

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

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL  
LABORATOIRE DE TECHNOLOGIE DES MATERIAUX ET GENIE DES PROCEDES

**MEMOIRE DE MAGISTER**  
Présenté par : M<sup>r</sup> BENYESSAD Djamel

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en Génie Civil  
Option : Matériaux et Structures

**THEME**

**VALORISATION DES MATERIAUX GRANULAIRES ISSUES DES GISEMENTS DE  
ROCHES MASSIVES DE LA WILAYA DE BEJAIA CAS DE SOMACOB AKBOU**

Devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> BOUAFIA YUCEF	Professeur, Université de Tizi Ouzou.	Président
M <sup>r</sup> MERABET DJOUDI	Professeur, Université de Bejaia.	Rapporteur
M <sup>r</sup> TAHAKOURT ABDELKADER	Maître de conférences Université de Bejaia	Co-Rapporteur
M <sup>r</sup> MAZA MUSTAPHA	Maître de conférences, Université de Bejaia.	Examineur
M <sup>r</sup> CHELOUAH NASSER	Maître de conférences, Université de Bejaia	Examineur
M <sup>r</sup> ARKOUB HAMID	Maître de conférences, Université de Bejaia	Examineur
M <sup>r</sup> MAKHLOUFI AMAR	PDG de SOMACOB Bejaia	Invité

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Chapitre I : Etude Bibliographique sur les matériaux granulaires</b>	
I-1 : Généralités sur les matériaux granulaires : .....	4
I-1-1 : Définitions : .....	4
I-1-2 : Importances des matériaux granulaires : .....	5
I-1-3 : Les granulats dans le secteur du bâtiment et travaux publics .....	6
I-1-4 : Classification des granulats .....	6
I-1-4-1 : Classification d'après leur provenance .....	6
I-1-4-2 : Classification d'après leurs dimensions .....	7
I-1-4-3 : Classification d'après leur nature minéralogique .....	7
I-1-4-4 : Classification d'après leur pétrographie .....	8
I-1-5 : Origine des granulats .....	9
I-1-5-1 : Roches magmatiques .....	9
I-1-5-2 : Roches métamorphiques .....	10
I-1-5-3 : Roches sédimentaires .....	11
I-1-8 : Les critères à demander et à retenir pour les sables à béton.....	13
I-1-8-1 : Module de finesse et fuseau granulométrique des sables .....	13
I-1-8-2 : La caractérisation des fines .....	14
I-1-8-3 : Valeur au bleu de méthylène .....	18
I-1-8-4 : L'équivalent de sable .....	19
I-1-9 : Valorisation des sables de concassage .....	19
I-1-9-1 : Rivalité entre les sables selon leur origine .....	19
I-1-9-2 : Les facteurs techniques .....	19
I-1-9-3 : Les facteurs économiques.....	20
I-1-9-4 : Comment valoriser les sables de concassage .....	20
I-2 : Exploitation des gisements de roches massives .....	23
I-2-1 : Que doit-on chercher .....	23
I-2-2 : Roches massive .....	24
I-2-2-1 : Extraction .....	25
I-2-2-2 : Elaboration des granulats .....	25
I-2-3 : Les pollutions au niveau des carrières .....	29
I-2-3-1 : Pollution liée à la genèse du massif .....	29
I-2-3-1 : Pollution accidentelle .....	29

I-2-4 : Les installations de traitement .....	30
I-2-4-1: Elimination avant le concasseur primaire.....	30
I-2-4-2: Elimination avant et après le concasseur primaire.....	31
I-2-5 : Les facteurs influençant la propreté des granulats .....	31
I-2-5-1 : La qualité de la roche au niveau d'un gisement .....	31
I-2-5-2 : Le fonctionnement de la chaine d'élaboration .....	32
I-2-6 : Influence des concasseurs sur la qualité .....	32
I-2-7 : Influence du stockage sur la qualité des granulats .....	33
I-2-8 : Pollution et contamination .....	33
I-3 : Influence des fines de sable sur les propriétés des bétons .....	34
I-3-1 : Mécanique des bétons sous conditions locales .....	34
I-3-1-1 : Expérimentation .....	34
I-3-1-2 : Résultats .....	35
I-3-1-3 : Conclusion .....	37
I-3-2 : Influence des fines calcaire et argileuses sur les bétons .....	37
I-3-2-1 : Préparation des composants .....	38
I-3-2-2 : Résultats obtenus .....	38
I-3-3 : Contribution à l'étude de l'influence des fines sur les caractéristiques mécanique du béton .....	41
I-3-3-1 : Procédure expérimentale .....	42
I-3-3-2 : Caractéristiques mesurées.....	42
I-3-3-3 : Résultats et analyses .....	42
I-4 : Défillérisation des sables de concassage .....	44
I-4-1 : Introduction .....	44
I-4-2 : Techniques de défillérisation .....	45
I-4-2-1 : Lit fluidisé .....	45
I-4-2-2 : Séparateur dynamique .....	46
I-4-2-3 : Séparateur combiné .....	46
I-4-3: Conclusion .....	47

## **Chapitre II : Cartographie des gisements des granulats : W- Bejaia**

Chapitre II :.....	48
II-1 : les exploitations (carrière) des gisements de roches massives : .....	48
II-1-1 : les exploitations en activité .....	48
II-1-1-1 : Carrière E.N.O.F Timezrit.....	48
II-1-1-2 : Carrière E.N.O.F Adrar Oufarnou : .....	49
II-1-1-3 : Carrière SOMACOB Toudja .....	49
II-1-1-4 : Carrière SOMACOB et ENCOTAB Akbou .....	50

II-1-1-5 : Carrière ETR Bejaia : .....	51
II-1-1-6 : Carrière SNTP Bejaia .....	52
II-1-1-7 : Carrières ETR Kherrata, SARL tout Agrégats .....	52
II-1-1-8 : Carrière SARL Nelle Carrière .....	55
II-1-1-9 : Carrière SNC ZIANE Md LARBI .....	54
II-1-1-10: Carrière LITTORAL AGREATS .....	55
II-1-2: les exploitations en arrêt .....	55
II-1-2-1 : Carrière STRPS (Chellata) Akbou.....	55
II-1-2-2 : Carrière SARL GRAVEM .....	56
II-1-2-3 : Carrière EURL SEMC ZENATI .....	57
II-1-2-4 : Carrière SARL AGREGAT CHREA .....	57
II-1-2-5 : Carrière ETRHB HADDAD .....	58
II-1-3 : Les exploitations en phase d'aménagement .....	58
II-1-3-1 : Carrière EURL MINSOLHYD.....	58
II-1-3-2 : Carrière EURL SEMC ZENATI .....	59
II-1- 4 : Production des granulats de roches massives de la wilaya de Bejaia .....	59
II-1-5 : Surfaces autorisées des exploitations.....	60
II-2 : Gisement des roches meubles (alluvionnaires) w- Bejaia :.....	61
II-2-1 : Production des granulats d'origine alluvionnaires W-Bejaia .....	61
II-2-1-1 : Extractions permanentes (sablères) W-Bejaia.....	62
II-2-1-2 : Extractions temporaires .....	63
II-3 : Carte locale des gisements de granulats W-Bejaia .....	64
II-4 : Analyse quantitatif des granulats du w .Bejaia.....	66
II-4-1 : Production régionale de granulats naturels en 2006 .....	66
II-4-2 : Apport de la wilaya de Bejaia dans la production nationale des granulats .....	66
II-5 : Conclusion .....	68

### **Chapitre III : Etat Actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB Et Caractérisation de leurs Granulats par les essais de laboratoire**

III-1 : Présentation de l'exploitation de SOMACOB AKBOU .....	69
III-1-1 : Historique de l'exploitation .....	69
III-1-2 : Site de la carrière .....	69
III-1-3 : Situation et accès:.....	70
III-1-4 : Géologie de gisement .....	70
III-1-5 : Méthode d'exploitation .....	71
III-1-5-1 : Extraction de la roche .....	72
III-1-5-2 : Concassage et criblage de la roche .....	72



III-2 : Echantillonnage .....	73
III-2-1 : Prélèvement de granulats sur chantier .....	75
III-2-1-1 : Prélèvement de matériaux en cours d'écoulement .....	75
III-2-1-2 : Prélèvement de matériau sur stock .....	76
III-2-2 : Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) .....	77
III-2-3 : Conditionnement des échantillons .....	77
III-3 : Propriétés des granulats de SOMACOB - Essais et spécifications .....	78
III-3-1 : Propriétés intrinsèques .....	78
III-3-1-1 : Etude pétrographique .....	78
III-3-1-2 : Détermination de La teneur en carbonate de calcium $\text{CaCO}_3$ .....	91
III-3-1-3 : Analyse minéralogique par DRX .....	93
III-3-1-4 : Caractéristique mécanique des granulats ; Essai Los Angeles .....	98
III-3-2 : Caractéristiques liées au mode d'élaboration .....	103
III-3-2-1 : Analyse granulométrique .....	103
III-3-2-2 : Module de finesse .....	109
III-3-2-3 : Fuseau granulométrique optimum .....	109
III-3-2-4 : Propreté des granulats .....	110
III-3-2-4-1 : Propreté superficielle .....	111
III-3-2-4-2 : Equivalent de sable à 10% de fines .....	113
III-3-2-4-3 : Essai au bleu de méthylène .....	117
III-4 : Influence des fines sur les propriétés des mortiers.....	121
III-4-1 : L'influence des fines sur les propriétés mécaniques des mortiers.....	121
III-4-1-1 : Mesure des résistances à la compression et à la flexion .....	121
III-4-1-2 : Essai de rupture par flexion .....	124
III-4-1-3 : Essai de rupture par compression .....	125
III-4-1-4 : Discussion des résultats .....	126
III-4-2 : Influence de la teneur en fines sur les retraits des mortiers.....	126
III-4-2-1 : Objectif de l'essai .....	126
III-4-2-2 : Principe de l'essai.....	126
III-4-2-3 : Equipement nécessaire .....	127
III-4-2-4 : Conduite de l'essai .....	127
III-4-2-5 : Résultats et discussion .....	128
III-5 : Conclusion .....	131

## Chapitre IV : Théorie sur les plans d'expériences

IV-1 : Introduction .....	132
IV-2 : Facteurs et réponses .....	133
IV-3 : Surface de réponse .....	133
IV-4 : Les étapes chronologiques des plans d'expériences .....	134
IV- 5 : Modélisation de l'expérimentation .....	135
IV-6 : Forme matricielle des modèles mathématique .....	137
IV-7 : Détermination de l'équation du modèle .....	138
IV-7-1 : Plan optimal à deux niveaux (plan $2^K$ ) .....	138
IV-7-1-1: Variables centrées réduites .....	139
IV-7-1-2 : Calcul des effets des facteurs .....	140
IV-7-2: Plans factoriels à trois niveaux (plan $3^K$ ) .....	141
IV-8 : Teste de modèle (analyse de régression) .....	142
IV-8-1 : Homogénéité des variances .....	143
IV-8-1-1 : Test de COCHRAN .....	143
IV-8-2 : Test de signification des coefficients (test de STUDENT) .....	143
IV-8-3 : Test d'adéquation (test de FISCHER) .....	144
IV-8-4 : Coefficient de détermination (coefficient de corrélation multiple) .....	145

## Chapitre V : Modélisation par plan d'expériences d'une station de traitement des granulats

V-1 : Introduction .....	146
V-2 : Description de la station de traitement des granulats .....	146
V-2-1 : Etape 1 - Poste Elimination .....	147
V-2-2 : Etape 2- Concassage primaire .....	147
V-2-3 : Etape 3- Concassage secondaire (broyage) .....	148
V-2-4 : Etape 4 - Séparation granulométrique (Criblage) .....	149
V-3 : Choix des facteurs du modèle .....	150
V-4 : Domaine d'étude .....	151
V-5 : Choix de la réponse .....	152
V-6 : Choix du plan expérimental .....	152
V-7 : Expérimentation .....	152
V-8 : Modélisation .....	154
V-8-1 : Détermination de l'équation du modèle .....	154
V-8-2 : Calcul des coefficients .....	154
V-9 : Validation du modèle .....	157
V-9-1 : Teste d'homogénéité des variances (Test de CORCHAN) .....	157

V-9-2 : Signification des coefficients de régression (Test de STUDENT) .....	157
V-9-3 : Validation de l'équation par le test de FISHER .....	158
V-9-4 : Coefficient de corrélation .....	159
V-9-5 : Analyse des résidus .....	159
V-9-6 : Test graphique .....	160
V-9 : Conclusion .....	161

## **Chapitre VI : Analyse des résultats et Optimisation des paramètres du modèle**

VI-1 : Résultats du plan d'expériences .....	162
VI-1-1 : Résultats au Point A .....	162
VI-1-2 : Résultats au Point B .....	163
VI-1-3 : Résultats au Point C .....	164
VI-1-4 : Résultats au Point D .....	164
VI-1-5 : Résultats au Point E .....	165
VI-1-6 : Résultats au Point F .....	166
VI-1-7 : Résultats au Point G.....	167
VI-1-8 : Résultats au Point H.....	167
VI-2 : Etude de l'équation du modèle .....	168
VI-2-1 : Effet de l'ouverture de sortie du broyeur .....	169
VI-2-2 : Etude des interactions .....	169
VI-2-3 : Etude d'interaction 1-2 .....	169
VI-2-4 : Etude d'interaction 2-3 .....	171
VI-3 : Evolution du teneur en fines des sables de concassage .....	172
VI-3-1 : Influence de l'ouverture de sortie du broyeur .....	172
VI-3-2 : Influence de l'ouverture de sortie du concasseur primaire.....	173
VI-3-3 : Influence de l'amplitude de vibration .....	175
VI-4 : Optimisation des paramètres .....	176
VI-4-1: Ouverture de sortie du concasseur primaire/Ouverture de sortie du broyeur	176
VI-4-2 : Ouverture de broyeur / Amplitude de vibration .....	178
VI-5 : Conclusion .....	180

<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>182</b>
---	------------

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>184</b>
--	------------

<b>ANNEXES .....</b>	<b>188</b>
----------------------	------------

## LISTE DES FIGURES

Figure (I-1) : Fuseaux proposés pour la granulométrie des sables à béton .....	13
Figure (I-2) : Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité.....	16
Figure (I-3) : fines sphérique : leur usage conduit à une réduction d'eau.....	17
Figure (I-4) : fines anguleuse : leur usage conduit à dosage supérieur d'eau.....	17
Figure (I-5) : Agglomération des éléments les plus fins sur les éléments les plus gros conduisant à une surconsommation d'eau .....	18
Figure (I-6) : Présence dans les fines d'éléments alvéolés avides d'eau.....	18
Figure (I-7) : schéma d'une installation d'élaboration de granulat.....	26
Figure (I-8) : Traitement des matériaux pollués.....	28
Figure (I-9) : Rapport E/C en fonction de la teneur en fillers.....	35
Figure (I-10) : Résistance à la compression des bétons à 28 jours, en fonction de la teneur en fillers.....	36
Figure (I-11) : Retrait des bétons à 28 jours en fonction de la teneur en fillers.....	37
Figure (I-12) : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 250 Kg/m <sup>3</sup> .....	39
Figure (I-13) : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 350 Kg/m <sup>3</sup> .....	39
Figure (I-14) : Résistance à la traction en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 250 Kg/m <sup>3</sup> .....	39
Figure (I-15) : Résistance à la traction en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 350 Kg/m <sup>3</sup> .....	39
Figure (I-16) : Valeur de l'équivalent de sable en fonction de la teneur en fines calcaires et argileuses .....	40
Figure (I-17) : la valeur de bleu de méthylène pour 100 g de sable en fonction des teneurs en fines.....	41
Figure (I-18) : la valeur de bleu de méthylène en fonction des teneurs en fines calcaires et argileuses.....	41
Figure (I-19).Résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en fines.....	43
Figure (I-20).Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines.....	44
Figure (I-21) : Lit fluidisé.....	45
Figure (I-22) : Séparateur dynamique de type Hosokawa.....	45
Figure (I-23) : séparateur combiné Hosokawa.....	46

Figure (II-1) : Evolution de la Production des granulats de roches massives W-Bejaia.....	60
Figure (II-2) : Surfaces autorisées des exploitations W-Bejaia.....	61
Figure (II-3) : Carte des gisements de granulats W - Bejaia.....	65
Figure (II-4) : provenance des granulats w - Bejaia 2006.....	66
Figure (II-5) : production national des granulats.....	67
Figure (II-6) : Evolution de la production nationale des granulats.....	67
Figure (III-1) : photographie de la roche calcaire exploitée par SOMACOB.....	71
Figure (III-2) : Les gradins de la carrière de SOMACOB AKBOU.....	71
Figure (III-3) : Station de concassage de la SOMACOB AKBOU.....	73
Figure (III-4) : Schéma d'un échantillonnage.....	74
Figure (III-5) : Prélèvement d'échantillon sur bande transporteuse.....	75
Figure (III-6) : Prélèvement sur stock.....	76
Figure (III-7) : Constitution de l'échantillon pour laboratoire- principe de quartage...	77
Figure (III-8) : Echantillons prélevés du gisement.....	79
Figure (III-9) : Scie diamantée.....	79
Figure (III-10) : Collage du l'échantillon sur la lame de verre.....	79
Figure (III-11) : Scie d'arasement.....	79
Figure (III-12) polissage dégrossi.....	80
Figure (III.13) polissage de finition.....	80
Figure (III-14) : vérification de l'épaisseur de l'échantillon avec un microscope.....	81
Figure (III-15) : Lames minces préparées au Laboratoire.....	81
Figure (III-16) Polarisation de la lumière naturelle.....	82
Figure (III-17) Principe du fonctionnement du microscope polarisant.....	82
Figure (III-18) : Classification de Dunhman des roches carbonatées.....	85
Figure (III-19) : classification de R Folk des roches carbonatées.....	86
Figure (III-20) : Courbe d'étalonnage du dosage en carbonate de calcium.....	92
Figure (III-21) : Paternes d'identification d'échantillon -A-.....	94
Figure (III-22) : Spectre de la DRX d'échantillon -A-.....	94
Figure (III-23) : Paternes d'identification d'échantillon -B-.....	95
Figure (III-24) : Spectre de la DRX d'échantillon -B-.....	96
Figure (III-25) : Paternes d'identification d'échantillon -C-.....	97
Figure (III-26) : Spectre de la DRX d'échantillon -C-.....	97
Figure (III- 27) : machine Los Angeles.....	100

Figure (III-28) : Courbe granulométrique de gravillon 3/8.....	106
Figure (III-29) : Courbe granulométrique de gravillon 8/15.....	107
Figure (III-30) : Courbe granulométrique de gravillon 15/25.....	108
Figure (III-31) : Courbe granulométrique de sable 0/3.....	109
Figure (III-32) : Fuseau granulométrique optimum. ....	110
Figure (III-33) : Essai de la tache au bleu de méthylène.....	120
Figure (III-34) : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	122
Figure (III-35) : Dispositif pour l'essai de rupture à la compression.....	122
Figure (III-36) : Résistances en flexion des mortiers en fonction de la teneur en fine..	124
Figure (III-37) : Résistances en compression des mortiers en fonction de la teneur en fines.....	125
Figure (III-38) : Dispositif pour la mesure du retrait.....	127
Figure (III-38) : Evolution des retraits en fonction de la teneur en fines.....	129
Figure (III-39) : Evolution des retraits de mortier normale en fonction du temps.....	129
Figure (IV-1) : Formulation du problème expérimental.....	133
Figure (V-1) : Fuseaux de la granularité des sables à béton. ....	146
Figure (V-2) : Schéma de la station de concassage de SOMACOB AKBOU.....	146
Figure (V-3) : Concasseur à mâchoires simple volet type VB 0806.....	148
Figure (V-4) : Schéma d'un broyeur à cône SYMONS.....	149
Figure (V-5) : Paramètres influençant la qualité des granulats.....	150
Figure (V-6) : Domaine d'étude pour étudier la teneur En fines d'un sable de concassage.....	151
Figure (V-7) : Les grandes étapes de traitement des granulats de carrière.....	154
Figure (V-8) : Diagramme des résidus.....	160
Figure (V-9) : Droite d'ajustements entre les réponses expérimentales et les réponses théoriques.....	160
Figure (VI-1) : Analyse granulométrique au point -A- du domaine d'étude.....	162
Figure (VI-2) : Analyse granulométrique au point -B- du domaine d'étude.....	163
Figure (VI-3) : Analyse granulométrique au point -C- du domaine d'étude.....	164
Figure (VI-4) : Analyse granulométrique au point -D- du domaine d'étude.....	165
Figure (VI-5) : Analyse granulométrique au point -E- du domaine d'étude.....	165
Figure (VI-6) : Analyse granulométrique au point -F- du domaine d'étude.....	166

Figure (VI-7) : Analyse granulométrique au point 'G' du domaine d'étude.....	167
Figure (VI-8) : Analyse granulométrique au point 'H' du domaine d'étude.....	168
Figure (VI-9) : Diagramme d'interaction 1-2.....	170
Figure (VI-10) : Diagramme d'interaction 1-2.....	172
Figure (VI-11) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du broyeur pour une amplitude de 6mm.....	172
Figure (VI-12) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du broyeur pour une amplitude de 10mm.....	173
Figure (VI-13) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du Concasseur primaire Pour une amplitude de 6 mm.....	173
Figure (VI-14) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du Concasseur primaire Pour une amplitude de 10 mm.....	174
Figure (IV-15) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'amplitude de vibration Pour une ouverture de sortie du concasseur de 60 mm.....	175
Figure (IV-16) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'amplitude de vibration Pour une ouverture de sortie du concasseur de 135 mm.....	175
Figure (VI-17) : Iso- teneurs en fines pour $X_3 = 6$ mm.....	177
Figure (VI-18) : Iso- teneurs en fines pour $X_3 = 10$ mm.....	177
Figure (VI-19) : Iso- teneurs en fines pour $X_1 = 60$ mm.....	178
Figure (VI-20) : Iso- teneurs en fines pour $X_1 = 135$ mm.....	179

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I-1) : Consommation des granulats par secteur.....	5
Tableau (I-2) : Classification des granulats selon leurs dimensions .....	7
Tableau (I-3) : Classification des granulats naturels selon le type de roche.....	8
Tableau (I-4) : Classification chimique des roches magmatiques.....	10
Tableau (I-5): Anisotropie de roches schisteuses .....	11
Tableau (I-6) : La finesse des fuseaux admissibles.....	14
Tableau (I-7) : Valeur de bleu de méthylène.....	18
Tableau (I-8) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	19
Tableau (I-9) : Substances polluant les granulats .....	21
Tableau (I-10) : Granulats utilisés pour la confection des différents bétons.....	35
Tableau (I-11) : mélange employé dans les sables.....	38
Tableau (I-12) : Proportion des mélanges .....	38
Tableau (I-13) : Dosages pondéraux .....	42
Tableau (II-1) : Situation de la carrière ENOF Timzerit.....	49
Tableau (II-2) : Situation de la carrière ALGRAN Bejaia .....	49
Tableau (II-3) : situation de la carrière SOMACOB Toudja .....	50
Tableau (II-4) : Situation de la carrière SOMACOB Akbou .....	50
Tableau (II-5) : Situation de la carrière ENCOTRAB Akbou .....	51
Tableau (II-6) : Situation de la carrière ETR Bejaia.....	51
Tableau (II-7) : Situation de la carrière SNTP Bejaia .....	52
Tableau (II-8) : Situation de la carrière ETR Kherrata.....	53
Tableau (II-9) : Situation de la carrière SARL Tout Agrégats.....	53
Tableau (II-10) : Situation de la carrière SARL Tout Agrégats.....	54
Tableau (II-11) : Situation de la carrière SNC ZIANE Md ARBI.....	54
Tableau (II-12) : Situation de la carrière LITTORAL AGREATS .....	55
Tableau (II-13) : situation de la carrière STRPS Akbou .....	56
Tableau (II-14) : Situation de la carrière SARL GRAVEM.....	56
Tableau (II-15) : Situation de la carrière EURL SEMC ZENATI.....	57
Tableau (II-16) : Situation de la Carrière SARL AGREGAT CHREA.....	57
Tableau (II-17) : Situation de la Carrière ETRHB HADDAD .....	58
Tableau (II-18) : Situation de la Carrière EURL MINSOLHYD .....	59
Tableau (II-19) : Situation de la Carrière EURL SEMC ZENATI.....	59
Tableau (II-20) : Evolution de la production des granulats (W-Bejaia).....	59



Tableau (II-21) : Extractions permanentes (sablères W-Bejai) .....	62
Tableau (II-22) : Extractions temporaires w, Bejaia.....	63
Tableau (III-1) : Equipements de traitement des granulats.....	72
Tableau (III-2) : Masse minimale d'échantillonnage .....	77
Tableau (III-3) : Classification de Dunhman .....	85
Tableau (III-4) Classification des Roches Calcaires selon R.Folk .....	87
Tableau (III-5) : Fiche minéralogique de l'échantillon -A- .....	88
Tableau (III-6) : Fiche minéralogique de l'échantillon -B- .....	89
Tableau (III-7) : Fiche minéralogique de l'échantillon -C- .....	90
Tableau (III-8) : La teneur en CaCO <sub>3</sub> des granulats de SOMACOB .....	92
Tableau (III-9) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -A- .....	93
Tableau (III-10) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -B- .....	95
Tableau (III-11) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -C- .....	96
Tableau (III-12) : La charge des boulets correspond à chaque classe granulaire .....	99
Tableau (III-13) : classification des granulats d'après le coefficient L <sub>A</sub> .....	99
Tableau (III-14) : Valeurs du coefficient de Los Angeles.....	101
Tableau (III-15) : Les masses volumiques absolues.....	103
Tableau (III-16) : Dimensions nominales des tamis .....	103
Tableau (III-17) : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	105
Tableau (III-18) : Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	106
Tableau (III-19) : Analyse granulométrique du gravier 15/25.....	107
Tableau (III-20) Analyse granulométrique de Sable.....	108
Tableau (III-21) : Propreté des gravillons de SOMACOB.....	112
Tableau (III-22) : Teneur en eau des échantillons .....	116
Tableau (III-23) : Détermination de la teneur en fine et la masse du sable correcteur..	116
Tableau (III-24) : Calcul de l'équivalent de sable .....	116
Tableau (III-25) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	117
Tableau (III-26) : Différentes proportions des matériaux d'expérimentation .....	123
Tableau (III-27) : Opérations de malaxage d'un mortier normal .....	124
Tableau (III-28) : Retrait des mortiers en fonction de la teneur en fines.....	128
Tableau (IV-1) : Matrice de planification des expériences.....	140
Tableau (IV-2) : Matrice de calcul des effets a deux facteurs .....	140

Tableau (V-1) : Caractéristiques du concasseur à mâchoires simple volet type VB0806.....	147
Tableau (V-2) : Caractéristiques d'un broyeur à cône SYMONS 4' ST.....	148
Tableau (V-3) : Caractéristiques de cribles vibrants à balourd de type CVB 1540.....	150
Tableau (V-4) : Matrice d'expérience et résultats d'essais.....	153
Tableau (V-5) : Effet des facteurs sur la teneur en fine d'un sable concassé .....	156
Tableau (V-6) : Valeurs des variances.....	157
Tableau (V-7) : Coefficients de test de STUDENT.....	158
Tableau (V-8) : Réponses données par le modèle .....	158
Tableau (V-9) : Calcul des résidus.....	159
Tableau (VI-1) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'Ouverture de sortie du broyeur .....	180
Tableau (VI-2) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'Ouverture de sortie du concasseur primaire.....	180
Tableau (VI-3) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'Amplitude de vibration .....	180

## LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Abréviation et symbole	Signification
<b>SOMACOB</b>	Société des Matériaux de Construction de Bejaia.
<b>CNERIB</b>	Centre National d'Etude et de la Recherche Intégrés du Bâtiment
<b>CTTP</b>	Contrôle Technique de Travaux Publics.
<b>LCPC</b>	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
<b>LTMGP</b>	Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés.
<b>LMDC</b>	Laboratoire des Matériaux de Construction.
<b>ENG</b>	Entreprise National des Granulats.
<b>DMI</b>	Direction des Mines et d'Industrie.
<b>DHWB</b>	Direction Hydraulique Wilaya de Bejaia
<b>NFP</b>	Normes Française.
<b>D/E</b>	Découverte sur Exploitable.
<b>MF</b>	Module de Finesse.
<b>ESV</b>	Equivalent de Sable à Vue.
<b>ESP</b>	Equivalent de Sable à Piston.
<b>LA</b>	Los Angeles.
<b>P</b>	Propreté superficielle.
<b>W</b>	teneur en eau
<b>VB</b>	Valeur au Bleu de méthylène.
<b>Oscp</b>	Ouverture de sortie du concasseur primaire.
<b>Osb</b>	Ouverture de sortie du broyeur.
<b>Av</b>	Amplitude de vibration.
<b>DRX</b>	Diffraction des Rayons X

# INTRODUCTION

## INTRODUCTION

Les matériaux granulaires sont les constituants de base de tous travaux de génie civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés et influences ; tant du point de vue de leurs élaborations que de leurs utilisations ; et ce, à fin de répondre aux besoins qui ne cessent d'augmenter tout en respectant les critères de qualité.

L'industrie de la construction consomme un tonnage important en granulats (environs 165 millions de tonnes par ans dont 60 million de sables) [1], la demande annuelle en cette matière passera progressivement du simple au double en tenant compte du développement remarquable dans les secteurs de travaux publics (Autoroute Est Ouest, l'entretien, la consolidation et l'extension du réseau routier, ainsi que le réseau ferroviaire ) et celui de bâtiment (Programme d'un millions de logement) ces dernières années.

La demande globale durant la période 2005- 2009 est estimée à 660 millions de tonnes. L'approvisionnement en cette matière, surtout le sable, matériau traditionnel pour la confection des bétons et mortiers, ne présentait pas de contraintes majeures jusqu'aux années 1980. A partir des années 1990, les besoins exprimés, qui ont généré une très forte demande en croissance constante, et l'absence des crues ont eu pour conséquence un épuisement rapide des sablières et ballastières. Cette situation, apparue dans une période relativement courte, a posé le problème de la disponibilité du sable. L'exploitation sauvage des sables de mer qui s'en est suivie à causé de graves dommages à l'environnement. L'extraction du sable à partir des plages a ainsi été interdite à partir de 1999. [1].

Parallèlement à cette situation, des carrières de granulats, le plus souvent d'origine calcaire, produisent du sable résultant des opérations de concassage. Ces sables étaient utilisés par le secteur des travaux publics et non pas pour la confection des bétons. La limitation du taux de fines (éléments passant à 80  $\mu\text{m}$ ) des sables pour bétons hydrauliques pénalisait fortement les sables calcaires. Il était très difficile de concilier en même temps la limitation du taux de fines et le module de finesse. Le seuil du taux de fines des sables était fixé par les normes françaises utilisées en Algérie à 12% [XPP18-540]

## Introduction :

---

Le concept, est de valoriser les matériaux granulaires des gisements de roches massives, en particulier les sables de concassage dans l'emploi des travaux de génie civil. L'objectif est aussi de substituer le sable de rivière et de mer par le sable de concassage pour limiter l'extraction sauvage et illicite des sables d'oued, et même de contribuer à la sauvegarde de l'environnement.

L'utilisation des sables de concassage ayant des teneurs en fines élevées (22% dans certaine carrières) [2], peut compromettre la qualité des mortiers et des bétons.

Par ailleurs, la présence des éléments fins en quantité non contrôlées dans une composition d'un mortier ou d'un béton est à l'origine de nombreuses défaillances ; Résistances mécaniques faibles, retraits importants qui sont à l'origine des fissurations des bétons et des mortiers.

L'objectif de ce travail est de valoriser les matériaux concassés en substitution des matériaux alluvionnaires. Cette valorisation a comme avantage de sauvegarder le plus important des biens, qui sont les eaux souterraines qui constituent une source d'alimentation en eau potable importante. Cette valorisation consiste à produire du sable concassé dont la teneur en fines est comprise entre 10 et 12%.

