	30	245	09	-0.56	71	9.38	0
F	31	192	51	-1.13	87	0.64	26
	32	207	51	-0.83	80	0.92	18
G	33	230	25	-0.81	79	2.83	00
	34	209	41	-1.00	84	1.19	12
	35	236	33	-0.42	66	2.34	01
	36	244	63	-0.10	54	1.34	09
	37	222	58	-0.48	68	1.08	14
	38	249	12	-0.12	55	7.35	00
H	39	253	82	+0.031	49	1.13	13
	40	289	72	+0.54	29	1.79	04
	41	280	70	+0.43	33	1.71	04

Tableau 5.3: La résistance caractéristique (bars) pour un risque de non atteinte P%

Entreprise	Numéro du projet	Résistance moyenne f_m (bars)	Ecart type par projet σ (bars)	La résistance caractéristique (f_c) pour un risque de non atteinte P			
				P=2,5 %	P=5%	P=15%	P=10%
A	1	129,44	48,37	35	50	79	68
	2	206,92	61,00	87	107	143	129
	3	233,73	58,28	120	138	173	159
	4	185,62	49,75	88	104	134	122
	5	233,16	53,19	129	146	178	165
	6	267,22	54,33	161	178	211	198
	7	191,08	47,88	97	113	141	130
B	8	172,68	30,78	112	122	141	133
	9	183,51	45,46	94	109	136	125
	10	202,93	38,76	127	139	163	153
	11	205,11	44,27	118	133	159	148
	12	274,00	32,60	210	221	240	232
	13	228,30	42,78	144	158	184	174
C	14	212,56	49,82	115	131	161	149
	15	193,70	54,27	87	105	137	124
	16	195,93	44,67	108	123	149	139
	17	200,43	55,83	91	109	142	129
	18	196,30	48,31	102	117	146	134
D	19	216,70	43,61	131	145	171	161
	20	263,25	72,97	120	144	187	170
	21	294,17	79,49	138	164	212	192
E	22	242,89	10,14	223	226	232	230
	23	250,89	13,09	225	229	237	234
	24	245,15	9,39	227	230	235	233
	25	243,74	8,36	227	230	235	233
	26	240,66	7,05	227	229	233	232
	27	245,38	9,02	228	231	236	234
	28	244,15	8,14	228	231	236	234
	29	250,60	12,45	226	230	238	235
	30	244,92	9,05	227	230	236	233
F	31	192,49	51,09	92	109	139	127
	32	207,30	51,49	106	123	154	141
G	33	229,95	24,76	181	189	204	198
	34	208,68	40,95	128	142	166	156
	35	236,23	32,53	172	183	202	195
	36	243,66	62,56	121	141	179	164
	37	222,14	57,78	109	127	162	148
	38	248,54	12,04	225	229	236	233
H	39	252,59	82,30	91	118	167	147
	40	289,20	72,26	148	171	214	197
	41	280,27	70,18	143	165	207	190

La dispersion :**-L'étendue:**

La plage (ou l'étendue) dont laquelle peuvent se situer les résistances à la compression dans nos chantiers est très grande. Pour apparaître sa grandeur, on a choisi 18 chantiers parmi les 41 retenus comme le montre le tableau 5.4.

Tableau 5.4: Les étendues des résistances dans 18 chantiers choisis.

Entreprise	Chantier	$R_{\max}$ (bars)	$R_{\min}$ (bars)	Etendue (bars)
A	2	350	89	261
	3	360	91	269
	5	361	100	260
B	9	300	94	206
	10	262	122	140
	11	292	98	194
C	14	322	103	219
	17	368	116	252
	18	266	96	170
D	19	277	89	188
	20	390	42	348
F	31	329	97	232
	32	307	94	213
G	34	313	126	187
	36	380	114	266
	38	272	221	51
H	39	452	126	326
	41	389	115	274

-Le coefficient de variation :

Dans les chantiers retenus, le coefficient de variation (V) varie entre 03% et 38% (voir tableau 5.1) repartit comme suit :

- 44 % des chantiers ont un $V \geq 25\%$
- 17 % des chantiers ont un $20\% < V < 25\%$
- 07 % des chantiers ont un $15\% < V < 20\%$
- 07 % des chantiers ont un $10\% < V < 15\%$
- 24 % des chantiers ont un $V < 10\%$

En rappelant que le coefficient de variation dans les travaux [28,29 et 30] est considéré comme étant un indice de la régularité de la production du béton, et en se référant aux valeurs des variations en fonction de la régularité proposé par Dreux [30] on note que:

- 44% des chantiers sont d'une régularité mauvaise.
- 17% des chantiers sont d'une régularité passable.
- 07% des chantiers sont d'une régularité bonne.
- 07% des chantiers sont d'une régularité excellente.

24% des chantiers ont une régularité identique à celle d'un béton de laboratoire pour un contrôle excellent et ce malgré les aléas du chantier. Si nous considérons que cette dernière catégorie de variation ne peut pas être celle des résistances du béton d'un ouvrage. Les valeurs de variation citées ci-dessus deviennent :

- 58% des chantiers sont d'une régularité mauvaise.
- 23% des chantiers sont d'une régularité passable.
- 10% des chantiers sont d'une régularité bonne.
- 09% des chantiers sont d'une régularité excellente.

Cette irrégularité peut être rendue au fait que le béton n'est jamais comparé à un béton témoin, ce qui laisse comprendre qu'il n'y a pas un suivi des compositions du béton.

-L'écart type :

Dans les chantiers retenus, les écarts types σ varient de 8 à 82 bars. Voir tableau 5.1.

Si on considère que l'écart type est un indice de la maîtrise de la technologie de production du béton en terme de surveillance et du contrôle de la qualité, et en se basant sur les travaux de Eldosoky [28] et Dreux [30] et en terme d'écarts types qui peuvent être estimés à partir des éprouvettes des chantiers soumis à d'excellent, très bon, bon, passable et un mauvais degré de contrôle de qualité, sont inférieurs à 30 bars, 30-40, 40-50, 50-70 et 70-90 bars respectivement, on note que :

- 12% des chantiers sont soumis à un mauvais contrôle.
- 24% des chantiers sont soumis à un contrôle passable.
- 27% des chantiers sont soumis à un bon contrôle.
- 10% des chantiers sont soumis à un très bon contrôle.
- 03% des chantiers sont soumis à un excellent contrôle.
- 24% des chantiers sont soumis à un excellent contrôle identique à celui d'un béton d'un même bétonnage et non pas d'un interbétonnage.

Dans le cas où nous ne considérons pas cette dernière catégorie d'écarts types on note:

- 03% de chantier avec $\sigma < 30$ bars.
- 13% de chantier avec $30 < \sigma < 40$ bars.
- 61% de chantier avec $40 < \sigma < 60$ bars.
- 23% de chantier avec $\sigma > 60$ bars.

D'après la figure 5.13, on remarque que les écarts types varient suivant la loi normale d'une bonne conformité, et même en éliminant la catégorie identique à celle d'un béton d'un même bétonnage, la répartition est toujours normale. La normalité et la concentration remarquées autour d'un écart type égale à 50 bars peuvent être expliquées par l'existence d'un mode prépondérant de fabrication du béton indépendamment des moyens et des équipements disponibles pour chaque chantier.

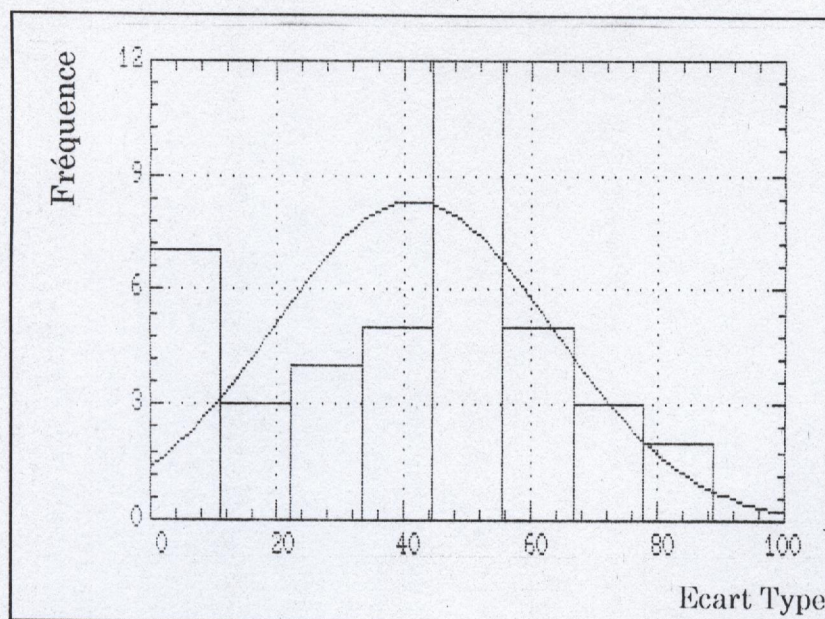


Figure 5.13: La distribution des fréquences des écarts types des chantiers observés.

Résultats :

Le béton produit dans tous les chantiers consultés présente des fluctuations importantes de la résistance entre les différents bétonnages (étendue, coefficient de variation et écart type), ce qui laisse comprendre que la résistance court un grand risque de ne pas atteindre la classe d'où la qualité voulue. De là, l'aspect économique est absent.

D'après les différentes formes de fluctuation de la résistance entre les différents bétonnages on conclut que :

- Le béton n'est pas comparé à un béton témoin. En un autre mot, même si l'étude existe, elle ne joue pas son rôle de recherche des compositions devant répondre à une certaine exigence, c'est à dire , elle n'a pas de valeur.
- Le contrôle n'est pas utilisé comme moyen de régulation.
- Il existe un mode prépondérant de confection et de fabrication du béton indépendamment des moyens disponibles dans les chantiers.

Toutefois, cette dispersion importante rend difficile la prononciation à partir d'une opération de contrôle sur la résistance de la structure, car avec cette dispersion

importante, le contrôle ne peut en aucun cas exprimer la population mère, c'est à dire, le béton de l'ouvrage.

d-Exploitation des P.V. du béton produit par entreprise :

A ce niveau on s'intéresse au béton produit par entreprise.

Résistance moyenne :

En consultant les résistances moyennes par chantier dans une même entreprise, (voir tableau 5.1) on constate qu'aucune classe n'est imposante. Ce qui laisse penser que les chantiers retenus peuvent être considérés comme appartenir à une même entreprise.

La figure 5.14 montre que les résistances moyennes dans les chantiers retenus varient de 129 bars à 294 bars et leurs distribution de fréquence suit très conformément la loi normale "Gauss" avec une moyenne de 223 bars. Ce qui justifie notre hypothèse de considérer que les chantiers retenus appartiennent à une même entreprise. De là, on peut dire que : la résistance moyenne dans nos chantiers converge vers une résistance prépondérante et estimable. Cette résistance ne peut être qu'une propriété intrinsèque du béton produit liée à la composition du béton et à la qualité des matériaux indépendamment des aléas de production. En terme d'estimation, on a estimé cette valeur intrinsèque du béton produit dans le centre Algérien entre 205 et 253 bars au niveau de risque 5%. Voir tableau 5.5

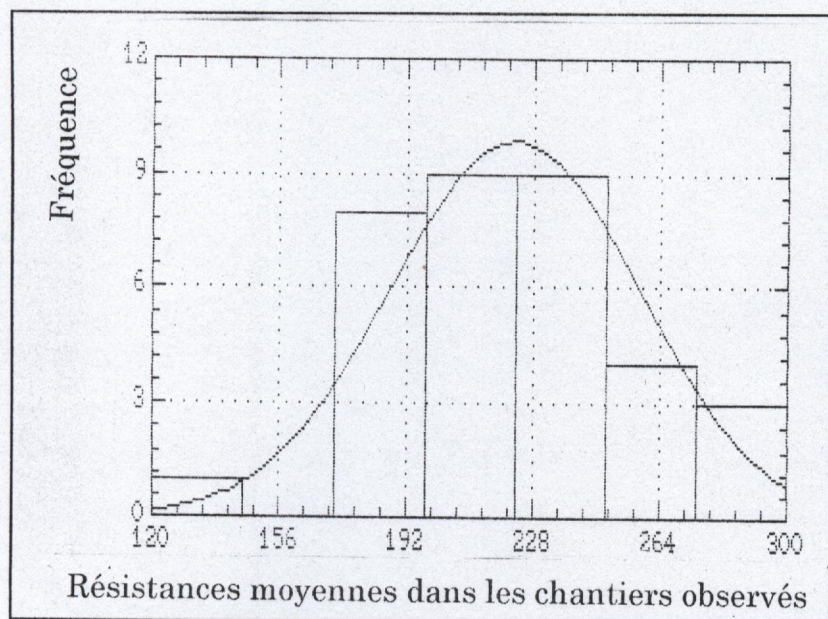


Figure 5.14: La distribution des fréquences, des résistances moyennes des chantiers observés.

Tableau 5.5 : Estimation des paramètres statistiques des bétons

Numero du projet	Intervalle de confiance de la moyenne des résistances produites dans le chantier pour le niveau de sécurité 95% [bars]	Intervalle de confiance de l'écart type des résistances produites dans le chantier Pour le niveau de sécurité 95% [bars]	Intervalle de confiance de la moyenne des résistances produites dans les chantiers par entreprise [bars]	Intervalle de confiance de l'écart type des résistances produites dans les chantiers par entreprise [bars]
1	118-140	42-58	166-248	49-58
2	195-219	53-71		
3	226-242	51-68		
4	174-198	43-60		
5	221-245	46-63		
6	256-279	47-64		
7	182-200	42-56		
8	162-183	25-41	172-225	33-48
9	172-195	39-55		
10	189-217	31-52		
11	195-216	38-53		
12	non-estimable	non-estimable		
13	218-239	36-52		
14	200-225	42-61	190-209	45-56
15	176-211	44-70		
16	182-210	36-58		
17	186-214	47-68		
18	173-219	36-74		
19	204-230	36-55	161-355	18-113
20	247-280	63-87		
21	255-334	60-119		
22	N.E	N.E	242-250	7 12
23	247-255	11 17		
24	242-248	8 12		
25	N.E	N.E		
26	238-243	6 9		
27	N.E	N.E		
28	241-247	7 11		
29	247-254	10 15		
30	242-248	7 12		
31	176-209	42-66	106-294	49-54
32	186-228	40-71		
33	N.E	N.E	188-257	12 76
34	196-222	33-53		
35	223-249	26-45		
36	N.E	N.E		
37	204-240	47-74		
38	N.E	N.E		
39	251-328	53-112	228-341	58-84
40	260-300	58-88		
41	244-253	10 16		

produits dans les chantiers du centre Algerien

Intervalle de confiance de la résistance moyenne produite dans le centre Algerien (bars)	Intervalle de confiance de l'ecart type des résistances produites dans le centre Algerien (bars)
205-253	28-60

Le nombre minimal d'essais permettant de déterminer la résistance moyenne dans l'intervalle de confiance souhaité $[-k\bar{f}, +k\bar{f}]$ est donné par la formule suivante :

$$n \geq \left[\frac{S}{k\bar{f}} t_{1-\alpha/2, \mu} \right]^2 \dots\dots\dots (5.19)$$

Sachant que : $V(\%) = \frac{S}{\bar{f}}$ d'où $n \geq \left[\frac{V}{k} t_{1-\alpha/2, \mu} \right]^2$

$t_{1+\alpha/2, \mu}$ est le fractile d'ordre $1-\alpha/2$ de la loi de Student à $n-1$ degré de liberté, dépendant de n .

A partir de cette inéquation, on peut déterminer le nombre minimal d'essais par bétonnage (nombre de prélèvement "n" par procès verbal). A ce niveau ($S, \bar{f}$) représentent respectivement l'écart type et la résistance moyenne par P.V. Comme on peut déterminer le nombre minimale d'essais par chantier (nombre minimal "N" de P.V. pour caractériser et classer un chantier.

Pour ce faire, il faut connaître l'intervalle de confiance du coefficient de variation des résistances d'un même P.V. lorsqu'il s'agit du nombre "n" et d'un même chantier lorsqu'il s'agit du nombre "N". A partir d'un coefficient de variation maximal appartenant à cet intervalle de confiance, on estime ce nombre minimal. En d'autre terme, à partir d'une variation donnée, nous déterminons le nombre minimal de prélèvement (par bétonnage ou par chantier) pour que leur résistance soit dans un intervalle $[-k\bar{f}, +k\bar{f}]$. D'après l'estimation du béton au risque de 5%, la population des résistances est définie dans un intervalle de confiance $[-0.1f_m, +0.1f_m]$. f_m représente la résistance moyenne de la population estimée.

Le nombre minimal de prélèvement par bétonnage (par P.V.):

D'après l'estimation de la variation (coefficient de variation) des résistances dans les procès verbaux des chantiers retenus, on détermine le nombre minimal de prélèvement permettant de déterminer la résistance moyenne dans l'intervalle de confiance souhaité $[-0.1\bar{f}, +0.1\bar{f}]$. $\bar{f}$ représente la résistance moyenne des différents bétonnage.

Pour les différentes entreprises retenues, à un risque d'erreur de 5%, la valeur minimale de prélèvement est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 5.6: La valeur minimale de prélèvement retenue pour chaque entreprise.

ENTREPRISE	A	B	C	D	F	G	H
Nombre minimal d'éprouvette	8	9	6	9	12	14	6

Donc, la taille des échantillons doit être au moins égale à 6 par P.V. par âge pour avoir 95% de chance d'avoir la résistance moyenne f_m dans un intervalle $[-0.10\bar{f}, +0.10\bar{f}]$ qui permet l'estimation de la population d'où l'estimation de la résistance de l'ouvrage.

Le nombre minimal pour caractériser et classer le béton d'un chantier :

D'après l'estimation du coefficient de variation des résistances dans les chantiers retenus qui a donné l'intervalle [14%-28%], on détermine le nombre minimal de P.V. permettant de déterminer la résistance du béton de chantier dans un intervalle de confiance souhaité $[-0.1f_{ch}, +0.1f_{ch}]$. f_{ch} représente la résistance moyenne du béton de chantier. Pour $V=28\%$, le nombre minimal de P.V. par chantier est égal à 33. Ce nombre permet d'identifier et classer le béton du chantier en question.

5.2 - Diagnostic des moyens de confection du béton :

5.2.1 Introduction :

La partie statistique a montré des insuffisances et des défaillances dans la fabrication et dans le contrôle du béton produit. La partie diagnostic va confirmer ces défaillances et identifie les causes sources pour y remédier par des recommandations adéquates.

Pour ce faire, un inventaire de caractéristiques des matériaux utilisés a été fait. On a procédé à un recueil d'informations concernant les caractéristiques physico-mécaniques des granulats et ciments utilisés dans la région centre par les entreprises choisies et durant la même période de collecte (87-94) des résistances à la compression pour l'analyse statistique. Une fiche d'information technique a été élaborée, destinée vers les entreprises choisies. Cette fiche technique peut être consultée dans l'annexe 3. La réponse aux questionnaires de la fiche a été faite par deux manières : par un remplissage direct et par "question - réponse" sur chantier. La fiche comporte trois (3) aspects :

- Caractéristiques techniques et moyens de fabrication du béton utilisés en structures.
- Contrôle de la qualité du béton et les matériaux constitutifs.
- Technique et moyen de mise en place du béton.

L'objectif de cette partie est d'identifier les sources de variation observées dans l'analyse statistique et de déterminer le niveau de qualité des bétons fabriqués par les entreprises choisies à travers les risques encourus dans la confection et la mise en oeuvre de ces bétons.

5.2.2 Identification des matériaux utilisés :

Pendant la période 1987-94, plusieurs matériaux, fréquemment utilisés, ont été recensés. Les origines de ces matériaux sont les plus fréquentes des bétons, dont les résistances ont été collectées dans la partie statistique. On a enregistré; six (6) origines de sable, trois (3) origines de gravier et quatre (4) origines de ciment.

5.2.2.1 Les granulats:

a) Les sables :

Parmi les origines des sables utilisées dans la confection du béton dans les trois (3) wilayas étudiées (Alger, Blida et Tipaza), on a collecté et analysé six (6) origines qui sont les plus fréquentes. Pour la même origine, on a trouvé au moins huit (08) courbes granulométriques différentes. Voir figure 5.15 par exemple. Pour toute origine confondue, on a 46 courbes granulométriques de sables.

Nos sables sont issus de deux (2) grandes origines, la mer et l'oued. En analysant les courbes granulométriques de nos sables et en les comparant au fuseau recommandé par DREUX [07], on remarque que nos sables (mer et oued) leur manque les éléments fins inférieurs à 0,2mm. C'est ces éléments qui doivent participer à la plasticité du béton frais sans compromettre pour cela le béton dans le chantier par un éventuel ajout d'eau pour faciliter l'ouvrabilité [07].

Les courbes granulométriques des six (6) origines du sables sont données par les figures 5.15 à 5.20.

Dans la même origine du sable, ce dernier se définit dans un fuseau considéré comme large si on connaît l'étendue de son module de finesse qui varie entre 1,01 et 2,86 dans les six (6) origines du sable choisies. Cette fluctuation dans la granulométrie du sable peut affecter nettement les proportions du sable dans la composition du béton. La chose qui peut se passer sachant que les compositions dans les centrales ne sont jamais vérifiées et corrigées pour un sable de même origine et d'emprunté différente. Ce qui pourra nuire à la fois à l'état frais (l'ouvrabilité) et à l'état durci (la résistance et la durabilité) de nos bétons aux chantiers. Tout cela laisse comprendre que nos sablières sont exploitées d'une manière anarchique en attendant une meilleure exploitation en installant sur chaque sablière des stations de traitement par exemple.

Les modules de finesse du sable d'oued sont généralement supérieurs et les modules de finesse du sable de mer sont généralement inférieurs aux ceux

recommandés par les fuseaux de DREUX [07] et donnant une meilleure qualité. Ce qui laisse penser à la nécessité d'une correction des sables des mers avec ceux d'oueds et même du concassé pour compenser le manque des éléments fins inférieurs à 0,2 mm. La chose qui n'est pas réalisable sachant que tout les rapports de composition consultés indiquent les corrections des sables fins ou grossiers non pas impérativement mais sous forme de suggestions. En général, les sables d'oued sont moins propres que ceux des mers.

Figure 5.15: Huit (8) courbes granulométriques d'un sable d'oued), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.

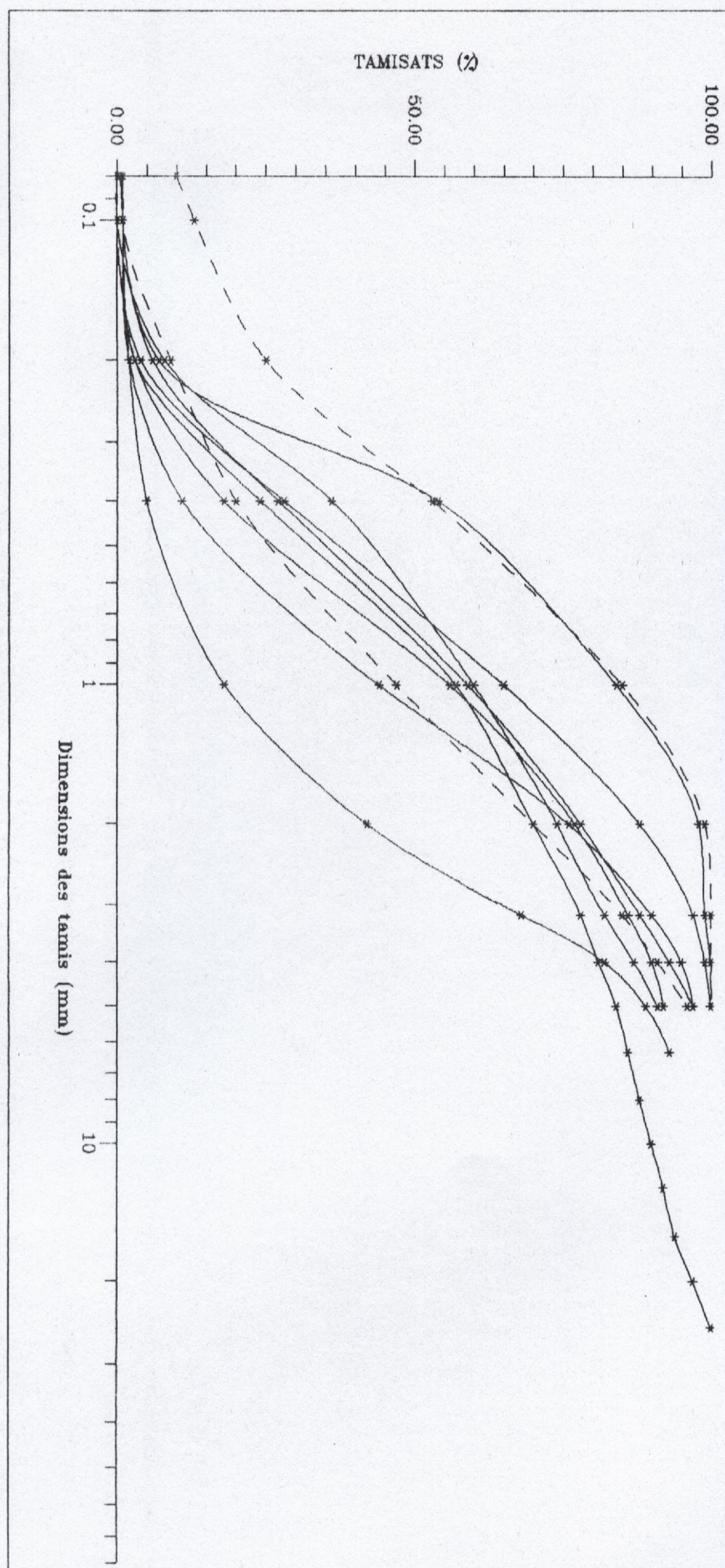
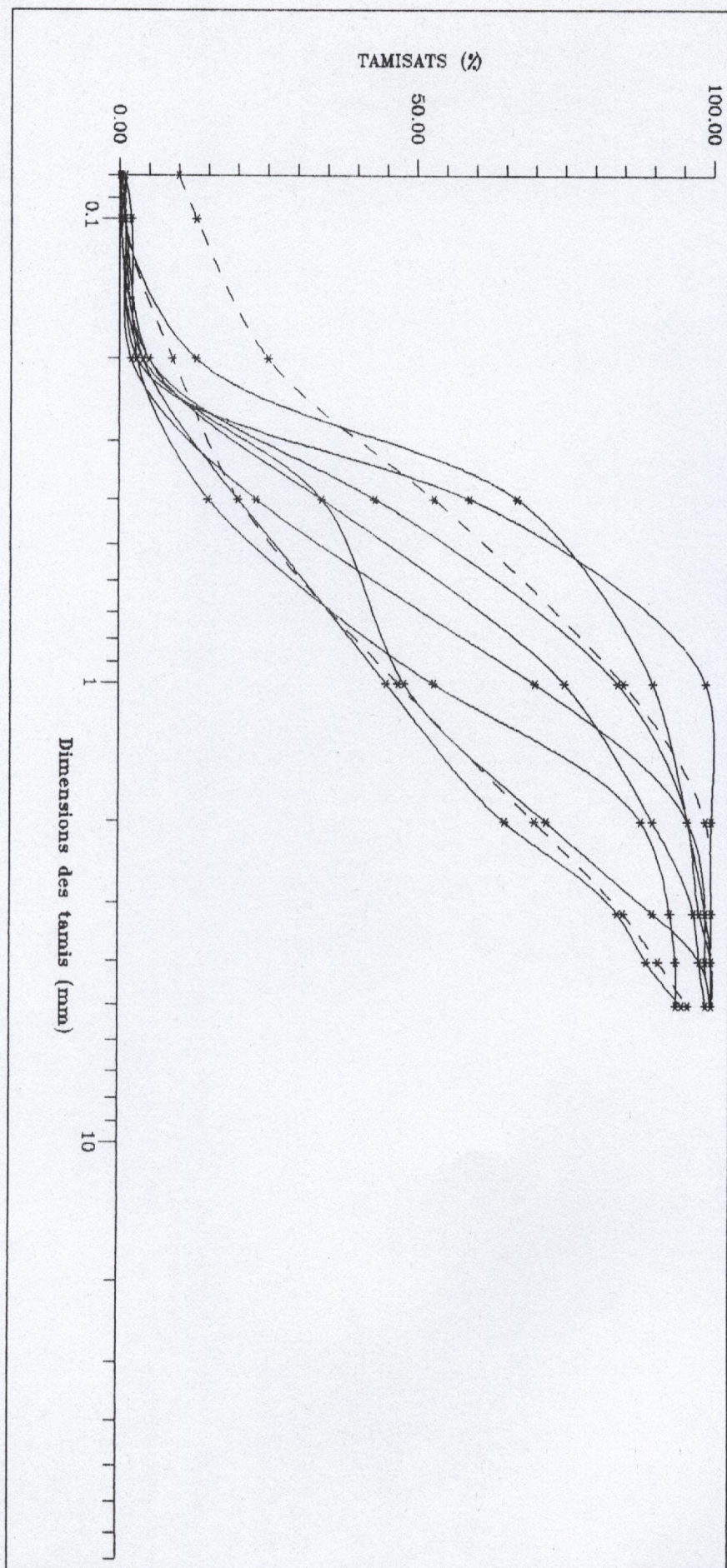


Figure 5.16: Huit (8) courbes granulométriques d'un sable S2 (sable de mer),
 issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.



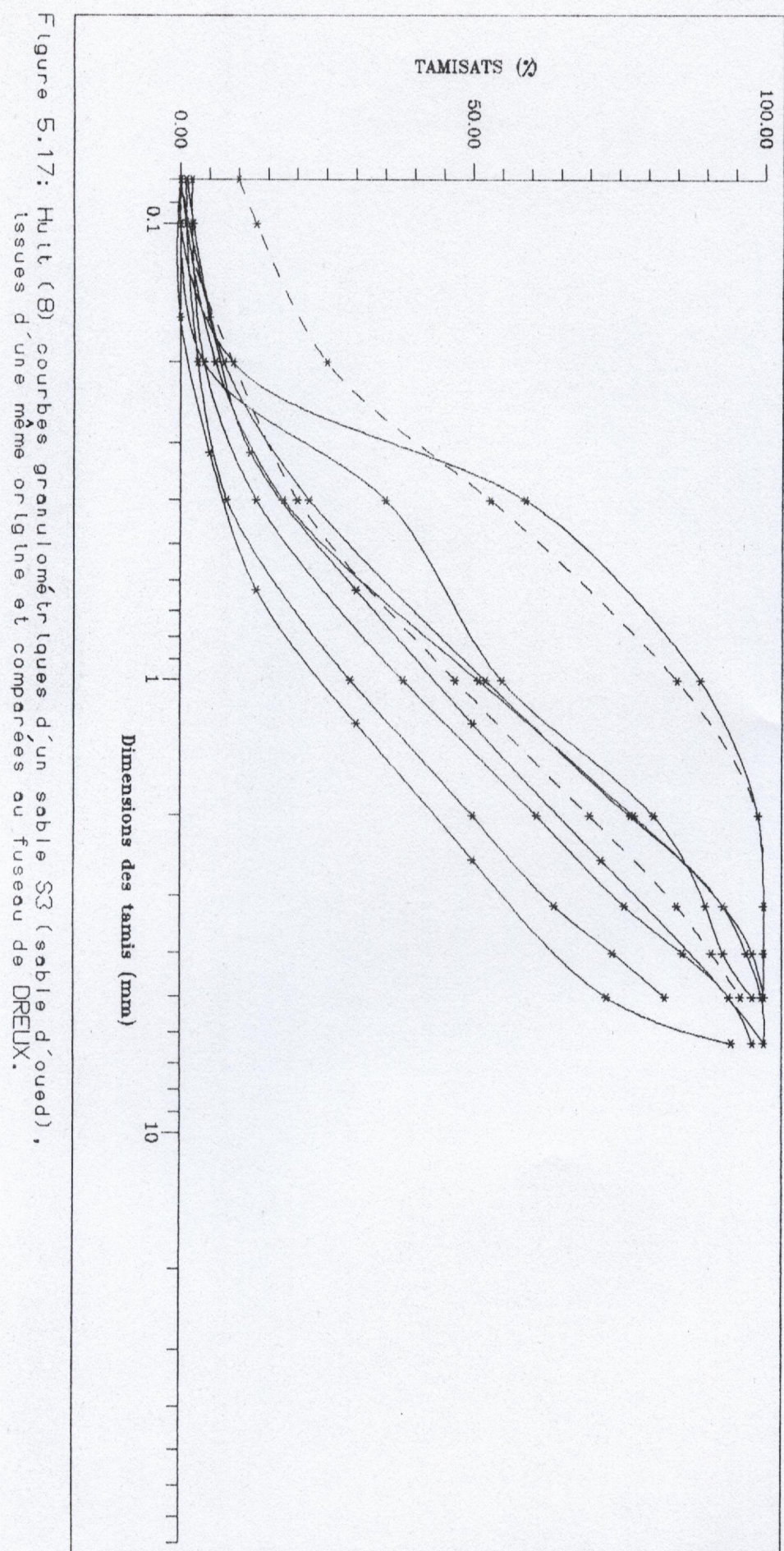


Figure 5.17: Huit (8) courbes granulométriques d'un sable S3 (sable d'oued), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.