Ce travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les matériaux granulaires, et établit un aperçu général sur ces matériaux, leurs importances, et leurs utilisations, ainsi que des connaissances sur l'exploitation des gisements de roche massives et en fin l'influence des fines des sables sur les résistances mécaniques et les retraits des mortiers et des bétons. Ce chapitre est complété par quelques techniques de défillérisation des sables concassés.

Le deuxième Chapitre a pour but d'élaborer une carte locale des gisements de granulats de la wilaya de Bejaia, et d'apporter des renseignements qui peuvent être utiles dans des décisions administratives sur la production annuelle de ces gisements ainsi que leurs capacités théoriques de production.

## Introduction :

---

Le troisième chapitre est scindé en quatre parties. La première est consacrée à l'analyse de l'état actuel du gisement de la SOMACOB d'Akbou wilaya de Bejaia. Dans la deuxième partie on a présenté les techniques d'échantillonnage. La troisième partie est consacrée à la caractérisation des matériaux granulaires par les essais de laboratoire. En fin la quatrième est réservée à l'étude expérimentale sur l'influence des fines sur les résistances mécaniques, ainsi que des mesures de retraits, en faisant varier la teneur en fine.

Dans les chapitres IV et V, nous nous sommes intéressés respectivement à la méthode des plans d'expériences, et à la modélisation de la station de traitement des granulats (SOMACOB Akbou) par un plan d'expériences  $2^K$  en fonction de trois paramètres : ouverture de sortie du concasseur primaire, ouverture de sortie du broyeur, et l'amplitude de vibration.

Le sixième chapitre est consacré à l'optimisation des paramètres de fonctionnement de la station afin d'avoir un sable de contenance optimale en fines comprise entre 10 à 12 %

Le travail est terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et des recommandations.

En fin, nous signalons que ce travail est réalisé dans le cadre d'une convention entre l'université de Bejaia et la société des matériaux de construction de Bejaia (SOMACOB).

# Chapitre I :

## Etude bibliographique sur les matériaux granulaires



Ce chapitre est subdivisé en quatre parties, la première a pour objectif de donner une vision générale sur les matériaux granulaires, plus précisément celles de secteur du bâtiment et des travaux publics ainsi quelques recommandations pour les sables de concassage. La seconde partie concerne l'exploitation des gisements des roches massives, la troisième est consacrée pour montrer l'influence des fines sur les propriétés physico-mécaniques des bétons, et la quatrième et dernière partie est réservée pour illustrer à titre d'exemple quelques méthodes de déféllirisation des sables de concassage.

## **I-1 : Généralités sur les matériaux granulaires :**

### **I-1-1 : Définitions :**

Un système composé d'un grand nombre de particules macroscopiques est appelé matériau granulaire. Mais d'après Degouet.C [3], les particules qui composent les matériaux granulaires doivent être de dimension caractéristique supérieure à 1  $\mu\text{m}$ .

La classification donnée par Brown & Richards [4], est la suivant : Un matériau granulaire est un matériau formé de composant solides discrets qui restent la plupart du temps en contact. Cette définition exclut tout ce qui concerne les lits fluidisés, les suspensions et autre milieu peu concentrés en matériaux granulaires. On définit d'ailleurs « Le contenu solide fractionnaire » d'un milieu granulaire comme le rapport entre la densité volumique des composants élémentaires et densité volumique réelle de matériau. Cette définition, très générale, admet un certain nombre de subdivision :

- Une poudre : est un matériau granulaire de particules de tailles inférieures à 100  $\mu\text{m}$ . On distingue d'ailleurs les poudres granulaires (10 à 100  $\mu\text{m}$ ) et les poudres superfines (1 à 10  $\mu\text{m}$ ).
- Un solide granulaire : est un matériau composé de granulés dont la taille se situe entre 100 et 3000  $\mu\text{m}$  ;
- Un solide brisé : est un matériau granulaire dont la plupart des particules ont des tailles supérieures à 3 millimètres.

Les propriétés des matériaux granulaires dépendent de la nature des interactions des particules entre elles mais aussi de celle-ci avec le fluide environnant. Par contre pour les autres matériaux granulaires le comportement est dominé par les interactions particules / particules. Lorsque le fluide interstitiel est de l'air, ces matériaux sont alors appelés matériaux granulaires secs.

Une des richesses scientifiques de ces milieux vient du fait qu'ils sont constitués de deux structures imbriquées et duales, ayant chacune ses caractéristiques propres : la première est formée par les grains solides et la seconde par l'espace laissé libre ( les pores). Dans beaucoup de matériaux granulaires, la connaissance des propriétés de ces deux espaces est nécessaire ; ainsi, dans un béton ou dans un sol, la tenue mécanique est essentiellement assurée par le solide, tandis que la dégradation se fera souvent à partir des pores, puisque c'est par là que pénétreront les agents extérieurs (l'eau par exemple) susceptibles de détériorer le matériau.

### I-1-2 : Importances des matériaux granulaires :

Ces matériaux sont d'une grande importance économique et scientifique. Ils constituent une part essentielle de notre environnement (argiles, sables, grès, ...) et sont aussi les éléments de base dans un grand nombre de secteurs industriels (travaux publics, bâtiment, industries chimique, pharmaceutique, agro-alimentaire...). En ce qui concerne le secteur de bâtiment et les travaux publics la consommation est donnée dans le tableau (I-1) [5] :

**Tableau (I-1) : Consommation des granulats par secteur. [5]**

Quantité (Tonne)	Destination
30 000 - 50 000	Un Kilomètre d'autoroute (6 voies)
20 000 – 40 000	Un Hôpital ou Lycée
10 000	Un Kilomètre de voie ferrée
100 – 300	Une Maison individuelle
50	Un Logement d'un immeuble
2	Un M <sup>3</sup> de béton

Après l'eau, le granulat est le produit naturel le plus consommé :

- 30 Kg / Jour / Habt. (Europe).
- 38 Kg / Jour / Habt. (Canada).
- 2 Kg / Jour / Habt. (Algérie).

**I-1-3 : Les granulats dans le secteur du bâtiment et travaux publics : [6]**

Les normes définissent les granulats comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 mm et 125mm destinés notamment à la confection des bétons, des mortiers, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées, et des voies ferrées. Les granulats sont dits :

- Naturels lorsqu'ils sont issue de roches meubles ou massives, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique.
- Artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de la roches ou de minerais.
- Recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrage.
- Courant lorsque leurs masse volumique réelle est supérieur ou égale à  $2 \text{ t/m}^3$ .
- Légers lorsque leurs masse volumique réel est inférieur à  $2 \text{ t/m}^3$ .

**I-1-4 : Classification des granulats :****I-1-4-1 : Classification d'après leur provenance :****I-4-1-1-1 : Granulats alluvionnaires :**

Les gisements alluvionnaires, correspondent à des matériaux non consolidés, généralement déposés pendant l'ère quaternaire par les glaciers, les cours d'eau ou sur les fonds marins peu profonds. Le site géographique le plus habituel est celui du lit ou de l'ancien lit d'une rivière. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation aura lieu « à sec » ou « dans l'eau »

**I-4-1-1-2 : Granulats de carrière :**

Les roches massives susceptibles de fournir des granulats viennent surtout des gisements épais de roches dures. Il s'agit surtout de calcaires de formations géologiques plus anciennes (au plus tôt du tertiaire), ou de roches d'origine magmatique ou plutonique, que l'on nomme roches éruptives. Si ces dernières sont plutôt propres, les calcaires peuvent contenir de limons ou argiles indésirables. Ce qui influe sur le procédé de production des granulats.

**I-4-1-1-3 : Granulats de recyclage et artificiels :**

Depuis quelques années, on produit des granulats de recyclage en concassant des matériaux de démolition issus des bâtiments ou des chaussées (bétons, pierre de taille...) et des sous-produits de l'industrie (laitiers de hauts fourneaux, mâchefers...).

Les granulats artificiels les plus employés sont les granulats légers obtenus par la cuisson des argiles, des schistes et laitiers dans les hauts fourneaux.

**I-1-4-2 : Classification d'après leurs dimensions :**

Les granulats sont classés suivant leur granularité qui est la distribution dimensionnelle de leurs grains, ce qui conduit aux appellations normalisées du tableau (I-2), où D et d sont respectivement la plus grande et la plus petite dimension du granulats. Ces dimensions sont déterminées par l'analyse granulométrique par tamisage selon la Norme NFP 18-560.

**Tableau (I-2) : Classification des granulats selon leurs dimensions [NFP 18-101]**

Nomination	Condition sur les dimensions d/D
Les fines	$0/D$ ou $D \leq 0.08$ mm.
Les sables	$0/D$ avec $D \leq 6.3$ mm
Les gravillons	$d/D$ avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31.5$ mm.
Les cailloux	$d/D$ avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
Les graves	$0/D$ avec $6.3$ mm $\leq D \leq 80$ mm.

**I-1-4-3 : Classification d'après leur nature minéralogique :**

La composition minéralogique des granulats dépend essentiellement de celle des roches exploitées (granulats de carrière), ou celle des roches auxquelles sont arrachés par l'érosion (granulats alluvionnaires). La classification de ces dernières dépend du taux en différents minéraux constituant ces granulats, on distingue :

- les granulats siliceux.
- Les granulats calcaires.
- Les granulats granitiques (argileux ou schisteux).

## I-1-4-4 : Classification d'après leur pétrographie : [7]

D'un point de vue pétrographique, les granulats, qu'ils soient concassés ou naturels, peuvent être classés en plusieurs groupes de roches présentant des caractéristiques communes. La classification donnée dans la norme BS 812 : partie 1 :1975 est la suivante :

Tableau (I-3) : Classification des granulats naturels selon le type de roche. [7]

Groupe des basaltes	Groupe de silex	Groupe des gabbros
Andésite ; Dolérites Basalte ; Spi lites Diabase ; Quartz- dolérites	Silex Chert	Diorite basique ; Gabbro Picrite ; péridotite ; Norite Serpentine ;
Groupe des calcaires	Groupe des granites	Groupe des quartzs
Dolomite ; Calcaire ; Marbre	Gneiss ; Granite ; granodiorite Pegmatite ; syénite ; granulite quartz -diorite	Quartzite Quartzite recristallisé
Groupe des grés	Groupe des roches Cornéennes	Groupe des schistes
Grés ; grés grossiers ; tuff Arkose ; grauwacke.	Toutes les roches issues du métamorphisme de contact Sauf les marbres.	Schistes ; Ardoise ; Phyllites Toutes les roches clivées.
Roches éruptives à phénocristaux		
Aplite ; Dacite ; Rhyolite ; granite microgrenu ; Trachyte		

Cette classification par groupe ne signifie pas que tous ces groupes donnent de bons granulats pour un béton : on peut trouver des matériaux à déconseiller dans chacun de ces groupes. Néanmoins, certains groupes de roches présentent de meilleures caractéristiques que d'autres.

**I-1-5 : Origine des granulats : [8]**

Les roches sont des milieux solides polycristallins, hétérogènes très complexes, composées de grains qui appartient à une dizaine d'espèces minérales et qui sont de taille et de forme varies. Les propriétés de la roche dépendent de la nature et de l'état d'altérations des minéraux.

Les roches sont aussi des milieux discontinus ; l'assemblage des grains n'est jamais parfait et il subsiste entre eux des vides grossièrement équidimensionnels appelés pores et des défauts inter ou inter cristallins appelés fissures ou une dimension est très petite par rapport aux autres. Ces discontinuités sont en grande partie responsables du comportement mécanique des roches.

Trois grandes catégories de roches existant dans la nature sont créatrices de granulats : les roches magmatiques ou éruptives, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques.

**I-1-5-1 : Roches magmatiques :**

Les roches magmatiques, caractérisées par une structure massive, se forment à partir du Refroidissement d'un magma. Si le magma s'est refroidi lentement, les minéraux se sont largement développés pour avoir une roche à texture grenue avec des minéraux de dimension millimétrique bien visibles à l'œil nu « roche intrusives ». Si le magma s'est refroidi rapidement en s'épanchant à la surface de l'écorce terrestre, la plupart des cristaux n'ont pas eu le temps de se développer et ils ne sont pas visibles à l'œil nu « roches extrusives où subsiste une phase vitreuse très finement cristallisée ». On peut donc avoir pour une composition chimique identique (même magma originel), des textures très différentes. Une texture très fine conduit toujours à une forte résistance mécanique, mais les cassures sont plus lisses et ces roches sont plus polissables. [9]

D'un point de vue chimique, les roches magmatiques sont des combinaisons de huit éléments chimiques seulement. Parmi ceux-ci, l'oxygène est dominant, et viennent ensuite la silice, l'aluminium, le fer, le calcium, le sodium, le potassium et le magnésium. En termes d'oxydes, la silice ( $\text{SiO}_2$ ) est de loin le plus abondant. La classification des roches magmatiques selon leurs teneurs en silice permet donc de définir quatre catégories de roches à savoir :

**Tableau (I-4) : Classification chimique des roches magmatiques [9].**

Roche magmatique	% en Poids de SiO <sub>2</sub>
Acide	> 66
Intermédiaire	50-60
Basique	45-50
Ultrabasique	< 45

Lors de la sélection des granulats, il est nécessaire de connaître la texture et la classe chimique de la roche. Un granulat à texture vitreuse, issu d'une roche magmatique acide, peut favoriser le développement des réactions alcalis silice. De même, la surface de contact entre les minéraux dans une roche constitue une surface de faiblesse où peut se développer une microfissure inter granulaire. Habituellement, cette microfissuration influence considérablement le comportement mécanique de cette roche.

#### **I-1-5-2 : Roches métamorphiques :**

La transformation des roches éruptives ou sédimentaires, sous l'action de la température et de la pression au fur et à mesure de leur enfoncement en profondeur, conduit aux roches métamorphiques. D'autres facteurs interviennent dans le métamorphisme, en particulier les échanges ioniques. La multiplicité des matériaux originels et des actions (température, pression,.....etc.) rendent toute classification difficile. Les roches métamorphiques ont généralement en commun une structure foliée plus ou moins marquée. Certaines roches à grains très fins (0,005 mm) peuvent avoir des résistances remarquables : 180 à 250 MPa en compression simple, c'est le cas des ardoises en particulier. Cependant, une forte anisotropie des propriétés mécaniques rend ces roches peu utilisables dans le domaine du béton. Cette anisotropie est le résultat des fortes pressions qui provoquent la concentration et l'alignement des minéraux, eux-mêmes anisotropes. Suivant une direction préférentielle perpendiculaire à la direction de la pression. La présence en quantité considérable de tels minéraux est indésirable car elle peut affecter sérieusement le comportement mécanique des granulats.

**Tableau (I-5): Anisotropie de roches schisteuses [10].**

Caractéristiques de la roche	Orientation	
	Dans le plan de schistosité	Perpendiculairement au plan de schistosité
Resistance à la compression(MPa)	49	100
Vitesse des ondes (m/s )	3100	5800

**I-1-5-3 : Roches sédimentaires [9]**

Les roches sédimentaires résultent d'un dépôt, qu'il soit actuel ou ancien, à la suite de processus d'érosion et de sédimentation. Ces processus, très brièvement schématisés, sont les suivants :

- Une décomposition ou altération des différentes roches selon leur nature et le climat.
- Les résidus de cette altération sont entraînés par des agents de transport (les eaux de ruissellement, les glaciers, le vent, ....etc).
- L'accumulation ou le dépôt des débris en strates dans des bassins sédimentaires.

Selon leur composition, ces roches sont divisées en deux catégories : les roches sédimentaires d'origine détritique (grès, sables, etc.) et les roches sédimentaires d'origine chimique (calcaire, dolomies).

Notons que ces roches sont la plupart du temps formées des deux fractions (soit la fraction détritique et chimique) et sont classées selon la fraction dominante.

Les conditions dans lesquelles se forment de telles roches peuvent être très variées et cela a une répercussion sur leurs caractéristiques. Une roche consolidée à faible profondeur peut être beaucoup plus poreuse et par le fait même moins résistante. Suite à leur mode de formation, ces roches sont formées de couches stratifiées et sont donc anisotropes. Leur comportement mécanique diffère donc selon la direction considérée. De plus, elles contiennent beaucoup d'impuretés, notamment des minéraux argileux que l'on considère nuisibles dans les granulats. La Connaissance de ces quelques particularités permet de comprendre la variété des performances de certains granulats provenant de roches sédimentaires.

De même que la composition minéralogique, la structure des roches est un élément important dans leur classification, puisqu'elle est une indication de la manière dont les assemblages de minéraux sont réalisés dans la roche. On peut distinguer cinq structures de base :

- Macro grenue (10 mm)



- Grenue (1 mm)
- Microgrenue (0.1 mm)
- Crypto cristalline ( 0.01 mm)
- Vitreuse (---)

Pour préciser certaines particularités de la structure; on dira qu'une structure est :

- Porphyrique lorsqu'elle est composée de cristaux millimétriques enrobés dans une matrice plus fine;
- Orientée lorsqu'elle est anisotrope à cause de l'orientation préférentielle des cristaux.
- Schisteuse si elle est très orientée;
- Litée si elle présente des alternances de roches;
- Fissurée si un réseau de fissures parcourt la roche

### **I-1-6 : Aperçu historique du concassage : [11]**

Du point de vue historique, l'homme a toujours puisé dans la nature pour faire face à ses besoins. Pour la construction, il a prélevé directement et dans son environnement immédiat les matériaux dont il avait besoin. Au fur et à mesure de l'accroissement de ses besoins et l'épuisement des premières sources, il a recherché des sources plus lointaines. Ensuite, ses besoins se faisant plus importants et les sources naturelles se tarissant, il a été obligé d'intervenir artificiellement dans le processus d'élaboration des matériaux de construction de base.

C'est pour satisfaire sa voracité toujours croissante que l'homme a eu recours au concassage de roches massives. Au début de ce siècle, le concassage était encore effectué dans chaque carrière par des centaines d'hommes et de femmes armés de massettes. Ce travail était l'un des plus pénibles qui soit.

Des casseurs de cailloux de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, à l'industrie des carrières de granulats que nous connaissons aujourd'hui, il s'agit bien d'une même activité pérenne et transformée au cours d'un siècle d'histoire industrielle, qui vit les carrières passer de l'artisanat à l'exploitation industrielle.

### **I-1-7 : Les sables de concassages :**

L'emploi de sable concassés a fait l'objet durant cette dernière décennie d'étude dans plusieurs pays tels le Maroc, l'Espagne, la France... ou ce type de sable est considéré comme une solution de substitution possible devant l'épuisement progressif des matériaux traditionnellement utilisés. Plusieurs raisons ont conduit à l'augmentation de l'utilisation de ce type d'agrégat calcaire dans certains pays.

En plus de son application selon une certaine norme non révisée durant déjà plusieurs années, a fait que l'on s'intéresse de plus en plus aux propriétés et aux caractéristiques des sables concassés calcaires et leurs effets sur les propriétés du béton. [12]

### I-1-8 : Les critères à demander et à retenir pour les sables à béton :

L'expérience nous a permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments concernant les critères à demander aux sables à béton. Le sable est l'élément inerte essentiel rentrant dans la composition des bétons ; il conditionne leur qualité.

#### I-1-8-1 : Module de finesse et fuseau granulométrique des sables: [13]

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100<sup>e</sup> de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 5, 10, 20, 40, 80 mm.

Le module de finesse est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les divers qualités du béton, ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités des admissibles tels que ceux représentés sur la figure suivante.

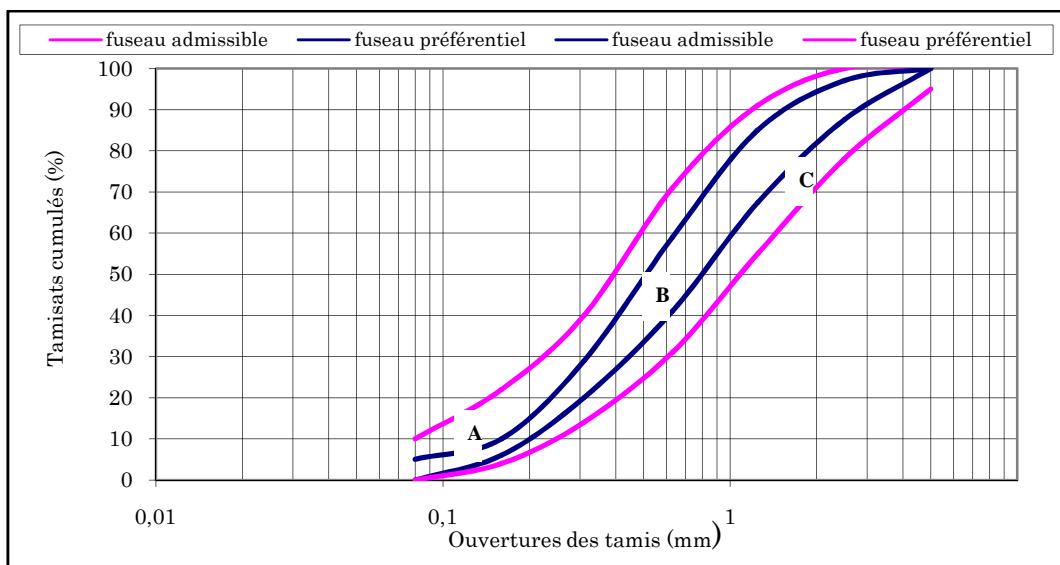


Figure (I-1) : Fuseaux proposés pour la granulométrie des sables à béton. [13]

- La partie centrale B ( $2.2 < M_f < 2.8$ ) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- La partie supérieur A ( $1.8 < M_f < 2.2$ ) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en oeuvre au détriment probable de la résistance.
- La partie inférieur C ( $2.2 < M_f < 3.2$ ) correspond à des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

La Norme NFP 18 541 indique que le module de finesse des sables doit être compris entre 1.8 et 3.2. À cette prescription s'ajoute, pour les bétons de  $f_{c28} > 36$  MPa, l'obligation que la valeur de ce module de finesse ne s'écarte pas plus de + ou - 0.3, en valeur absolue, de sa valeur moyenne, cette tolérance qui implique une régularité dans la fourniture de sable étant repris par le fascicule 65 A dans le cas des bétons de  $f_{c28} \geq 30$  MPa ou pour les bétons de  $f_{c28} < 30$  MPa dans le cas où ceux-ci sont mis en oeuvre à la pompe.

**Tableau (I-6) : La finesse des fuseaux admissibles.**

Sables admissibles	Fuseaux	Module de finesse
Préférentiel	B	2.20 à 2.80
Un peut trop fin	A	1.80 à 2.20
Un peut trop grossier	C	2.80 à 3.20

#### I-1-8-2 : La caractérisation des fines : [12]

Les normes s'accordent pour définir comme fines les éléments passant à un tamis de maille de 80 microns. Pour désigner les éléments bruts de concassage inférieur à 80  $\mu\text{m}$ , un filler est dit siliceux s'il contient plus de 90% de silice, et calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans d'autre cas le filler est désigné par le nom de la roche d'origine. Le plus important c'est l'action de celle-ci qui est une action forte complexe par ce qu'elles dépendent de leurs dimensions et de leur nature.

On a souvent l'habitude d'adopter un schéma simplificateur distinguant :

- Les fines inertes.
- Les fines actives.

**I-1-8-2-1 : Les fines inertes :**

Sont par principe des fines de concassage qui adhèrent peu à la surface des grains de sable, ce qui permet de se débarrasser de l'excès par des traitements tels que : la ventilation à l'air et ne donnant pas d'effets physico-chimique nocifs.

Du fait de leur finesse, elles auront naturellement pour effet d'accroître l'eau de mouillage de sable. Leur présence donc devrait conduire à un accroissement de rapport Eau/Ciment à maniabilité égale.

Par suite de leur effet plastifiant rhéologique, les fines de concassage surtout les fines calcaires arrivent à l'effet inverse, c'est-à-dire à améliorer la maniabilité à condition d'être en proportion limitée (optimum 6 à 15 %) [11]. Elles contribuent également au maintien de l'homogénéité des bétons et s'opposent à la ségrégation. A un certain degré de finesse, elles ont aussi des effets physico-chimiques favorables tels que :

- Création de liaison épi-taxiques, c'est-à-dire accolement continu par liaison à l'échelle des assemblages cristallins entre les réseaux des éléments du ciment et de la calcite.
- Activité pouzzolanique c'est-à-dire combinaison avec la chaux provenant du ciment avec certaines fines siliceuses.
- Dispersion de la pâte de ciment par des fines de même dimension avec création de germes cristallins ayant un effet d'accélération des réactions.

**I-1-8-2-2 : Les fines actives :**

Elles sont celles qui présentent ce qu'on appelle des propriétés colloïdales. Leurs propriétés de surface sont dues non seulement à leur petite dimension mais aussi à leur microstructure et leurs charges électriques.

**I-1-8-2-3 : Les fines d'ajout (addition) : [14]**

Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité des bétons sont :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- l'énergie de mise en place.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; on part des éléments les plus gros (10 à 20 mm) : ceux-ci créent des macros vides que l'on peut remplir avec du sable, et les vides du sables par des fines. Ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité.

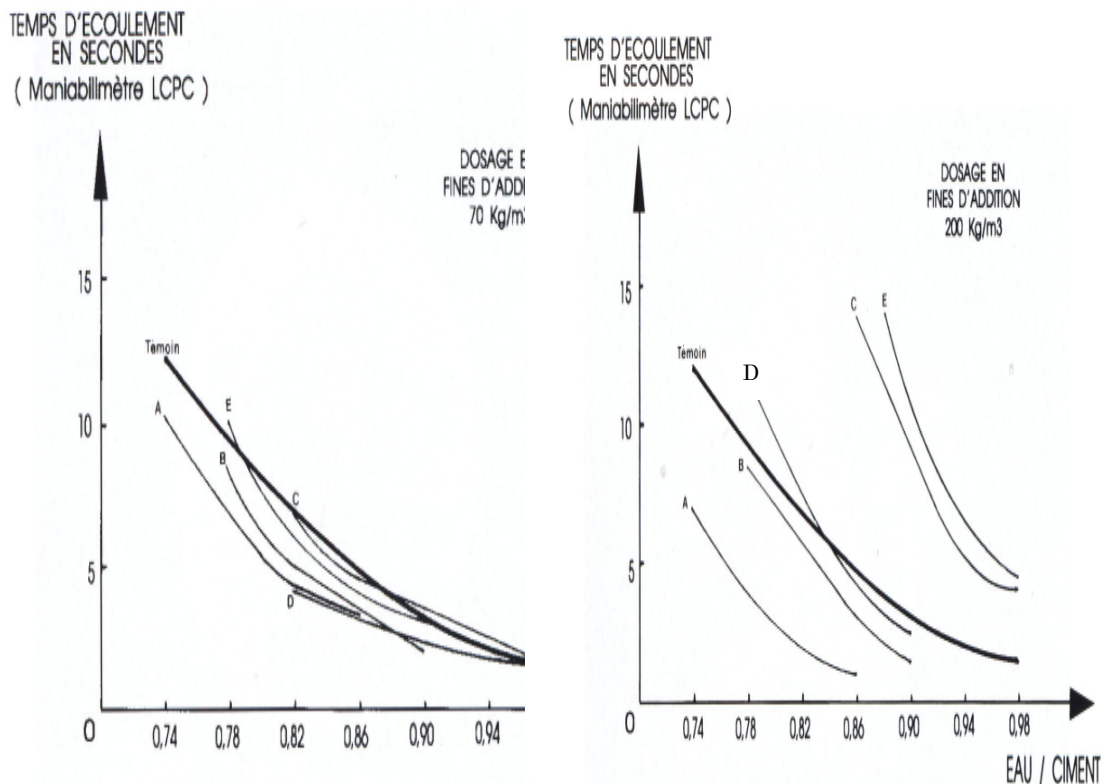
Cet aspect est pris en compte dans les normes actuelles, qui introduisent la notion de liant équivalent  $C + kA$  ou  $C$  est le dosage en ciment.

A : est le dosage de l'addition en fines et  $k$  un coefficient de prise en compte lié à la nature de l'addition. On peut ainsi parler, non plus de  $E/C$  mais de  $E/C+kA$ .

On distinguera les fines actives (laitier moulu, cendres volantes, ...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives ...) les fines actives apporteront un complément d'hydraulicité au mélange que n'amèneront pas les fines inertes ; la distinction sera cependant difficile à établir dans certains cas : l'association de certains ciments par exemple avec des fines calcaires pourront conduire à un complément d'hydraulicité (formation de carbo-aluminate). Par ailleurs, si des fines actives sont employées qui nécessitent beaucoup d'eau pour conserver un niveau de maniabilité acceptable, le gain en résistance pourra être fortement diminué.

On peut constater figure (I-2) qu'à dosage constant en fines d'addition que :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente.
- Pour un rapport Eau/Ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

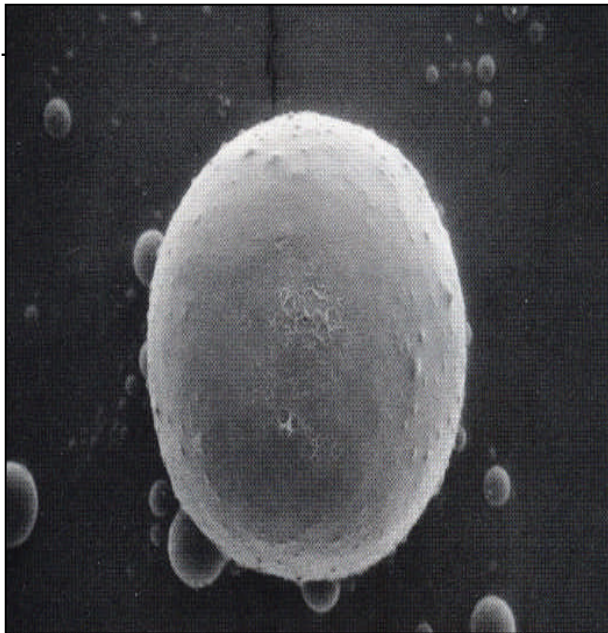


**Figure (I-2) : Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité. [14]**

Si on compare, par exemple les additions A et E, on constate que :

- Pour une même maniabilité, l'addition A nécessite un rapport eau/ciment beaucoup plus faible que l'addition E, quel que soit le dosage donné en addition.
- Quand on augmente le dosage en addition, à rapport eau/ciment fixe, la maniabilité avec l'addition A est améliorée, alors qu'elle se détériore considérablement avec l'addition E.

Ces différences tiennent davantage à la morphologie de l'addition qu'à sa finesse ; une addition constituée uniquement de particules sphériques figure (I-3) sera réductrice d'eau. Par contre des fines anguleuses figures (I-4) nécessiteront davantage d'eau. On obtient donc une aussi bonne maniabilité avec des valeurs du rapport Eau/Ciment plus faibles avec des particules sphériques qu'avec des particules anguleuses.



**Figure (I-3) : fines sphérique : leur usage conduit à une réduction d'eau. [14]**



**Figure (I-4) : fines anguleuse : leur usage conduit à dosage supérieur d'eau. [14]**

De même certaines fines auront tendance à s'agglomérer figure (I-5) et de ce fait à absorber davantage d'eau : parfois également (cas de certaines cendre volantes) l'addition pourra contenir des éléments alvéolés (imbrulés par exemple) négligeables en poids mais constituant de véritables éponges en volume figure (I-6).