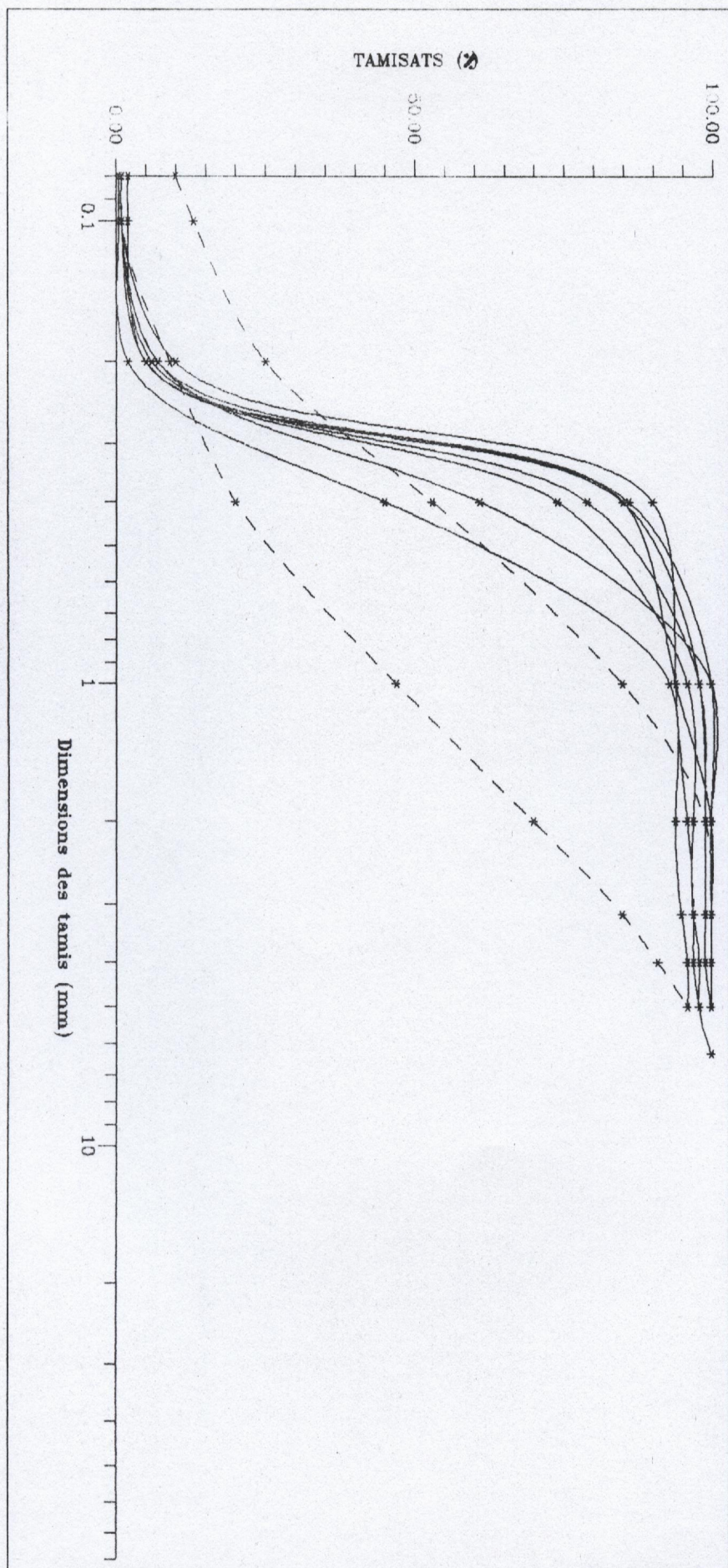


Figure 5.18: Huit (8) courbes granulométriques d'un sable S4 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.

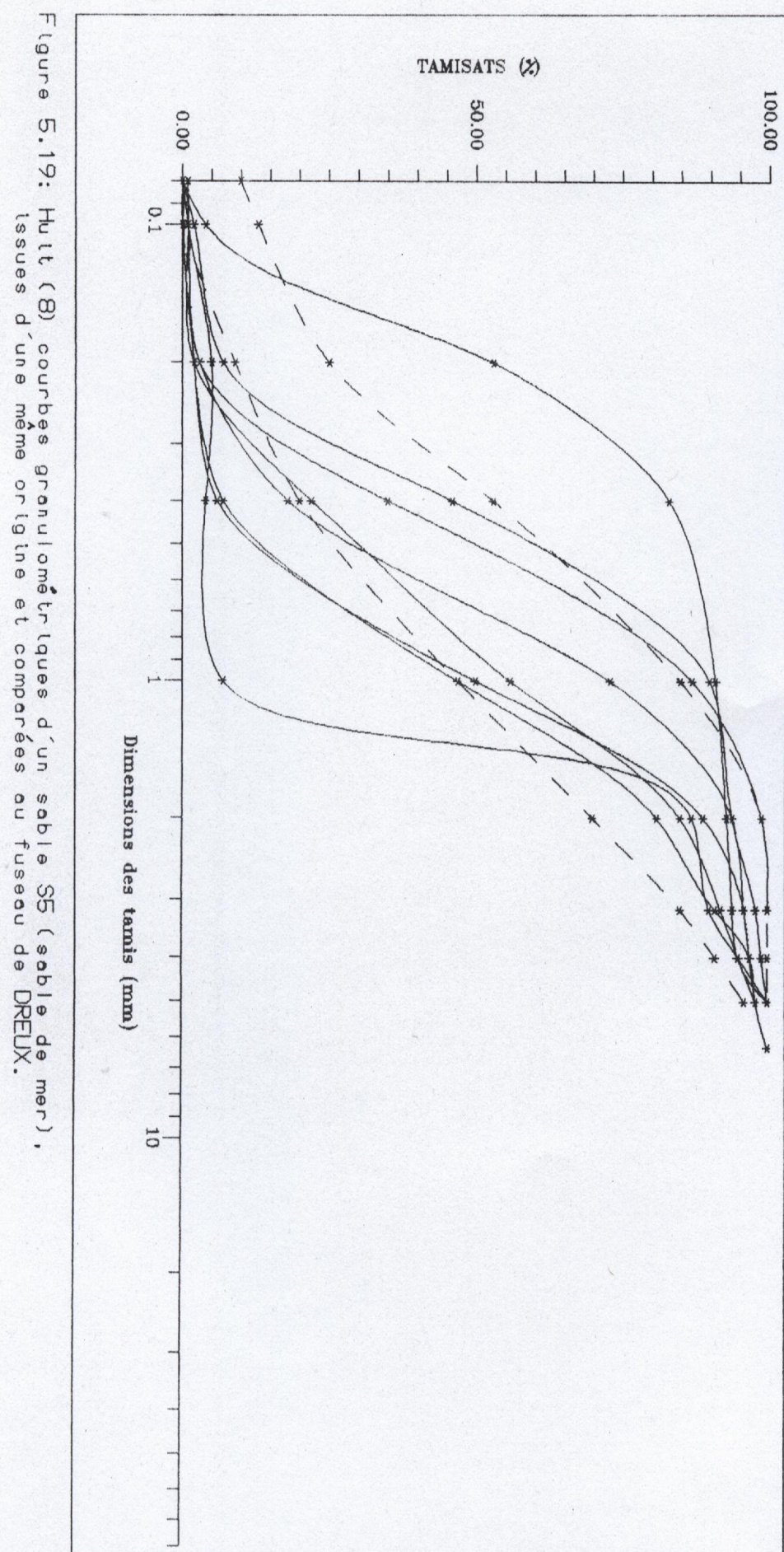


Figure 5.19: Huit (8) courbes granulométriques d'un sable S5 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.

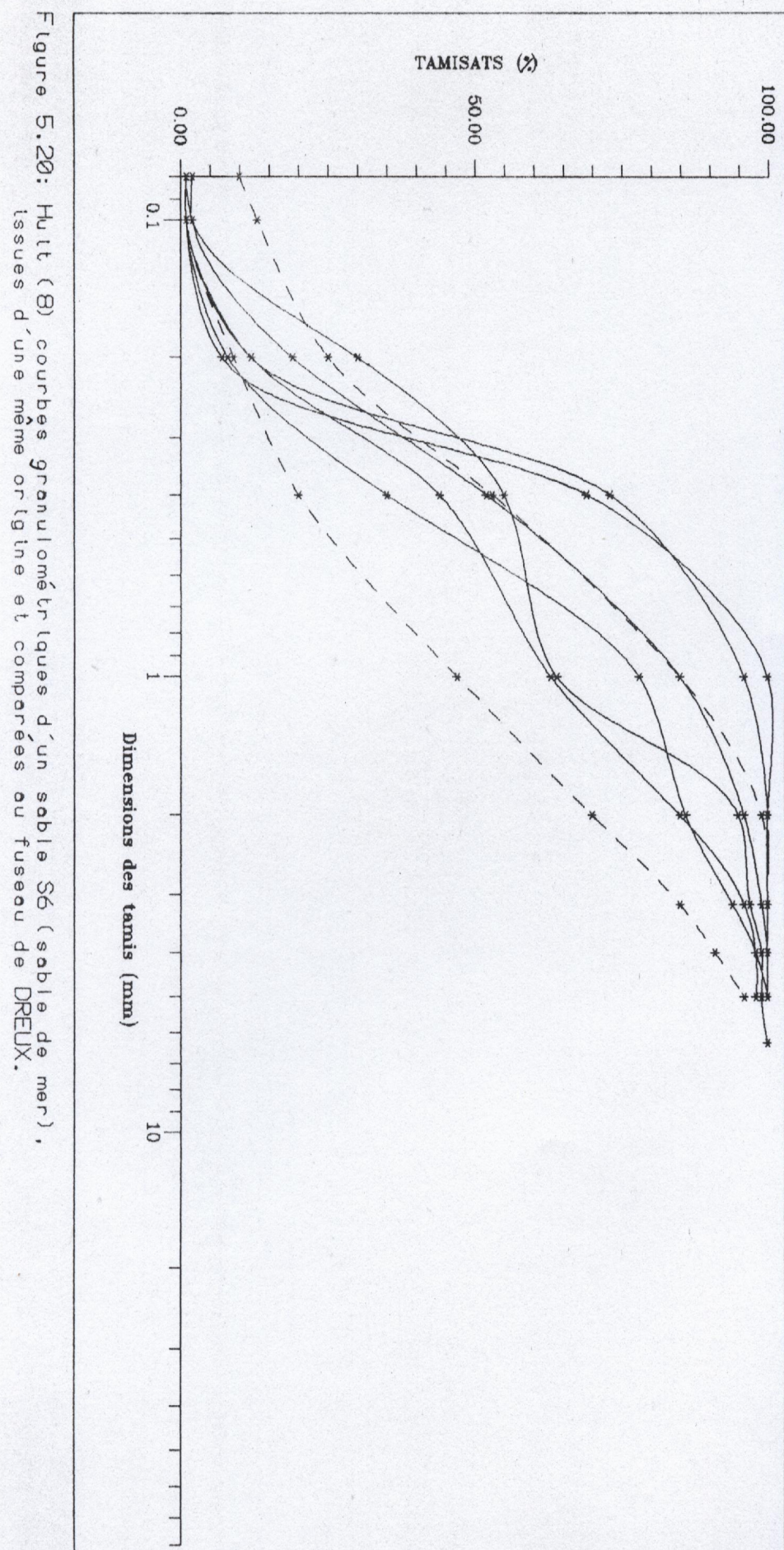


Figure 5.20: Hult (8) courbes granulométriques d'un sable S6 (sable de mer), issues d'une même origine et comparées au fuseau de DREUX.

b) Les graviers:

Parmi les origines des graviers utilisées dans la confection du béton dans les trois wilayas étudiées, on a collecté et analysé trois (3) origines qui sont les plus fréquentes. Pour la même origine, on trouve au moins 10 courbes granulométriques. Nos graviers sont de nature concassées, de classe 3/8, 5/15 et 15/25. Pour toute origine, confondue, on a 56 courbes granulométriques de gravier.

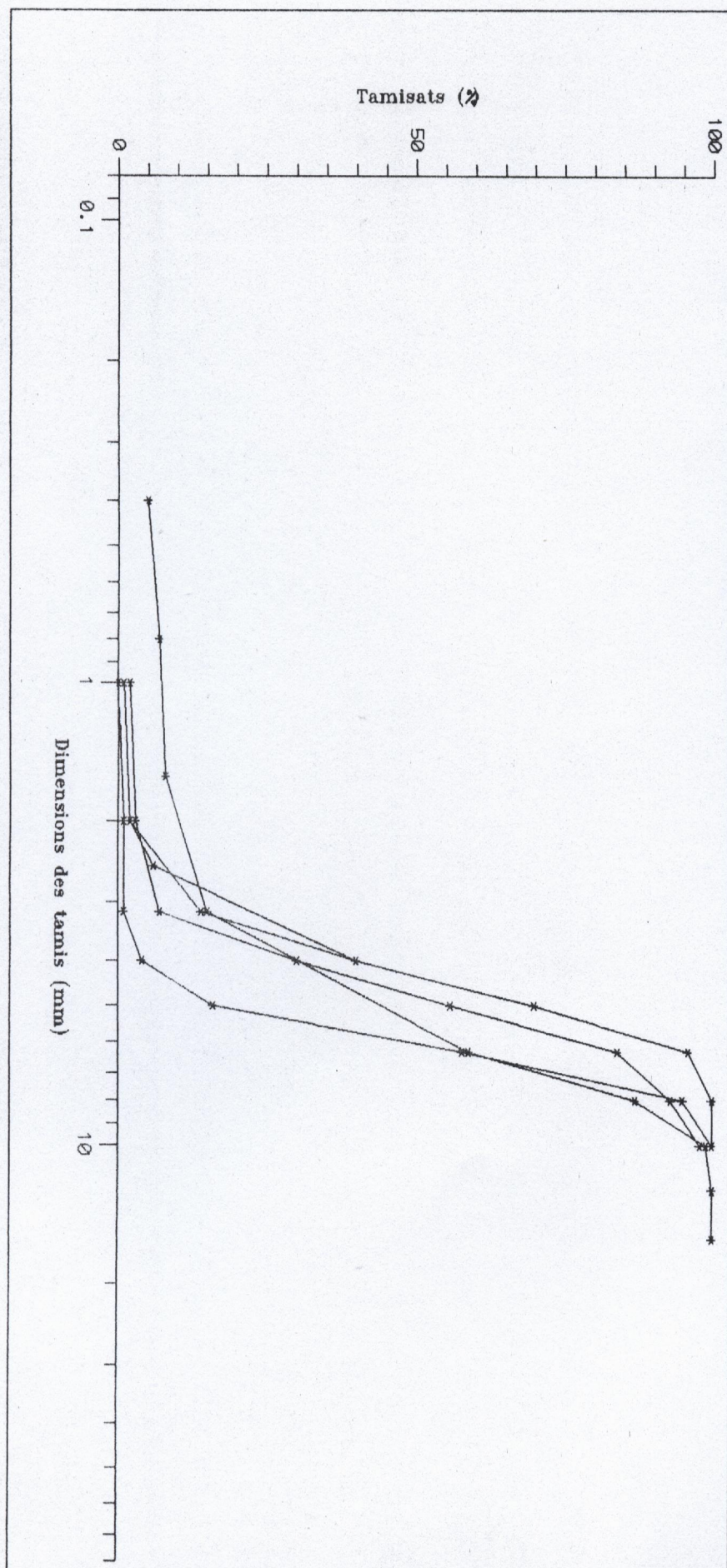
Les figures 5.21 à 5.27 montrent les courbes granulométriques d'un gravier issu d'une même origine pour une même classe et collectées sur une période de deux (2) ans.

Malgré que le gravier est d'origine industrielle, on trouve que les classes sont généralement non respectées, chauvauchées surtout pour la classe 5/15 avec la classe 15/25. Ce qui laisse voir que notre béton est constitué par fois uniquement d'une seule classe de gravier. Les graviers disponibles sont présumés avoir une dimension maximale de 25 mm, or d'après ces courbes, on peut déduire que la dimension maximale peut être variable d'un mélange à un autre, généralement, elle est inférieure à 20 mm (refus au tamis 20 mm est nul). Tirant une grande partie de sa résistance des gros grains qu'ils renferment dans son volume, il paraît évident que le béton confectionné à partir des graviers fins (en calibre) soit faible de résistance.

L'impropreté des graviers de classe 5/15 reste toujours possible dans nos centrales en cas d'un contrôle limité.

Dans les centrales visitées, la granulométrie, la densité et la propreté ne sont jamais vérifiées d'un approvisionnement à un autre ou même d'une manière régulière. Le mode d'approvisionnement et de stockage ne permettent jamais la maîtrise de l'exploitation (nombre de boxes est inférieur à celui des origines et des classes de gravier). On ira même vers un mélange de plusieurs origines de gravier.

Figure 5.21: Les courbes granulométriques d'un gravier G1 de même classe (3/8) et issues d'une même origine.