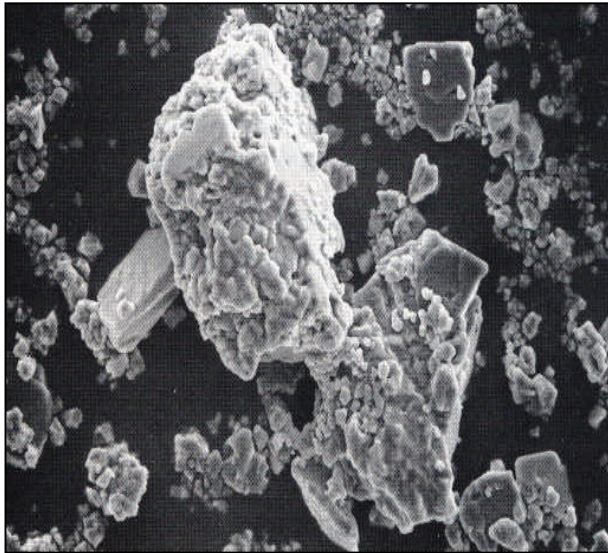


Figure (I-5) : Agglomération des éléments les plus fins sur les éléments les plus gros conduisant à une surconsommation d'eau. [14]

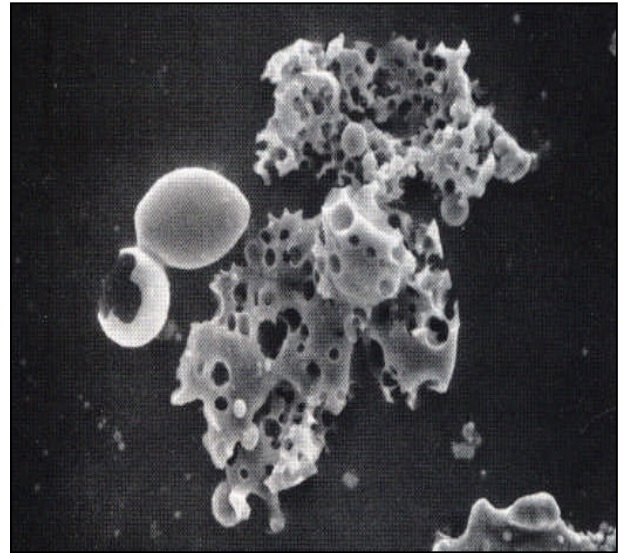


Figure (I-6) : Présence dans les fines d'éléments alvéolés avides d'eau. [14]

On constate en définitive qu'en matière d'addition il faudra systématiquement procéder à des essais ; l'emploi d'adjuvants réducteurs d'eau s'avérera souvent nécessaire et leur fonction de défloculation permettra aux fines d'ajout d'assurer efficacement leur rôle.

### I-1-8- 3 : Valeur au bleu de méthylène : [NFP 18-595]

L'essai consiste à déterminer la quantité d'un colorant ; le bleu de méthylène nécessaire pour couvrir une couche de fines et plus précisément des particules argileuses d'un matériau maintenu en suspension dans l'eau.

A titre indicatif, on présente dans le tableau (I-7) quelques valeurs de bleu de méthylène d'après [12] :

Tableau (I-7) : Valeur de bleu de méthylène. [12]

Nature de matériaux	Valeur de bleu
Montmorillonite	12 à 20
Illite	5
Kaolinite	2
Argiles naturelles diverses	4 à 10
Fines siliceuse concassées	0.5 à 1.5
Fines calcaires concassées	0 à 7

**I-1-8-4 : L'équivalent de sable : [NFP 18-598]**

L'essai consiste à caractériser un effet global en fonction de la qualité et de la nature des fines contenus dans un sable par un essai faisant appel au phénomène physique de floculation qui caractérise les matières ayant un comportement colloïdal.

Les valeurs préconisées pour les sables concassés est fixée à 65 pour un équivalent de sable à vue (ESV), et 60 pour un équivalent de sable à piston (ESP) ; toute fois les sables concassés dont ES est inférieur à cette valeur sont conformes à la norme si la valeur du bleu de méthylène est inférieur ou égale à 1.

**Tableau (I-8) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.**

ES a Vue	ES Piston	Nature et qualité du béton
ES < 65 %	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait, à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq ES < 75$	$60 < ES < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour un béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq ES \leq 85$	$70 < ES < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ES > 85	ES $\geq$ 80	Sable propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton.

**I-1-9 : Valorisation des sables de concassage : [11]****I-1-9-1 : Rivalité entre les sables selon leur origine :**

Dans la rivalité entre les sables provenant de roches meubles et les sables de concassage, il ya plusieurs facteurs à savoir :

**I-1-9-2 : Les facteurs techniques :**

Parmi les caractéristiques pertinentes sur la base des quelles les granulats sont analysés, il faut citer l'angularité et la propreté.

- 1- **l'angularité** : les matériaux provenant de roches meubles qui n'ont pas subit de concassage ont des formes arrondies, alors que les granulats concassés présentent des arêtes vives et ont une forte angularité.

Une bonne angularité confère au mélange granulaire une meilleure stabilité mécanique, par contre la présence d'éléments roulés assure une meilleure maniabilité qui au moment de la mise en oeuvre, facilite le serrage et l'obtention d'une bonne compacité.



- 2- **la propreté** : les sables de roches meubles sont d'ordinaire propres et leurs mise en œuvre se fait directement après prélèvement de dépôt naturel. Par contre, les granulats concassés sont poussiéreux, leur pollution se fait pendant le processus mécanique de leur élaboration, ainsi que lors du stockage.

#### **I-1-9-3 : Les facteurs économiques :**

Les matériaux alluvionnaires sont simplement prélevés et par fois criblés pour réaliser les classes granulaires, par contre les granulats concassés sont les résultats d'un processus technologique plus long et plus complexe ; ce qui met en œuvre des investissements plus importants. Cette différence de procédé se traduit par des prix de revient à l'unité, allant du simple au sextuple.

#### **I-1-9-4 : Comment valoriser les sables de concassage :**

Il est possible de cesser de porter atteinte à notre environnement sans remettre en cause notre développement. Pour le faire il faut :

- produire des sables concassés propre et de bonne qualité.
- Changer nos habitudes dans la composition des bétons hydrauliques.

#### **I-1-9-4-1 : Production de sables concassés propres et de bonne qualité :**

Pour produire des sables de concassage propre et de bonne qualité il faut tenir compte de plusieurs facteurs et prendre beaucoup de précautions à savoir :

- 1- Connaître parfaitement le gisement à exploiter.
- 2- Choisir judicieusement le type de godet des engins de chargement.
- 3- Intercaler un crible scalpeur entre l'alimentateur et le concasseur primaire.
- 4- Dimensionner correctement les surfaces des cribles (criblage technique et criblage de classement).
- 5- Equiper tous les postes d'élaboration des granulats de système de dépoussiérage.
- 6- Installer un système de défilinage (défilirisation).

#### **I-1-9-4-1-1 : Connaissance du gisement à exploiter :**

La propreté des sables est toujours fonction de la nature du gisement à exploiter c'est à dire :

- La nature de la roche.
- La configuration morphologique du gisement.

La non propreté des sables de concassage est indiquée par la présence de substance nuisible qu'on peut trouver dans le gisement lui-même. D'après TOURNEQ.C DENIS.A [8], les substances nuisibles au béton varient selon la nature de la roche :

**Tableau (I-9) : Substances pollutant les granulats. [8]**

Nature	caractéristiques	présence	Action
Argile	Grandes surfaces spécifiques et hydrophiles	Toutes les roches naturelles	Ecran vis avis des liants. Réhydratation déformation des bétons hydrauliques
Minéraux altérés Feldspaths	Source d'argile	Roches magmatiques	Idem
Micas	Assez grande surface spécifique	Toutes roches sauf calcaires	Ecran vis avis de tous les liants
Hydroxyde de fer	Hydrophiles	Latérites	expansion des liants
Pyrites marcassite	Oxydables	Toutes les roches	Expansion (ettringite)
Gypse anhydrite	Soluble réactifs	Alluvions en climats secs	Expansion
Chlorures	Réactifs	Sables et gravillons marins	Corrosion des aciers
Opale Silice microcristalline	Réactifs	Toutes les roches	Expansion et fissuration
Acides organiques	réactifs	Alluvions	Retard ou absence de prise

Le principe cardinal consiste à choisir le gisement et non à le subir, lorsqu'on connaît la nature et les teneurs des substances nuisibles on fait le choix entre :

- prévoir des installations techniques susceptibles de les éliminer (ou maîtriser dans certaines limites le cas échéant).
- Ou ne pas produire un sable non-conformes aux normes.

#### **I-1-9-4-1-2 : Choix du type de godet des engins de chargement :**

Après l'abattage à l'explosif, la présence de substances nuisibles peut être réduite en carrière au moment du chargement pour le marinage. L'utilisation de godet scarificateur permet de réduire dans très grandes proportions la teneur en substance nuisible.

**I-1-9-4-1-3 : Intercaler un crible scalpeur entre l'alimentateur et le concasseur primaire :**

Lorsque les précautions citées aux points ci-dessus n'ont pas permis d'éliminer dans la proportion requise les substances nuisibles, il est indispensable de procéder avant le concassage de la roche à un classement granulaire qui permet de mettre hors circuit toutes les particules inférieure à une certaine dimension (40 Cm). Cette opération est réalisée par un crible scalpeur qui laisse passer les substances nuisibles qui se présentent sous forme de fines, cailloux, mottes, branches ..... etc.

Les refus de ce classement sont dirigés directement vers le concasseur primaire. Ce dernier recevant de la roche saine, produira que des fines saines. Annexe (I-1)

**I-1-9-4-1-4 : Dimensionnement et choix des appareils :**

Le choix des équipements de criblage se fait en fonction des paramètres suivant :

- Longueur de criblage : Ce paramètre influence directement la qualité de criblage ; plus le crible est long, plus le grain aura de la chance de trouver une ouverture dans la grille lors de son avancement sur le crible.
- Largueur de crible : La largueur de crible influence directement le débit possible sur la machine.
- Vibration : l'amplitude, la fréquence, la forme et le sens de la vibration ont aussi une influence importante sur l'opération de criblage.
- Les matériaux à cribler : la granularité du matériau influence également les résultats de l'opération de criblage.
- La surface de criblage : le type de surface utilisée et son mode de fixation jouent également un rôle. Le calcul de cette surface est donnée par la formule suivante [15] :

$$S = \frac{P}{(A.B.C.D.E.F)}$$

P : Le débit de passant en t / h.

A : Débit de base en t/h par mètre carré.

B : Coefficient lié au pourcentage de refus dans l'alimentation de l'étage.

C : Coefficient lié à la qualité de criblage.

D : Coefficient lié au pourcentage de plus petits demi-maille dans l'alimentation de l'étage.

E : Coefficient de pour criblage sous arrosage.

F : Coefficient d'étage.

Pour obtenir des sables propres, il faut connaître la teneur en fines de tous les granulats à chaque stade d'élaboration, et dimensionner les cribles de telle sorte que les fines soient entraînées systématiquement avec les passants.

#### **I-1-9-4-1-5 : Equipement des postes d'élaboration des granulats de système de dépoussiérage :**

Le processus d'élaboration des granulats produit des poussières à chacune de ses étapes. Ces poussières, si elles ne sont pas captées à la source auront tendance à polluer les produits finis en cours d'élaboration ou en stockage. La propreté des granulats (surtout le sable) passe obligatoirement par la présence de systèmes de dépoussiérage.

#### **I-1-9-4-1-6 : Installation d'un système de déffinage :**

Cette opération consiste à séparer les fines contenues dans les granulats des autres particules plus grosse a fin d'améliorer leur qualité.

Les normes françaises fixent la teneur en fines des sables à moins de 10 %. Les sables de concassages conformes à la norme sont issus des concassages tertiaires et quaternaires.

### **I-2 : Exploitation des gisements de roches massives :**

#### **I-2-1 : Que doit-on- chercher : [16]**

La taille du gisement à mettre en évidence peut varier beaucoup. Elle dépend essentiellement des besoins locaux. Pour répondre à un besoin permanent, elle devra permettre de satisfaire celui-ci pendant au moins dix ans. Les réserves devront alors être au moins égales à 500 000 tonnes, et parfois dépasser 10 millions de tonnes (grosses carrières de roches concassées).

Pour répondre à un besoin particulier limité dans le temps (emprunt pour la construction d'une chaussée par exemple), elle pourra être seulement de quelques dizaines de milliers de tonnes traitées par une installation mobiles.

Les granulats sont des matériaux uniquement exploités à ciel ouvert. Pour les gisements de roches meubles, le rapport D/E (découverte sur exploitable) est généralement inférieur à 1/3, l'épaisseur minimale de la couche exploitable étant de 2 mètres. Pour les gisements de roches massives, ce rapport D/E est généralement inférieur à 1/5, l'épaisseur minimale de la couche étant de l'ordre de 10 mètres.

La disponibilité et le coût des terrains, les contraintes diverses, l'état de la surface, les conditions d'accès et d'aménagement des sols après exploitation ainsi que les critères d'environnement sont également à prendre en compte pour déterminer la possibilité d'exploiter, dans des conditions économiquement valables.

L'exploitation d'un gisement de granulats de roches massives est essentiellement fonction de la résistance mécanique de la roche saine. Les autres spécifications sont

définies non seulement par les caractéristiques intrinsèques de la roche mais aussi par le mode d'élaboration adopté dans l'unité de traitement.

En première approximation, un gisement de roche massive sera exploitable, en vue des différentes utilisations :

- Granulats à béton et pour couches de forme et de fondation en viabilité
  - Los Angeles  $\leq 35$ .
  - Micro Deval en présence d'eau  $\leq 30$ .
  - Coefficient de friabilité  $\leq 35$ .
  
- Granulats pour couche de roulement (enrobés et enduit superficiels) :
  - Los Angeles  $\leq 25$ .
  - Micro Deval en présence d'eau  $\leq 20$ .
  
- Granulats pour ballast :
  - Los Angeles  $\leq 20$ .
  - Micro Deval en présence d'eau  $\leq 10$ .

Les critères liés à l'hétérogénéité du gisement sont également à prendre en compte et notamment :

- La variation latérale et/ou verticale de la qualité.
- La présence de filons.
- La fracturation qui entraîne des pollutions, des difficultés d'abattage et de tenue des fronts de carrières lorsqu'elle est excessive.
- La karstification et les phénomènes liés à la pollution.

### **I-2-2 : Roches massive : [17]**

Ce sont des assemblages de minéraux, elles ont en général, des propriétés en partie liées à celles des minéraux. Mais l'assemblage est rarement parfait du fait de la présence de vides. Ces vides sont parfois grossièrement sphériques (pores) et dus au dégazage des roches magmatiques ou à une cimentation incomplète des roches sédimentaires (grès, calcaire poreux). Ils se présentent parfois sous forme de fissures très fines dues à des contraintes d'origine thermique ou mécanique et peuvent, dans ce cas affecter toutes les roches. Les pores et les fissures conduisent à des diminutions de résistance.

Les roches sédimentaires massives se présentent toujours en bancs de quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur horizontaux. La production des granulats de carrière passe par plusieurs étapes.

**I-2-2-1 : Extraction :**

L'objectif principal est d'amener dans l'usine de préparation la plus forte proportion possible de matériaux sains.

Après l'élimination de la découverte à l'aide d'une pelle hydraulique, l'abattage à l'explosif est nécessaire pour fragmenter au maximum le matériau et éviter les trop gros blocs qui ne pourraient être admis directement dans la trémie de premier concasseur.

Après forage, suivant un schéma adapté à la structure du gisement, on met en place l'explosif et on utilise des microretards pour limiter les ébranlements (nuisance pour l'environnement), le matériau est ainsi réduit en 0/2000 mm de dimension par abattage de 10 000 à 50 000 tonnes. Repris à la pelle hydraulique, ou à l'aide d'une chargeuse sur pneus, il est déversé sur le premier élément de la chaîne d'élaboration (grille de scalpage).

**I-2-2-2 : Elaboration des granulats :**

Après l'abattage ou extraction, le tout-venant va subir trois types de transformations : le criblage, le concassage et le lavage.

**I-2-2-2-1 : Le criblage :**

Le criblage est commun à toutes les installations quel que soit le type de roche exploitée. Cette fonction de classement est fondamentale puisqu'elle va définir les produits marchands tel que : fines, sable, gravillons, ballasts et graves.

Pour les roches massives, un aspect particulier du criblage est l'élimination de 0/D qui se pratique en amont (grilles de scalpage à barres parallèles) ou après le débiteur (cribleur à mailles carrées), ou les deux dans le but d'éliminer le maximum de produits argileux. Le criblage se fait, en général, sur des cribles vibrants à une ou plusieurs toiles à mailles carrées.

Deux pièges sont à éviter dans le criblage :

- Le sous-dimensionnement des cribles ou la suralimentation, l'utilisation d'alimentateurs spéciaux permet de limiter ce défaut.
- L'alimentation par des matériaux pollués (ou à teneur en eau élevée pour les plus petites coupures).

## I-2-2-2-2 : Le concassage :

Le concassage est obligatoire pour les roches massives, celui-ci n'interviendra pour les alluvions que pour corriger la granularité. Le rôle du concassage est de réduire les dimensions des éléments pour obtenir la granularité souhaitée et, accessoirement, pour améliorer leur forme. Les concasseurs sont basés sur trois principes :

- Rupture par écrasement entre deux pièces métallique, dont l'une est mobile par translation (mâchoires) ou par rotation (giratoires).
- Rupture par chocs contre des pièces mobiles en rotation (marteaux, percussions).
- Rupture sous l'action de charges libres (boulets, barres).

La granularité produit par un concasseur dépend :

- De la granularité des produits d'entrée.
- Du débit d'alimentation.
- De l'usure des pièces broyantes.

La figure (I-7) donne un schéma classique d'installation simple de roches massives.

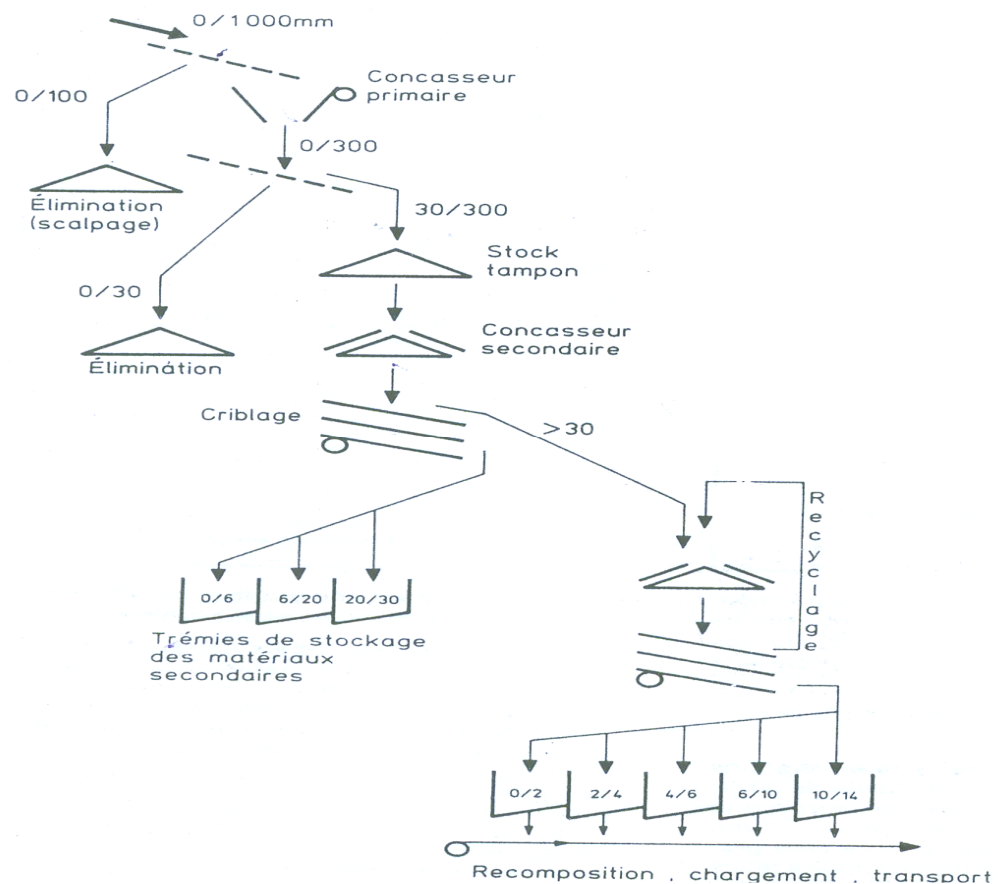


Figure (I-7) : schéma d'une installation d'élaboration de granulat. [17]

**I-2-2-2- 3 : Lavage des granulats :**

Le lavage des granulats est omniprésent dans les gisements alluvionnaires ou l'eau ne manque pas. Il est soit une exception pour les roches massives (débouage en amont du débiteur), soit utilisé pour débarrasser les gravillons de leurs fines de surface.

D'après Archimbaud, C & Berthali, J [18] le terme lavage désigne les actions permettant de détacher, grâce à des moyens mécaniques, hydrauliques ou vibratoires, les éléments fins agglomérés entre eux ou collés à la surface des granulats afin de les éliminer avec l'eau ayant servi à cette action et dans le but de récupérer les granulats égouttés et exempts des éléments nuisibles.

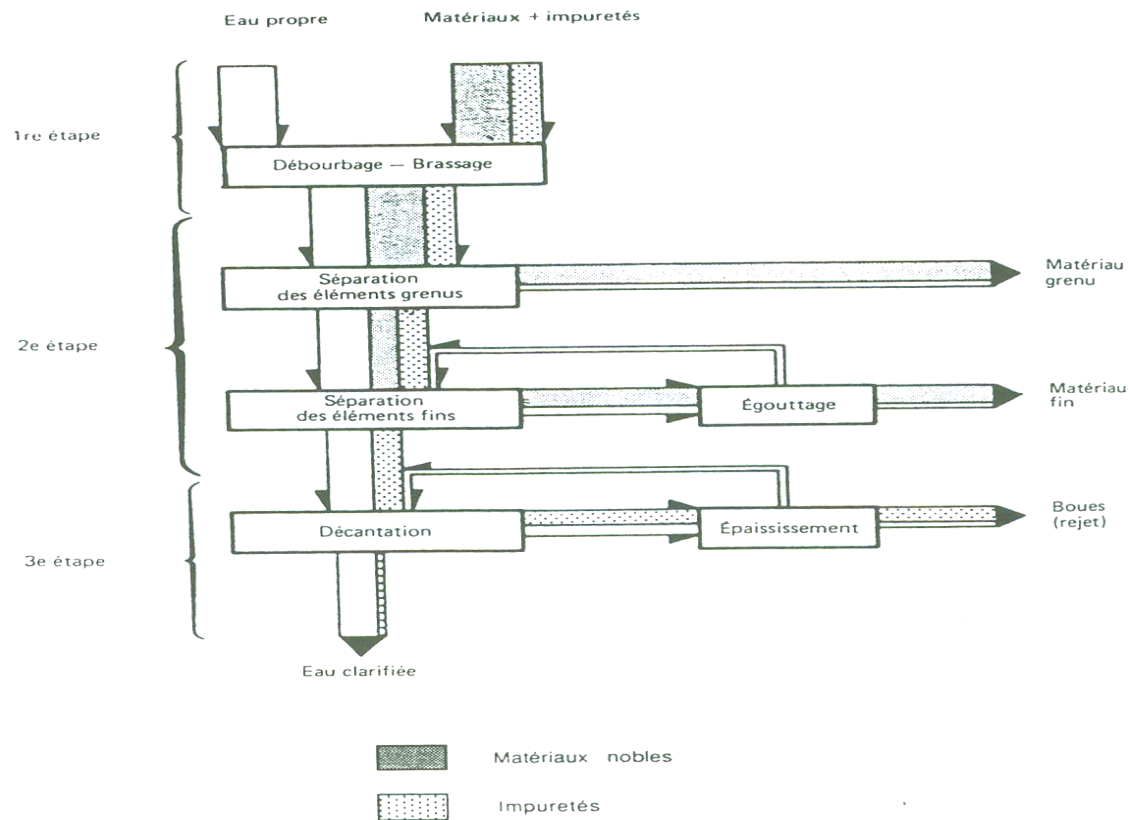
En fonction de l'importance et de la nature de la pollution des matériaux, les actions de lavage peuvent être simples, comme le rinçage sur crible, ou complexes avec plusieurs opérations de traitement réalisées avec des appareils tels que déboureur, cellule d'attrition, roue laveuse, cyclone, etc.

Le lavage est une opération qui peut se réaliser aux différents stades des chaînes de traitement du niveau primaire jusqu'au niveau de classification des sables.

D'une manière schématique, on peut représenter les circuits de lavage ou de classification par voie humide en trois grandes étapes :

- Mise en contact de l'eau propre et des matériaux bruts pour mettre en suspension les éléments polluants ou en excès.
- Séparation des produits marchands grenus et fins des eaux chargées.
- Décantation des eaux de rejet pour les clarifier avec corollaire, une "production" inévitable de boues figure (I-8)





**Figure (I-8) : Traitement des matériaux pollués. [18]**

#### I-2-2-2-4 : Carrière et environnement : [17]

Les granulats sont des matériaux dont on ne saurait se passer et cette notion est trop souvent oubliée du grand public, qui ne ressent l'impact des carrières qu'à travers les atteintes qu'elles apportent à l'environnement.

Les granulats sont des matériaux bon marché, et le développement des contraintes au niveau de leur production ne peut qu'entraîner un renchérissement des produits.

L'exploitation des carrières ne conduit pas à terme, comme beaucoup de gens semblent le croire, à une stérilisation d'une surface qui peut être considérable. Ce n'est qu'un épisode de l'occupation du sol qui se conclut, à plus ou moins long terme, par une nouvelle affectation dont bénéficie la collectivité. Citant à titre d'exemple : Bases de loisirs, Espace sportifs, Bassins de pêche, terres agricoles, opérations d'urbanisme, bassins d'alimentation en eau, aménagement paysager, stockage contrôle des déchets.

Les actions envisageables sur la réduction des nuisances, associées aux multiples possibilités de réaménagement, montrent que la carrière n'a qu'un effet nuisible temporaire et réductible qui, à moyen et long termes, sera toujours bénéfique pour la collectivité.

**I-2-3 : Les pollutions au niveau des carrières : [19],[20]****I-2-3-1 : Pollution liée à la genèse du massif :**

Dans les massifs calcaires, cette pollution correspond essentiellement à :

- Des intercalations de lits argileux ou de lentilles de nature différente du faciès d'ensemble et une altération superficielle.
- Des fissures verticales et des poches de dissolution contenant de l'argile. Ces phénomènes qui sont relativement fréquents, influent directement sur l'état du matériau après abattage.

La propreté des gravillons et du sable par temps humide, est gravement affectée, les blocs sont entourés d'une gangue argileuse entraînant un colmatage des cribles des équipements d'élaboration.

Il n'existe aucun procédé susceptible d'atténuer les conséquences de l'extraction des matériaux de faille à l'exception du lavage.

**I-2-3-2 : Pollution accidentelle :**

La présence de zones très fracturées, peut considérablement gêner une exploitation. Ces zones correspondent très généralement à des matériaux très altérés impropres à l'utilisation. Compte tenu des caractéristiques qualitatives des matériaux, les gisements ont été classés en trois catégories [21]

- La zone de bonne qualité (présence de moins de 10% d'altération et/ou de minéraux indésirables tels que les argiles et les roches tendres) permet l'utilisation de ces granulats pour tout emploi.
- La zone de qualité moyenne (présente de 10 à 30% d'altération et/ou de minéraux indésirables) permet leur utilisation en béton hydraulique et assises de chaussée.
- La zone de mauvaise qualité ou hétérogénéité du gisement (plus de 30% d'altération et/ou des minéraux indésirables) ne permet un emploi normal que sous réserve d'une sélection des parties les plus favorables du gisement, ou d'un effort particulier d'élaboration pour éliminer les matériaux les plus tendres, lavage, etc.

**I-2-4 : Les installations de traitement [18], [19], [22].**

Dans la carrière, la pollution se situe à trois niveaux :

- La découverte qui est mal décapée, peut entraîner une pollution généralisée d'un abattage de roche saine.
- Les poches d'argiles qu'il y aura lieu de purger pour éviter l'inconvénient cité plus haut.
- Une pollution diffuse inter stratifiée qu'on retrouve dans les gisements sédimentaires.

Dans les deux premiers cas, l'essentiel de la pollution peut être éliminé par une extraction bien conduite ou par des éliminations au niveau du poste primaire.

Dans le troisième cas, l'élimination est plus difficile dans la mesure où on fait appel au traitement par voie humide.

Une installation de traitement permettant d'obtenir la qualité des matériaux exigés, ne peut être conçue qu'à partir d'une bonne connaissance du gisement.

On s'intéresse à l'élimination des impuretés contenues dans le banc lui-même et provenant du remplissage argileux de fissures ou d'altérations très localisées.

Il est impératif de prévoir un pré-criblage qui est fonction de la granularité du tout venant de la carrière et de sa teneur en éléments argileux dont la présence est indésirable dans un agrégat de qualité et qu'il faut éliminer le plus vite possible avant le concassage.

Ce pré-criblage peut être complété d'un criblage ou d'un lavage pour récupérer les bons matériaux contenus dans les stériles.

L'adoption d'un post-criblage est également recommandée après le concasseur primaire afin d'affiner le matériau en propreté.

Deniau- M & Archimbaud-C [20] propose deux dispositions constructives :

- Elimination des stériles avant le concasseur primaire.
- Elimination des stériles avant et après le concasseur primaire.

**I-2-4-1: Elimination avant le concasseur primaire**

Outre l'extraction des stériles, elle permet de soulager le concasseur et d'éviter de polluer les blocs s'y trouvant.

- Traitement des matériaux avec peu d'éléments fins à éliminer : un pré-crible équipé de deux claies, permet d'obtenir l'extraction totale d'un (0/D) ou d'un (0/d) et par le canal d'un by-pass la tranche (d/D) si celle-ci, est acceptable.
- Traitement des matériaux avec beaucoup d'éléments fins à éliminer : il est nécessaire d'opérer avec deux étages de traitement :

Un pré-crible équipé d'une seule surface criblante (D) compatible avec taille et la quantité de matériaux indésirable à extraire pour avoir la quasi-certitude d'éliminer la totalité des stériles.

Les matériaux (O/D) peuvent être traités par voie sèche ou par voie humide avec éventuellement, l'utilisation d'un laveur débourbeur suivant la nature des éléments de pollution et les possibilités locales en eau

#### **I-2-4-2: Elimination avant et après le concasseur primaire**

Dans le cas les plus difficiles ou le tout venant contient une forte quantité d'éléments fins avec des blocs recelant des inclusions argileuses, il est nécessaire d'introduire un post-criblage dans le circuit qui permet d'éliminer les indésirables concentrés dans les fines de concassage.

#### **I-2-5 : Les facteurs influençant la propreté des granulats : [23][24]**

Les granulats produits en carrière, proviennent du concassage de roches. Les formations rocheuses sont d'abord fracturées au moyen d'explosifs puis concassées à la dimension voulue.

La qualité des granulats est essentiellement influencée par deux facteurs :

- La qualité de la roche.
- Le fonctionnement de la chaîne d'élaboration.

#### **I-2-5-1 : La qualité de la roche au niveau d'un gisement**

Les roches sont extraites généralement d'un gisement dont l'étude s'avère nécessaire afin d'examiner comment seront produit les granulats. Si le gisement est non-homogène, on peut retrouver une certaine homogénéité au niveau des granulats mais rarement au niveau des sables car les matériaux les plus tendres ont tendance à se concasser en éléments beaucoup plus fin que les matériaux durs. La pureté et la santé d'une roche déterminent la rentabilité d'un gisement et influent directement sur les caractéristiques intrinsèques, la forme et la propreté des gravillons et des sables produits.

**I-2-5-2 : Le fonctionnement de la chaîne d'élaboration :**

Autant que la qualité de la roche, le bon fonctionnement de la chaîne d'élaboration (dispositifs d'élimination, ouvertures des concasseurs, lavage et débouage etc.) est un gage certain pour l'obtention de la qualité.