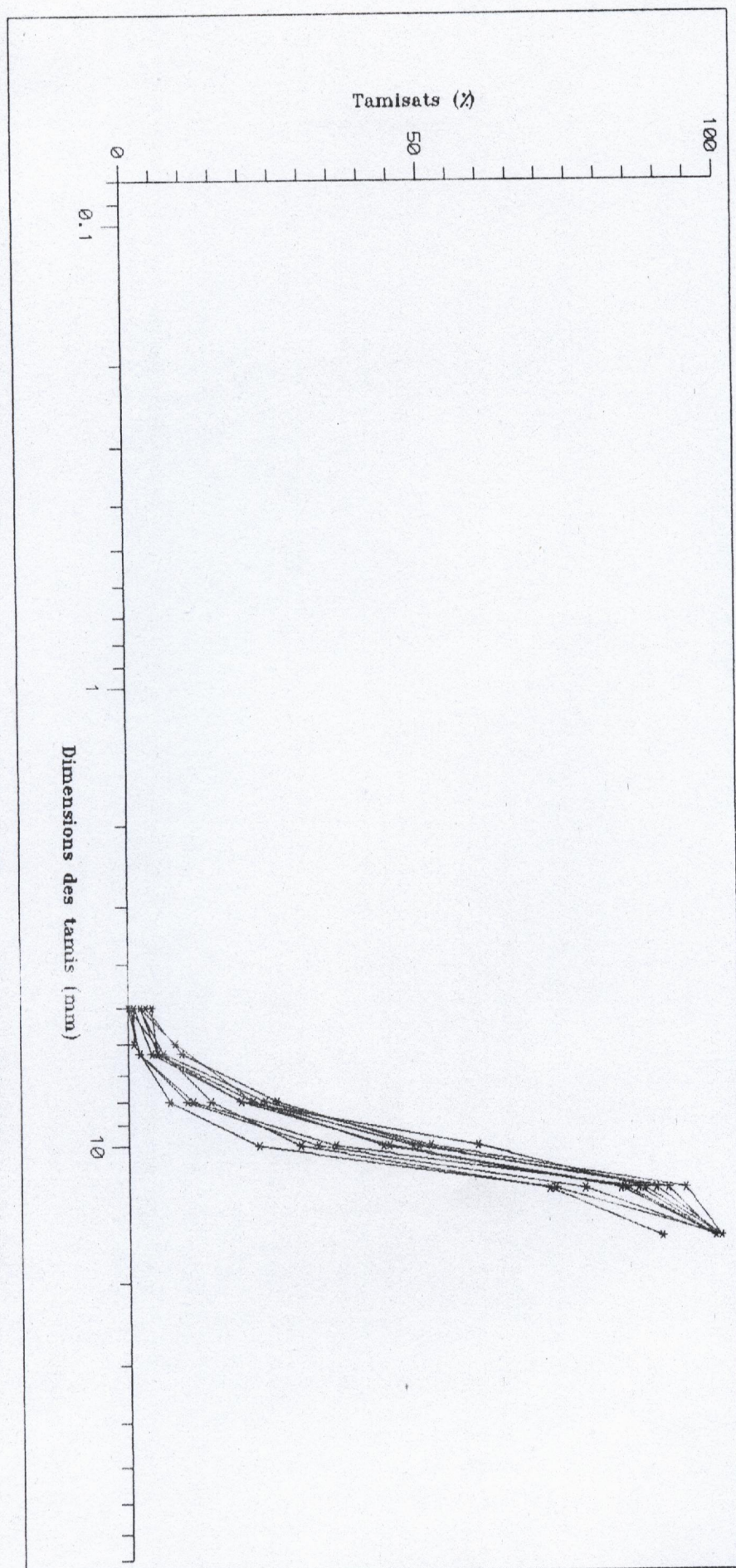
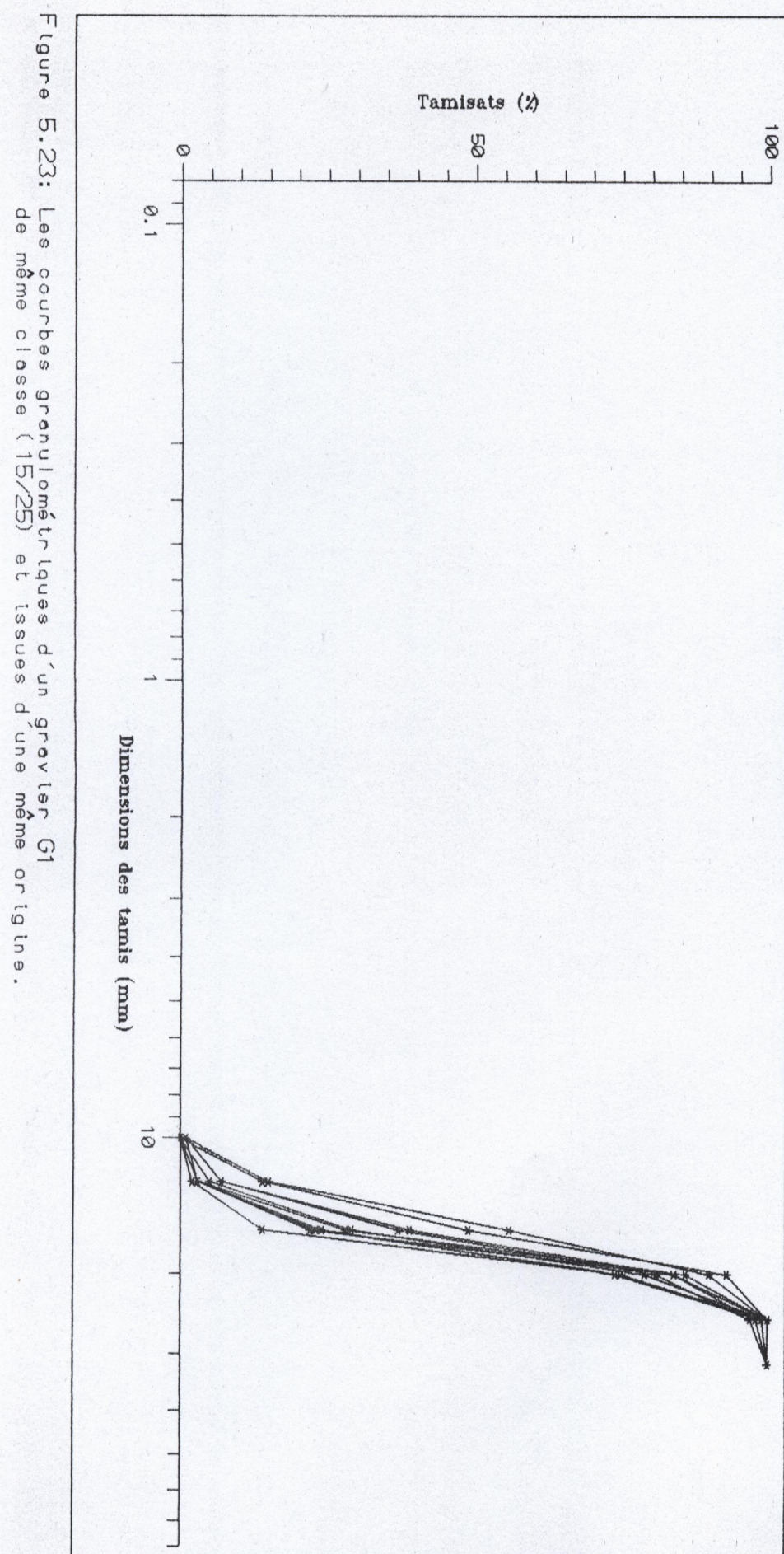


Figure 5.22: Les courbes granulométriques d'un gravier G1 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.



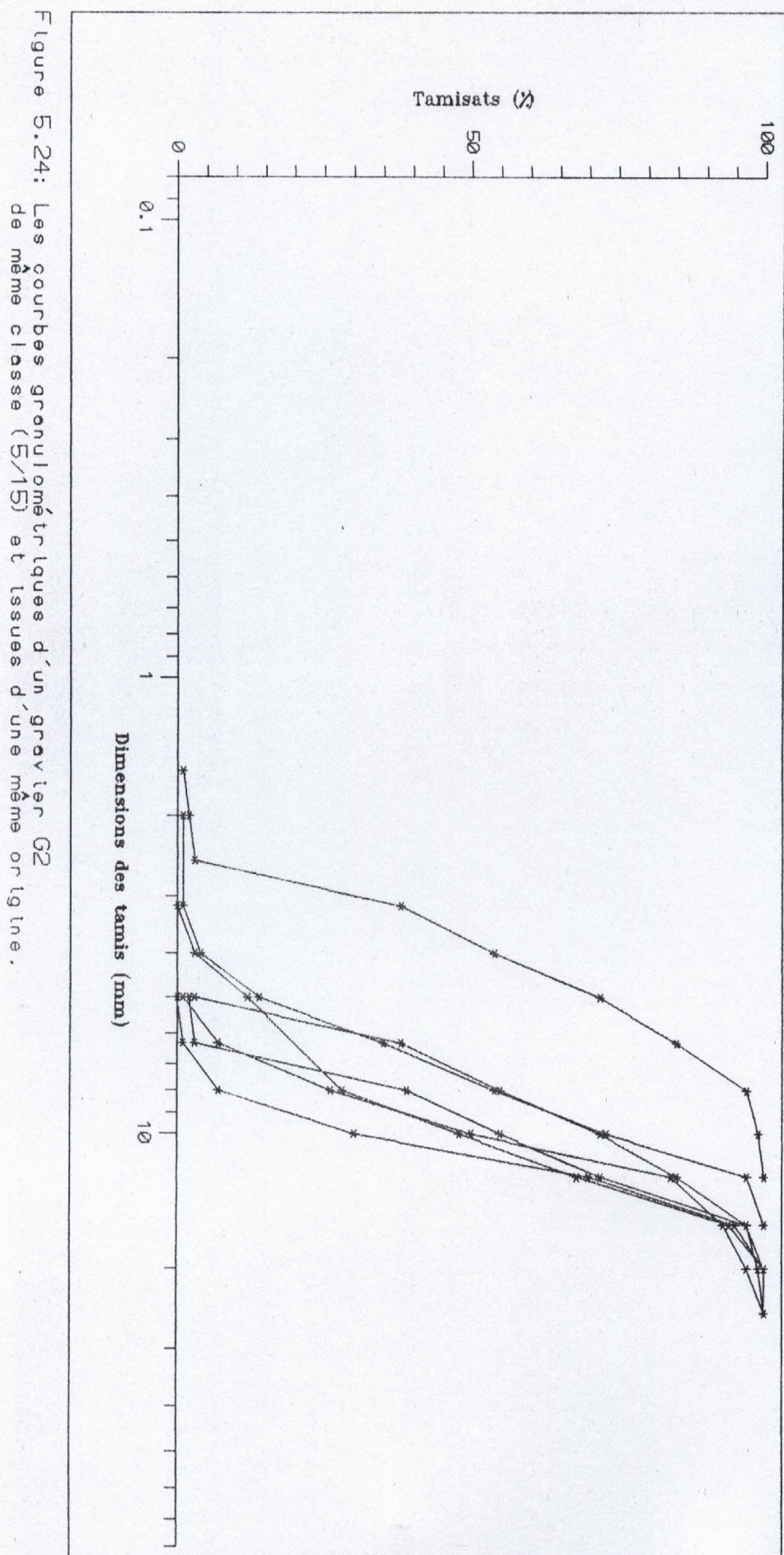


Figure 5.24: Les courbes granulométriques d'un gravier G2 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.

Figure 5.25: Les courbes granulométriques d'un gravier G2 de même classe (15/25) et issues d'une même origine.

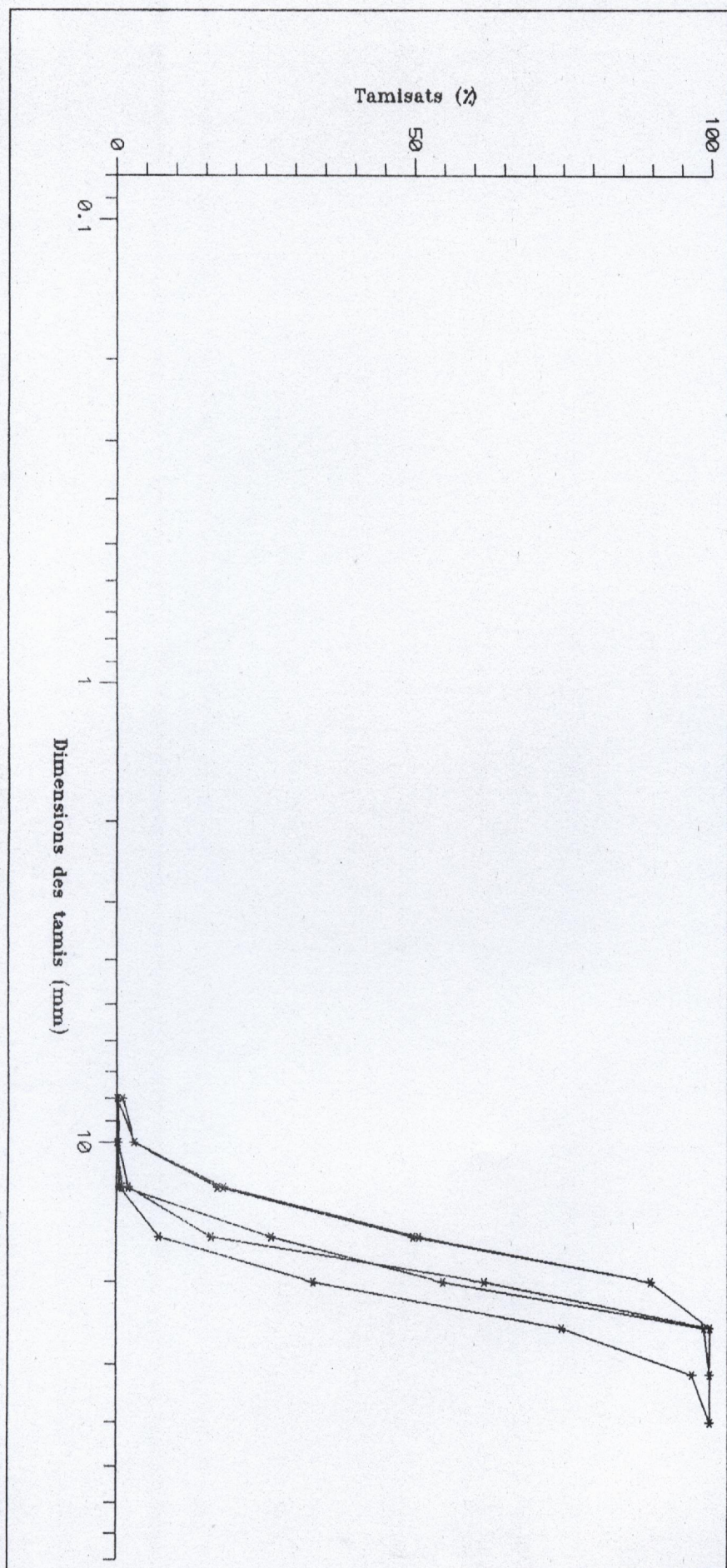


Figure 5.26: Les courbes granulométriques d'un gravier G3 de même classe (5/15) et issues d'une même origine.

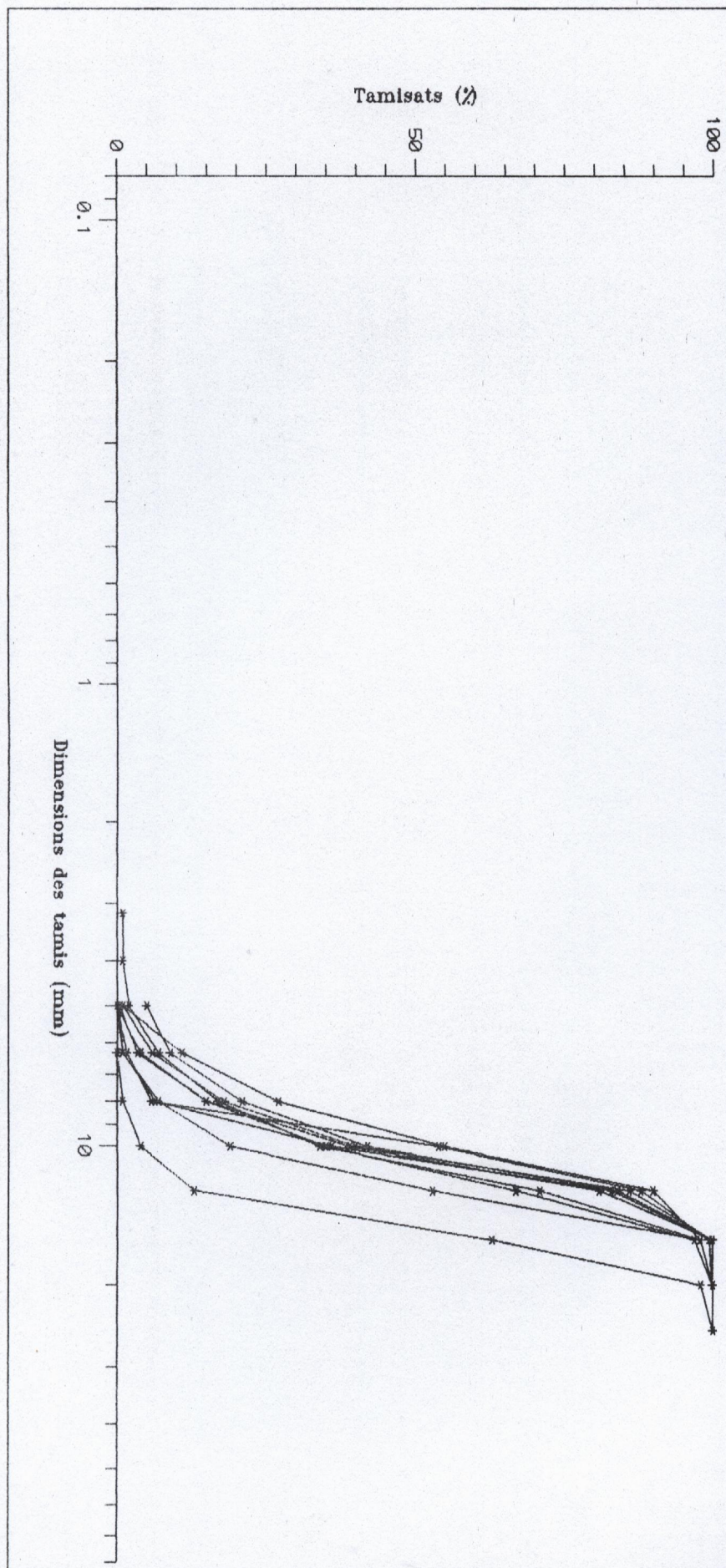
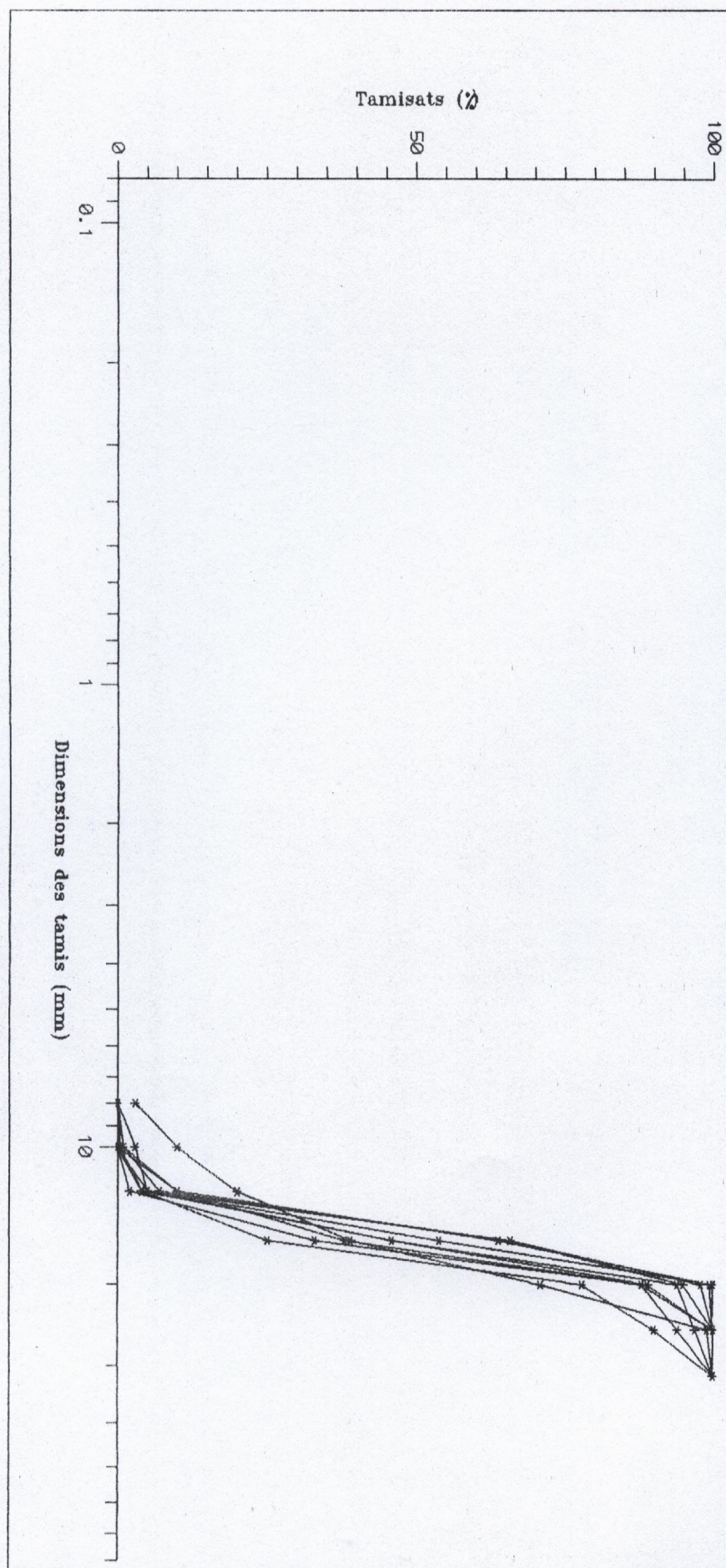


Figure 5.27: Les courbes granulométriques d'un gravier G3 de même classe (15/25) et issues d'une même origine.



Avec une telle variation dans la granulométrie, la qualité est affectée par une variation dans le dosage d'eau qui est exigé par les granulats afin d'atteindre l'ouvrabilité voulue. En conséquence, la quantité du ciment doit être corrigée pour maintenir le rapport E/C et la résistance à la compression constants. La chose qui n'est pas faite dans nos centrales.

Afin d'apparaître l'influence de la variation de la granulométrie sur la composition granulaire des bétons, 72 compositions ont été étudiées en combinant les six (6) origines du sable avec les trois (3) origines du gravier.

Un sable S et un gravier G sont définis par une plage granulométrique, par S_i (courbe granulométrique inférieur) et S_s (courbe granulométrique supérieur) pour le sable et par G_i et G_s pour le gravier. En utilisant la méthode de composition de Dreux-Gorisse[47], et en combinant les deux (2) courbes granulométriques S_i et S_s du sable avec les deux (2) courbes granulométriques G_i et G_s du gravier, on aura quatre (4) compositions granulaires extrêmes pour une même origine du sable et du gravier. Le tableau 5.7 montre les proportions du sable et du gravier pour les 4 compositions granulaires probables entre un sable S et un gravier G. Ces proportions du sable et du gravier pour les 4 compositions granulaires représentent les limites de variation des proportions du sable et du gravier que peut prendre une composition du béton dans nos centrales à béton.

Tableau 5.7 : Les proportions probables du sable et du gravier dans une composition granulaire, en utilisant la méthode de composition de Dreux et Gorisse [47].

Graviers Sables		G ₁		G ₂		G ₃	
		G _i	G _s	G _i	G _s	G _i	G _s
S ₁	S _i	(31-69)	(33-67)	(27-73)	(33-67)	(31-69)	(35-65)
Sable d'oued	S _s	(46-54)	(48-52)	(41-59)	(48-52)	(46-54)	(50-50)
S ₂	S _i	(28-72)	(30-70)	(24-76)	(30-70)	(28-72)	(32-68)
Sable de mer	S _s	(42-58)	(44-56)	(37-63)	(43-57)	(41-59)	(45-55)
S ₃	S _i	(30-70)	(32-68)	(26-74)	(32-68)	(30-70)	(33-67)
Oued	S _s	(46-54)	(48-52)	(42-58)	(48-52)	(46-54)	(50-50)
S ₄	S _i	(26-74)	(28-72)	(23-77)	(28-73)	(26-74)	(29-71)
Mer	S _s	(34-66)	(36-64)	(29-71)	(35-65)	(34-66)	(38-62)
S ₅	S _i	(27-73)	(29-71)	(22-78)	(29-71)	(27-73)	(30-70)
Mer	S _s	(42-58)	(44-56)	(37-63)	(44-56)	(42-58)	(46-54)
S ₆	S _i	(27-73)	(29-71)	(23-77)	(29-71)	(27-73)	(30-70)
Mer	S _s	(37-63)	(38-62)	(32-68)	(38-62)	(36-64)	(40-60)

(x-y) : x% de sable et y% de gravier dans un mélange de 100 % de granulats.

De ce tableau on peut tirer les informations suivantes :

- Le dosage des granulats n'est pas précis, il se fait par erreur dans les proportions du sable et du gravier. L'étendue des proportions du sable et du gravier dans une composition du béton pour une origine d'approvisionnement constante peut atteindre 15 à 18% en cas extrême, pour un risque d'erreur d'estimation de 5%. Par exemple, pour une vibration normale et une densité des granulats égale à 2.6, la composition granulaire peut atteindre en cas extrême une erreur de ± 278 à 334 kg/m^3 dans le dosage en sable ou en gravier.
- L'effet du sable sur la variation des proportions des granulats dans une composition pour une origine constante est prépondérant. Cette prépondérance est estimée entre 70 et 81 %. C'est à dire pour une même courbe granulométrique du gravier combinée aux deux (2) courbes granulométriques du sable (qui forment la plage de variation du sable) l'étendue des proportions du sable et du gravier peut atteindre 11 à 14% (comparant cette intervalle à l'autre [15 à 18%] ça donne [70 à 81%]) . C'est la même

conclusion qui a été soulevée par Dreux [47] et par l'association du ciment portland où il y a eu une liste des variables qui peuvent affecter la résistance [49].

- L'effet du sable d'oued sur la variation des proportions et des granulats dans une composition pour une origine constante est plus prépondérant que celui du sable de mer. C'est à dire que les étendues, les plus élevées des proportions du sable et du gravier dans une composition pour une même courbe granulométrique du gravier, se trouvent dans le sable d'oued, estimées entre 15 et 16%. Voir le tableau 5.7 pour les sables d'oueds (pour le S_1 , et pour le même G ; G_1 par exemple, une fois on a la proportion (x-y) égale à (31-69) et une autre fois (46-54), la différence donne 15%).

c) Les ciments :

A partir du laboratoire [LNHC] (laboratoire national de l'habitat et de construction), on a recueilli les demandes des entreprises pour un contrôle des ciments approvisionnés au cours des années 1988 à 1994. Les procès verbaux (P.V.) des résultats sur les ciments comportent les résistances mécaniques en compression et en flexion et les temps de prise. Aucune détermination n'est faite sur les caractéristiques chimiques. Durant cette période, 120 P.V. ont été prélevés, distribués comme suit :

- 79 % sont d'une production d'origine locale, distribuée sur quatre (4) cimenteries qui se plantent au centre du pays.
- 13 % sont des ciments importés, sans indication du pays exportateur.
- 08 % sont des ciments dont on ne connaît pas leurs origines.

Les ciments soumis aux contrôles sont les ciments de classe nominale 325 bars "CPA325".

Les résultats des résistances à la compression des ciments à l'âge de 28 jours au cours des années 88 à 94 pour les quatre (4) cimenteries du centre Algérien sont donnés par le tableau 5.8.

(Algérie)

[illegible]

A partir des résultats des tableau 5.8, on a pu tirer les informations suivantes :

-Durant une période de 7 ans, on soulève uniquement 120 demandes de la part des entreprises pour un contrôle des ciments approvisionnés, surtout que les soupçons de ces entreprises se trouvent en maintes reprises justifiés (44% des moyennes des résistances des ciments contrôlés sont inférieurs à la classe nominale qui est égale à 32,5 MPa).

-La fréquence du contrôle des ciments par les entreprises n'est pas régulière. Elle est inhérente aux périodes où la qualité est en cause. Tout de même, on remarque que depuis l'année 1992, cette fréquence est en décroissance continue. L'histogramme ci-dessous montre cela.

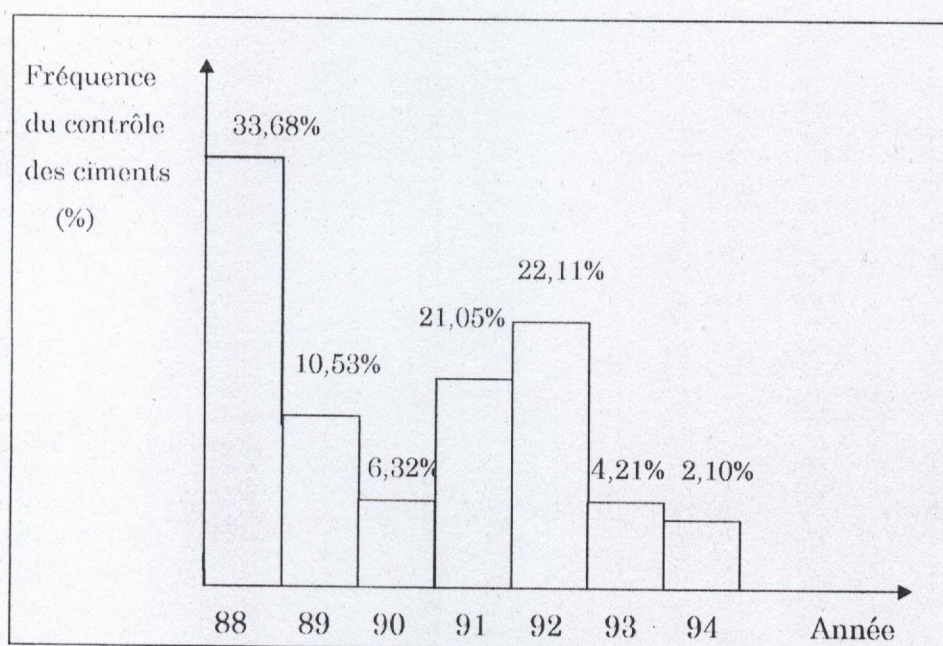


Figure 5.28 : La fréquence du contrôle des ciments par année.

Le tableau 5.9 donne les pourcentages des essais qui ont la résistance à la compression inférieur à la classe nominale, du ciment approvisionné par cimenterie.

Tableau 5.9 : les pourcentages des essais qui ont la résistance à la compression inférieur à la classe nominale "325 bars".

Origine du ciment	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
(%) des essais dont la classe est non atteinte	29%	42%	94%	35%

-Comme dans la plupart des codes étrangers, il existe une résistance exigée pour les ciments, c'est la résistance caractéristique, et les résistances réelles sont souvent en dessus. Dans nos cimenteries, cette résistance caractéristique reste inconnue, d'où on ne peut guère comparer notre niveau de résistance des ciments. De là vient la nécessité de caractériser nos cimenteries, les classer et estimer leur variation afin de compenser cette variation de la résistance par un ajout d'une quantité de ciment dans le but d'atteindre la résistance du béton exigée [35].

- Malgré que nous nous disposons pas assez de résultats par période d'une année pour se prononcer de la variation du ciment, on remarque uniquement pour la première cimenterie (C_1) que l'écart type est de 3,27 MPa pour l'année 88 (voir tableau 5.8) dépassant ainsi les écarts types donnés par les études [09 et 10] qui sont respectivement 3 et 2,2 MPa.

Pour un écart type global, durant les 7 ans, la variation est plus grande. Les paramètres statistiques sont résumés dans le tableau 5.10.

De là, on peut dire que le ciment mis à la disposition des entreprises a des caractéristiques mécaniques variables.

Tableau 5.10 : Les paramètres statistiques globaux (résistance moyenne, écart type et variation) des ciments collectés par cimenterie durant la période 88-94 :

Paramètres statistiques Origine du ciment	Résistance moyenne global (MPa)	Ecart type global (MPa)	Variation (%)
C ₁	35,17	4,92	14
C ₂	32,24	5,89	18
C ₃	30,22	3,00	10
C ₄	32,78	5,21	16

Impact de la classe vraie du ciment sur celle du béton:

Comme première conséquence du fait que la classe vraie du ciment "CPA325" soit inférieur à la classe d'appellation "32,5 MPa" est que dans le prédosage du ciment et précisément pour déterminer le rapport E/C, on a souvent recours à une des formules qui exprime la résistance du béton (R) en fonction de la classe vraie du ciment et du rapport E/C.

A l'instar des autres formules, la formule la plus utilisée est celle dite "formule de

Bolomey" [04], elle s'écrit : $R = K \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$ (5.20)

Où K : exprime plusieurs paramètres [Nature et dosage du ciment, qualité des granulats (nature minéralogique, adhérence, forme, propreté etc...), nature et intensité du serrage].

C : dosage en ciment .

E: dosage en eau.

Bolomey[04] propose comme expression du coefficient K le produit G.C_E:

$$K = G \cdot C_E$$

avec G : un coefficient granulaire qui dépend du serrage et de la taille des grains.

C_E : la classe du ciment.

Pour une mise en place par vibration, la valeur de G est donnée dans le tableau ci-dessous (Tableau 5.11).

Tableau 5.11: Les valeurs de G

Qualité des granulats	Dimension des grains	
	Fins ($D \leq 16$ mm)	$D \geq 20$ mm
Excellente	0,55	0,6
Bonne-courante	0,45	0,50
Passable	0,35	0,40

Nous introduisons dans la formule de Bolomey chaque classe du ciment produit par les différentes cimenteries. En se basant sur la classe vraie du ciment qui à la fréquence d'occurrence la plus élevée (dans notre cas, il s'agit de la moyenne) et en tenant compte bien entendu de la qualité des granulats, nous obtiendrons les résistances attendues des bétons confectionnés (Voir tableau 5.12). Comme nous le verrons plus loin le rapport E/C utilisé est dans l'intervalle $[0,5-0,55]$, on peut le prendre ($E/C = 0,53$).

Tableau 5.12 : La résistance attendue (MPa) du béton confectionné avec les 4 ciments (provenants des quatres cimenteries)

Origine du ciment	Qualité des Granulats	Dimension des grains	
		fins ($D \leq 16$ mm)	$D \geq 20$ mm
C ₁	Excellente	27	29
	Bonne	22	24
	Passable	17	19
C ₂	Excellente	24	27
	Bonne	20	22
	Passable	16	18
C ₃	Excellente	23	25
	Bonne	19	21
	Passable	15	17
C ₄	Excellente	25	27
	Bonne	21	23
	Passable	16	18

Du tableau 5.12, on peut avancer qu'avec les ciments produits :

- La résistance en compression du béton atteint rarement les 25 MPa; exception faite pour les bétons fabriqués à partir des granulats d'excellente qualité.
- Pour une bonne qualité des granulats prise comme courante dans nos carrières, les résistances des bétons attendues seraient comprises entre 19 et 24 MPa, chose qui est comparable à l'estimation de la résistance dans la phase statistique (entre 20,5 et 25,3 MPa), sachant que cette résistance estimée a été prise comme propriété intrinsèque liée à la composition et à la qualité des matériaux indépendamment des aléas de production.
- Les résistances faibles du béton pourraient être dues à l'utilisation de gravier de faible calibre.