**I-2-6 : Influence des concasseurs sur la qualité : [24]**

Le choix des concasseurs destinés à effectuer les opérations de concassage et de broyage, est difficile à réaliser en ce sens qu'ils présentent tous les avantages et les inconvénients selon le type de roche à exploiter et l'utilisation prévue des granulats produits.

Un choix judicieux du type de concasseur reste nécessaire afin d'assurer une certaine qualité.

Afin d'améliorer la production des granulats en terme de qualité, l'audit [25] réalisée par l'Organisme de Contrôle Technique de Travaux Public (CTTP) et le Laboratoire Central des Pont et Chaussées de Paris (LCPC) dans le cadre d'un protocole d'accord portant assistance technique, recommande le recours systématique aux types de matériels suivants :

- Le concasseur à mâchoires ( concasseur primaire) est à réserver pour le débitage des roches par préférence au concasseur giratoire et ce, eu égard à la taille des carrières.
- Le concasseur à marteaux (ou à percussion) est à réserver au roches calcaires car il permet une très grande réduction des éléments.
- Le concasseur giratoire sera réservé pour la réduction secondaire et tertiaire.

Parfois les concasseurs secondaires sont des « faux secondaires » parce que le matériau provenant de ce concassage dit secondaire, n'est pas criblé à part mais il est envoyé au crible unique de l'installation.

On obtient finalement un mélange de granulats provenant du concassage primaire (qui sont pollués et comportent des éléments tendres) et de granulats provenant du concassage secondaire (qui sont beaucoup plus propres et plus durs).

Les sables des divers étages sont également très souvent mélangés alors qu'ils doivent être systématiquement séparés pour être utilisés dans de bonnes conditions.

**I-2-7 : Influence du stockage sur la qualité des granulats : [23] [24] [26]**

D'autres facteurs peuvent être à l'origine de la mauvaise qualité des granulats, on cite entre autres :

- Les conditions de stockage et de reprise sur les stocks.
- Les conditions de transport.

Les travaux routiers sont soumis à des aléas climatiques et sont donc saisonniers, les travaux de bâtiments sont plus répartis mais présentent eux aussi des variations saisonnières importantes, dont les pointes et les creux coïncident avec ceux de l'industrie routière. La demande étant donc saisonnière, on doit stocker une partie importante de la production.

Le stockage des granulats est une opération qui n'a pas toujours reçu les soins et l'attention souhaités dans les installations de concassage.

A la sortie des cribles, les gravillons et les sables sont stockés dans les trémies ou sur des aires de stockage couvertes ou découvertes.

Généralement, les trémies et les silos étant limités par leurs capacités de stockage (jusqu'à 200t), il est souvent nécessaire de stocker les matériaux dans des aires de stockage.

Les modes de stockage et de reprise sont des sources de phénomènes qui peuvent affecter la qualité initiale des granulats et des sables et qui sont :

- La contamination.
- La pollution.

Le constat qui se dégage après l'exploitation, est le suivant :

- Les granulats et les sables stockés dans les trémies sont plus propres.
- Les granulats et les sables stockés dans des aires à découvert sont moins propres.

**I-2-8 : Pollution et contamination [22],[27].**

Au cours des manutentions successives et sur le lieu de stockage, le matériau initialement propre peut être pollué par :

- Des poussières entraînées par l'air.
- Les produits que contiendraient les engins de transport.
- La boue entraînée par les roues des appareils de manutentions.
- Les manutentions peuvent aussi détériorer les arêtes vives des matériaux anguleux et modifiera la granularité par attrition.

Il faut éviter d'une part, le mélange des différents produits et d'autre part leur souillure soit par la poussière régnant au voisinage de la carrière soit par le sol naturel si celui-ci n'est pas aménagé.

Il s'avère donc nécessaire d'apporter beaucoup de soin à la préparation des aires de stockage. Lorsque des tas présentant des propriétés différentes, sont disposés les uns à côté des autres, il existe entre les tas, une zone de chevauchement provoquant un mélange des matériaux.

- Si la reprise est automatique à partir d'orifices à travers un tunnel par des extracteurs et transporteurs d'évacuation, la zone de chevauchement des tas ne doit pas s'approcher de ces orifices, entraînant un stock inutilisable.
- Si les matériaux sont repris à la chargeuse, il faut alors élever des murs de séparation afin d'éviter cette contamination.

### **I-3 : Influence des fines de sable sur les propriétés des bétons :**

#### **I-3-1 : Mécanique des bétons sous conditions locales : [28]**

Le béton est un matériau purement locale, ses propriétés sont étroitement dépendantes des conditions locales (constituants, fabrication, mise en œuvre .....). Dans le but de combler un manque quasi-total d'informations sur les aspects de la mécanique des bétons propre à la région, un vaste programme expérimental sur des matériaux locaux (granulats,...) à été mené au sein du LMDC (Laboratoire des Matériaux de Construction) de l'université Mentouri de Constantine, en vue de cerner certaine phénomènes restés jusque la méconnus, et de répondre à certaines questions qui se pose devant la grande variétés des choix offerts. Mais surtout devant un manque d'informations sur les produits disponibles. L'essentiel de cette communication est représenté ci-dessous

##### **I-3-1-1 : Expérimentation :**

La campagne d'essai concerne l'étude de l'influence des fillers sur les propriétés des bétons. Trois béton (B1, B2, B3) ont été formulé en utilisant du sable lavé et tamisé à 80  $\mu\text{m}$  au quel on introduit des fillers en différentes proportions (0, 5, 10, 15, 20%). L'eau de gâchage est calculée de sorte à obtenir un affaissement au cône d'une valeur voisine de 10cm. Les éprouvettes confectionnées : (16x32 Cm) pour les essais de compression ; (7x7x32 Cm) pour les mesures des variations dimensionnelles et massiques en fonction du temps et les essais de traction/flexion.

La composition de base des bétons utilisée est celle de Dreux-Gorisse, le dosage en ciment est pris égale à 350 Kg/m<sup>3</sup>. Les constituants de ces trois bétons sont les suivant :

Tableau (I-10) : Granulats utilisés pour la confection des différents bétons. [28]

Granulats	Bétons		
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
0/3	x	x	x
3/8	x	x	x
8/15	x		x
15/25	x	x	x
< 80 μm	x	x	x

### I-3-1-2 : Résultats :

#### I-3-1-2-1 : Influence de la teneur en fine sur le rapport E/C :

On constate que pour les trois bétons étudiés B1, B2, B3 la quantité d'eau de gâchage augmente avec l'augmentation de la teneur en fillers. Le dosage en eau est une fonction croissante de la teneur en fillers jusqu'à des teneurs de l'ordre de 15% puis devient décroissante, au delà de cette valeur figure (I-9) cette constatation reste valable quel que soit l'origine du sable. On doit signaler par ailleurs que les bétons confectionnés avec du sable brut demandent un peu plus d'eau que ceux confectionnés avec du sable reconstitué ayant la même teneur en fillers. Ceci s'expliquerait probablement par le fait que les sable bruts utilisés ne sont pas lavés et contiendraient des impuretés consommatrice d'eau.

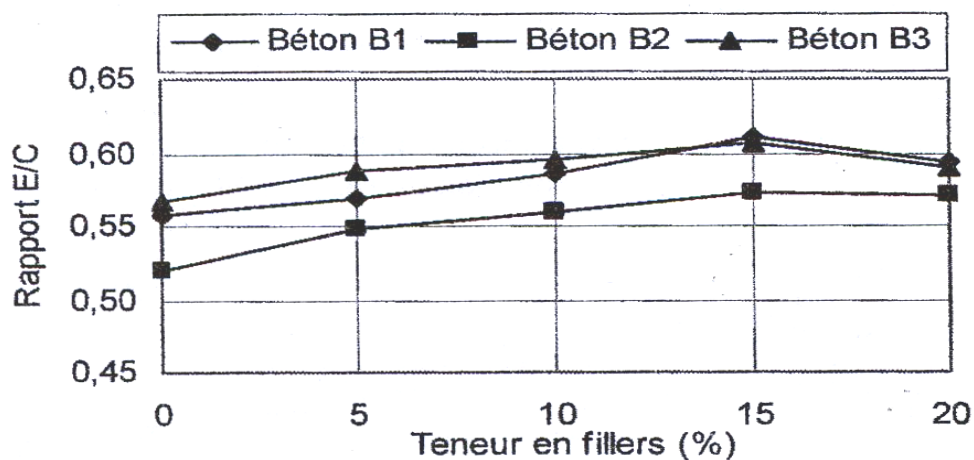


Figure (I-9) : Rapport E/C en fonction de la teneur en fillers. [28]



**I-3-1-2-2 : Influence de la teneur en fines sur la densité des bétons :**

Les valeurs obtenues sont assez basses et varient entre 2.2 et 2.45 t/m<sup>3</sup>, ce qui se traduit probablement par une porosité élevée des bétons. On constate que la densité réelle du béton augmente jusqu'à la teneur en fillers de 15%, puis diminue. La compacité optimale est obtenue entre 10 et 15 %.

**I-3-1-2-3 : Influence de la teneur en fines sur la résistance à la compression :**

On constate d'après la figure (I-10) que les résistances à la compression augmentent avec le pourcentage des teneurs en fillers et passent par un extremum pour 15 % de fillers environ, et ce, quel que soit le béton et le temps du durcissement. Au-delà de la teneur en fillers de 15%, les résultats s'inversent et diminuent plutôt rapidement. Des résultats en accord avec ceux trouvés précédemment et relatifs à la compacité.

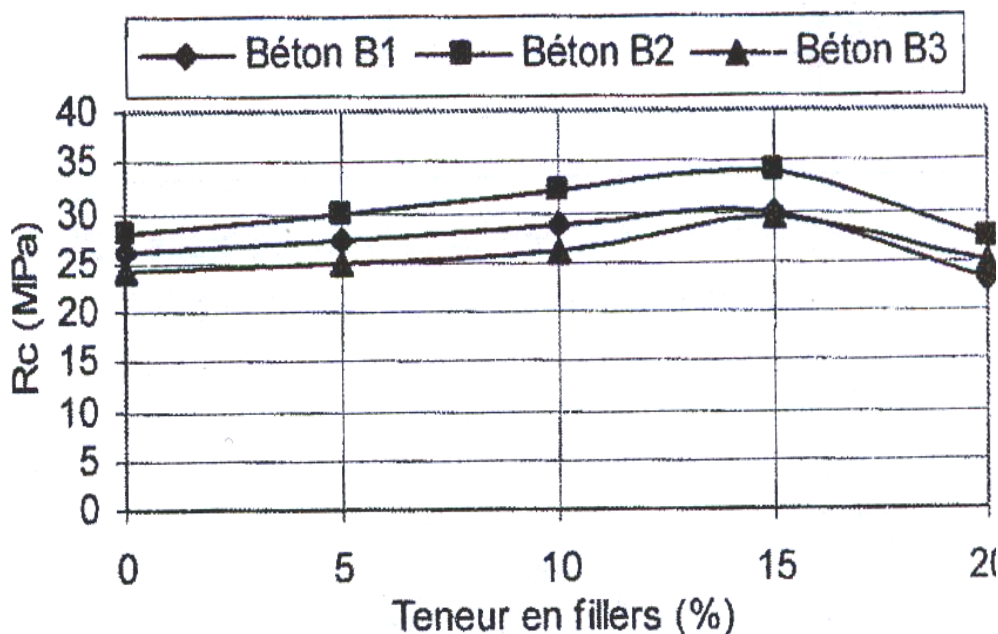


Figure (I-10) : Résistance à la compression des bétons à 28 jours, en fonction de la teneur en fillers. [28]

**I-3-1-2-4 : Influence de la teneur en fines sur le retrait des bétons :**

Le dosage en fines augmente le retrait du béton qui peut atteindre des valeurs triples de celui d'un béton sans fines. Ce résultat est probablement lié à une distribution et aux tailles des vides différentes entre les deux matériaux, à leur distribution ainsi qu'à une augmentation du volume de pâte. Le retrait des bétons de granulométrie continue présente un retrait supérieur d'environ 35% par rapport à celui des bétons de granulométrie discontinue figure (I-11).

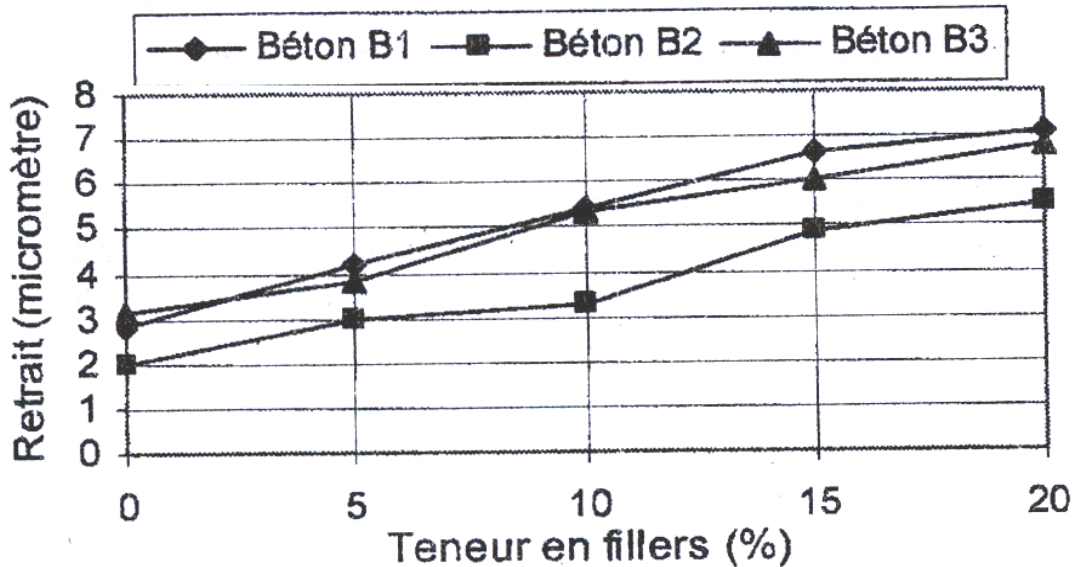


Figure (I-11) : Retrait des bétons à 28 jours en fonction de la teneur en fillers. [28]

### I-3-1-3 : Conclusion :

L'influence des fillers sur les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci, viennent à point. Le problème des mauvais bétons se pose encore dans la région. Incrimine-t-on à tort les éléments fins contenus dans les granulats calcaires ? Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à ce sujet [29], [30]. Chaque pays possède ses propres normes concernant les pourcentages d'éléments fins admis dans les granulats [31], [32]. Cette étude sur les éléments fins a montré que le béton confectionné avec des granulats calcaires présente une ouvrabilité. Les éléments fins contribuent à la cohésion du béton. Les bétons sans fillers donnent des résistances inférieures que les bétons avec fillers. La teneur optimale en fillers qui permet d'obtenir des résistances mécaniques les plus élevées est de l'ordre de 10 à 15 %.

### I-3-2 : Influence des fines calcaires et argileuses sur les bétons :

Une étude sur l'influence des fines calcaire et argileuses sur les bétons est réalisée par le CNERIB [12] dont le résumé est le suivant :

Des mélanges différents de bétons en même ouvrabilité, en prenant comme variables les teneurs en fines calcaires et argileuse dans des sables et les teneurs en ciment. Les valeurs des fines employées dans les mélanges sont montrées dans le tableau (I-11) lequel il est sensé couvrir suffisamment d'intervalle réels de combinaisons. Deux dosages en ciment ont été utilisés (350 et 250 Kg/m<sup>3</sup>).

Tableau (I-11) : mélange employé dans les sables. [12]

Fines dans les sables ; f (%)	Argile/ sable ; i (%)			
	0	1	2	4
25	*	*	*	*
20	*	*	*	*
15	*	*	*	*
10	*	*	*	*
5	*	*	*	
3.5	*	*		

**I-3-2-1 : Préparation des composants :**

La carrière était choisie en se basant sur la bonne qualité de la roche calcaire ( $\text{CaCO}_3 = 96\%$ ) et la disponibilité d'une station pour lavage du sable ; un besoin fondamental pour la préparation des mélanges sables-fines.

Les mélanges tableau (I-12) sont effectués dans le but d'obtenir une maniabilité similaire aux valeurs généralement réalisées sur les chantiers. Les valeurs prises en compte au maniabilimètre LCPC sont :

- 15 Seconds pour le dosage  $250 \text{ Kg/m}^3$
- 13 Seconds pour le dosage  $350 \text{ Kg/m}^3$

Tableau (I-12) : Proportion des mélanges. [12]

Dosage en ciment $\text{Kg/m}^3$	Agrégats (mm)	Proportion du mélange ; f (%)					
		3.5	5	10	15	20	25
250	12/15	34	34	36	36	36	36
	5/12	16	16	19	21	23	25
	Sable	50	50	45	43	41	39
350	15/25	36	36	38	40	40	40
	5/12	20	20	20	20	23	26
	sable	44	44	42	40	37	34

**I-3-2-2 : Résultats obtenus :****I-3-2-2-1 : Résistances mécaniques :**

Une teneur en fines calcaires supérieure à 15% pour les deux types de bétons, et une teneur en argile nulle ( $i = 0$ ) n'influent en aucun cas sur les résistances mécaniques des bétons figure (I-12),(I-13),(I-14),(I-15).

Pour les sables dont la teneur en argile est comprise entre 1 et 2 % et pour des dosages élevés (350 Kg/m<sup>3</sup>), une faible diminution en contraintes de l'ordre de 10% est observée. Pour de faible dosage (250 Kg/m<sup>3</sup>) la pente en contrainte est de l'ordre de 5%. De même pour des dosages en fines élevés de l'ordre de 20% à 25 % la pente est progressive.

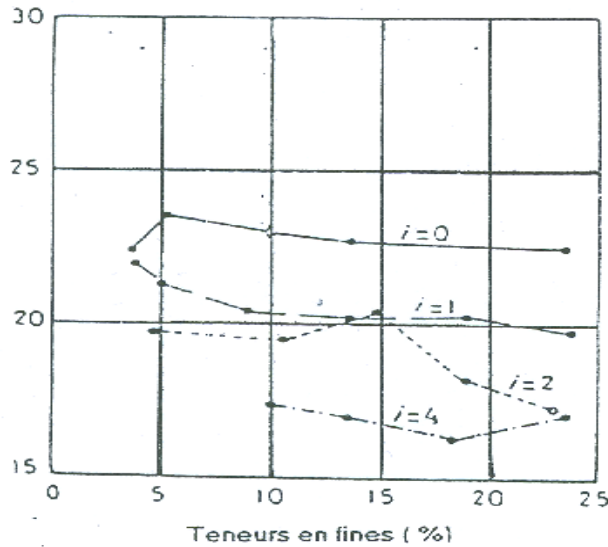


Figure (I-12) : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 250 Kg/m<sup>3</sup> [12]

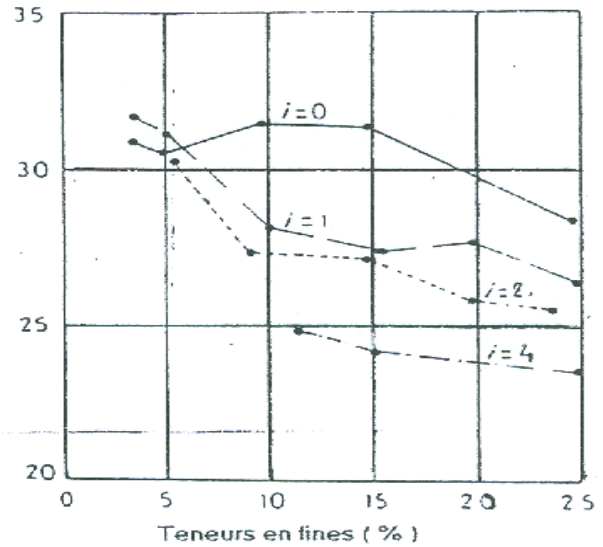


Figure (I-13) : Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 350 Kg/m<sup>3</sup> [12]

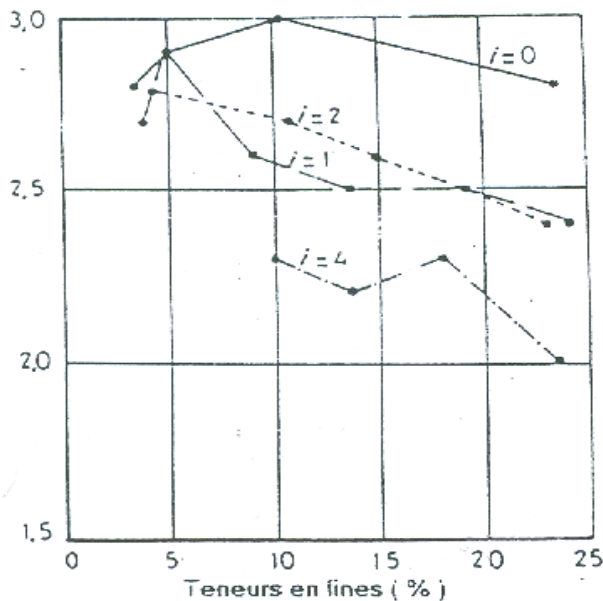


Figure (I-14) : Résistance à la traction en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 250 Kg/m<sup>3</sup> [12]

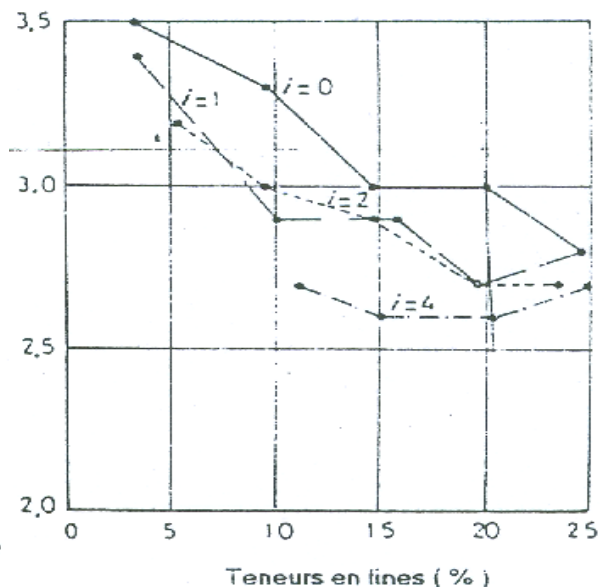
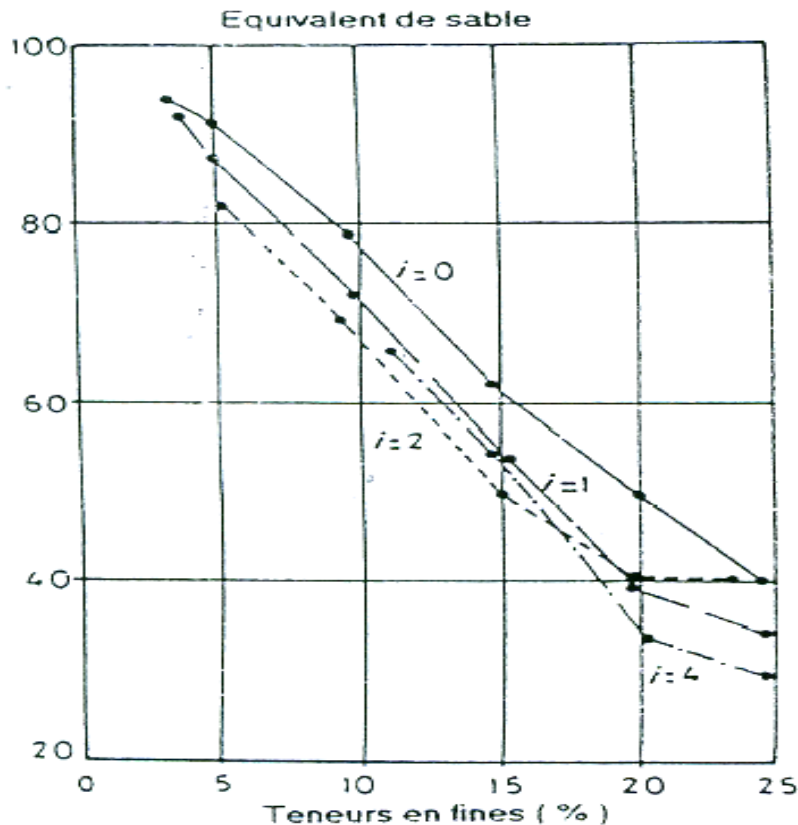


Figure (I-15) : Résistance à la traction en fonction de la teneur en fines pour un dosage en ciment de 350 Kg/m<sup>3</sup> [12]

**I-3-2-2-2 : Equivalent de sable :**

La valeur admissible de l'équivalent de sable pour les sables concassés est fixée à 65 (NFP 18-301) et en tenant compte des résultats obtenus figure (I-16), il a été conclu comme suit :

- Pour 0% d'argile la limite des fines est de l'ordre de 15 %.
- Pour 1 % d'argile la limite des fines est de l'ordre de 12 %.
- Pour 2% d'argile la limite des fines est de l'ordre de 10 %.



**Figure (I-16) : Valeur de l'équivalent de sable en onction de la teneur en fines calcaires et argileuses. [12]**

**I-3-2-2-3 : Essai au bleu de méthylène :**

La valeur du bleu en gramme de colorant pour 100 g de sable, figures (I-17),(I-18) varie en sens opposé à l'évolution de la résistance lorsque la teneur en argile ou en fines totales varient. D'autre part l'expression qui correspond à 100g de fines donne le résultat suivant : lorsque l'argile augmente la valeur du bleu augmente tandis qu'à chaque niveau d'argile lorsque le taux de fines augmente la valeur du bleu diminue.

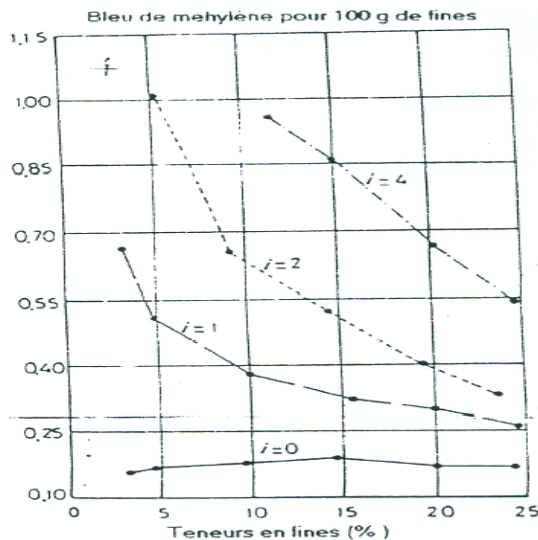


Figure (I-17) : la valeur de bleu de méthylène pour 100 g de sable en fonction des teneurs en fines [12]

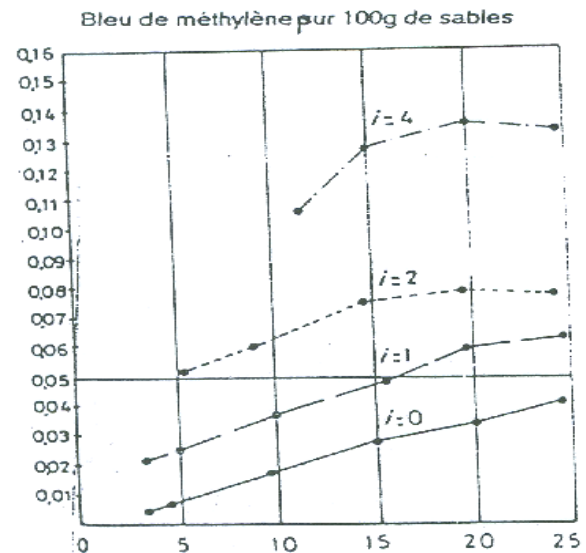


Figure (I-18) : la valeur de bleu de méthylène en fonction des teneurs en fines calcaires et argilleuses. [12]

En conclusion toutes ces observations ont conduit à admettre une limite de 15 % de fines dans le sable calcaire à condition que le taux en fines argilleuses soit contrôlé à l'essai au bleu de méthylène.

### I-3-3 : Contribution à l'étude de l'influence des fines sur les caractéristiques mécaniques du béton : [33]

Une étude a été menée au L.T.P.Est de Constantine afin d'obtenir la teneur optimale des fines dans un sable à béton. Pour cela 05 séries ont été réalisées. D'une série à une autre ils ont fait varier la teneur en fines (0%-5%10-15%-20%).Des échantillons de béton confectionnés ont fait l'objet de mesures de résistances à la compression (cylindres et cubes), à la traction (sur prisme), et aussi une estimation de la résistance à l'aide de l'auscultateur dynamique et scléromètre.

D'après Y-BENACHOUR [33] ; la présence de fines en quantités non contrôlée dans une composition de béton peut compromettre la qualité de ce dernier.

Lors d'une reconnaissance des sables de concassage [2] utilisés pour la confection des bétons, il apparait que certaines carrières produisent un sable à forte teneur en fines, notamment celles de L'E.N.G ou le taux moyen des fines enregistré est de 22%.

L'analyse du sable de cette carrière a montré que celui-ci présente de bonnes caractéristiques si ce n'est un excès de fines. Donc, les fines ayant servi à l'étude de Y.BENACHOUR ont été récupérées par tamisage à sec d'un sable produit par une carrière géante (ENG) située à 20 km au sud-est de Constantine. Le gisement exploité est constitué essentiellement de calcaire gris foncé et gris clair. Cette carrière produit un fort pourcentage en fines, qui est de l'ordre de 22 %.

**I-3-3-1 : Procédure expérimentale**

- Dosage en fines : 0%-5%-10%-15% et 20% de fines.
- Dosage en ciment : le dosage le plus courant ; 350kg/m<sup>3</sup>
- Dosage en eau : La quantité d'eau a été fixée au départ a 185 litres, a été corrigé progressivement de manière à maintenir un affaissement au cône d'Abrams constant pour toutes les séries d'essais.
- Dimension maximale des granulats : D = 25mm.

**I-3-3-2 : Caractéristiques mesurées** : Les mesures effectuées sont :

- Résistance à la compression sur cylindres 16\*32 cm
- Résistance a la compression sur cube 2\*20\*20 cm
- Résistance a la traction par flexion sur prisme 7\*7\*28 cm
- Résistance estimée par l'auscultation au scléromètre sur cube.
- Résistance estimée par l'auscultation dynamique sur cube 20\*20\*20 cm.
- Dosage des constituants :

**Tableau (I-13) : Dosages pondéraux [33]**

série	Fines	Ciment	Gravier (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable	Fines
1	0	350	1225	621	00
2	5	350	1225	590	31
3	10	350	1225	559	62
4	15	350	1225	528	93
5	20	350	1225	497	124

**I-3-3-3 : Résultats et analyses :****I-3-3-3-1 : Résistance à la compression mesurée sur cylindre : figure (I.19)**

Pour un pourcentage faible de fines la résistance est constante (jusqu'à 5%), au delà de cette valeur et jusqu'à 15%, l'ajout de fines inertes paraît améliorer la résistance. Celle-ci augmente de 25% à 7 jours et 20% à 28 jours. L'optimum de résistance paraît se situer entre 10 à 15% de fines.

**I-3-3-3-2 : Resistance à la compression mesurée sur cube : figure (I.19)**

Ils constatent que la résistance commence à s'améliorer à partir de 5% de fines. De 5 à 10% de fines une augmentation de 17% est constatée. L'optimum de résistance est obtenu pour un pourcentage de fines de 10 à 15%.



### I-3-3-3 : Résistance estimée par l'auscultation dynamique : figure (I.19)

De 5 à 15% de fines, la résistance est améliorée de 20%. L'optimum est atteint pour un pourcentage de fines de 15 à 20%.

### I-3-3-4 : Résistance estimée par l'auscultateur-scléromètre : figure (I.19)

Ils relèvent aussi une amélioration de 17% de la résistance (soit de 107kg/cm<sup>2</sup>) pour un dosage en fines de 15%.

### I-3-3-5 : Résistance à la traction par flexion : figure (I.20)

De même que pour les cas précédant, c'est à partir de 5% que la résistance à la traction commence à s'améliorer. Ils relèvent de 5% à 15% de fines une augmentation de résistance de 22%. L'optimum de résistance est obtenu pour un pourcentage de fines de 15%.

Ils concluent que pour les sables présentant des teneurs en fines très élevées ; il y a lieu d'intervenir soit au niveau des équipements de concassage, soit corriger par un apport d'un sable présentant un pourcentage modéré de fines [34].

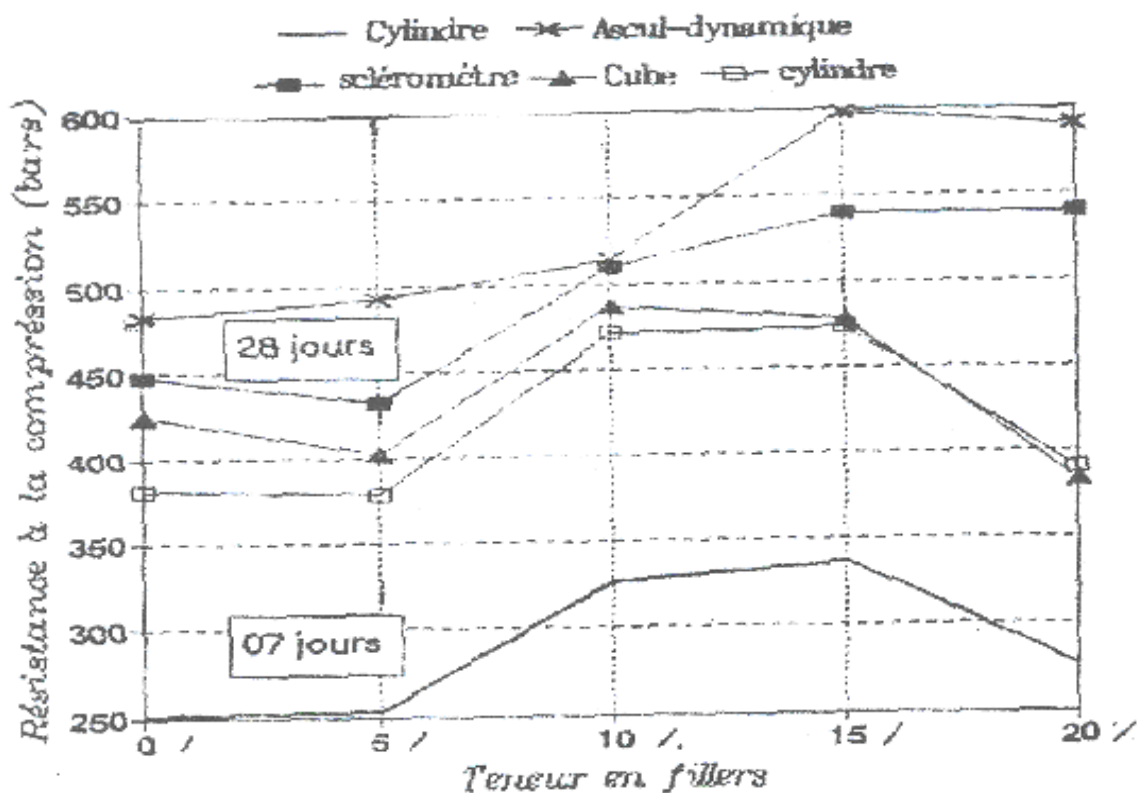


Figure (I-19). Résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en fines [33].



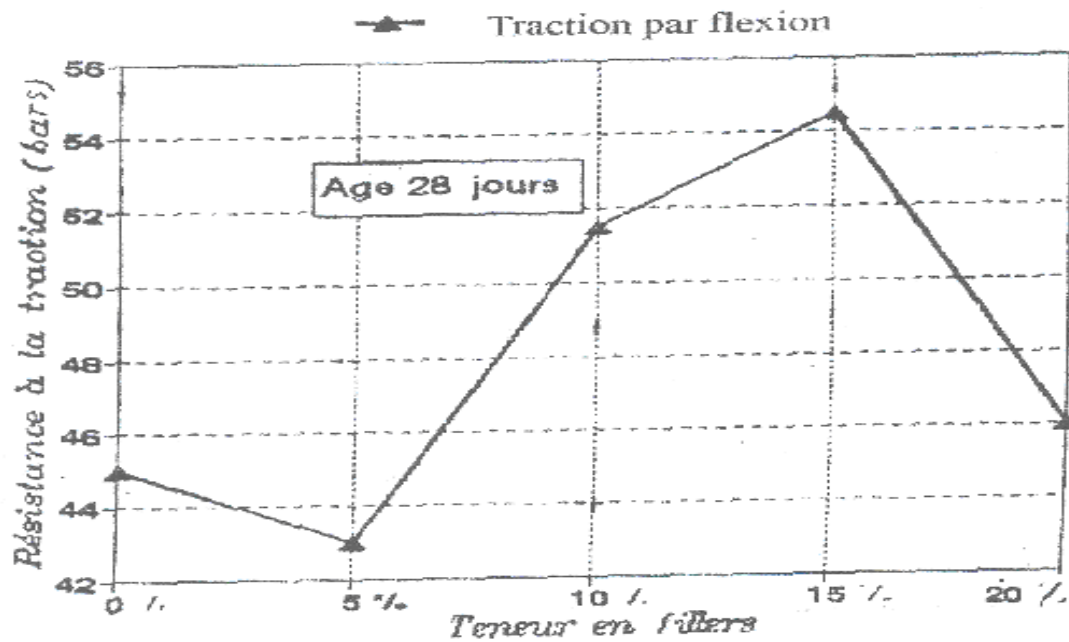


Figure (I-20). Résistance à la compression en fonction de la teneur en fines [33].

#### I-4 : Défillérisation des sables de concassage : [35]

##### I-4-1 : Introduction :

Dans l'industrie extractive, de nombreuses dimensions de particules sont produites durant les étapes de concassage, y compris les fines non désirées, ce qui est appelé plus communément le « filler ». Il s'agit de particules qui peuvent être définies comme passant au tamis à mailles carrées de 74µm. Ces particules accompagnent les grains plus grenus ou y adhèrent.

Il est essentiel de noter que, d'une part, l'élimination du filler est utile pour diminuer les envolées de poussières et est une obligation pour respecter les spécifications de certains produits (granulats, sables de concassage...). Mais que, d'autre part, il faut en fabriquer, par broyage, pour l'utiliser comme charges minérale (par exemple, utilisation de calcaire micronisé dans les peintures, les colorants, les vernis, les enduits, les tapis, les plastiques, le caoutchouc, le papier,...).

A l'heure actuelle, la défillérisation dans l'industrie extractive s'effectue en voie sèche ou en voie humide mais elle ne donne pas entière satisfaction que ce soit pour des questions de performance, des aspects économiques (coûts d'investissement et d'exploitation) ou des raisons environnementales.

Il ne faut pas oublier qu'en dehors de leur granulométrie, les caractéristiques des particules à séparer peuvent être très proches ou totalement différentes, chimiquement, minéralogiquement ou physiquement (formes, masses volumiques, friabilité, adhésivité, résistivité,...).

### I-4-2 : Techniques de défillérisation :

Il existe plusieurs techniques de défillérisation. On cite les trois principales techniques à titre d'exemple.

#### I-4-2-1 : Lit fluidisé :

Comme le montre la figure (I-21), la séparation granulométrique est basée sur le principe d'entraînement des fines particules par un courant d'air ascendant.

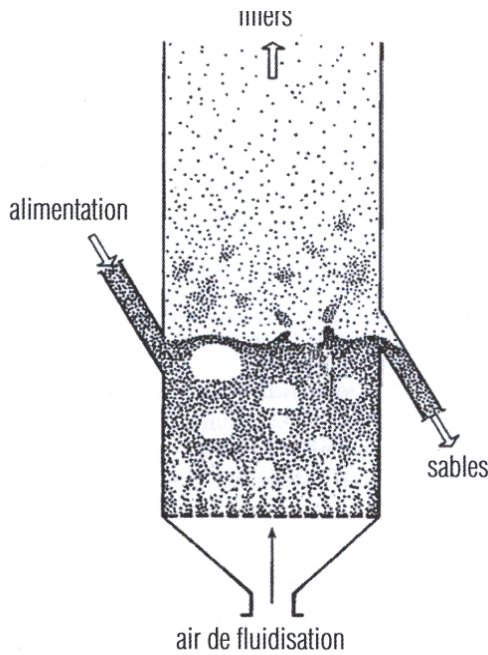


Figure (I-21) : Lit fluidisé

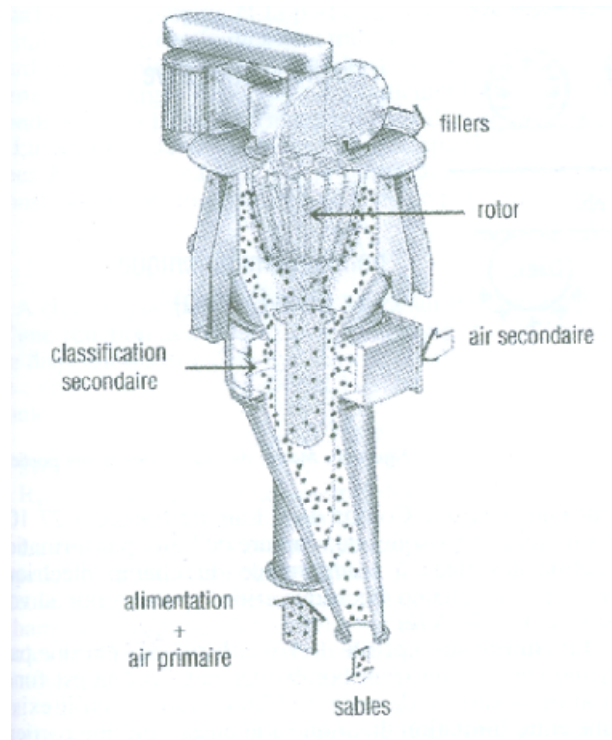


Figure (I-22) : Séparateur dynamique de type Hosokawa

Cette solution présente l'avantage d'être simple et de fonctionnement stable dans la mesure où le débit de ventilateur de fluidisation est correctement contrôlé. Il présente toutefois les inconvénients suivants :

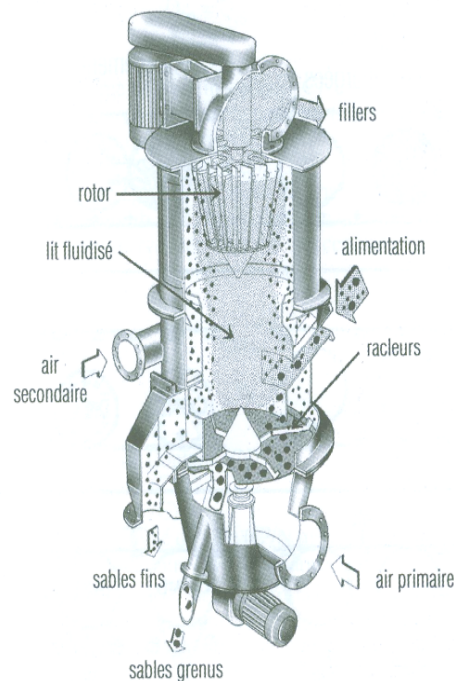
- La nécessité de voir une grande surface de fluidisation pour atteindre les capacités de traitement souhaitées ;
- Le débit d'air nécessaire pour fluidiser l'ensemble des grains, y compris les plus grenus, est conséquent,
- La totalité des gaz chargés doit être dépoussiérée pour récupérer les fines ;
- L'obligation, pour des raisons environnementales, d'avoir un réacteur en dépression, ce qui implique l'utilisation d'un deuxième ventilateur.

**I-4-2-2 : Séparateur dynamique :**

La matière à défillériser est injectée, avec le courant d'air principal, par les bas grâce à un conduit réglable figure (I-22). Elle est ensuite dirigée vers le rotor au travers duquel ne peuvent passer que les fines, la variation de la vitesse de ce rotor réglant la coupure granulométrique. Les particules grenues redescendent dans le séparateur ou elles sont mises en contact avec un flux d'air secondaire turbulent les éventuels agglomérés et en décollant les fines qui adhèrent aux particules plus grosses. Elles sont ensuite évacuées par un conduit dans la partie inférieure.

**I-4-2-3 : Séparateur combiné :**

La défillérisation peut être effectuée en utilisant une combinaison d'un système à lit fluidisé et d'un séparateur dynamique figure (I-23).



**Figure (I-23) : séparateur combiné Hosokawa. [35]**

Le produit à traiter est introduit dans le séparateur et est dispersé dans un lit fluidisé. L'air entrant par un orifice situé à la partie inférieure de l'équipement entraîne les particules vers la zone de séparation à l'exception des particules les plus grenues qui restent dans le fond du séparateur et sont évacuées grâce à des bras racleurs.

Les particules, dont la granulométrie est inférieure à la dimension de coupure, passent entre les pales du rotor et sortent du séparateur ; dans la mesure où celles-ci peuvent encore contenir des fines, elles sont mises en contact avec un flux d'air secondaire qui a le même rôle que dans le cas du séparateur dynamique. La fraction grenue est ensuite déchargée par une conduite de sortie se trouvant dans le bas de l'équipement.

**I-4-3: Conclusion :**

Dans l'industrie extractive, la défillérisation (élimination de la fonction granulométrique inférieure à  $74\ \mu\text{m}$ ) des sables de concassage 0/2 mm est actuellement pratiquée à sec ou par voie humide. Il existe, en effet, d'une part des sélecteurs dynamiques performants mais qui nécessitent un séchage préalable, et d'autre part, des hydrocyclones qui produisent une boue qu'il faut ensuite déshydrater (décantation, filtration et éventuellement séchage).

Dans ces sables, le filler se présente sous forme de particules isolées ou adhérant à des particules plus grenues. Pour les particules isolées, une séparation pneumatique par courant d'air ou par aspiration peut convenir.

## Chapitre II :

# Cartographie des gisements des granulats : Wilaya de Bejaia

## Chapitre II :

### Cartographie des gisements des granulats : Wilaya de Bejaia

La production de granulats est présente sur l'ensemble de territoire de la wilaya de Bejaia, grâce à la richesse géologique de cette wilaya. Le territoire de Bejaia comporte 99 unités de production de granulats. Dont 19 exploitations des gisements de roches massives (carrières), et le reste sont des unités de productions des granulats d'origine alluvionnaires (sablères).

#### II-1 : les exploitations (carrière) des gisements de roches massives :

La forte demande des matériaux de construction, par le secteur du bâtiment après le lancement de projet d'un million de logements, et de travaux publics entre autre, a encouragé de nombreux promoteurs à investir dans ce créneau. Dans ce contexte la wilaya de Bejaia contient 19 unités de production de granulats de roches massives, répartis sur douze communes, qui exploitent des gisements de calcaire, dont douze sont en activité, cinq en arrêt et deux en phase d'aménagement.

##### II-1-1 : les exploitations en activité :

Actuellement douze exploitations de roche massive sont en activité dans la wilaya de Bejaia à savoir :

###### II-1-1-1 : Carrière E.N.O.F Timezrit :

➤ **Situation géographique :**

La carrière ENOF Timezerit est située à Ighil Haroune dans la commune de Timzerit, à environs 7 Km au sud de l'oued soummam. Les accès à cette carrière sont les CW 15 et le CW 21 qui rejoignent la RN 26.

➤ **Situation physique :** [Source DMI Bejaia 2007]

La carrière d'ENOF Timzerit est ouverte en 1977 dont le personnel productif est issu de l'ex mine de l'hématite, abandonnée en 1976 suite à une forte présence d'eau qui causait des effondrements au niveau des galeries.

Les réserves estimées (au massif) sont de 578 380 m<sup>3</sup> de calcaire sur une surface de 11 Ha, 90 ars et 37 Ca.

**Tableau (II-1) : Situation de la carrière ENOF Timzerit**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut Juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
ALGRAN/Timezrit	Ighzer Haroun Timezrit	Filiales du Groupe ENOF	130 000	1	684.170	370.260
				2	684.450	370.365
				3	684.480	369.075
				4	684.225	370.095

**II-1-1-2 : Carrière E.N.O.F Adrar Oufarnou :**➤ **Situation géographique**

Le gisement d'Adrar Oufarnou est situé à une distance de 06 km au nord de la ville de Bejaia. L'unité est reliée par un accès de 02 km à la RN 24, menant à Tizi Ouzou et à Alger en passant par Azeffoun. Ses limites naturelles sont : au Nord la mer méditerranée, à l'Ouest, à l'Est et au Sud des terrains accidentés, rocaillieux.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement d'Adar Oufarnou est mis en exploitation en 1979 par le groupe ENOF sur une Superficie de 41 HA, 80 Arcs et 25 Ca. Les réserves géologiques globales de cette carrière sont évaluées à 1 084 476 m<sup>3</sup> de calcaire.

**Tableau (II-2) : Situation de la carrière ALGRAN Bejaia.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/An)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pt	X	Y
ALGRAN/Bejaia	Adrar Oufarnou	Filiales du Groupe ENOF	200 000	1	708.105	390.060
				2	708.970	389.775
				3	709.000	389.250
				4	708.580	389.310
				5	708110	389.700

**II-1-1-3 : Carrière SOMACOB Toudja :**➤ **Situation géographique :**

La carrière SOMACOB Toudja est située à Brirouche, une localité au Nord du village de Toudja, dans la Daïra d'El-kseur. Les accès à cette carrière sont CW43 et CW34, qui rejoignent la RN 26.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement actuellement exploité par la SOMACOB Toudja est le versant Nord du djebel Aghbalou qui est mis en exploitation en 1984. Les réserves géologiques globales de ce gisement sont estimées à 219 186 m<sup>3</sup>.de calcaire sur une superficie de, 07 Ha, 49 Arc et 27 Ca.

**Tableau (II-3) : situation de la carrière SOMACOB Toudja.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SOMACOB TOUDJA	Brirouche Toudja	EPE/SPA	50 000	1	969.730,00	380.155,00
				2	696.672,10	386.371,90
				3	696.776,00	386.486,20
				4	696.889,80	386.521,00
				5	697.000,00	386.400,00
				6	696.925,90	386.242,00

**II-1-1-4 : Carrière SOMACOB et ENCOTRAB Akbou :**

➤ **Situation géographique :**

Les deux carrières SOMACOB et ENCOTRAB Akbou sont distantes l'une de l'autre de quelques centaines de mètres ; elles sont situées au « Piton » d'Akbou, a envions deux kilomètre au sud de la ville d'Akbou, et à une centaine de mètres de la voie ferrée et de l'oued Soummam.

➤ **Situation physique SOMACOB Akbou : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement qu'exploite la carrière de SOMACOB Akbou est une structure en piton appartenant à Adrar Gueldamene. Il est mis en exploitation en 1984. Cette carrière s'étale sur une superficie de : 8Ha et 24 Ars

Les réserves globales de cette carrière sont estimées à : 1 342 000 m<sup>3</sup> de calcaire.

**Tableau (II-4) : Situation de la carrière SOMACOB Akbou.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SOMACOB Akbou	Piton d'Akbou	EPE/SPA	50 000	1	664.263,00	350.726,20
				2	664.217,50	350.839,90
				3	664.215,20	350.872,00
				4	664.264,50	350.921,00
				5	664.505,00	350.875,00
				6	664.554,10	350.870,60
				7	664.552,60	350.577,30
				8	664.434,50	350.591,00



➤ **Situation physique ENCOTRAB Akbou : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement exploité par ENCOTRAB Akbou est le même que celui de SOMACOB Akbou. Ce gisement contient 700 000 m<sup>3</sup> de calcaire comme réserves géologiques globales. Et s'étale sur une superficie de 11Ha. Ce dernier est mis en exploitation en 1976.

**Tableau (II-5) :-Situation de la carrière ENCOTRAB Akbou.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pts	X	Y
ENCOTRAB	Piton d'Akbou	EPE/SPA	11 500	1	664.580	350.534
				2	664.705	350.481
				3	664.934	350.563
				4	664.950	350.650
				5	664.950	350.785
				6	664.580	350.785

**II-1-1-5 : Carrière ETR Bejaia :**

➤ **Situation géographique :**

La carrière ETR Bejaia est située à une distance de 07 km au Nord de la ville de Bejaia Dans la localité de Bouabra. L'unité est reliée par un accès de quelques centaines de mètres à la RN 24, menant à Tizi-Ouzou. Cette carrière est mise en exploitation en 1987.

➤ **Situation physique ETR Bejaia : [Source DMI Bejaia 2007]**

L'unité de production ETR Bejaia exploite un gisement de calcaire d'une surface de 08 Ha ,02 Ars et 68 Ca. Avec des réserves géologiques globales qui sont estimées à : 198 769 m<sup>3</sup>. La durée de vie de ce gisement est estimée à 10 ans.

**Tableau (II-6): Situation de la carrière ETR Bejaia.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/An)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
ETR/Bejaia	Loubard/Bejaia	EPE/SPA	62 400	1	705.333	389.423,0
				2	705.300,7	389.286,7
				3	705.301,9	389.225,0
				4	705.367,2	389.197 ,7
				5	705.532,8	389.165,3
				6	705.605,4	389.149,8
				7	705.666,5	389.312,1
				8	705.656,8	389.410,9

**II-1-1-6 : Carrière SNTP Bejaia :**➤ **Situation géographique :**

La carrière SNTP Bejaia est située à 9 Km au Nord de la ville de Bejaia dans la localité de Boulimat. L'unité est reliée par une piste de quelques centaines de mètres de la RN 24 menant vers Tizi Ouzou.

➤ **Situation physique SNTP Bejaia : [Source DMI Bejaia 2007]**

L'unité « SNTP Bejaia » exploite un gisement de calcaire d'une superficie importante qui est de l'ordre de 20Ha et 25 Ares. Avec une estimation de 9 214 723 m<sup>3</sup> comme réserves géologiques globales. Ce gisement est mis en exploitation en 1982.

**Tableau (II-7) : Situation de la carrière SNTP Bejaia.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SNTP/Bejaia	Boulimat/Bejaia	Société Nationale	239 200	1	706.250	390.130
				2	706.250	389.650
				3	706.700	390.130
				4	706.700	389.650

**II-1-1-7 : Carrières ETR Kherrata, SARL tout Agrégats :**➤ **Situation géographique :**

Les deux exploitations ETR Kherrata et SARL tout Agrégats sont situées l'une à côté de l'autre, elles exploitent le même gisement qui se trouve à 5 Km à l'Ouest de la ville de Kherrata et à 4 Km au Nord du barrage de Kherrata dans la localité de Mehrriara.

L'accès à ces carrières est assuré par une route communale de 2 Km qui est reliée au CW 14.

➤ **Situation physique ETR Kherrata : [Source DMI Bejaia 2007]**

La carrière ETR Kherrata exploite un gisement de surface de 13 Ha et 1 000 000 m<sup>3</sup> de calcaire comme réserves géologiques. Ce gisement est mis en exploitation en 1987.

Tableau (II-8) : Situation de la carrière ETR Kherrata.

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées UTM)		
				Pts	X	Y
ETR Kherrata	Mehrira/Kerrata	EPE/SPA	130 000	1	702.734	4.040.347
				2	702.680	4.040.362
				3	702.662	4.040.430
				4	702.437	4.040.518
				5	702.437	4.040.518
				6	702.371	4.040.649
				7	702.765	4.040.823
				8	702.809	4.040.612
				9	702.837	4.040.383

➤ **Situation physique SARL Tout Agrégats : [Source DMI Bejaia 2007]**

L'unité « SARL Tout Agrégats » exploite un gisement de calcaire sur une surface de 20 Ha et 30 Ares. Avec des réserves géologiques estimées à 914 000 m<sup>3</sup>.

Tableau (II-9) : Situation de la carrière SARL Tout Agrégats.

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/An)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SARL Tout Agrégats	Mehrira Kherrata	SARL	161 200	1	729.712,42	357.416,27
				2	729.658,81	357.430,67
				3	729.640,86	357.498,59
				4	729.415,38	357.585,88
				5	729.267,00	357.290,15
				6	729.263,78	357.953,34
				7	729.336,78	357.953,63
				8	729.403,33	357.048,44

**II-1-1-8 : Carrière SARL Nelle Carrière :**

➤ **Situation géographique :**

L'unité de la «SARL Nelle Carrière» est située à 12 Km à l'Est de la Daira d'Ighil Ali, dans la localité d'Iaarkav commune de Boudjellil. L'accès à cette carrière se fait par un chemin communal de 6 Km qui est reliée au CW 42 à 2 Km de la RN 26.

➤ **Situation physique SARL Nelle Carrière : [Source DEM Bejaia 2007]**

Les réserves géologiques de la SARL Nelle Carrière sont estimées à 63 815 m<sup>3</sup> de calcaire sur une surface de 03 Ha 88 Ares et 24 Ca. Cette carrière est mise en exploitation en 1997.

**Tableau (II-10) : Situation de la carrière SARL Tout Agrégats.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SARL Nelle Carrière	Iaarkav Boudjelil Tazmalt	SARL	156 000	1	652.408,8	339.467,6
				2	652.307,3	339.359,3
				3	652.177,2	339.394,4
				4	652.113,1	339.425,0
				5	652.172,4	339.525,3
				6	652.280,4	339.571,8

**II-1-1-9 : Carrière SNC ZIANE Md LARBI :**

➤ **Situation géographique :**

L'exploitation de « ZIANE Md LARBI » est située à 10 Km à l'Ouest du centre ville de la daïra de Ighil Ali dans la localité de AIN EL BIR commune de Boudjellil.

➤ **Situation physique SNC ZIANE M<sup>d</sup> LARBI : [Source DMI Bejaia 2007]**

L'unité de « SNC ZIANE M<sup>d</sup> LARBI » exploite un gisement de calcaire d'une surface de 01 Ha, ce gisement est mis en exploitation en 1994.

**Tableau (II-11) : Situation de la carrière SNC ZIANE M<sup>d</sup> LARBI.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/an)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
SNC ZIANE MD LARBI	Ain Elbir Boudjellil Tazmalt	SNC	70 000	1	654.836,50	338.081,50
				2	654.863,70	338.060,70
				3	654.871,90	338.060,70
				4	654.889,70	338.052,30
				5	654.896,80	338.062,60
				6	654.933,70	338.078,30
				7	654.947,10	338.107,50
				8	654.946,50	338.112,00
				9	654.935,20	338.137,70
				10	654.929,10	338.163,70
				11	654.927,60	338.181,80
				12	654.880,30	338.188,00

**II-1-1-10 : Carrière LITTORAL AGREGATS:**➤ **Situation géographique :**

L'exploitation LITTORAL AGREGATS est située à 6 Km au Sud de Cap Aoukas, dans le Col de Kfrida commune d'Aoukas.

➤ **Situation physique LITTORAL AGREGATS : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement exploité par la « LITTORAL AGREGATS » est d'une superficie de 2 Ha, et contient 592 823 m<sup>3</sup> de calcaire comme réserves géologiques globales.

**Tableau (II-12) : Situation de la carrière LITTORAL AGREGATS.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées UTM)		
				Pts	X	Y
SARL LITTORAL AGREGATS	Col Kfrida Aoukas	SARL	10	1	701.600	4.051.300
				2	701.500	4.051.300
				3	701.500	4.051.500
				4	701.600	4.051.500

**II-1-2: les exploitations en arrêt :**

Cinq exploitations de gisements de calcaire ont cessé leur activité dans la W- Bejaia, pour différentes raisons : administratives pour STRPS Akbou (défaut de titre minier), opposition des citoyens pour SARL GRAVEM, EURL ZENATI et SARL AGREGATS CHERIA et opposition des services de forets pour ETRHB HADDAD.

**II-1-2-1 : Carrière STRPS (Chellata) Akbou :**➤ **Situation géographique :**

La carrière STRPS Akbou se situe dans les hauteurs du massif de Chellata dans la localité de Bouabra. L'accès à cette carrière se fait par le CW 158 qui relie Chellata à Akbou.

➤ **Situation physique STRPS Akbou : [Source DMI Bejaia 2007]**

La carrière STRPS Akbou exploite un gisement de calcaire qui s'étale sur une surface de 7 Ha, 67Ars et 87 Ca qui englobe 129 000 m<sup>3</sup> de calcaire comme réserves géologiques globales. L'unité est actuellement en arrêt d'exploitation pour défaut de titre minier.

Tableau (II-13) : situation de la carrière STRPS Akbou.

Entreprise	Localisation du gisement	Statut Juridique	Capacité de production (t/An)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				pts	X	Y
STRPS Akbou	Bouabra Chellata Akbou	SPA	200 000	1	662.323,60	358.607,90
				2	662.400,17	358.776,73
				3	662.564,44	358.807,24
				4	662.688,96	358.775,52
				5	662.736,78	358.655,71
				6	662.724,27	358.566,05

### II-1-2-2 : Carrière SARL GRAVEM :

➤ **Situation géographique :**

La carrière de SARL GRAVEM est située à 10 Km à l'Est du centre ville de DARGUINA, dans la localité dite AGRIDJ ABDELAH commune de MELBOU.

L'accès à cette unité est assuré par un chemin communal de 500 m qui mène de Darguina à Ighil Oufnisse, ce dernier est relié à la RN 9.

➤ **Situation physique SARL GRAVEM : [Source DMI Bejaia 2007]**

Cette carrière renferme d'énormes quantités de calcaire comme réserves géologiques : 1 261 047 m<sup>3</sup> sur une surface de 22 Ha, 23 Ars et 90 Ca. Ce gisement est mis en exploitation en 1998, la carrière est actuellement à l'arrêt suite à l'opposition des citoyens de cette localité.

Tableau (II-14) : Situation de la carrière SARL GRAVEM.

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Capacité de production (t/An)	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pts	X	Y
SARL GRAVEM	Agredj Abdallah Melbou	SARL	200 000	1	737550	369120
				2	737805	369005
				3	737970	369075
				4	737924	368935
				5	737927	368635
				6	737400	368675
				7	737335	368820
				8	737460	368950

**II-1-2-3 : Carrière EURL SEMC ZENATI :**➤ **Situation géographique :**

Le gisement de EURL ZENATI est situé à 2 Km au Nord de la commune de Boukhelifa dans la localité dite djebel Amdjout.

➤ **Situation physique :**

La carrière « EURL ZENATI » exploite un gisement de calcaire d'une surface de : 12,36 Ha et 52 Ars qui renferme des quantités importantes de granodiorite comme réserves géologiques.

**Tableau (II-15) : Situation de la carrière EURL SEMC ZENATI.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pts	x	Y
EURL SEMC ZENATI	Djebel Amdjout Boukhelifa	EURL	10	1	688.296	4.054.977
				2	688.296	4.054.737
				3	688.066	4.054.737
				4	688.066	4.054.977

**II-1-2-4 : Carrière SARL AGREGAT CHREA:**➤ **Situation géographique :**

L'unité de la « SARL AGREGAT CHREA » est située à 13 Km au Nord Est de la ville d'Ighzer Amoukrane dans la localité dite Col de CHREA commune d'Aouzellaguen. L'accès à cette unité se fait par le CW 159.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement de « SARL AGREGAT CHREA » renferme 1 207 464 m<sup>3</sup> de calcaire comme réserves géologiques sur une superficie de 11 Ha. Cette unité est actuellement inactive suite à l'opposition des citoyens de cette localité.

**Tableau (II-16) : Situation de la Carrière SARL AGREGAT CHREA.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pts	X	Y
SARL AGREGAT CHREA	Col de Chréa Ouzellaguen	SARL	10	1	637.300	4.047.600
				2	637.300	4.047.400
				3	637.200	4.047.400
				4	637.200	4.047.300
				5	636.900	4.047.300
				6	636.900	4.047.600

**II-1-2-5 : Carrière ETRHB HADDAD:**➤ **Situation géographique:**

L'unité de ETRHB HADDAD est située à 10 Km au Sud de la daïra d'Ighil Ali. Dans la localité dite Tizi Arirous commune d'Ighil Ali. L'accès à cette carrière est assuré par le CW 42.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement de ETRHB HADDAD est d'une surface de : 16 Ha qui renferme d'énormes quantités de calcaire 17 000 000 m<sup>3</sup>. L'opposition des services des forêts a empêché l'ouverture de cette exploitation en juin 2006.