Néanmoins, ces résultats avancés peuvent être contestés par l'UREG de Boumerdes (laboratoire chargé du contrôle de la production du ciment dans le centre d'Algerie), étant donné que ses rapports annuels font état d'une classe vraie de ciment aux environs de 42 MPa pour toutes les cimenteries du centre. En effet, ces rapports sont établis à partir d'un contrôle de production et les échantillons testés proviennent, d'après le laboratoire, de la cimenterie. Sachant que pour la présente étude, on doit s'intéresser au ciment mis à la disposition du consommateur tout en tenant compte des aléas du transport et des conditions de conservation.

Une question reste posée: les conditions actuelles (transport et conservation) sont-elles aussi non conformes pour justifier cette différence importante de classe vraie de ciment testé au niveau de la production et le ciment utilisé sur chantier par les opérateurs de secteur du bâtiment ?

d) Les adjuvants:

La totalité des entreprises contactées n'utilisent pas d'adjuvants dans la confection du béton, même s'il s'avère indispensable dans certains cas (cas de desserte de béton à grande distance par exemple). La non utilisation de ces produits dans le béton est dû, selon ces entreprises, à leur mauvaise qualité. Mais cet argument reste à vérifier en tout cas. Comme elle peut être due à la mal utilisation de cet adjuvant.

but d'utiliser une composition pour chaque changement d'origine d'approvisionnement.

Pour la centrale à béton où nous avons trouvé qu'une seule ou deux compositions, il est à supposer que même s'il y aura un changement de composition il sera tardif, en attendant, c'est l'ancienne composition qui subsiste.

26 compositions sont disponibles sur les quatres (04) centrales à béton, distribuées comme suit: Voir tableau 5.13.

Tableau 5.13: Nombre de compositions disponible sur une centrale d'une entreprise

Entreprise	A	B	C	D
Nombre de compositions	21	3	1	1

a) Le dosage en ciment:

Dans ces cas de compositions destinées vers les constructions en logements ou équipements, 77% des dosages en ciments sont des dosages à 350 kg/m³ et 23% sont des dosages à 380 kg/m³.

En admettant que le dosage minimum en ciment est un critère de durabilité, on peut comparer les dosages des compositions prélevées aux ceux exigés par les normes étrangères, pour des conditions d'environnement similaires aux nôtres. Le tableau 5.14 montre la comparaison entre le document D.T.R Algerien [17] et les normes étrangères pour le dosage minimal en ciment.

Tableau 5.14 : Le dosage minimal du ciment (C_{min}) dans les normes étrangères, comparé à celui dans le D.T.R Algerien [17].

BS 8110 [38]	Prénorme Européenne ENV 206 [37]	Norme Française AFNOR [39]	D.T.R Algerien BE 2-1 [17]
En admettant un enrobage $e=30\text{mm}$ - Pour les conditions d'exposition modéré $C_{min}= 325 \text{ Kg/m}^3$ - Pour les conditions d'exposition sévère $C_{min}= 350 \text{ Kg/m}^3$	- Environnement humide (sans gel): $C_{min}=280 \text{ Kg/m}^3$. - Environnement marin (sans gel) : $C_{min}=300 \text{ Kg/m}^3$. - Environnement présentant une agressivité chimique faible à modéré: $C_{min}= 280 \text{ à } 300 \text{ Kg/m}^3$.	Pour $D_{max}=25 \text{ mm}$ - Environnement moyennement agressif : $C_{min}= 290 \text{ Kg/m}^3$. - Environnement fort agressif : $C_{min}= 368 \text{ Kg/m}^3$.	Pour les ouvrages courants en béton armé $C_{min}= 350 \text{ kg/m}^3$.

D_{max} : diamètre maximal des granulats

On remarque que notre dosage en ciment peut se placer dans des conditions d'exposition sévère dans tout les cas. La chose qui laisse entendre que notre ciment est surconsommé en vue d'une durabilité meilleure.

b) Le rapport E/C:

Tout les rapports de composition consultés montrent que le rapport E/C (eau-ciment) varie pondéralement entre 0,45 et 0,60. Ce rapport E/C dans les 26 compositions des 04 centrales se distribue comme c'est montré dans le tableau 5.15.

Tableau 5.15 : Classement par intervalle des rapports E/C des 26 compositions collectées

Intervalle du rapport E/C	Nombre des compositions appartenant à cet intervalle	Le pourcentage
[0,45 - 0,50]	09	35%
[0,50-0,55]	13	50%
[0,55-0,60]	04	15%

Le tableau 5.16 montre le rapport E/C maximum exigé par les normes étrangères, comparé à celui exigé par le D.T.R. Algérien [17].

Tableau 5.16: Le rapport E/C maximum exigé par les normes étrangères comparé à celui exigé par le D.T.R Algerien

BS 8110 [38]	ACI 318-83 [06]	ENV 206 [37]	AFNOR [39]	D.T.R Algérien [17] B.E 2-1
En admettant un enrobage e=30mm *Pour des conditions d'exposition modéré $E/C_{max} = 0,55$ *Pour les conditions d'exposition sévère $E/C_{max} = 0,50$	*Béton étanche exposé à l'eau fraîche: $E/C_{max} = 0,50$ * Exposé à l'eau de mer: $E/C_{max} = 0,45.$	*Environnement humide (sans gel) $E/C_{max} = 0,60.$ * Environnement marin (sans gel) $E/C_{max} = 0,55$ environnement présentant une agressivité chimique faible $E/C_{max} = 0,55.$	environnement moyennement agressif $E/C_{max} = 0,55.$ environnement fort agressif $E/C_{max} = 0,50.$	$0,4 < E/C_{max} < 0,6$ avec la valeur moyenne $E/C = 0,5.$

Les rapports E/C donnés par les compositions consultées sont comparables aux rapports E/C maximum donnés par la plupart des normes étrangères. Avec la réunion de tout les facteurs d'une bonne confection et mise en oeuvre, sans oublier la bonne

qualité des composants, ces rapports sont censés donner des meilleures résistances et une meilleure durabilité. D'après le ACI 211.1-81 [06], un rapport de E/C effectif égal à 0.48, 0.55 et 0.57 donne des résistances moyennes à la compression à 28 jours entre 35 et 30 MPa. D'après une documentation Allemande du V.D.Z : Béton 11.1970 [15], pour un rapport de E/C égal à 0.5, 0.55 et 0.60, la résistance moyenne à 28 jours peut être égale à 42,37 et 34 MPa respectivement. A l'appui de cela, on peut citer un article de Popovics [46] consacré au relation entre la résistance et le rapport E/C, dont le texte traduit est le suivant : " La production de résistance du ciment, c'est à dire, le développement de la résistance par un (1) kg de ciment est maximum quand le rapport E/C est autour de 0.5 pondéralement ".

c) Le rapport G/S:

Les rapports Gravier-sable (G/S) dans les compositions consultées se distribuent comme c'est montré dans le tableau 5.17.

Tableau 5.17 : Classement par intervalle des rapports G/S des 26 compositions collectées.

Intervalle du rapport G/S	Nombre des compositions appartenant à cet intervalle	Le pourcentage
Inférieur à 1,4	08	31%
[1,4 - 1,8]	06	23%
[1,8 - 2,2]	00	0%
[2,2 - 2,6]	08	31%
supérieur à 2,6	04	15%

On remarque que peu de compositions se conforment aux exigences du rapport G/S, sachant que ce dernier conditionne l'ouvrabilité et la facilité de la mise en oeuvre. En les comparant aux exigences du D.T.R Algérien[17] pour un béton normal de structure (mise en oeuvre facile) dans lequel le rapport G/S se situe entre 1.8 et 2, on soulève qu'aucune composition n'est conforme à cette exigence. Et en les comparant à la tendance actuelle proposée par Dreux [04] de ne pas dépasser en valeur de rapport G/S; 1.5 à 1.6, on trouve que 62 % des compositions ne sont pas conformes à cette tendance. Ce qui veut dire que nos compositions ne sont pas aptes

pour une ouvrabilité nécessaire, soit que le rapport G/S est élevé, donc l'ouvrabilité se trouve affaiblie par un risque de ségrégation, soit qu'il est diminué, donc l'ouvrabilité se trouve améliorée au dépens de l'état durci par une diminution de la résistance à la compression.

d) Etude des compositions au laboratoire :

Pour traiter la possibilité qu'offrent les composants à obtenir un béton résistant en premier lieu dans les conditions de chantier, plusieurs compositions seront confectionnées à partir des matériaux émanant du même chantier.

Une série de compositions a été alors effectuée au laboratoire à partir de composants prélevés de différents chantiers à la recherche de la meilleure résistance en compression des éprouvettes de béton confectionnées. Il en ressort des compositions réalisées que la résistance varie de 200 à 300 bars pour un même dosage en ciment (350kg/m^3) ainsi que pour différents dosages en eau de gâchage. Le Tableau 5.18 donne les résultats de ces compositions est permis de retenir les remarques ci-dessous:

Tableau 5.18 : Résultats des compositions formulées aux laboratoires.

Composition	Résistance à la compression Rc 28 jours (bars)	Slump test (cm)	Rapport E/C
1	214	4.6	0.52
2	233	8.2	0.63
3	300	10	0.54
4	280	4.5	0.58
5	225	6.5	0.50
6	343	8	0.56
7	240	8.5	0.66
8	300	4.5	0.54
9	207	9.0	0.57

- Deux (02) compositions seulement dépassent les 300 bars en résistance pour un dosage de 350 kg/m^3 de ciment avec un slump test de 8 à 10 cm.
- Pour deux (02) compositions, on avait voulu atteindre la résistance moyenne de 300 bars. Pour ce faire, il fallait réduire l'eau de gâchage jusqu'à ce que l'essai du slump

test donne un affaissement de 4 à 5 cm. Donc il suffisait d'utiliser des adjuvants pour améliorer cette ouvrabilité tout en gardant la résistance aux environs de 280 bars.

En conclusion nous notons qu'il est très difficile dans nos chantiers d'avoir un béton de résistance supérieur à 250 bars avec un dosage du ciment de 350 kg/m³ et pour un béton plastique (affaissement au cône compris entre 8 et 12 cm).

e) Etude d'une opération de convenance :

Parmi les quatre (4) entreprises retenues, on a choisit deux (2) dont lesquelles des compositions ont été formulées à partir des caractéristiques des composants existants sur site. Ces compositions ont été proposées aux entreprises pour la confection des éprouvettes. D'autres éprouvettes ont été réalisées avec la composition de l'entreprise. Le tableau 5.19 donne les résultats de cette opération de convenance dans les deux entreprises.

Tableau 5.19: Résultats de l'opération de convenance dans les chantiers

Entreprise	Composition proposée			Composition de l'entreprise			Résistance obtenue en phase statistique
	Composition	Slump (cm)	Rc ₂₈ (bars)	Composition	Slump (cm)	Rc ₂₈ (bars)	Valeur inf-sup (bars)
A	C ₁	9.5	213	C _A	10	190	173-274
	C ₂	11.6	238				
	C ₃	12.5	166				
C	C ₁	12	242	C _C	20	152	209-249
	C ₂	13	283				

5.2.3.2 Appréciation du béton frais, à la sortie du matériel de production :

Pour ce faire, on a utilisé l'appareil de Joisel dont l'objectif est de déterminer les quantités de ciment, sable, gravier et eau contenues dans un échantillon frais. Voir annexe 4.

L'analyse du béton frais sur les 4 centrales à béton choisies est résumée par le tableau 5.20. Ce contrôle a permis d'apparaître les paramètres susceptibles d'entraîner des changements de la composition initiale. Ces paramètres peuvent être les suivants :

- Variation de la quantité d'eau mélangée.
- Variation de la granulométrie.
- Variation de la quantité et la qualité du ciment.
- Variation des rapports E/C et G/S.

Tableau 5.20: Résultats d'essais sur bétons frais à la sortie des centrales à bétons, comparés aux compositions théoriques (initiales) du béton.

Entreprise	Facteurs de composition théorique (G/Set E/C)	Caractéristiques des sables (teneur en eau et module de finesse)	Proportions des granulats (S,G) dans la granulométrie du béton sec	Contrôle de la composition à l'état frais (Méthode de JOISEL)	Proportions des granulats (S,G) dans la granulométrie du béton frais	Facteurs de composition du béton frais (G/S et E/C)
A	G/S=2.22 E/C=0.53	$M_f=3.18$ $W(\%)=07$	S(%)=32 G(%)=68	Poids du béton prélevé: $P_b=4000g$ S=1032.52g G=2310.31g C=461.13g E=326.35g	S(%)=29 G(%)=71	G/S=2.24 E/C=0.71
B	G/S=1.67 E/C=0.56	$M_f=3.38$ $W(\%)=11$	S(%)=38 G(%)=62	$P_b=4157g$ S=855.43g G=2281.35g C=669.30g E=522.89g	S(%)=29 G(%)=71	G/S=2.67 E/C=0.78
C	G/S=1.36 E/C=0.57	$M_f=3.37$ $W(\%)=07$	S(%)=41 G(%)=59	$P_b=3828g$ S=838.68g G=1996.05g C=611.01g E=390.99g	S(%)=30 G(%)=70	G/S=2.38 E/C=0.64
D	G/S=1.62 E/C=1.51	$M_f=2.51$ $W(\%)=03$	S(%)=37 G(%)=63	$P_b=3841g$ S=1346.04g G=1513.78g C=628.53g E=406.39g	S(%)=44 G(%)=56	G/S=1.12 E/C=0.65

a) Variation de la quantité d'eau mélangée :

Les causes de variation dans la quantité d'eau de gâchage dans le béton frais sont multiples. Les plus importantes sont les suivantes :

- a - L'eau n'est pas mesurée avec précision, du moment que les centralistes dosent la quantité d'eau au dépens de la fluidité demandée. En d'autre terme, c'est à l'appréciation du centraliste que se fait le dosage en eau.
- b - Le volume d'eau versé n'est pas correcte. L'introduction de l'eau dans le Skip se fait avec une perte importante.
- c - L'humidité des granulats n'est pas contrôlée (reste inconnue). En prenant l'exemple des centrales étudiées, et en exploitant le tableau 5.20, on aura la quantité d'eau provenant de l'humidité du sable (voir le tableau 5.21) qui varie entre 20 et 76 litres

par mètre cube du béton (l/m^3), c'est à dire entre 11% et 39 % de la quantité nominale d'eau.

Tableau 5.21 : Evaluation de la quantité d'eau apportée par le sable des 4 centrales analysées (litres).

Entreprise	A	B	C	D
La teneur en eau du sable (%)	07	11	07	03
Quantité d'eau apportée par le sable par m^3 du béton (l)	40	76	50	20
Pourcentage de la quantité nominale d'eau(%)	22	39	25	11

d - Une quantité d'eau est versée dans le béton pour compenser la perte de slump ou pour améliorer l'ouvrabilité sur chantier. Cette eau n'est pas compensée par un surplus de ciment, d'où la résistance et la durabilité peuvent être compromises. Cette erreur est très étendue dans nos chantiers en cas d'absence de contrôle.

Donc la variation de la quantité d'eau de gâchage dans nos chantiers peut être l'une des plus importantes causes de variation dans la qualité du béton. Cela est dû au rapport E/C qui est le premier facteur déterminant la résistance et la durabilité du béton. A l'appui de cela, on peut citer un article récent de G.FAGERLAND [35] dont lequel, il montre l'effet du surplus de l'eau de gâchage sur la résistance du béton. Le texte traduit est le suivant : " La variation de la résistance est approximativement égale à la variation de la quantité d'eau de gâchage ". Voir figure 3.2.

b) Variation de la granulométrie :

En comparant la granulométrie de la composition donnée à l'état sec (avant malaxage) avec celle de l'état frais (après malaxage) (voir figures 5.29 à 5.32), on remarque qu'il existe toujours une variation. Cette variation varie d'une centrale à

béton à une autre. Les causes de variation de la granulométrie d'avant et après malaxage peuvent être les suivantes :

a - On ne surveille pas la séparation des granulats de différentes origines dans les boxes de stockage.

b - La granulométrie de même origine se diffère (surtout pour le cas des sables). Dans le paragraphe 5.2.2.1 de ce même chapitre, on a montré que le sable joue le rôle prépondérant dans la variation de la granulométrie.

c - Le dosage en sable se trouve varié par la quantité d'eau apportée (teneur en eau). Ce qui explique que la plus grande surface de décalage entre les deux courbes granulométriques se trouve dans la partie sable ($< 5\text{mm}$). Voir Figures 5.29 à 5.32.

d- L'organisation de l'entreprise joue un rôle important dans le respect de la granulométrie. En soulevant le décalage entre les deux (2) courbes granulométriques des figures 5.29 à 5.32 existants au niveau du tamis 5mm pour chaque centrale, on aura le tableau 5.22.

Tableau 5.22: La différence de tamisats (entre les 2 courbes granulométrique) au tamis 5 mm pour chaque centrale analysée.

Entreprise	A	B	C	D
Différence de tamisats au tamis de 5mm (%)	03	09	11	07

On remarque que l'entreprise la plus organisée (21 compositions disponibles sur la centrale à béton), sa variation de la granulométrie est la moindre par rapport aux autres. L'exemple de la centrale (C) qui donne un décalage le plus élevé, c'est la centrale qui s'intéresse peu à la composition, vu son mode d'organisation (une (1) composition disponible sur la centrale à béton) et son mode d'approvisionnement des granulats (variation continue des origines d'approvisionnement). En d'autres termes, cette centrale à béton n'a pas pour chaque origine de granulats une nouvelle composition.

e - Absence totale d'un contrôle régulier des granulats. C'est à base de ce contrôle que doit avoir toute correction possible pendant la confection du béton. Le contrôle peut se faire régulièrement et en premier lieu sur la granulométrie et la densité vraie des granulats.

Donc la variation de la granulométrie de nos compositions peut être, elle aussi, un des facteurs influants sur la qualité, sachant qu'une variation dans la granulométrie implique une variation dans la quantité d'eau exigée pour produire l'ouvrabilité voulue. D'où une variation dans le rapport E/C.G.FAGERLAND [35] estime la variation de la quantité d'eau de gâchage à cause de la variation de la granulométrie par 26l/m^3 , d'où ± 10 à 15% de la quantité d'eau totale.

c) Variation de la quantité du ciment :

La variation due au ciment peut intervenir par deux (2) aspects :

La qualité (classe vraie du ciment du béton) et la quantité réelle dans le mélange.

a - Dans le paragraphe 5.2.2.2 de ce même chapitre, on a montré que dans une même cimenterie, la résistance à la compression du ciment varie. D'une cimenterie à une autre, elle varie aussi. Dans les centrales à béton, la classe vraie du ciment porte peu. Les entreprises se désintéressent de plus en plus à ce composant vital et à son contrôle régulier. Dans un silos de stockage de ciment, on peut trouver plus qu'une origine.

b - La quantité réelle du ciment dans le béton frais varie de celle désignée par la composition. La quantité du ciment trouvée dans les échantillons prélevés dans les quatres (4) centrales et convertie par m^3 du béton montre cela. Voir Tableau 5.23.

Tableau 5.23 : La quantité réelle du ciment par mètre cube du béton frais

Entreprise	A	B	C	D
Quantité réelle du ciment / m^3 du béton frais (kg)	341	384	366	365

d) Variation des rapports E/C et G/S:**a) Le rapport eau/ciment (E/C):**

Comme c'est montré dans le tableau 5.20, le rapport E/C à l'état frais (à la sortie du matériel de production du béton) a subi des changements. Cela peut être dû à la combinaison de deux ou plusieurs facteurs de variation des composants cités ci-dessus.

D'après le ACI 211.1-81 [06] et une documentation Allemande du V.D.Z béton 11.1970 [15], les estimations des résistances à la compression que peuvent être données par les rapports E/C (à l'état frais dans les quatres 4 centrales à béton étudiées) sont données par le tableau 5.24.

Tableau 5.24 : Estimation des résistances à la compression d'après le ACI 211.1-81] et la documentation allemande V.D.Z béton 11.1970.

Entreprise	A	B	C	D
Rapport E/C à l'état frais	0.71	0.78	0.64	0.65
Résistance moyenne à 28 jours estimée d'après le ACI 211.1-81 [MPa]	≤ 20	≤ 20	≤ 25	≤ 25
Résistance moyenne à 28 jours estimée d'après la documentation Allemande V.D.Z Béton 11.1970 [MPa]	≤ 25	≤ 23	≤ 30	≤ 29

Les résistances moyennes données par le ACI 211.1-81 [06] ou la documentation Allemande [15] donnent une idée sur le niveau de qualité que peuvent atteindre nos bétons à la sortie du matériel de production à conditions que tous les autres paramètres de mise en oeuvre seront respectés. Ces résultats peuvent être comparables à la résistance moyenne estimée dans la phase statistique (entre 20 et 25 MPa). La différence peut être rendue à la mise en oeuvre du béton dans les moules qui peut être défectueuse.

D'après la relation entre la perméabilité et le rapport E/C donnée par la documentation [14], l'estimation de la perméabilité en fonction de nos rapports E/C à l'état frais est donnée par le tableau 5.25

Tableau 5.25 : L'estimation des coefficients de perméabilité d'après la documentation [14].

Entreprise	A	B	C	D
Rapport E/C donné par la composition	0.53	0.56	0.57	0.51
Coefficient de perméabilité (10^{-14} m/s), donné par la documentation [14]	11.43	15.71	19	09
Rapport E/C à l'état frais	0.71	0.78	0.64	0.65
Coefficient de perméabilité (10^{-14} m/s) correspondant	130	170	51	63
Rapport des coefficients de perméabilité	11	11	03	07

On observe d'après ce tableau que la perméabilité d'où la durabilité se trouve compromise par l'augmentation du rapport E/C après malaxage. Le coefficient de perméabilité du béton réalisé est au moins trois (3) fois plus élevé que celui du béton conçu (de la composition initiale).

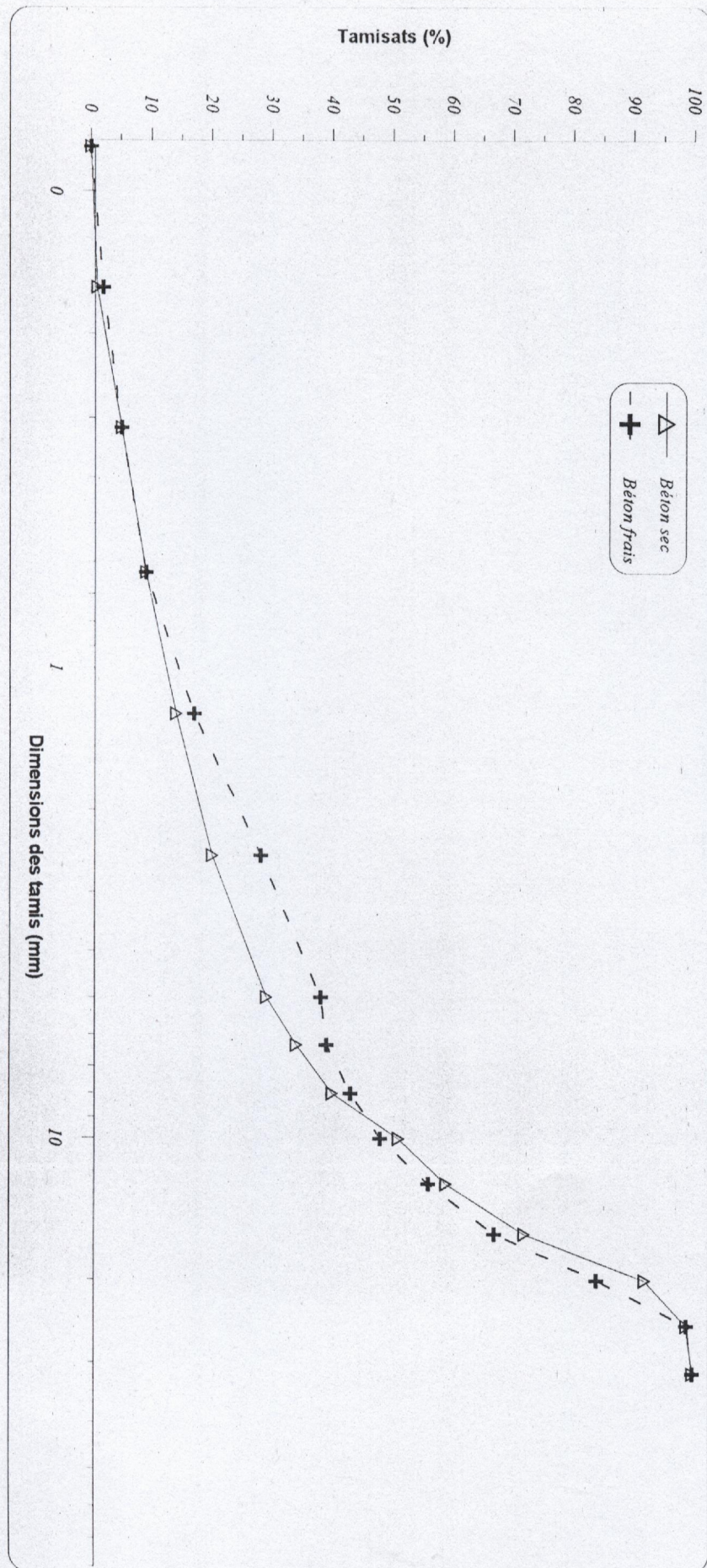
β) Le rapport Gravier/Sable (G/S):

Comme c'est montré dans le tableau 5.20 le rapport G/S à l'état frais a subi aussi un changement. Ce changement ne peut qu'expliquer les points suivants :

- La variation de la granulométrie des granulats par rapport à celle donnée par la composition initiale.
- La perte dans le dosage du sable dû à la teneur en eau dans ce dernier (ce qui a faussé le dosage du sable).

A ce niveau, on peut remarquer que l'entreprise (A) qui dispose d'une organisation efficace (21 compositions, sur la centrale à béton) a obtenu un changement minimal (de $G/S=2.22$ à $G/S=2.24$).

A partir du rapport G/S obtenu pour les quatre (4) centrales à béton, on peut dire que notre béton pour trois (3) centrales à béton est sujet à la ségrégation et nécessitant des précautions de mise en oeuvre. Pour une seule centrale à béton, le rapport donne une bonne ouvrabilité mais ne permet pas des résistances élevées.



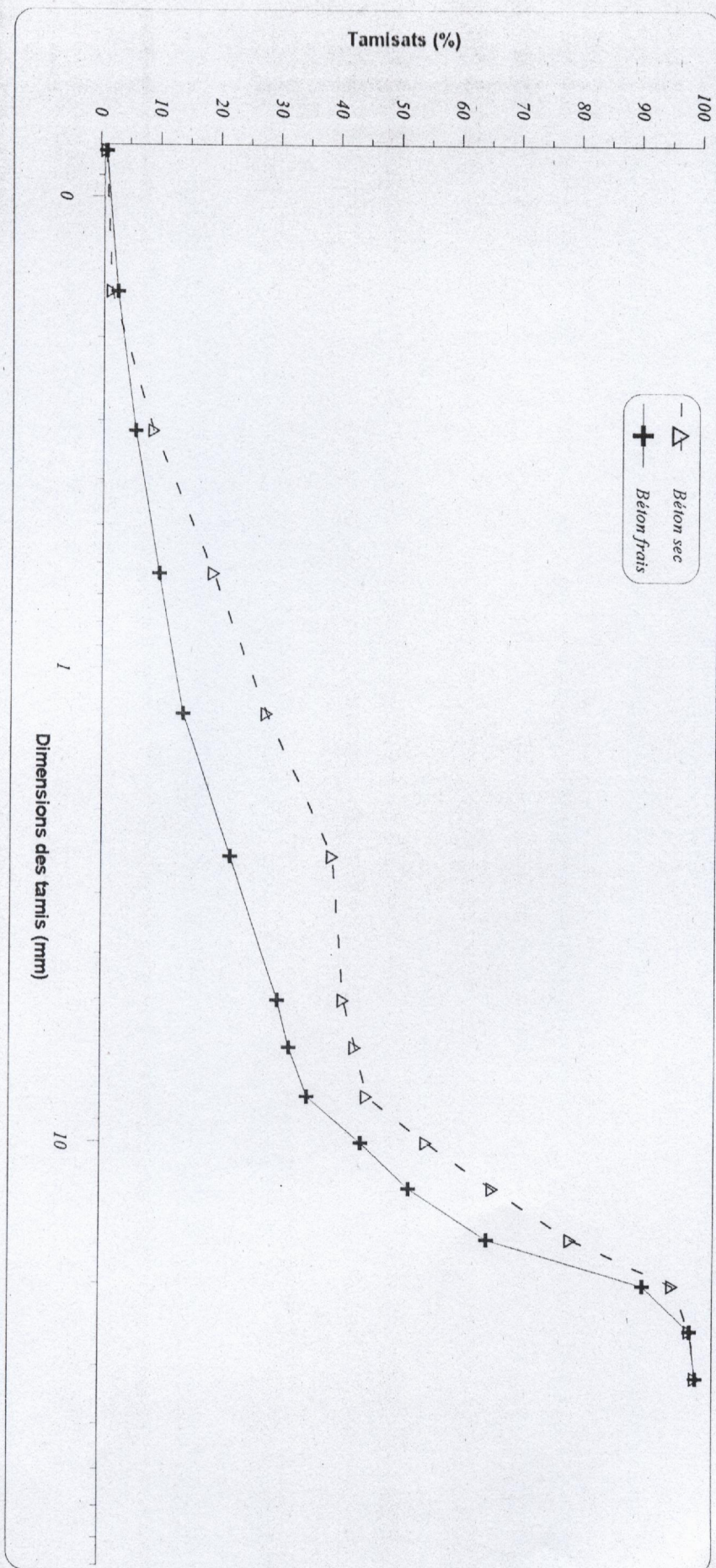


Figure 5.31: Comparaison des courbes granulométriques du béton de l'état sec (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage): Entreprise C.

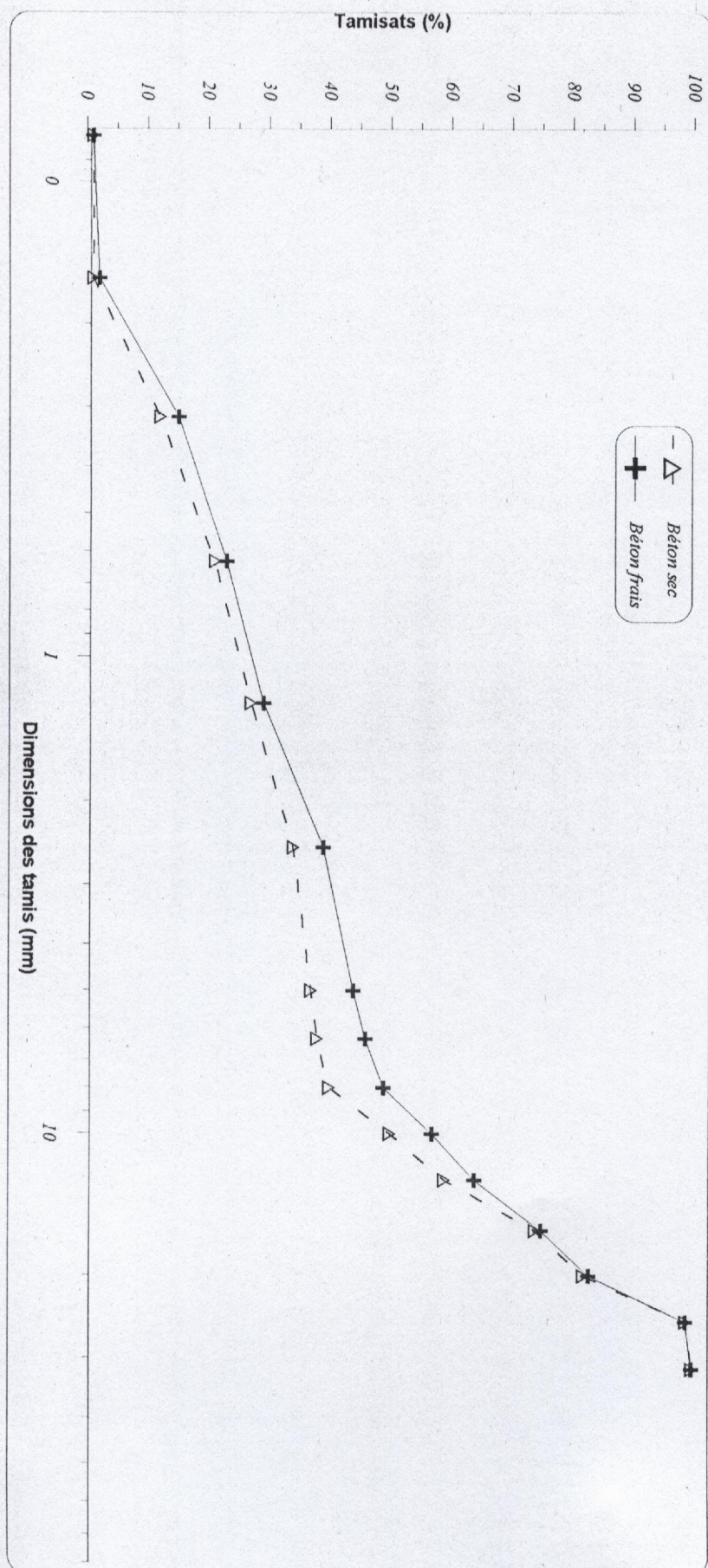


Figure 5.32: Comparaison des courbes granulométriques du béton de l'état sec (avant malaxage) avec celui de l'état frais (après malaxage): Entreprise D

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions générales :

La qualité intrinsèque du béton produit liée à la composition et à la qualité des matériaux peut être acceptable, dans les chantiers. Mais elle reste toujours faible pour des dosages en ciment de l'ordre de 350 Kg/m^3 . La question qui doit être posée est : est ce que la valeur intrinsèque estimée dans l'intervalle [205-253 bars] est le niveau de performance dans nos chantiers ou elle peut être facilement dépassée ?

La confection du béton dans nos chantiers est régie par les mêmes facteurs et les mêmes modes. Ce qui laisse comprendre que toutes les entreprises maîtrisent de la même manière la technologie de fabrication du béton dans le chantier. Ce qui peut être expliqué par le fait qu'aucune corrélation entre la classe du béton produit et la catégorie de l'entreprise n'est apparente.