**Tableau (II-17) : Situation de la Carrière ETRHB HADDAD.**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées Lambert)		
				Pts	x	Y
ETRHB HADDAD	Tizi Arirous Ighil Ali	SPA	10	1	636.400	4.015.300
				2	636.800	4.015.300
				3	636.800	4.014.900
				4	636.400	4.014.900

**II-1-3 : Les exploitations en phase d'aménagement :**

Actuellement deux exploitations de gisement de calcaire sont en travaux d'aménagement à savoir :

**II-1-3-1 : Carrière EURL MINSOLHYD :**➤ **Situation géographique :**

La carrière EURL MINSOLHYD est située à 2 Km au Nord du centre de Chellata, au Col de Chellata commune de Chechlata. L'accès à cette unité est assuré par la RN 26A qui mène d'Akbou vers Tizi Ouzou passant par Chellata.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

L'exploitation de MINSOLHYDE qui est en phase d'aménagement renferme des quantités importantes de calcaire qui sont estimée à 17 414 564 m<sup>3</sup> comme réserves géologiques de ce gisement qui s'étale sur une surface de 26 Ha.



**Tableau (II-18) : Situation de la Carrière EURL MINSOLHYD**

Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées UTM)		
				Pts	X	Y
EURL MINSOLHYD	Col de Chellata Chellata	EURL	10	1	632.000	4.043.400
				2	632.000	4.043.000
				3	631.700	4.043.000
				4	1631.700	4.042.900
				5	631.300	4.042.900
				6	631.300	4.042.200
				7	631.600	4.043.200
				8	631.600	4.043.400

**II-1-3-2 : Carrière EURL SEMC ZENATI :**➤ **Situation géographique :**

L'exploitation de l' EURL SEMC ZENATI est située à 2 Km à l'Est de Tichi, dans la localité appelée Adrar n'zeka commune de Boukhelifa. Cette carrière est reliée à la RN 9 par un chemin d'environ 5 kilomètres.

➤ **Situation physique : [Source DMI Bejaia 2007]**

Le gisement de l'EURL SEMC ZENATI est destiné à produire des agrégats et de la pierre de taille. Le gisement est d'une surface de 09 Ha qui renferme d'énormes quantités de grano-diorite.

**Tableau (II-19) : Situation de la Carrière EURL SEMC ZENATI.**

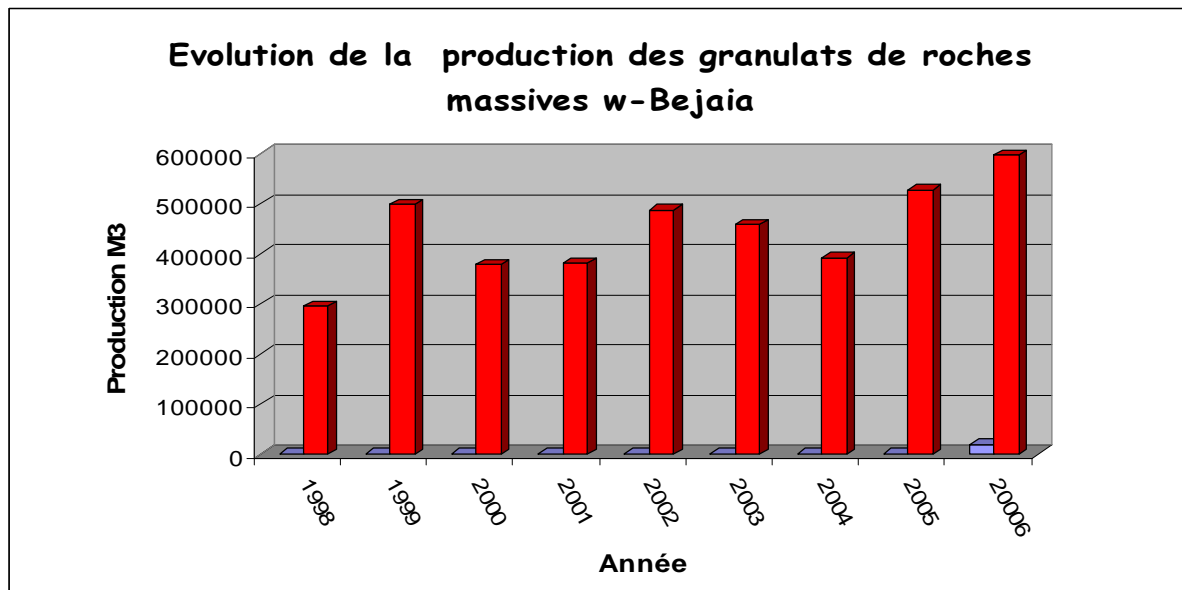
Entreprise	Localisation du gisement	Statut juridique	Validité Ans	Localisation géographique (Coordonnées UTM)		
				Pts	X	Y
EURL SEMC ZENATI	Adrar N'zeka Boukhelifa	EURL	10	1	694.565	4.057.611
				2	694.816	4.057.660
				3	694.814	4.057.310
				4	694.565	4.057.311

**II-1- 4 : Production des granulats de roches massives de la wilaya de Bejaia :**

L'évolution de la production des granulats dans la wilaya de Bejaia au cours de ces dernières années est comme suit :

**Tableau (II-20) : Evolution de la production des granulats (W-Bejaia).**

Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Production m <sup>3</sup>	295241	498334	378166	381666	486853	457826	392461	527666	596551



**Figure (II-1) : Evolution de la Production des granulats de roches massives W-Bejaia.**

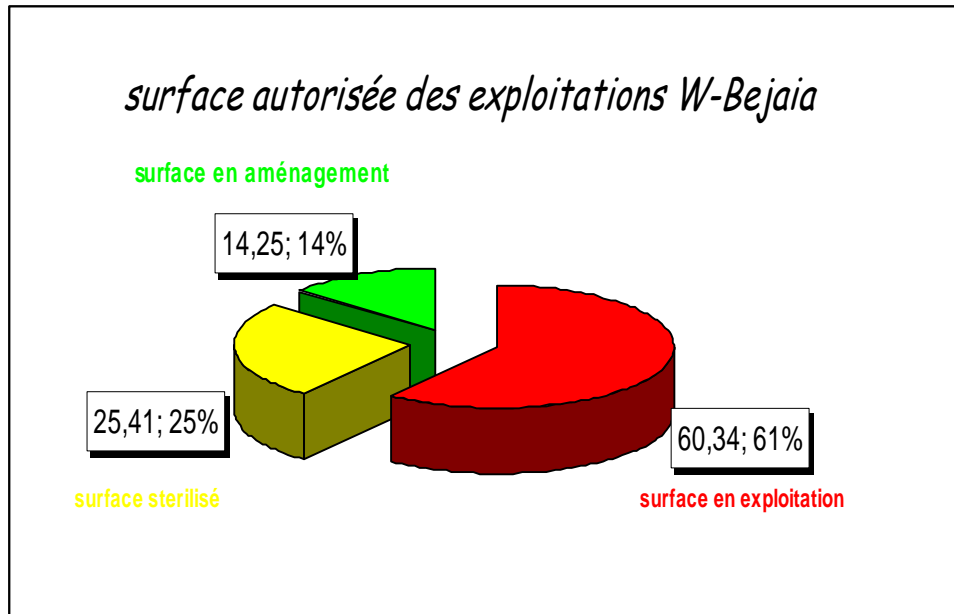
L'évolution de la production (la consommation) des granulats est un excellent paramètre d'appréciation sur l'état de développement économique de la région.

Le graphique ci-dessus figure (I-2) retrace l'évolution globale de la production de granulats concassés de 1998 à 2006 de la Wilaya de Bejaia. Cette évolution se caractérise par un pic en 1999 avec 498334 m<sup>3</sup> et en 2002 (486853m<sup>3</sup>), Liée notamment au développement remarquable dans le secteur de bâtiment dans ces périodes. Si non au moyen ce graphique est en évolution pour atteindre le maximum en 2006 avec 600 000 m<sup>3</sup>

Toute en sachant que la baisse de la production en 1998 et 2001 est liée notamment à la situation sécuritaire du pays, l'explosif est approvisionné avec une haute sécurité. Et celle de 2004 est liée à l'amendement de la loi minière N° 0110 du 03-07-2001 plusieurs exploitations sont en phase de transition, jusque à la création de décret d'application [Source DMI de Bejaia 2007]

#### **II-1-5 : Surfaces autorisées des exploitations :**

La totalité de la surface autorisée par la Direction des Mines et d'Industrie (DMI) de la Wilaya de Bejaia est de : 245 Ha 68 Ars et 68 Ca, dont 148 Ha 24 Ars et 81Ca qui représente (60.34 %) sont exploitées et 62 Ha 43 Ars et 77 Ca (25 .41 %) qui sont stérilisés par des causes citées en (I-2), et 35 Ha (14 .25%) en phase d'aménagement



**Figure (II-2) : Surfaces autorisées des exploitations W-Bejaia.**

## II-2 : Gisement des roches meubles (alluvionnaires) w- Bejaia :

Les alluvions constituent généralement les matériaux de construction traditionnels les plus faciles à extraire. Ce ci a donné naissance à un nombre important d'entreprises de production de granulats (sablères) le long des Oueds : Soummam, Sahel, Taida, Djemaa, Amassine et Agrioune. D'autre part la proximité des lieux de consommation et leurs coûts par rapport à celle des roches massives expliquent le développement intensif des exploitations de ces matériaux, et la place prépondérante qu'ils occupent aujourd'hui dans le marché locale des granulats.

### II-2-1 : Production des granulats d'origine alluvionnaires W-Bejaia : [Source DHWBejaia 2007]

La production des granulats d'origine alluvionnaire dans la W. Bejaia est estimée à 408 216 m<sup>3</sup> en 2006, répartis sur 59 sites, dont 16 unités de production permanentes (sablères) et 54 extractions temporaires pour des utilités publiques. Plus de la moitié de cette production répond aux besoins du génie civil et la construction.

## II-2-1-1 : Extractions permanentes (sablères) W-Bejaia : [Source DHWBejaia 2007]

Tableau (II-21) : Extractions permanentes (sablères W-Bejai) :

NOM DE L'ENTREPRISE	ADRESSE	LIEU D'EXTRACTION	PRODUCTION AUTORISE	CLASSE DE PRODUCTION	COORDONNÉE (UTM)	
					X (UTM)	Y (UTM)
SARL SABILIERE DU PONT	AFTIS/BOUDJELIL	OUED SAHEL R.D	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8, 8/15	631500	4028400
ZIANE CHERIF	ICHEKAR TAZMALT	OUED SAHEL R.D	20 000M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3,gravier concassé3/8, 8/15	626100	4025700
RABIA MADJID	THILA TAZMALT	OUED SAHEL R.G	20 000M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé 3/8 et 8/15	628400	4026600
SARL SABILIERE DE LA SOUMMAM	TAHARACHT AKBOU	OUED SOUMMAM	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	642600	4038400
SARL SABLIERE DE TAHARACHT	TAHARACHT AKBOU	OUED SOUMMAM	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	639300	4036200
SARL SABILIERE DE GUENDOOUZA	GUENDOOUZA AKBOU	OUED SOUMMAM R.G	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	638400	4034500
BENKHELLAT BAHIM	AZAGHAR AKBOU	OUED SAHEL R.G	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé 3/8 et 8/15	636300	4031800
SNC BELHOUL FRERES	HIRCHID AKBOU	OUED SOUMMAM	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	642500	4038900
SNC BOUINAN	AFTIS SEDDOUK	OUED SOUMMAM	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8,8/15	647300	4046300
SNC SOFA EXTRA	HANDIS AITARZINE	OUAD SAHEL R.G	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	634700	4030300
SNC SOFA EXTRA	OULED SAIDA BOUDJELIL	OUAD SAHEL R.G	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	628300	4025900
SARL SABLIEE DU NORD	TAKRIETZ ELFLAY	OUAD SOUMMAM R.G	50 00 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé 3/8 et 8/15	649400	4050000
TIGHEDET MADJID	TABLYANT AOUKAS	OUAD DJEMAA	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé 3/8 et 8/15	696500	4081100
MOUSSAOUI MOHAND	TAIDA BENIKSILA	OEUAD TAIDA	5 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé	652100	4081100
SARL SABILIERE BOUZROUAL	BOUZREOUAL AKBOU	OUAD SOUMMAM R.G	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier roulé 3/8 et 8/15	638300	4033500
SARL SABILIERE ATH ABASSE	TIZI TAGRART AIT ARZINE	OUED SAHEL	20 000 M <sup>3</sup> /AN	sable 0/3, gravier concassé 3/8à15/25	632100	4028900

## II-2-1-2 : Extractions temporaires : [Source DHWBejaia 2007]

Tableau (II-22) : Extractions temporaires w, Bejaia

NOM DE L'ENTREPRISE	LIEU D'EXTRACTION	QUANTITÉ AUTORISÉE (m <sup>3</sup> )
ETPB DALI MABROUK	OEUD SOUMMAM	1155
ENAHYA / SPA	OEUD I . AMOUKRANE	3500
ETB AODIA MOUSSA	OUED SAHEL	160
ETBPH ZIDANE FATIMA	OUED AGRIOUNE	786
SARL ISSAFENE	OUED SOUMMAM	1630
ETBPH SELLAH	OUED SOUMMAM	750
SARL ERTPB SAOUDI	OUED SAHEL	1120
ETPBH TAMEDRARI	OUED SOUMMAM	675
LAMARI BOULAM	OUED AMIZOUR	600
BOUANANI CHAABANE	OUED SOUMMAM	2500
ETPB MEGROUS	OUED SOUMMAM	3000
ABDELI RACHIDE	OUED AMASSINE	3000
ETR BEJAIA	OUED SOUMMAM	8400
ETPBH BOURAHLA	OUED SOUMMAM	2122
MOULTI AHMED	OEUD SOUMMAM	820
ETPB MEGROUS	OUED SOUMMAM	3900
ETBTH LOUNIS KAMEL	OUED AGRIOUNE	210
EBTP ADRRAR AHCEN	OUED JEMAA	1213
AGOUNE ARZKI	OUED MEROUAHA	100
STRPS AKBOU	OUED SOUMMAM	1529
ETPH GERICHE	OUED SOUMMAM	6000
ABEDELI KHELLAF	OUED AMACINE	2500
ETPB MEGROUSE	OUED DJEMAA	1341
STVB BEJAIA	OUED ZITOUNA	2150
ETPB MOUSSAOUI YAHIA	OUED SOUMMAM	7330
ETB/ TCE BOUMAAZA	OUED AGRIOUNE	20000
ECOTB MOHALI	OUED SOUMMAM	12900
EGTPH KADOUR	OUED SOUMMAM	360
ETPS MAKNI RACHID	OUED ILLOULA	3000
STRPS AKBOU	OUED SAHEL	350
ETUPB BELLAL ZAHIR	OUED SAHEL	3220

**II-3 : Carte locale des gisements de granulats W-Bejaia :**

Une synthèse des données des gisements de granulats de la Wilaya de Bejaia est faite à l'aide du logiciel « MAPINFO » ou on a procédé à la localisation de ces gisements sur un assemblage de deux cartes topographiques : SÉTIF et TIZI-OUZOU à l'échelle 1/200000 après avoir délimité le territoire de Bejaia avec une table « limite ».

Une distinction entre la nature des gisements est assurée par une différenciation de symboles :

- Etoile pour les gisements d'origine de roches massives.
- Pyramide pour les gisements d'origine alluvionnaires.

Et de leurs états par une différenciation de couleurs :

- Rouge pour les exploitations en activité
- Jaune pour les exploitations en arrêt.
- Vert pour les exploitations en aménagement.

Un champ d'informations sur les gisements à savoir : les coordonnées, la surface, les réserves géologiques, la capacité de production annuelle, statut juridique et le nom de l'entreprise, est possible sur la carte (l'application), avec un simple clic sur le symbole de gisement.



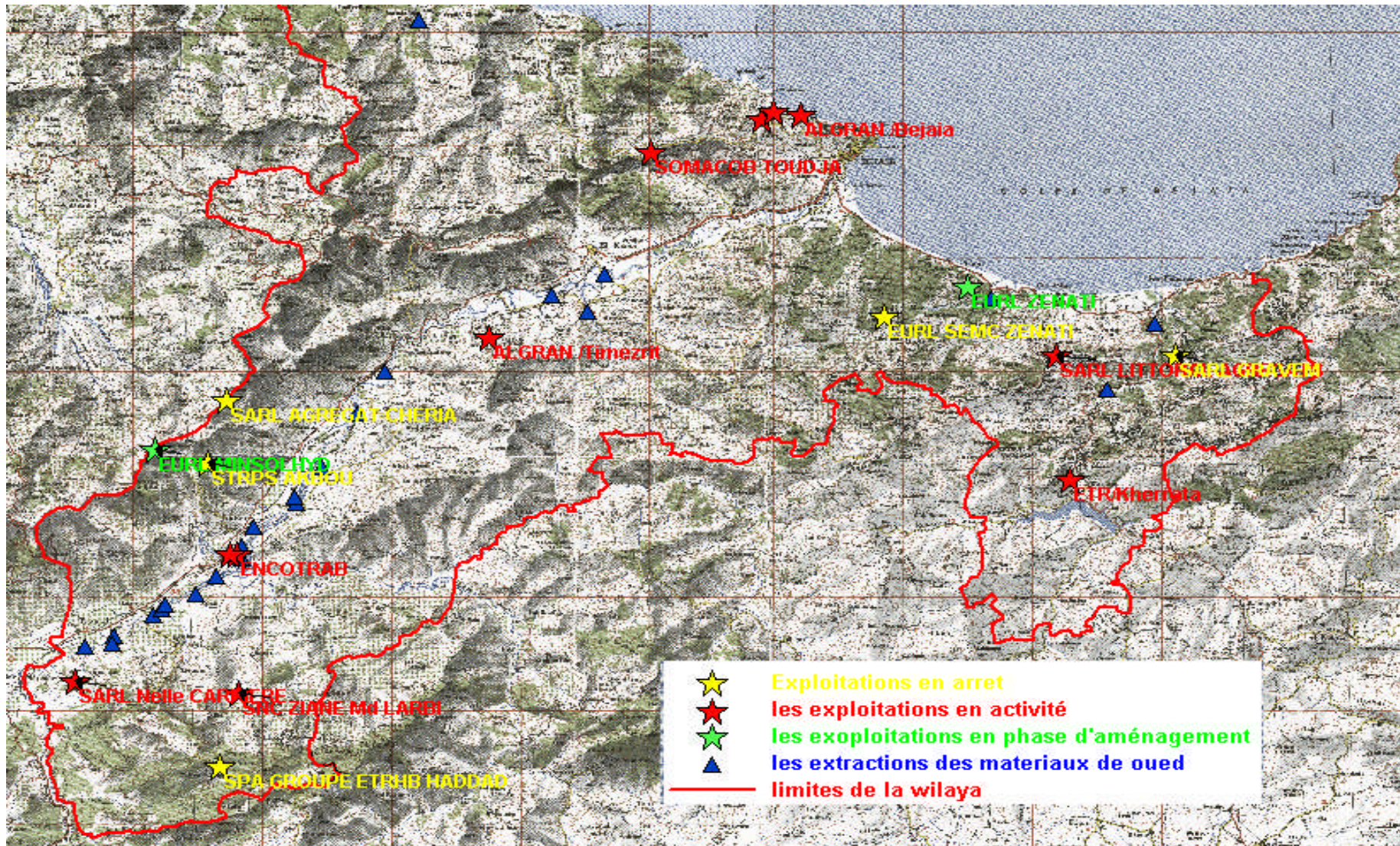


Figure (II-3) : Carte des gisements de granulats W - Bejaia



#### II-4 : Analyse quantitative des granulats de la wilaya de Bejaia :

La production des granulats naturels dans la wilaya de Bejaia est loin de répondre aux besoins locaux en cette substance minérale utilisée comme matière première pour la fabrication des bétons et le revêtement des routes.

##### II-4-1 : Production régionale de granulats naturels en 2006 :

La totalité de la production de granulats naturels de la wilaya de Bejaia en 2006 est de l'ordre de 982 872.04 M<sup>3</sup> dont 596551.04 m<sup>3</sup> d'origine de roches massives calcaire qui représente 60.69% de la totalité de la production, et 386 321 m<sup>3</sup> d'origine alluvionnaire qui représente 39.31 % de la production totale.

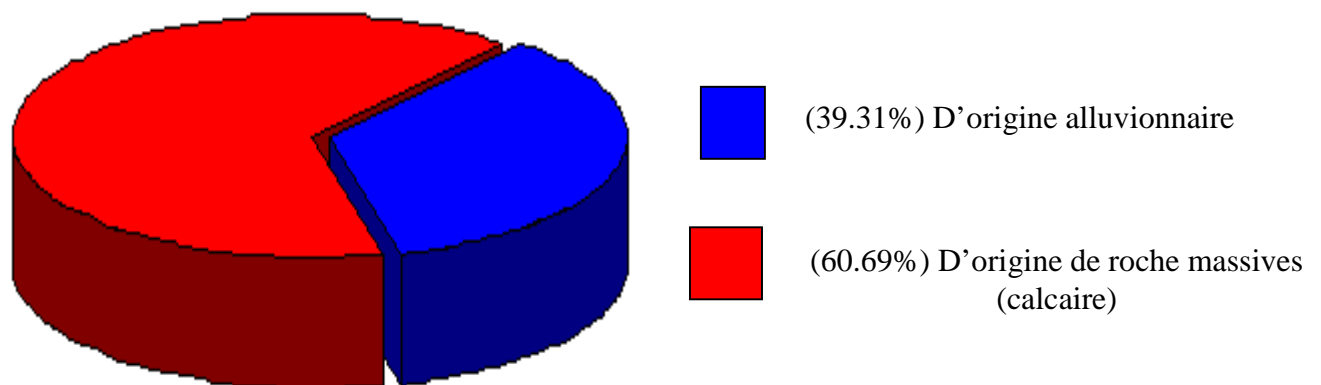


Figure (II-4) : provenance des granulats w - Bejaia 2006.

##### II-4-2 : Apport de la wilaya de Bejaia dans la production nationale des granulats : [5]

La part de la wilaya de Bejaia dans la production nationale est peu significative. 60% de cette production, sables concassés y compris est assurée par 10 wilayas, qui produisent un volume de 12.45 millions de m<sup>3</sup> ; 3 wilayas Mila, Constantine et Sétif concourent à hauteur de 25% et produisent chacune plus de 2 millions de m<sup>3</sup>, 5 autres wilayas Boumerdes, Bouira , Bordj-Bouarrerdj, Oran et Batna avec des productions comprises entre 1 et 2 millions de m<sup>3</sup> participent à hauteur de 27%, Enfin Oum El Bouaghi et Sidi Bel Abbés interviennent avec 7% pour une production de près de 0.8 millions de m<sup>3</sup> chacune.



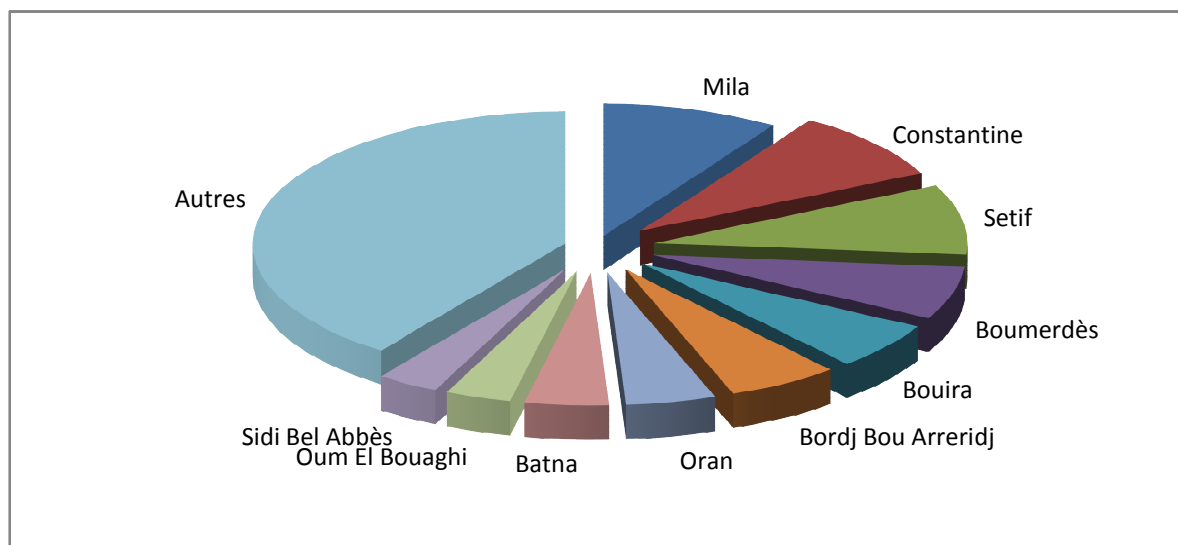


Figure (II-5) : Production nationale des granulats.

#### II-4-3 : Evolution de la production nationale des granulats (millions de m<sup>3</sup>) : [5]

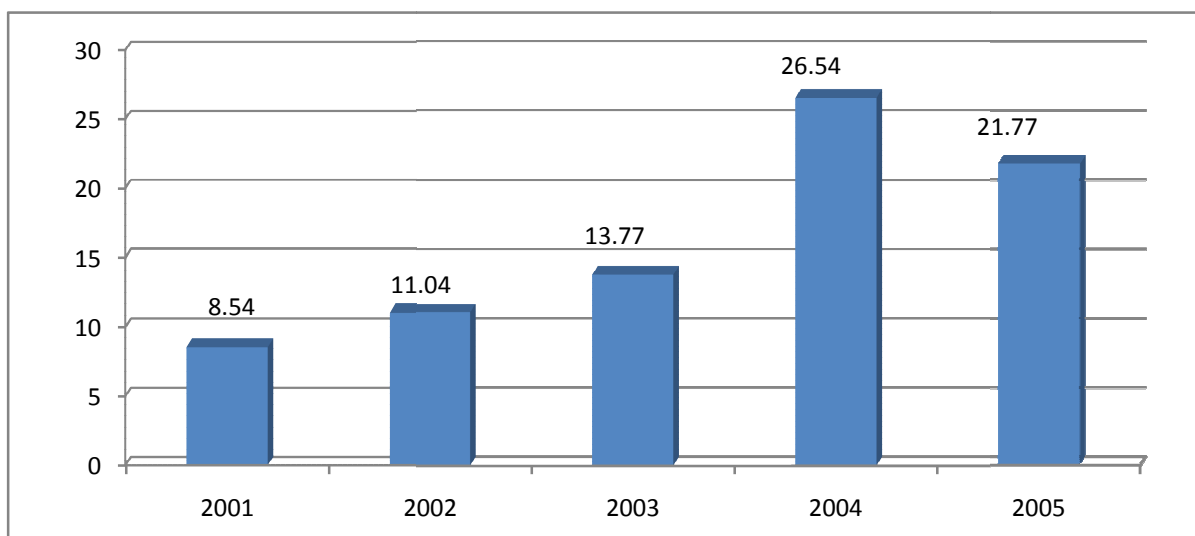


Figure (II-6) : Evolution de la production nationale des granulats en millions de m<sup>3</sup>.

Depuis l'année 2001 la production des agrégats est en croissance continue avec cependant un léger fléchissement en 2005 par rapport à l'année 2004. En 5 ans la production des agrégats a plus que doublé, elle a été multipliée par 2.5. De 8.54 millions de m<sup>3</sup> en 2001 elle est passée à 21.77 millions de m<sup>3</sup> en 2005.

La consommation des agrégats, est en règle générale, un excellent paramètre d'appréciation sur l'état des économies comme le permettent l'acier, le fer ou le cuivre pour ne rester que dans les matières premières etc.

**II-5 : Conclusion :**

L'urbanisation intense, la réhabilitation du réseau routier de la wilaya de Béjaïa et de ses régions voisines ainsi que la proximité du grand projet national de l'Autoroute Est-ouest nécessitent des volumes considérables en granulats qu'il faudrait garantir.

L'établissement de la carte locale des gisements de granulats de Bejaia nous a permis de conclure et de constater ce qui suit :

- La concentration des gisements le long des oueds Soummam, Sahel, Taida, cette concentration est liée notamment à l'aspect géologique de ses gisements, et la proximité des voies de transport. Il est donc impératif d'exploiter les granulats à la plus faible distance du leur lieu de consommation.
- La majorité des exploitations de roche massive sont des exploitations du calcaire.
- Le nombre des exploitations en arrêt qui est important par rapport à celui des exploitations en activité 5 /12, dans le but d'atténuer les actions d'opposition d'associations de citoyens, des services de forêts et d'agricoles la Direction des Mines et d'Industrie de Bejaia a entrepris plusieurs actions de sensibilisations auprès des concernés.
- Le nombre important des gisements alluvionnaires (sablères) qui ont été fermées en fin 2007, d'où la nécessité d'explorer d'autres voies de substitutions, citant à titre d'exemple le massif de Gueldamen afin de répondre aux besoins locaux qui ne cessent pas d'évoluer.
- Les besoins en granulats devenant très importants au regard des grands travaux routiers, portuaires, habitat, et hydraulique, l'offre en matériaux concassés n'a pas suivi la courbe ascendante des besoins exprimés.

## **Chapitre III :**

**Etat Actuel du système d'exploitation  
Utilisé par la SOMACOB et  
Caractérisation de leurs Granulats par les  
essais de laboratoire**

## **Chapitre III :**

### **Etat Actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB Et Caractérisation de leurs Granulats par les essais de laboratoire**

Ce chapitre est consacré à l'analyse de l'état actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB ainsi la caractérisation de leurs granulats. Il est subdivisé en quatre parties, la première concerne une présentation de la dite carrière, la seconde sert à décrire les méthodes d'échantillonnage, la troisième à caractériser et contrôler la conformité de ces produits (granulats) par les essais de laboratoire (caractérisation), et la dernière concerne l'étude de l'influence des fines sur les propriétés des mortiers.

#### **III-1 : Présentation de l'exploitation de SOMACOB AKBOU :**

##### **III-1-1 : Historique de l'exploitation : [36]**

Le site d'implantation de la carrière a fait l'objet d'une exploitation par la direction des ponts et chaussées de 1975 à 1980, dont l'objectif principal était de satisfaire les besoins des chantiers d'aménagement et de revêtement des chemins de la wilaya.

L'exploitation du gisement par SOMACOB a débuté durant l'année 1984. Les produits sont essentiellement destinés à l'approvisionnement de l'unité de fabrication des buses appartenant à la même entreprise, et des projets de travaux publics et d'intérêt général de la wilaya.

##### **III-1-2 : Site de la carrière :**

La carrière occupe une partie du flanc Sud de la terminaison occidentale du massif montagneux de GUELDAMEN. Cette terminaison connue sous le nom de « piton d'Akbou » s'est détachée du reste du massif à la faveur d'une importante faille dont le tracé est empreinté par l'oued Soummam. L'exploitation s'étend sur une surface totale de huit (08) hectares.

Les gradins d'exploitation présentent un allongement sub-latitudinal et une orientation Sud de front de taille, elle est délimitée par :

- la piste d'accès au Sud.
- La carrière d'agrégats de l'ENCOTRAB AKBOU à l'Est.
- Les limites de périmètre de l'exploitation au Nord et à l'Ouest.

Les gradins d'exploitation sont au nombre de trois (03) et présentent une hauteur moyenne de 16 m, la carrière est actuellement taillée sur une hauteur totale de 50 m.