L'exploitation des procès verbaux d'écrasement à tous niveaux nous a permis de faire les conclusions suivantes :

- Le contrôle n'a pas le sens qu'il doit avoir à savoir; régulariser et apprécier la qualité sur chantier. En effet nous avons relevé certaines insuffisances tels que :

- Prélèvement de la même gâchée.
- Insuffisance du nombre d'éprouvettes dans l'échantillonnage.
- Absence du contrôle des matériaux de base.
- La fréquence des prélèvements est indéterminée.

- Le contrôle n'est que superficiel. Aucun suivi des différentes opérations, pendant la confection, comme la vérification de la composition à tout stade, n'apparaît dans les différents bétonnages. d'où, le béton produit est loin d'être économique. En effet, la résistance dans les chantiers court des risques très variables de ne pas atteindre la classe ou la résistance de calcul voulue. Ce qui affecte cette dernière, alors que le béton est classé de façon à assurer son utilisation rationnelle.

Le diagnostic des moyens de confection du béton dans nos centrales à béton a révélé les conclusions suivantes :

- Les causes de variations de la qualité du béton sont multiples, dès sa confection dans les centrales à béton.

- Les qualités intrinsèques des composants, pris chacun à part, sont soumis à des variations qu'il faut en tenir compte dans la composition durant le dosage et le malaxage. En cas contraire, leur effets sur la qualité du béton seront considérables. Suivant l'importance d'effet sur la qualité du béton, l'attention doit être donnée respectivement aux ciments, aux sables, aux graviers puis à l'eau.
- Lors du malaxage dans les centrales à béton, les compositions des bétons déjà préparées ne sont pas respectées. Ce qui nous donne en général des mélanges instables d'où des résistances à la compression dont la variation est élevée.
- Le mode d'approvisionnement et de stockage des composants ne permettent jamais le respect de la composition donnée par le laboratoire. Ce dernier reste à l'écart de toute résolution ou toute correction possible.
- La quantité d'eau de gâchage est le seul facteur causant les plus larges variations dans la qualité du béton dans nos chantiers.
- Nos bétons présentent un risque potentiel de ségrégation lors de la mise en oeuvre sur les chantiers. Cela peut être remarqué dans les compositions consultées et sur les bétons frais.

Il apparaît, donc, de la présente partie que les défaillances de la résistance en compression observées en phase statistique sont dues à une mauvaise prise en charge de la qualité du béton par:

- Une mauvaise utilisation des composants : les granulats étant conformes vis à vis des spécifications, mais ils présentent certaines insuffisances que l'on peut surmonter, pour pouvoir atteindre les résistances en compression escomptées. (Classe vraie du ciment, diamètre maximal (D_{max}) du béton, finesse des sables et l'absence d'adjuvant).
- Une mauvaise organisation dans la production du béton (approvisionnement, stockage, etc...)
- Une absence de coordination entre l'équipe de conception (laboratoire et l'équipe de production).

6.2 Recommandations :

6.2.1 Recommandations pour la pratique :

A/ Le contrôle continue de la qualité du béton:

1/ La résistance du béton doit être continuellement mesurée au niveau de la centrale à béton. Cette recommandation s'applique de la centrale à béton jusqu'au chantier.

Sur la base d'un nombre au moins égal à six (6) éprouvettes, la moyenne et l'écart type des résistances du béton actuel sont à évaluer, tout en respectant le mode de prélèvement.

2/ L'évaluation des résultats des tests de contrôle doit être supervisée par un ingénieur qui est responsable de la production du béton. Dans ce contexte, ingénieur ne doit pas approuver uniquement la résistance du béton, mais aussi la conformité de la résistance du béton à la classe voulue, sans compromettre pour cela la sécurité et le coût de la structure.

3/ La meilleure centrale à béton est celle qui peut produire une panoplie de classe de résistance à la compression et non pas celle qui produit un béton de haute performance avec un risque de non atteinte variable.

4/ Tout de même, prévoir le défaut et maîtriser la qualité, c'est agir à tout les stades de l'élaboration d'un ouvrage. Il y a des actions de contrôle qui doivent s'effectuer dans un créneau de temps très court: C'est le cas de réception des bétons sur chantier, et il y en a autres où la latitude d'intervention est plus grande: C'est le contrôle de l'état de fonctionnement de la centrale de fabrication. Ce contrôle peut être raisonnablement fait la veille. C'est le contrôle de la qualité des stocks de granulats à la centrale pour faire les corrections possibles dans la composition donnée. Ou encore plus en amont, le suivi de la production des cimenteries ou des carrières.

5/ Il faut penser aux moyens instantanés de contrôle de qualité tels que :

- Le contrôle de la composition effective des bétons sur chantier par des méthodes pratiques et simples tels que le procédé "de la poêle à frire" qui sert d'une manière simple à séparer l'eau du béton frais par l'alcool à brûler et de faire ensuite la granulométrie sur le béton frais.
- L'emploi des contrôles non destructifs tels que la méthode combinée de l'indice sclérométrique et la vitesse du son pour faire les ultimes vérifications directes sur les ouvrages.

6/ Pour faire le contrôle nécessaire, il faut que les laboratoires soient disponibles. Il est recommandé que les laboratoires du béton soient établis à travers toutes les centrales à béton ou au moins un laboratoire par entreprise. Ces laboratoires doivent être certifiés et agrés. L'équipement nécessaire est simple, le minimum est:

- i- Une simple presse hydraulique .
- ii- Une balance, un petit malaxeur du béton, des moules et un vibreur.
- iii- Des series de tamis .
- ix- Le cône d'ABRAMS.

B/ La confection du béton:

1- Il est extrêmement important que la variation de la résistance du béton soit réduite. Ces variations dans la qualité et la résistance sont réduites si les règles suivantes sont suivies:

a/ La variation dans l'eau de gâchage est le seul paramètre causant de large variations dans la résistance du béton, pour cela: L'humidité des granulats, spécialement du sable, doit être mesurée régulièrement et compensée dans la quantité d'eau, et les granulats en général doivent être protégés de la pluie.

-Aucun ajout d'eau n'est permis sur le chantier pour compenser la perte de slump ou pour améliorer l'ouvrabilité.

b/ Le ciment doit être certifié par des laboratoires agrés. Sa classe vraie doit être connue. En plus, il doit avoir une faible variation de la résistance à la compression.

c/ La qualité des granulats doit être testée pour chaque nouveau approvisionnement, au minimum une analyse granulométrique doit être faite. En cas de variation, cela doit être tenu en compte dans la composition du béton. C'est pour cette raison que cette dernière doit être changée ou corrigée après chaque nouveau approvisionnement. D'ou il est recommandé de préparer à l'avance les compositions du béton à base de granulats d'origines probables, et de les laisser à la disposition du centraliste.

d/ La composition du béton définitive sur la centrale à béton doit être basée sur des essais préalables et des essais de convenance en relation avec la résistance moyenne et la variation de la résistance voulues.

2- En éliminant les fluctuations dues aux matériaux, on peut dire que nous possédons tout les éléments permettant de fabriquer un béton de bonne qualité. Hélas, deux points empêchent et ne permettent pas une garantie totale de la production:

-C'est l'homme à qui on impose des rendements de plus en plus importants sans toujours lui donner la qualification nécessaire. Dans ce cas, on doit insister sur la formation et la sensibilisation du personnel.

- C'est la mécanique réunissant dans une chaîne très longue des matériels de niveaux techniques fort différents qui traitent des matériaux présentant des hétérogénéités ou évoluant dans le temps. Les incidents apparaissent donc inévitables. Dans ce cas, il faut chercher à en réduire la fréquence et à détecter ceux qui restent.

3- Le progrès serait satisfaisant si on pouvait avancer dans le transport et la mise en place pour atteindre un niveau de sécurité équivalent à celui atteint en fabrication. Malgré que l'étude n'a pas été étendue vers ces deux domaines, mais on peut dire qu'on est très en retard autant pour les matériels de chantier que pour les dispositifs de contrôle. C'est probablement là que devrait se développer la recherche dans les années à venir.

4- Sur chantier, il faut optimiser le rendement de la qualité du béton de point de vue technico-économique. De là, une méthodologie d'étude de la qualité du béton s'impose et qu'on peut la recommander à partir de cette étude et qui est la suivante:

En prenant la résistance à la compression comme critère unique de la qualité du béton, et en fixant la classe de résistance voulue, c'est à dire la résistance moyenne et la variation (écart type et coefficient de variation) voulues, on peut déterminer les seuils de variation de chaque paramètre intervenant dans la confection du béton à part. Au delà de ces seuils, la classe du béton voulue sera compromise.

6.2.1 Recommandations pour les futurs travaux:

Afin de compléter cette étude et de cerner de près tous les paramètres qui régissent la qualité du béton dans les chantiers Algériens, nous recommandons donc, éventuellement pour un travail futur, d'aborder les points suivants:

1/ Détermination des seuils de variation de chaque paramètre intervenant dans la confection du béton sur la qualité, au-delà duquel, cette dernière (telle qu'on la définit) sera compromise. Parmi ces paramètres, on cite:

-Les granulats (Sable et Gravier).

-Les ciments.

-L'eau.

-Le transport.

-La mise en oeuvre.

2/ Détermination du nombre minimal d'essais (éprouvettes) par procès verbal en fonction des catégories des entreprises (en fonction de leur maîtrise de la technologie du béton).

3/Détermination du nombre minimal pour classer et identifier son béton en fonction des catégories des entreprises.

4/ Influence de la mise en oeuvre du béton (comparaison entre les résultats des résistances des procès verbaux et les résultats des essais sur structure) (étude corrélative).

5/L'influence de la variation de résistance sur les autres propriétés (Module d'élasticité, l'adhérence acier-béton, fluage et retrait).

Bien que notre étude n'a pas été à la mesure de nos ambitions de départ pour différentes raisons, on espère qu'elle a pu ouvrir une porte sur une méthodologie d'analyse de la qualité dans les chantiers. Toute de même, cette étude peut être mieux raffinée pour en tirer plus de résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - **J.DEBOUVERIE** "La réglementation et l'innovation du bâtiment dans les pays en développement ", Rapport du C.E.B.T.P, Dec. 1987.
- [2] - **P.C.AITCIN** "La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord ", Matériaux et construction N° 20, 1987 pp 180-189.
- [3] - **M. HAMRAT** "Béton à haute performance, formulation et propriétés rhéologiques et mécaniques", Thèse de magister, Dpt. Genie-Civil, Chelef 1994.
- [4] - **G.DREUX** "Nouveau guide du béton", 5^e Edition Eyrolles 1986.
- [5] - **M.SAMARAI** "La durabilité du béton en climat chaud", Séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, Mars 1994, pp 20-25.
- [6] - **J.J.BROOKS** et **A.M.NEVILLE** "Concrete technology", Longman scientific and technical, London, 1987.
- [7] - **G.DREUX** et **F.GORISSE** "Contribution à l'étude de la finesse des sables sur diverses qualités des bétons", Annales ITBTP, N°261, Sep. 1969.
- [8] - **F.GORISSE** "Essais et contrôle des bétons", Editions Eyrolles 1978.
- [9] - **H.C.ENTROY**, **R.E.FRANKLIN** et **D.C TEYCHENNE** "Design of normal concrete mixes", University of Glasgow, Dpt of Civil-Engineering, England, pp 28.
- [10] - **A.MAYER**, Personal communication, 1978.
- [11] - **R.E.DAVIS** "Uniformity of portland cements, facts and fantasies", NSGA/NRMCA Joint technical information letter, N°315/318, National standard gravel association, Silver spring, Maryland, Feb. 1975, pp 5.
- [12] - **A.PAILLERIE** "Rôle des adjuvants", Proceeding du séminaire "Le béton et l'eau", Organisé par le collège international des sciences de la construction, Paris, Juin 1985, pp 68-88.
- [13] - **A.BRAHMA** "Le béton", Office des Publications Universitaires, 1992.
- [14] - **A.M. NEVILLE** "Properties of concrete", 3^e Edition, Pitman, England 1982.
- [15] - **M.VENUAT** "La pratique des ciments et des bétons", Edition moniteur, Paris, 1976.
- [16] - **M.ADAM** "Durabilité et pathologie du béton", Technique de l'ingénieur, Traité construction, C2 250.

- [17] - **DTR. BE 2-1**, Document technique reglementaire "Regles d'exécution des travaux de construction d'ouvrage en béton armé", C.G.S, 1991.
- [18] - **R.SHALON** "Report on behaviour of concrete in hot countries", Part 1: fresh concrete, *Materiaux et constructions*, Vol. 11, N°62, pp 127-139.
- [19] - **G.BURG** "Slump loss, air loss, and field performance of concrete", *ACI journal*, Technical paper, N°80-34, 1983.
- [20] - **A.CORNEILLE** "L'eau et la cure du béton", *Proceeding du séminaire "Le béton et l'eau"*, Organisé par le collège international des sciences de la construction, France, Juin 1985, pp 89-103.
- [21] - **G.DREUX et F.GORISSE** "Vibration, ségrégation et ségrégabilité", *Annale ITBTP* N°265, Janvier 1970.
- [22] - **M.VENUAT** "Coffrage et vibration du béton", *le Moniteur*, Mai 1975.
- [23] - **L.LACHEMAT** "Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés du béton chaud", séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, Mars 1994, pp 30-44.
- [24] - **N.GOWRIPALAN, J.G.CABRERA, A.R.CUSENS et P.J.WAINWRIGHT** "Effect of curing on durability", *Concrete international*, Feb. 1990, pp 47-54.
- [25] - **J.G.CABRERA, SCHOLER et P.J.WAINWRIGHT** "Assenement of the effectiveness of different methods of curing concrete using gas permeability", *Magazine of concrete research*, 1991.
- [26] - **M.CHARONNAT** "Bétonnage par temps chaud" *Proceeding du séminaire de formation continue, "Chaussées en béton"*, Alger, Dec. 1990.
- [27] - **L.LACHEMAT** "Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés mécaniques et durabilité du béton en climat chaud", *Thèse de magister, Institut de Genie-Civil, USTHB*, 994.
- [28] - **S. ELDESOKY** "Variation de la résistance du béton en pratique", *Proceeding du 5^{eme} seminaire Arabe de Genie civil*, Tripoli, Lybie, Nov. 1993, pp 392-403.
- [29] - **I.SOROKA** "Variation de la résistance à la compression sous differentes conditions", *Materiaux et construction*, N°21, Vol.4, 1971, pp 155-161.
- [30] - **G.DREUX et F.GORISSE** "Contribution à l'étude statistique des contrôles du béton", *Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics (ITBTP)*, N°302, Fev. 1973, pp 145-163.
- [31] - **F.KHARCHI et S.BOUTAMINE** "Etude critique des bétons fabriqués dans les chantiers Algeriens", *Proceeding du seminaire international sur la qualité du béton en climat chaud*, Ghardaia, Mars 1994, pp 173-181.

- [32] - **S.KENAI** et **A.FATIMA** "Analyse de quelques cas pathologiques de construction dans le sud Algerien", Proceeding de seminaire international sur la qualité en climat chaud, Ghardaia, Mars 1994, pp 146-155.
- [33] - **K.NASRI** "La qualité du béton au sud de l'Algerie", Proceeding du seminaire international de la qualité du béton en climat chaud, Ghardaia, Mars 1994.
- [34] - **D.S. PRAKASH RAO, V.ANURADHAAN** et **N.J.MENZES** "Correlation entre la pratique des constructions et les codes de pratiques", The Indian concrete journal, Dec. 1991, pp 607-613.
- [35] - **G.FAGERLUND** "Economical use of cement in concrete", Building issues, Volume 6, Lund University, Sweden, 1994, pp 22.
- [36] - **J.PERCHAT** "Reglements étrangers du béton armé: Etude comparative des codes CEB-BSI-DIN et ACI", Editions Eyrolles, Paris 1982.
- [37] - Normalisation Française, P18-325, AFNOR, ENV 206, "Béton: performances, production, mise en oeuvre et critère de conformité", Août 1991.
- [38] - British standard, BS 8110, Part1, "Structural use of concrete", 1985.
- [39] - Normalisation Française, NFP 18-010, AFNOR, "Classification et désignation des bétons", Dec. 1985.
- [40] - Egyptian code of practice for design of reinforced concrete structures, N°464, Cairo, Egypt, 1989.
- [41] - **CBA 93** "Regles de conception et de calcul des structures en béton armé", D.T.R - B.C.2-41, Centre National De Recherche Appliquée en Génie Parasismique, C.G.S. 1994
- [42] - **J.A.BLAND** "Statistics for construction students", Longman grouplimited, New York, 1985.
- [43] - **H.RUSH, D.SELL** et **E.RECHWIZ** "Etude de 927 chantiers", Cahier du centre Scientifique et Technique du Batiment, CSTB, N°305, Dec. 1984.
- [44] - Normalisation Française, NFP 18-305, AFNOR, "Bétons prêts à l'emploi préparés en usine", Dec. 1981.
- [45] - Document de Centre National de l'animation Technique CNAT "Classification, des entreprises publics et privées (dans le domaine du batiment)", Janv.1992.
- [46] - **S.POPOVICS** "Analysis of the concrete strength versus water- cement ratio relationship", ACI materials journal, Sep.Oct. 1990, Vol. 87, N°5, pp 517-529.