Les formations stériles sont disposées en bermes de sécurité le long du flanc Sud de la carrière de façon à renforcer la protection de la station de concassage et les infrastructures environnantes contre les projections des roches lors des travaux d'abatage à l'explosif.

La station de concassage est disposée sur une plate forme située à proximité avale de la carrière.

### **III-1-3 : Situation et accès :**

La carrière de SOMACOB est située à la sortie Sud-Ouest de l'agglomération d'Akbou, soit à près de 600 m de piste au Sud-est de la RN 26. On y accède par l'intermédiaire d'une piste carrossable, elle se trouve à l'extrémité Nord d'une zone d'activités occupée par des entreprises locales.

Les coordonnées Lambert du centre de la carrière sont :  $X = 664.350$   $Y = 350.750$ .

### **III-1-4 : Géologie du gisement :**

La carrière de SOMACOB-AKBOU exploite les calcaires massifs du lias inférieur, ce sont des calcaires lithographiques (calcaire à grains très fin et très homogène) de couleur gris clair à gris foncé recoupés par un réseau dense de micro fissures à cristallisation de calcite. La stratification est rarement observée en raison du caractère massif des bancs de calcaires. La direction des couches est Est-ouest et leur pendage varie de  $70^\circ$  à  $80^\circ$  vers le Nord. Le gisement est recoupé par des failles et fractures pouvant atteindre plusieurs mètres d'ouvertures figure (III-1), la formation géologique encaissante ne présente aucun stérile interne formé de roches meubles. La couleur de la roche peut changer au contact des accidents tectoniques ou la circulation d'eau engendre une accumulation d'oxydes.

Les réserves géologiques du massif montagneux (piton d'Akbou) en roches à agrégats sont très importantes, ses dimensions sont de l'ordre de 1500 mètres de longueur, 1000 mètres de largeur et 200 mètres de dénivelée, compte tenue de sa forme conique ses réserves totales seraient de l'ordre de 150 millions de  $m^3$  de roches massives.

Les dimensions de l'exploitation dans les limites du périmètre de l'autorisation sont de 350 mètres de longueur par 250 mètres de largeur et une pente moyenne de 40%, soit une surface totale de 08 hectares. Ses réserves exploitables sont évaluées à 1 342 821  $m^3$ .

Il représente moins de 1% du volume total du massif encaissant.



**Figure (III-1) : photographie de la roche calcaire exploitée par SOMACOB**

#### **III-1-5 : Méthode d'exploitation :**

La carrière est à ciel ouvert, la méthode d'exploitation utilisée est l'abatage par explosifs sur des couches successives horizontales, chaque couche supérieure est exploitée avec avancement par rapport à la couche inférieure formant ainsi des gradins figure (III-2). Généralement, les gradins devraient avoir une hauteur variant entre 10 et 15 m et une largeur de 5 m. Le bon dimensionnement de ces gradins devrait faciliter l'accès au gisement et permettre une bonne exploitation de ce dernier.



**Figure (III-2) : Les gradins de la carrière de SOMACOB AKBOU.**

Le processus de fabrication des granulats s'inscrit dans une chaîne technologique qui comporte plusieurs phases :

### III-1-5-1 : Extraction de la roche :

La méthode de préparation de la roche à l'extraction adoptée dans cette carrière, comme dans la plupart des carrières, est la suivante :

1- Préparation des trous de mines par forage, ces trous sont disposés en deux rangées parallèles distantes de 1,5 m entre elles et situées sur le bord extérieur du gradin, la profondeur de chaque trou est de 6 m, la distance entre 2 trous d'une même rangée est de 1,20 m.

2- Bourrage des trous avec 2,5 Kg d'explosif ; le type d'explosif utilisé dépend de la nature de la roche, dans le cas de notre carrière il s'agit de la gylanite ; la fracturation importante du gisement fait que le rendement par tir est faible : la fracturation dissipe l'énergie libérée lors de l'explosion de la charge.

3- Nettoyage et dressage des talus des gradins après tir ; la roche est récupérée au niveau de la plateforme de réception, les blocs dont le diamètre est supérieur à celui d'admission au concasseur (40 Cm) subissent un débitage secondaire au moyen d'un brise roche porté par une pelle hydraulique. L'ensemble des matériaux ainsi produits sera transporté par camions vers la station de concassage situé à 200 mètres en aval.

### III-1-5-2 : Concassage et criblage de la roche :

La carrière possède une station de concassage figure (III-3), d'une capacité de production de 60 -70 m<sup>3</sup>/h. qui est dotée d'équipements suivants :

**Tableau (III-1) : Equipements de traitement des granulats.**

Equipement	Capacité	Nombre
Concasseur à mâchoire	60-70 m <sup>3</sup>	01
Broyeur à cônes	60-70 m <sup>3</sup>	01
Crible	6m <sup>2</sup> de surface	01
Sauterelles	--	08
Poste de transformation électrique	--	01

### Chapitre III : Etat actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB

Les matériaux bruts (tout venant) sont concassés dans un concasseur primaire dégrossissant, puis repris dans un concasseur finissant. A ce stade les granulats ainsi obtenus sont constitués de différentes classes granulométriques.

Ces granulats transitent à travers des cribles calibrés et vibrant, où ils subissent une séparation en différentes classes granulométriques de granulats, le maillage des cribles et calibré de façon à produire les classes granulométriques suivantes :

- 1) La 0/3 (sable), dont le diamètre des particules varie entre 0 et 3 mm.
- 2) La 3/8, dont le diamètre des particules varie entre 3 et 8 mm.
- 3) La 8/15, dont le diamètre des particules varie entre 8 et 15 mm.
- 4) La 15/25, dont le diamètre des particules varie entre 15 et 25 mm.

Le transport de ces produits finis vers leurs points de stockage transitoire se fait à l'aide de transporteurs à bandes (sauterelles). A ce niveau les produits sont prêts à être commercialisés.



**Figure (III-3) : Station de concassage de la SOMACOB AKBOU.**

#### III-2 : Echantillonnage : [37]

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci doivent permettre la mesure des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.



### Chapitre III : Etat actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB

Cette opération est généralement difficile, prend du temps et, parfois, coûteuse, mais elle est essentielle.

En général le prélèvement d'échantillons de granulats se fait en deux temps :

1) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine, d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.

2) Au laboratoire, prélèvement d'une quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ, qu'on appelle préparation de matériaux.

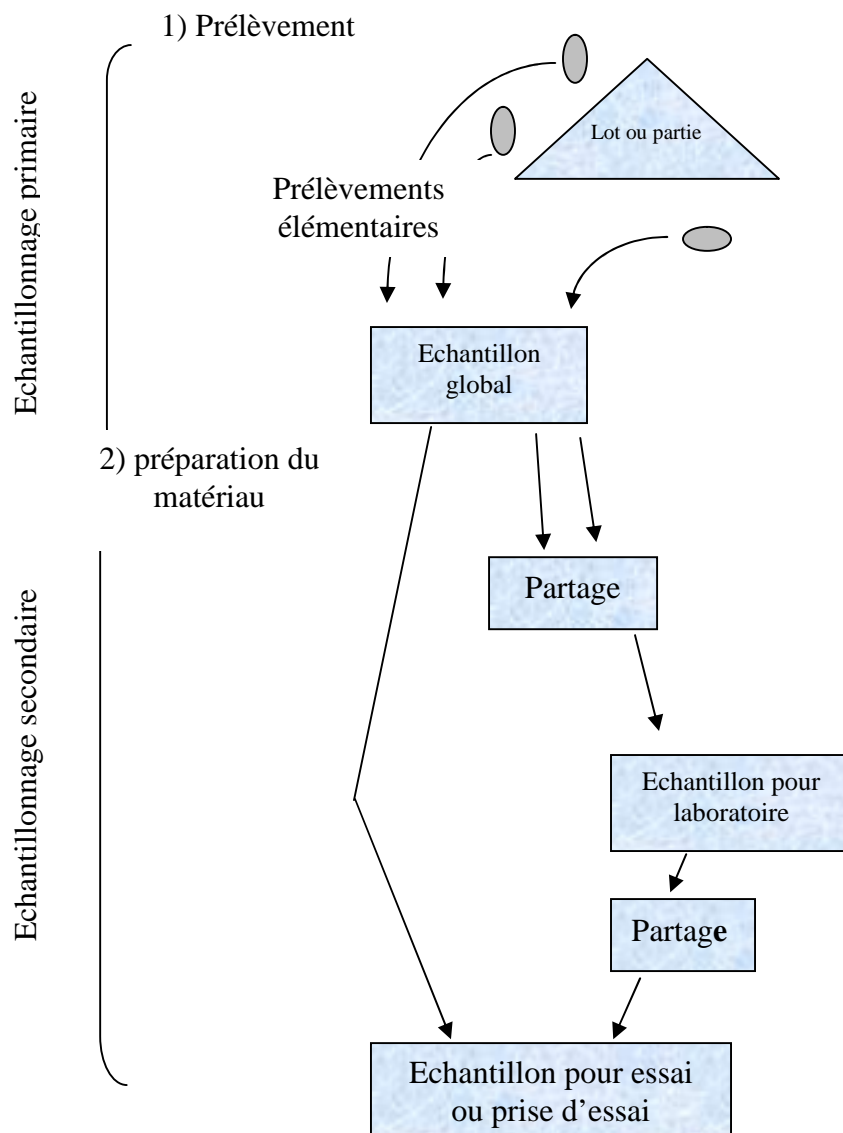


Figure (III-4) : Schéma d'un échantillonnage.[38]

### III-2-1 : Prélèvement de granulats sur chantier :

Le prélèvement d'échantillons de granulats sur chantier peut s'effectuer, selon deux procédures :

#### III-2-1-1 : Prélèvement de matériaux en cours d'écoulement : [NFP 18-552]

Le prélèvement s'effectue sur une bande transporteuse avec un cadre composé de deux tôles parallèles distantes d'au moins  $(4D+10\text{mm})$  reliées entre elles par deux entretoises au minimum, leur extrémité inférieure est découpée de la forme de la bande (sauterelles). La largeur du cadre doit être égale à la largeur de la bande Figure (III.5).

D : la plus grande dimension spécifique en millimètres.

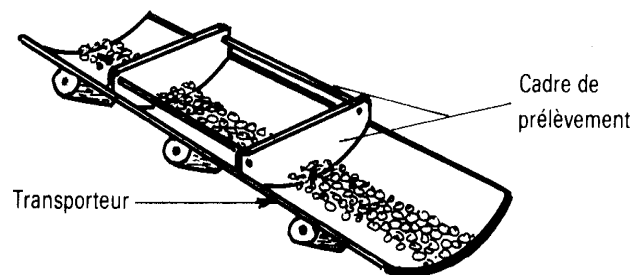


Figure (III-5) : Prélèvement d'échantillon sur bande transporteuse.

#### III-2-1-1-1 : Constitution d'un échantillon global :

L'échantillon global est la réunion de plusieurs prélèvements de masses voisines, obtenues dans les mêmes conditions opératoires. Pour diminuer les erreurs aléatoires de constitution de cet échantillon, il convient que chaque prélèvement élémentaire ait une masse aussi faible que possible, afin de bénéficier d'un plus grand nombre de prélèvements. La masse minimale d'un échantillon globale de granulats courants est donnée par la formule suivante :  $M \geq 2D$  M : Kilogramme, D : millimètre.

#### III-2-1-1-2 : Exécution du prélèvement :

- La bande transporteuse est arrêtée pour effectuer le prélèvement.
- Le cadre est enfoncé, toujours au même endroit, dans le courant de matériau perpendiculairement à la bande et jusqu'à son contact.
- Pour faciliter la pénétration, un léger mouvement transversal de va et vient peut être pratiqué.
- Les matériaux isolés à l'intérieur du cadre sont extraits dans leur totalité.

### III-2-1-2 : Prélèvement de matériau sur stock : [NFP 18-551]

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc le matériau en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble.

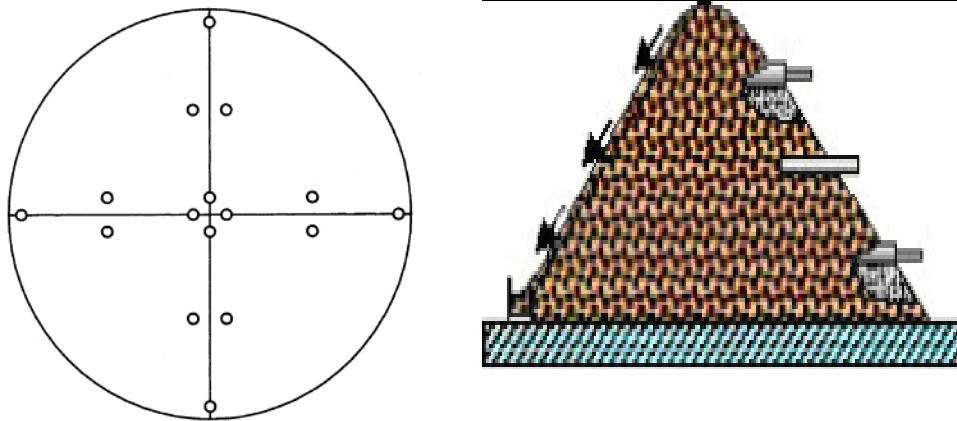


Figure (III-6) : Prélèvement sur stock ( tas).

#### III-2-1-2-1 : Exécution du prélèvement :

L'utilisation d'une sonde nécessite une pénétration régulière de l'outil sans coup ni vibrations. Si la sonde est capable de pénétrer à une profondeur égale au moins au quart de la hauteur de stock, trois prélèvements situés vers le haut, le milieu et le bas du tas suffissent. Ces sondages peuvent être horizontaux, obliques ou verticaux selon le type de sonde et les possibilités d'accès. Si la sonde ne pénètre qu'à une profondeur inférieure au quart de la hauteur du tas, on est ramené à l'utilisation d'une pelleteuse qui permet de rendre accessible tous les points du tas, les prélèvements se font avec une sonde ou une pelle en dix points au minimum, répartis dans l'ensemble du volume du tas.

#### III-2-1-2-2 : Constitution d'un échantillon global :

Un échantillon global est constitué de nombreuses parties prélevées dans différentes parties du tas. Le nombre minimal de parties, appelées incréments est de dix, les incréments contribuent à une masse qui ne doit pas être inférieure à celle donnée par la Norme BS 812.[7]

Tableau (III-2) : Masse minimale d'échantillonnage (Norme BS 812).[7]

Dimension maximale des éléments dans une proportion substantielle (mm)	Masse minimale de l'échantillon (Kg)
≥ 28	50
Compris entre 5 et 28	25
≤ 5	13

III-2-2 : Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire) : [37]

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

• Quartage :

L'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération peut se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial.

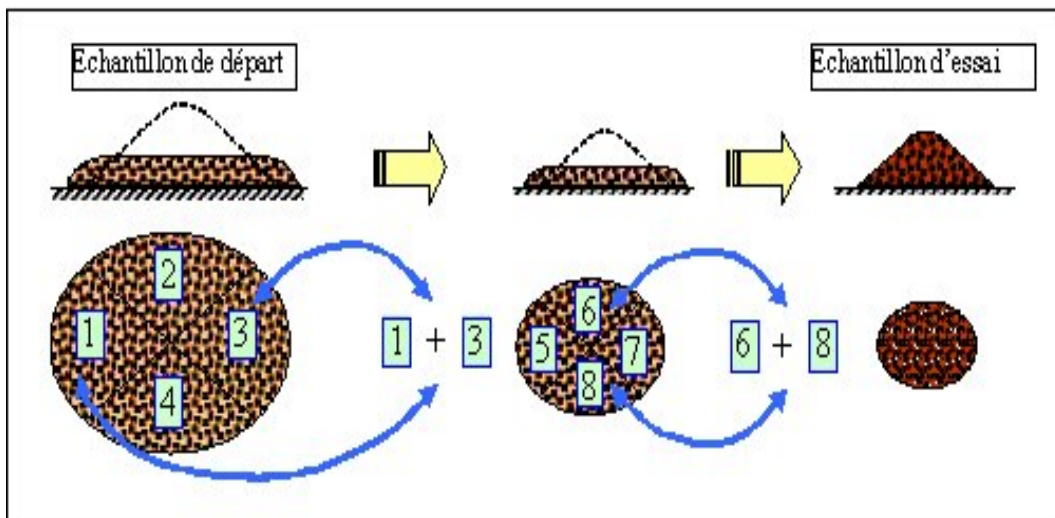


Figure (III-7) : constitution de l'échantillon pour laboratoire- principe de *quartage*.

III-2-3 : Conditionnement des échantillons :[39]

Chaque échantillon pour laboratoire est versé dans un emballage résistant et imperméable. Ainsi les sacs en tissu et en papier ne sont pas appropriés pour contenir des échantillons ; Les sacs en tissu ne retiennent pas les particules fines à l'état sec, les sacs en papier se déchirent facilement.

### III-3 : Propriétés des granulats de SOMACOB - Essais et spécifications :

De nombreuses propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés des massifs rocheux d'origine. (Minéralogie, propriétés physiques et mécaniques, caractéristiques pétrographiques, couleur). D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaboration, il s'agit principalement des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains (granularité), ceci est complété par des caractéristiques liées à la propreté des matériaux.

#### III-3-1 : Propriétés intrinsèques :

##### III-3-1-1 : Etude pétrographique :

L'étude pétrographique au microscope polarisant, porte sur des lames minces figure (III-15), réalisées au niveau du **LTMGP** de l'université de Bejaia, sur des échantillons prélevés du gisement de SOMACOB d'AKBOU. Conformément aux prescriptions de la norme [EN 932-1] sur les différents types de roches que contient ce gisement figure (III8).

- ❖ **Echantillon -A** - : Roche de couleur brune - rougeâtre un peu fissurée.
- ❖ **Echantillon -B** - : Roche de couleur grise claire moins fissurée.
- ❖ **Echantillon -C** - : Roche de couleur grise - sombre très dense sonnante sous marteau.

Le lieu de prélèvement des échantillons est représenté sur la carte topographique de notre carrière dans l'Annexe (III-1).

##### III-3-1-1-1 : Confection des lames minces :

La plupart des minéraux qui constituent les roches ne se laissent pas traverser par les rayons lumineux. Pour les observer au microscope, il est nécessaire de réaliser une préparation de très faible épaisseur appelée lame mince. Sa fabrication exige plusieurs étapes :

###### 1 - Sciage de la roche :

La roche prélevée dans le gisement est taillée à l'aide d'une scie diamantée figure (III-9) pour obtenir un parallélépipède présentatif et manipulable appelé communément "sucre".

La méthode la plus utilisée est le tronçonnage abrasif, les meules de tronçonnage sont constituées de deux composants principaux : abrasif et liant. Lors du tronçonnage la meule de tronçonnage est arrosée avec un liquide de refroidissement afin d'éviter les dommages thermiques et d'éliminer les résidus de coupe pour obtenir un meilleur enlèvement de la matière.



**Figure (III-8) : Echantillons prélevés du gisement**



**Figure (III-9) : Scie diamantée  
Laboratoire- LTMGP- U- Bejaia**

### 2- Collage sur lame de verre :

Après séchage et chauffage, une lame de verre dépolie est collée sur la face lisse du "sucre" avec de la résine puis mise sous presse chauffante à 30 °C pendant 24 heures figure (III-10).



**Figure (III-10) : Collage de l'échantillon sur la lame de verre.  
Laboratoire LTMGP Université - Bejaia**



**Figure (III-11) : scie d'arasement.  
Laboratoire- LTMGP- U- Bejaia**

### 3- Réduction de l'épaisseur de l'échantillon :

Une fois la résine polymérisée, l'échantillon est amené à une épaisseur d'environ 2 millimètres (lame + échantillon) avec la scie d'arasement figure (III-11), la fixation de la lame sur la machine se fait sous vide.

### 4- Polissage :

L'épaisseur adéquate (30 à 40 micromètres) de l'échantillon est obtenue en deux opérations de polissage.

#### ❖ Pré polissage (Polissage dégrossi) :

Cette opération consiste à réduire l'épaisseur de l'échantillon à 50  $\mu\text{m}$  à l'aide d'une polisseuse à plateau figure (III-12) et une solution de poudre abrasive (Grite), la lame est placée sur un porte échantillon sous vide.



**Figure (III-12) polissage dégrossi**  
LTMGP Université - Bejaia



**Figure (III.13) polissage de finition**  
LTMGP Université - Bejaia

#### ❖ Polissage de finition :

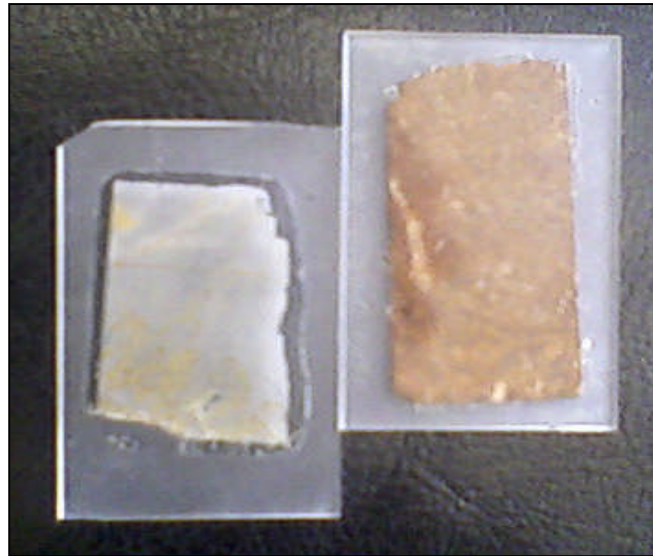
Pour éliminer les déformations provenant du pré polissage et obtenir une surface réfléchissante, les échantillons doivent être polis avant leur examen au microscope. Le polissage de finition se fait à l'aide d'une polisseuse menée d'un disque du tissu en soi figure (III-13) et un abrasif : poudre diamanté DP- SPRAY-P poly cristallin.

On contrôle à l'aide de microscope le parallélisme des faces et l'épaisseur de l'échantillon qui doit être de 30  $\mu\text{m}$ , à cette épaisseur la plupart des minéraux sont transparents à la lumière et ils peuvent être étudiés sous un microscope polarisant figure (III-14).





**Figure (III-14) : vérification de l'épaisseur de l'échantillon avec un microscope**



**Figure (III-15) : Lames minces préparées au Laboratoire**

#### III-3-1-1-2 : Principe de fonctionnement du microscope polarisant : [40]

Le microscope polarisant est spécialement adapté aux études pétrographiques, celles-ci consistent à observer des lames minces, à faces parallèles.

Il diffère du microscope ordinaire par l'adjonction de deux dispositifs de polarisation :

- ❖ Le polariseur : interposé entre la source lumineuse et le minéral figure (III-16)
- ❖ L'analyseur : situé entre l'objectif et l'oculaire, il est escamotable.

La lumière sortie du polariseur vibre dans le plan de celui-ci (N-S), le plan de vibration de l'analyseur est alors (E-W) et celui-ci ne laisse passer que les vibrations qui sont contenues dans son plan. Figure (III-17)

Le microscope polarisant utilisé dans notre étude pétrographique au sein de notre laboratoire LTMGP est un microscope polarisant multifonctionnel :

- Microscope polarisant pétrographique qui fonctionne en lumière transmise.
- Microscope polarisant métallurgique qui fonctionne en lumière réfléchie.



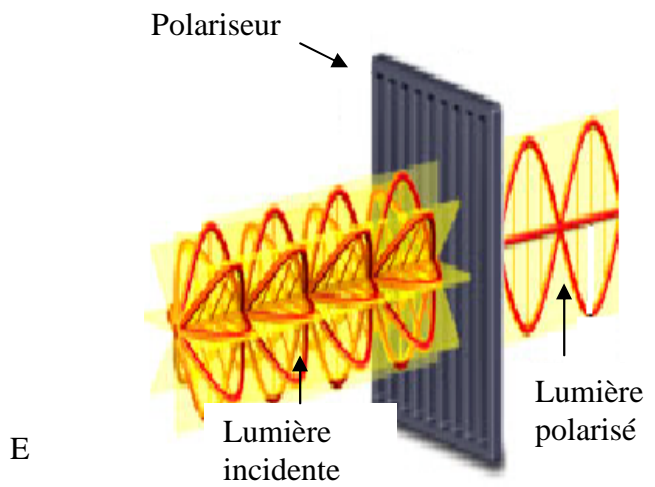
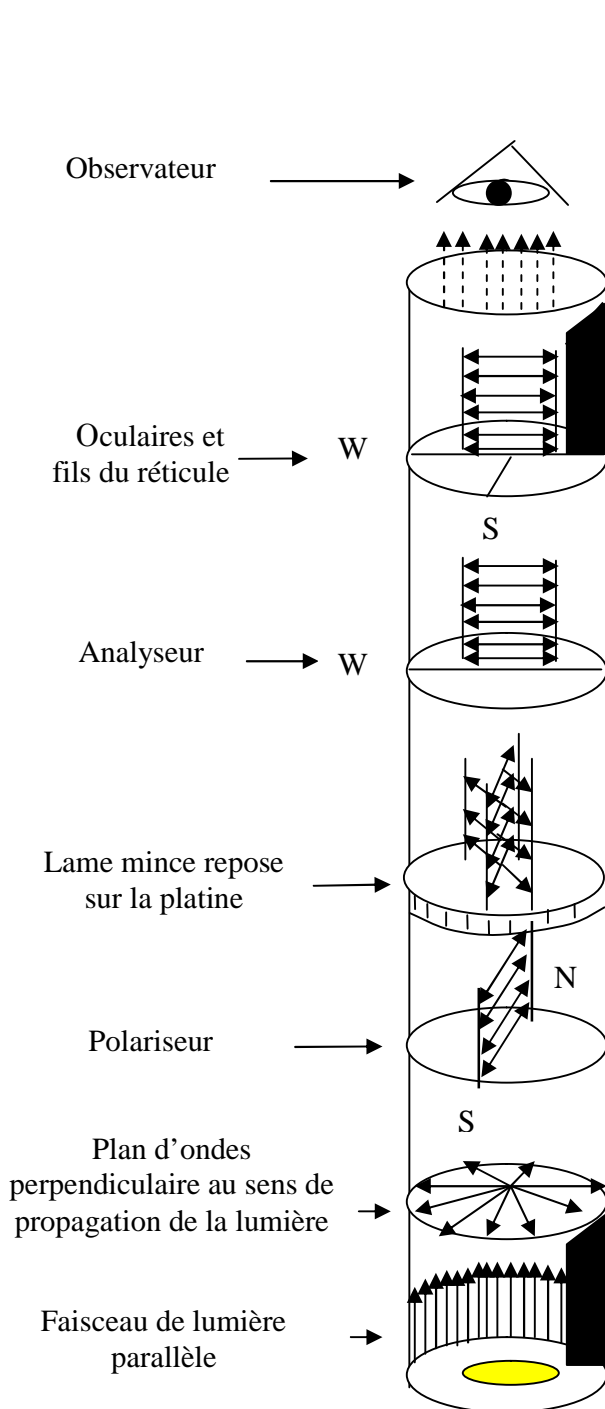


Figure (III-16) Polarisation de la lumière naturelle

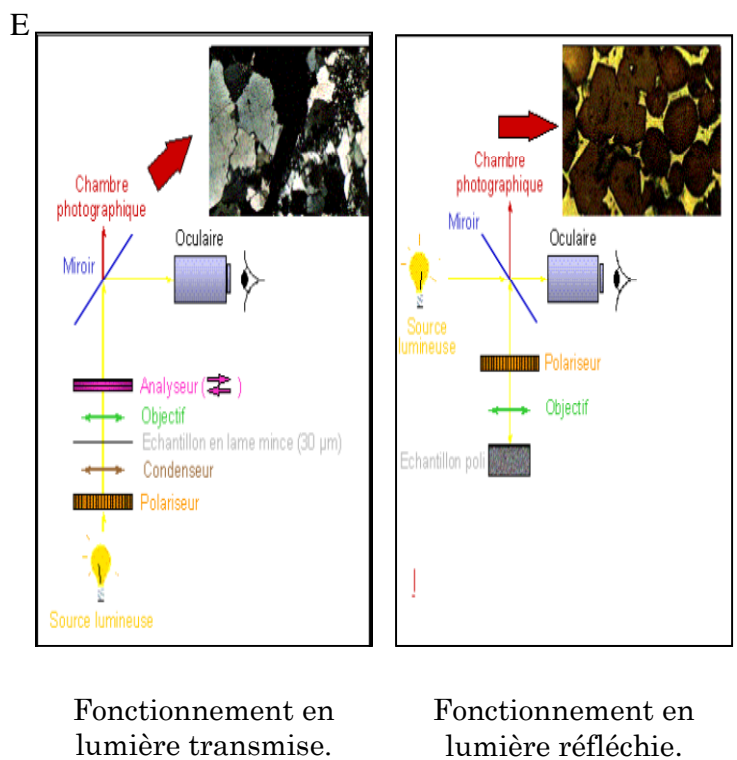


Figure (III-17) Principe du fonctionnement du microscope polarisant [40]

### III-3-1-1-3: Critères de reconnaissance des minéraux en lame mince : [40]

La reconnaissance des minéraux sous un microscope polarisant se fait à l'aide de leurs propriétés : optiques, physiques et géométriques suivantes :

#### 1) **Forme et géométrie des minéraux :**

Les sections minérales à contours géométriques bien définies sont dites automorphes ou subautomorphes. Celles de formes quelconques caractérisent les minéraux xénomorphes.

#### 2) **Réfringence :**

La réfringence dépend directement de la valeur absolue de l'indice de réfraction des minéraux, et l'indice d'un minéral est d'autant plus élevé que ses contours sont plus accusés : son relief est d'autant plus accentué. C'est cette impression de relief qui est ressentie lors de l'observation au microscope.

#### 3) **Le pléochroïsme :**

La lumière qui émerge d'une section minérale à faces parallèles a souvent, une intensité moindre qu'à l'entrée. Cette diminution d'intensité est due au phénomène d'absorption de certaines longueurs d'onde de la lumière utilisée.

- lorsque l'absorption est faible, le corps est transparent et incolore ; Exemple : Quartz.
- Si l'absorption a lieu, le minérale apparaît coloré. Cette coloration est plus ou moins intense suivant les espèces cristallines.
- Si l'absorption est totale, le corps est opaque : cas des minerais.

Il en découle que la couleur qui est une propriété du minéral est un critère important de reconnaissance des minéraux.

#### 4) **Les altérations des minéraux :**

Les phénomènes d'altération sont très fréquents dans les minéraux. Il s'agit de la transformation d'une espèce minérale, de cristallisation précoce, en un assemblage de produits minéraux tardifs plus finement cristallisés. Cette altération progresse, généralement, de la périphérie du minéral vers son centre. Elle se propage à la faveur des plans de discontinuité du minéral (clivages, casseurs).

#### 5) **Les clivages :**

C'est les plans selon les quels le minéral se casse préférentiellement lorsqu'il est soumis a une contrainte. Ce sont des plans de moins grande densité atomique.

#### 6) **Les fractures :**

Ce sont des plans de cassure du minéral, sans relation avec les directions cristallographique des cristaux.

### III-3-1-1- 4 : Classification des roches calcaires :

#### III-3-1-1-4-1 : classification de Dunhman :

D'après Dunhman (1962) la classification des roches calcaires est basée sur l'observation des textures originelles des sédiments et permet de situer de manière précise la roche calcaire étudiée dans le modèle actuel de sédimentation. Elle comporte trois classes :

- **les Boundstones (roches construites) :**

Ce sont des roches calcaires entièrement construites sur place par des organismes coloniaux vivants. Exemple : calcaire à polypiers.

- **Les Grainstones, Packstones, Wackstones et Mudstones :**

Correspondent aux autres roches calcaires dont on peut observer les caractéristiques du sédiment. On les subdivise en deux sous classes :

1) - **Les roches calcaires à support granulaire :**

Ces roches montrent une grande proportion de grains, qui sont jointifs, et sont donc issues d'un milieu de dépôt de haute énergie. On distingue :

- **Les Grainstones** : dont les grains sont soudés par un ciment, et qui ne montrent pas de boue (diamètre < 20µm) dans le sédiment originel. Ce sont des roches qui se sont déposées dans un milieu de très haute énergie.
- **Les Packstones** : qui montrent une matrice, dont le sédiment comportait de la boue calcaire. Leur milieu de dépôt est de haute à moyen énergie.

2)- **Les roches calcaires à support boueux :**

Elles Comportent une quantité prédominante de matrice. Les grains ne sont pas jointifs. Ce sont des roches dont le sédiment s'est déposé en milieu de basse énergie. On distingue :

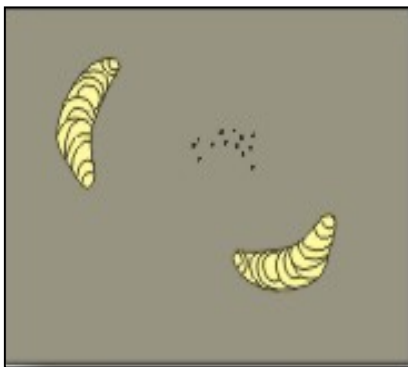
- **Les Wackstones** : qui possèdent plus de 10% de grains, et qui correspondent à un milieu d'énergie moyenne à basse.
- **Les Mudstones** : qui contiennent moins de 10% de grains et qui sont déposés dans un milieu d'énergie basse à nulle.

- **les calcaires recristallisés :**

Les calcaires recristallisés sont des roches calcaires dont la cristallisation totale de la calcite pendant la diagenèse ou lors d'un métamorphisme ultérieur a effacé toutes traces de sédiment originel.

Tableau (III-3) : Classification de Dunhman (1962).

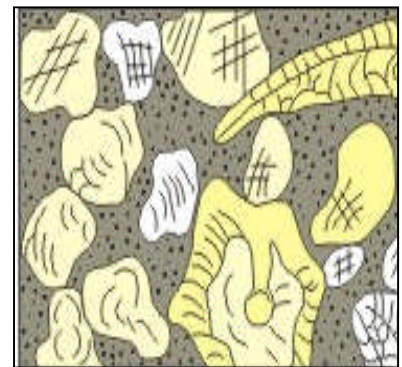
Grains		Avec boue	Sans boue
Non jointifs	< 10 %	Mudstone	
	>10 %	Wackstone	
Jointifs		Packstone	Grainstone



MUDSTONE



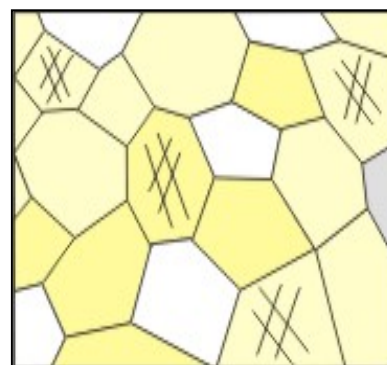
WACKSTONE



PACKSTONE



GRAINSTONE



CALCAIR CRISTALIN

Figure (III-18) : Classification de Dunhman des roches carbonatées.

III-3-1-1-4-2 : Classification de R-FOLK (1959) :

Cette classification est fondée sur la proportion relative de grains carbonatés ou *allochems* et de phase de liaison (matrice- ciment) ou *orthochems* (micrite ou sparite).

• **Les allochems ou grains carbonatés :**

- Les fossiles, microfossiles ou fragment de macros fossiles (bioclastes).
- Les oïdes, grains ovoïdes constitués d'un nucléus de nature variable et d'un cortex concentrique de  $\text{CaCO}_3$ , alterna avec de la matière organique.
- Les péloïdes sont des particules microcristallines sans structure interne. La plupart sont de Petites taille (0,1 à 0,5 mm) et correspondent aux déjections d'organismes marins.
- Les Intraclasts sont des fragments de sédiments carbonatés consolidés précocement.
- Les agrégats sont composés de péloïdes, d'oïdes et de bioclastes cimentés par de l'aragonite sont parfois fréquents.

• **La phase de liaison : les orthochems**

On distingue deux types principaux :

- La matrice de calcite microcristalline ou micrite. Ces particules de petite taille : ( $1 \mu\text{m} < \emptyset < 4\mu\text{m}$ ) sont considérées comme résultant de la précipitation chimique (ou biochimique) de carbonate, où cette « poussière carbonatée » résulte aussi de la fragmentation et de l'abrasion d'organismes calcaires.
- Le ciment de calcite spathique ou sparite. Cristaux relativement limpides ( $\emptyset > 10 \mu\text{m}$ ) formant un remplissage des pores.

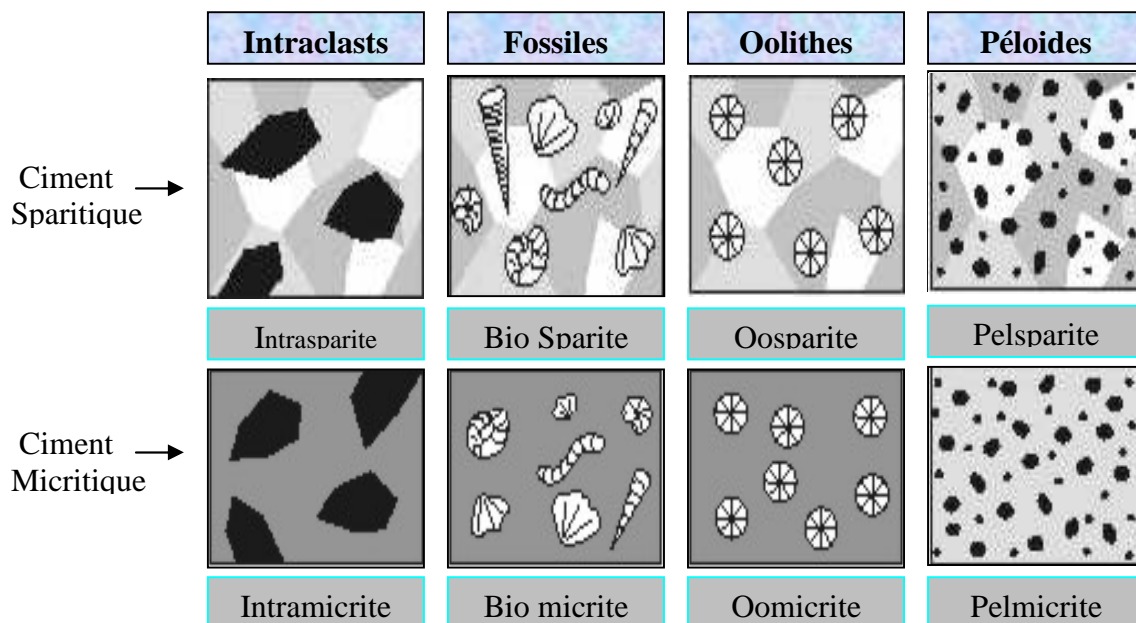


Figure (III-19) : classification de R Folk des roches carbonatées.

Tableau (III-4) Classification des Roches Calcaires selon R.Folk

Classification de R - Folk 1959		CALCAIRES & DOLOMIES PRIMAIRES				
		>10% Allochems		< 10% Allochems		
		Ciment > Matrice	Matrice > Ciment	1 a 10 % Allochems	< 1 % Allochems	Bioherme
> 25% Intraclasts > 25% Oolithes		Intrasparite	intra micrite	Micrite à intraclastes	Micrite	Biolithite
		Oosparite	Oomicrite	MicroOolithique		
Rapport Fossiles/ Pellets	R > 3	Bio Sparite	Bio micrite	Micrite fossilifère		
	3>R>1	Biopelsparite	Biospelmicrite	Micrite a pellets		
	R < 1	Pelsparite	Pelmicrite			
		DOLOMIES SECONDAIRES				
		Présence de fantômes d'allochems		Absence de fantômes d'allochems		
> 25% Intraclastes > 25% Oolithes.		Dolomite a intraclastes		Dolomite cristalline		
		Dolomite oolithique				
Rapport Fossiles/ Pellets	R > 3	Dolomite fossilifère				
	1<R<3					
	R<3	Dolomite a pellets				

### III-3-1-1- 5 : Résultats et interprétation :

Une première observation macroscopique des échantillons A, B, C, affinée à la loupe nous a permis de donner une description générale de la roche, et de mettre en évidence l'existence de calcaire par un teste d'effervescence à l'acide chlorhydrique. La détermination plus précise des constituants minéralogiques est effectuée par l'observation des lames minces.

L'ensemble des résultats obtenus sont récapitulés sous forme de fiches minéralogiques représentées ci-dessous :

Tableau (III-5) : Fiche minéralogique de l'échantillon -A-


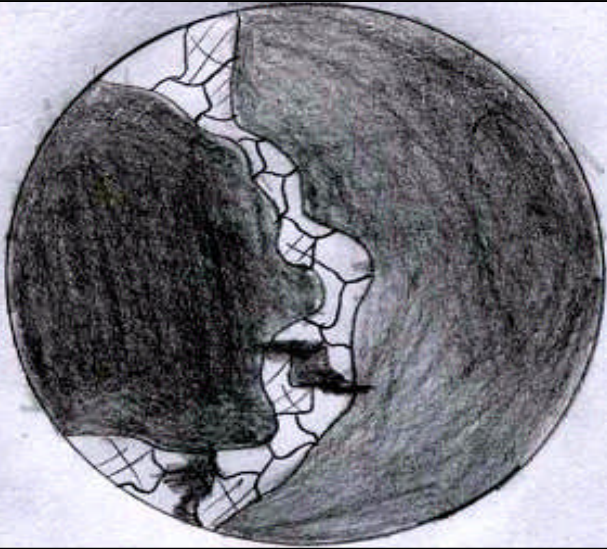
Echantillon -A-			
Description macroscopique		Description microscopique (Lame mince)	
<b>Œil nu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Aspect</b> : roche homogène avec des grains millimétriques.</li> <li>- <b>Patine</b> : brun rougeâtre.</li> <li>- <b>Couleur</b> : brun rougeâtre avec éclats de quelques grains.</li> <li>- <b>Dureté</b> : dure, raie le verre.</li> <li>- <b>Fissures</b> : roche peu fissurée</li> <li>- <b>Effervescence à l'acide</b> : Observée.</li> </ul>	<b>Microscope Polarisant</b>	<p><b><u>Lumière naturelle (LN)</u></b> :</p> <p>Opaque, sauf apparition de quelque gros grains de calcite dans les fissures</p>
			<p><b><u>Lumière polarisante (LP)</u></b> :</p> <p>Très opaque (sombre)</p>
			
<p>Origine de la roche : roche sédimentaire.</p>			



Tableau (III-6) : Fiche minéralogique de l'échantillon -B-


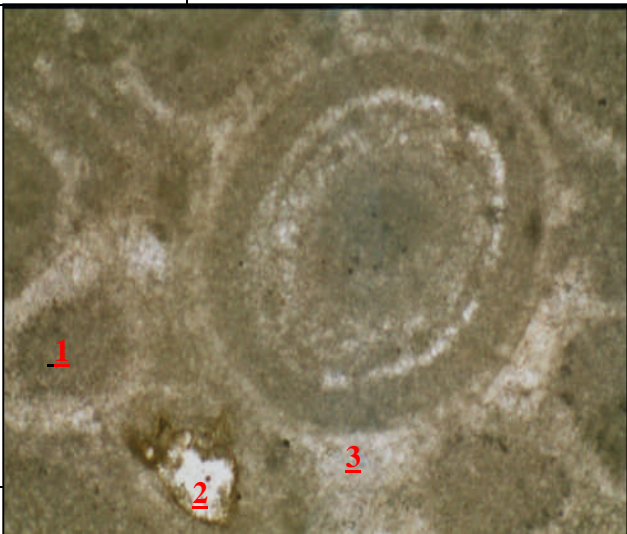

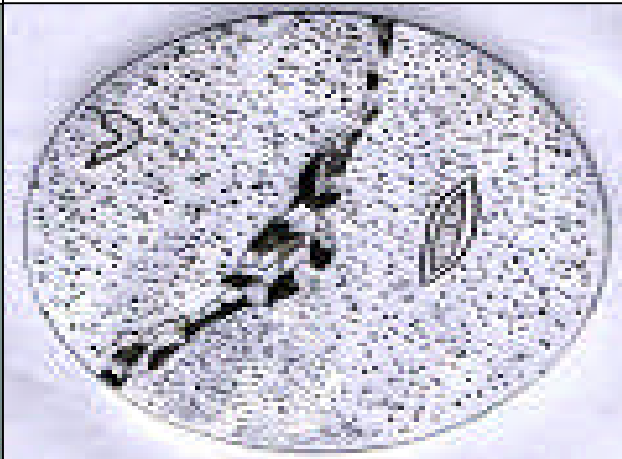
Echantillon -B-			
Description macroscopique		Description microscopique (Lame mince)	
<b>Œil nu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Aspect</b> : roche très homogène, compact avec des grains infra macroscopique.</li> <li>- <b>Patine</b> : grise jaunâtre.</li> <li>- <b>Couleur</b> : gris très clair.</li> <li>- <b>Fissures</b> : roche très peu fissurée.</li> <li>- <b>Dureté</b> : roche dure mais ne raie pas le verre.</li> <li>- <b>Effervescence à l'acide</b> : fortement observée.</li> </ul>	<b>Microscope Polarisant</b>	<p><b><u>Lumière naturelle (NL):</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Eléments</b> :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>1</u> Oolites 95%</li> <li>▪ <u>2</u> Divers fossiles.</li> <li>▪ <u>3</u> Ciment : Sparitique.</li> </ul> </li> <li>- <b>Forme</b> : automorphe.</li> <li>- <b>Couleur</b> : très faiblement coloré</li> <li>- <b>Relief</b> : fort.</li> <li>- <b>Pléochroïsme</b> : nul.</li> </ul>
			<p><b><u>Lumière polarisante (LP) :</u></b></p> <p><b>Biréfringence</b> très forte ; Polarise dans les teintes délavé de 4eme Ordre. avec des irisations rose et verte, échelle de polarisation.</p> <p><b>Extinction</b> : droite.</p>
			
<p><b>Famille</b> : Carbonate.</p> <p><b>Nom de la roche</b> : Calcaire Oolithique [D'après Dunhman 1962]. : Biosparite [D'après R- Folk 1959].</p>			



Tableau (III-7) : Fiche minéralogique de l'échantillon -C -

Echantillon -C -	
Description macroscopique	Description microscopique (Lame mince)
<p><b>Oeil nu</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Aspect</b> : roche très compacte, homogène avec des grains infra macroscopique.</li> <li>- <b>Patine</b> : très sombre vers bleuâtre.</li> <li>- <b>Couleur</b> : gris sombre.</li> <li>- <b>Fissures</b> : roche très peu fissurée.</li> <li>- <b>Dureté</b> : roche dure mais ne raie pas le verre.</li> <li>- <b>Effervescence à l'acide</b> : fortement observée.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Microscope Polarisant</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Lumière naturelle (LN) :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Eléments</b> : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Recristallisation dans les fissures de la sparite (gros grains de calcite) et oxyde de fer.</li> <li>▪ Fossiles.</li> <li>▪ Pellets.</li> </ul> </li> <li>- <b>Ciment</b> : micritique.</li> <li>- <b>Forme</b> : automorphe.</li> <li>- <b>Couleur</b> : très faiblement coloré</li> <li>- <b>Relief</b> : fort.</li> <li>- <b>Pléochroïsme</b> : nul.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Lumière polarisante (LP) :</b></p> <p><b>Biréfringence</b> : très forte ; Polarise dans les teintes délavées de 4eme Ordre, échelle de polarisation.</p> <p><b>Extinction</b> : droite.</p>
	
<p><b>Famille</b> : Carbonate.</p> <p><b>Nom de la roche</b> : Calcaire Packstone [D'après Dunhman 1962].</p> <p style="padding-left: 100px;">: Biomecrite [D'après R- Folk 1959].</p>	

D'après les fiches minéralogiques ci-dessus on constate que la composition minéralogique de l'échantillon -A- est à 90% opaque ce qui explique que la plupart des minéraux de cette roche sont des oxydes métalliques, qui ne sont pas différenciables en lame mince.

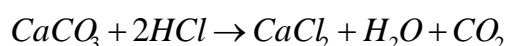
Pour les échantillons B, C on remarque qu'ils sont constitués presque par des minéraux carbonatés (95%) dont la taille est très fines avec des phases de liaison micritique pour l'échantillon -B- et sparitique pour l'échantillon -C-, tout on notant la présence de quelques fossiles.

Généralement, la nature des éléments carbonatés a une grande influence sur la résistance du matériau aux chocs. En effet, les roches ayant une phase de liaison micritique résistent mieux aux chocs ainsi que les roches qui présentent des éléments carbonatés de petite taille et à faible cristallisation. Ceci nous mène à dire que la roche exploitée par SOMACOB est d'une assez bonne qualité du point de vue de sa composition pétrographique

#### III-3-1-2 : Détermination de La teneur en carbonate de calcium $\text{CaCO}_3$ :

Pour confirmer les résultats de l'analyse pétrographique et de déterminer la teneur exacte de  $\text{CaCO}_3$  on effectue un dosage en carbonate de calcium, avec le calcimètre de Bernard.

Le principe de ce dosage est basé sur la mesure du volume de  $\text{CO}_2$  dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique  $\text{HCl}$  sur les carbonates de calcium  $\text{CaCO}_3$  d'un échantillon de sol.



L'essai porte sur 0,3 g de chaque échantillon : A, B, C préalablement broyés, et étuvés.

#### III-3-1-2-1 : Courbe d'étalonnage :

La courbe d'étalonnage est tracée pour des échantillons de  $\text{CaCO}_3$  pure, tout en variant la masse de  $\text{CaCO}_3$  (0,1, 0,2, 0,3 grammes) en mesurant le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé figure (III-20).

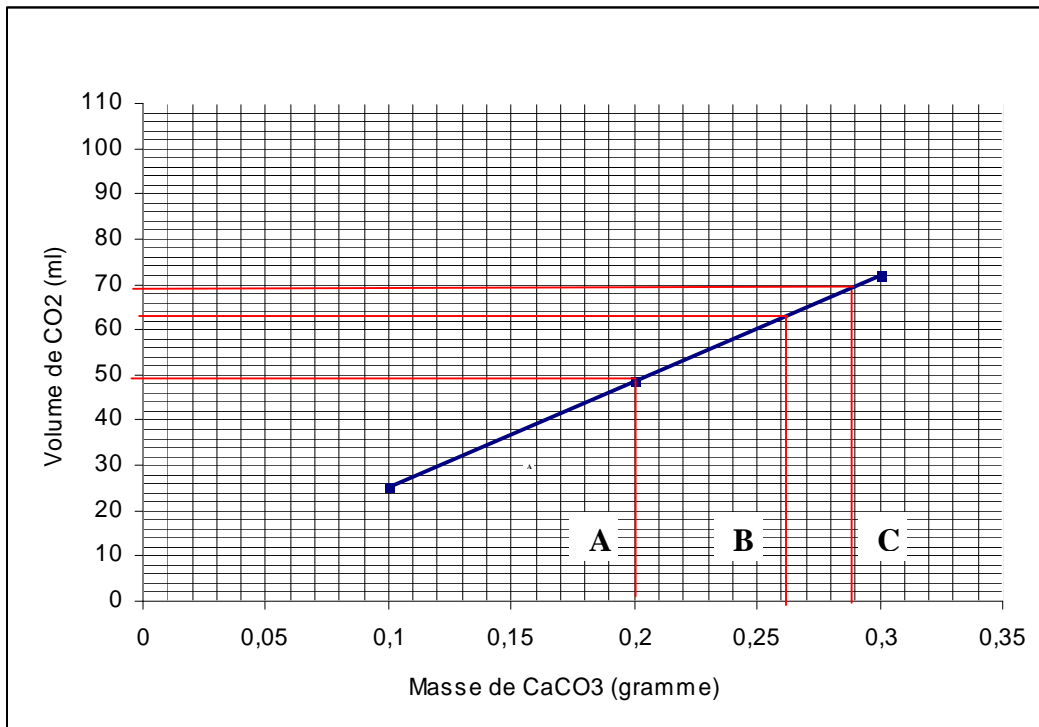


Figure (III-20) : Courbe d'étalonnage du dosage en carbonate de calcium.

III-3-1-2-2 : Résultats obtenus :

En tenant compte de la courbe d'étalonnage figure (III-20), les résultats obtenus pour les échantillons A, B, C sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (III-8) : La teneur en CaCO<sub>3</sub> des granulats de SOMACOB.

Echantillon	Masse (g)	Volume CO <sub>2</sub> (ml)	Masse de CaCO <sub>3</sub> (g)	CaCO <sub>3</sub> %
A	0,3	49,1	0,2	66,66
B	0,3	62,8	0,262	86,66
C	0,3	70	0,29	96,66

### III-3-1-3 : Analyse minéralogique par DRX :

Chaque minéral possède un spectre caractéristique de diffraction des rayons X, en fonction d'incidence  $2\theta$  de la source des rayons X sur leurs plans cristallins. Ce qui permet de les identifier à partir de spectre de diffraction de l'échantillon analysé

La diffraction des rayons X à été réalisée au Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procèdes (LTMGP) de l'Université de Bejaia, à l'aide d'un diffractomètre de marque PHILIPS « XPERT-PRO » équipé d'une anticathode de cuivre fonctionnant sous 45 KV et 30 mA.

La composition minéralogique des échantillons est donnée grâce à une analyse sur les échantillons -A- Roche de couleur rouge brunâtre, -B- : Calcaire de couleur Gris foncé -C- : Calcaire de couleur Gris clair broyées à une dimension inférieure à 100  $\mu\text{m}$ .

Les diffractogrammes RX ainsi leurs identifications pour les trois échantillons A, B, C sont rapportés par les tableaux et les figures suivantes :

#### Echantillon -A- :

**Tableau (III-9) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -A-**

N° pics	Position des pics ( $2\theta$ ) °	Intensité relative	Calcite	Dolomite ferroan	Goethite
1	21.2202	7.10			+
2	23.0855	3.34	+		
3	29.459	100	+		
4	30.9813	61.90		+	
5	33.1467	4.28		+	+
6	36.0695	6.08	+		+
7	36.636	3.19			+
08	39.504	6.47	+		
09	41.1276	5.51		+	+
10	43.2425	7.07	+		
11	44.8689	2.15		+	
12	47.635	7.08	+		
13	48.6241	7.72	+		
14	50.7843	2.92		+	+
15	57.5960	1.09	+		+

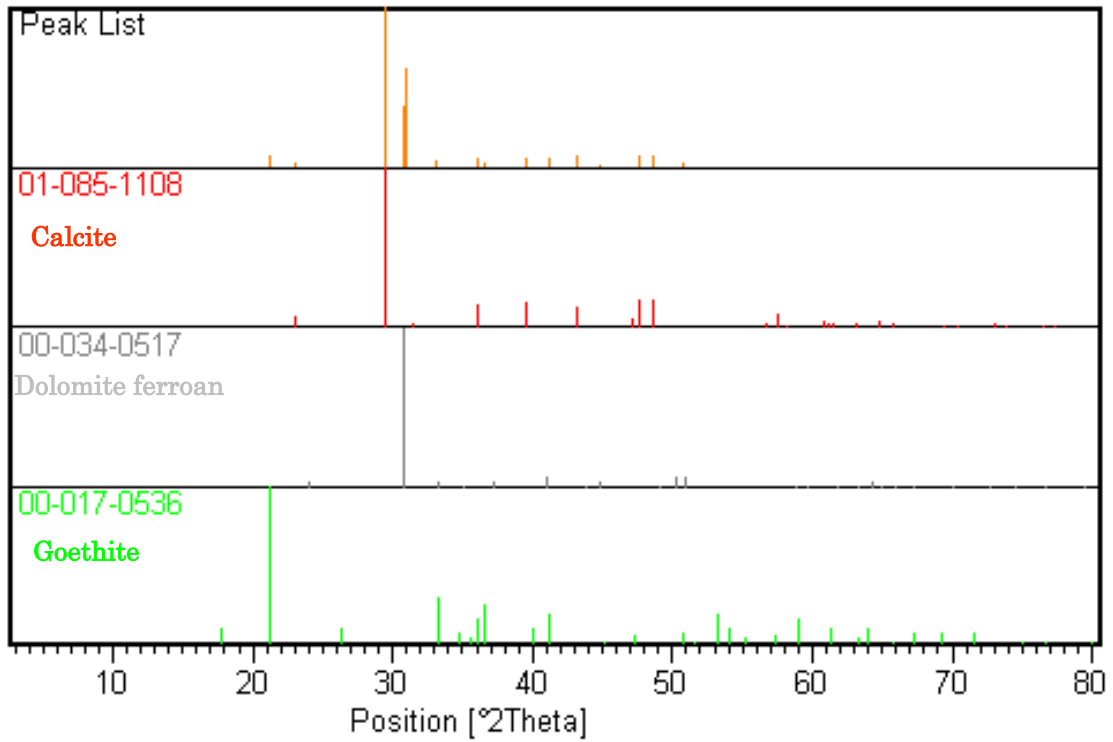


Figure (III-21) : Paternes d'identification d'échantillon -A-

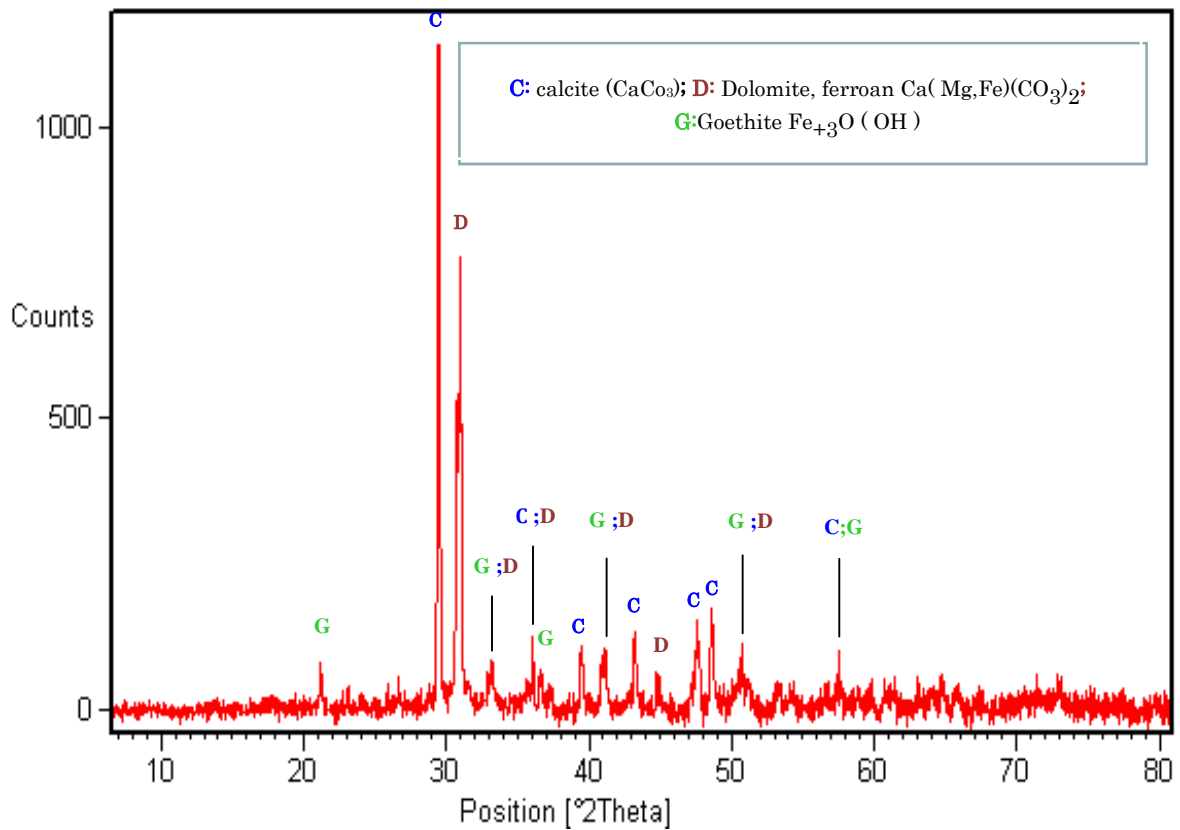


Figure (III-22) : Spectre de la DRX d'échantillon -A-

Tableau (III-10) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -B-

N° Pics	Position des pics (2θ)°	Intensité relative	Calcite	Dolomite
1	23.0866	7.95	+	
2	29.4396	100.00	+	
3	30.9412	1.45		+
4	31.5084	2.34	+	
5	36.0050	10.32	+	
6	39.4524	15.93	+	
7	43.2087	13.81	+	
8	47.1787	4.25	+	
9	47.5677	13.15	+	
10	48.5486	14.39	+	
11	56.6256	2.94	+	
12	57.4484	5.61	+	
13	60.7285	3.76	+	
14	61.4377	1.50	+	
15	63.1287	1.16	+	
16	64.7179	3.87	+	
17	65.6884	2.42	+	
18	69.2569	0.79	+	
19	70.3115	1.00	+	+
20	72.9752	1.65	+	+
21	76.3039	0.71	+	
22	77.2659	1.19	+	+

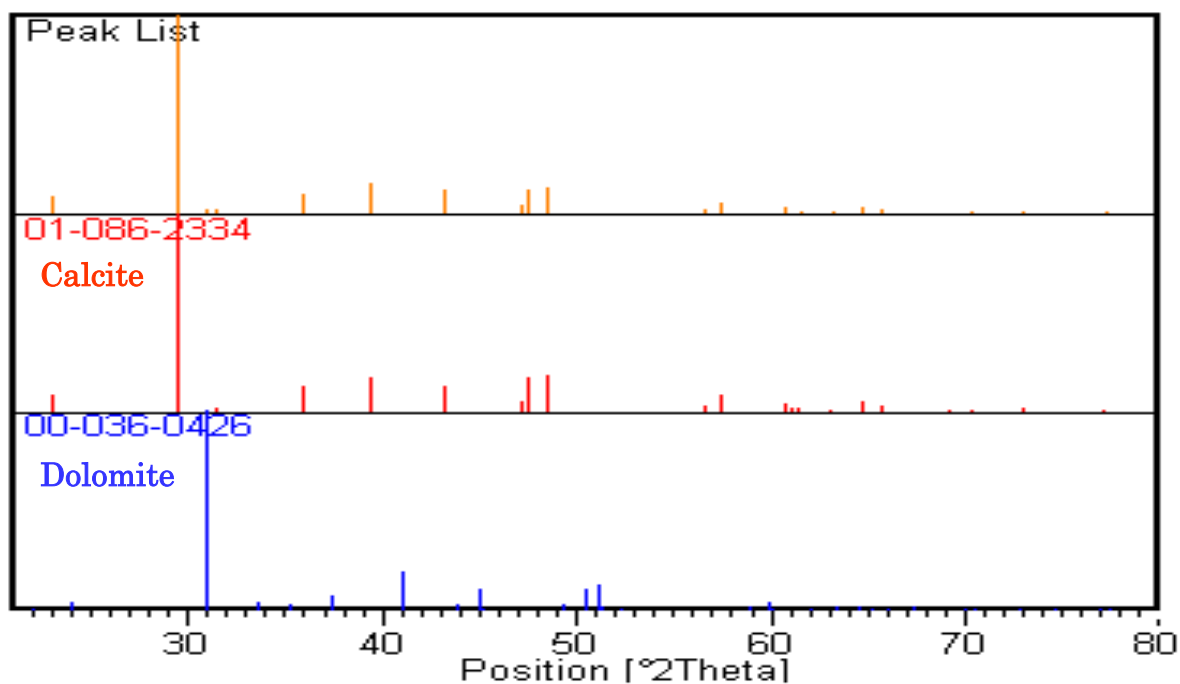


Figure (III-23) : Paternes d'identification d'échantillon -B-

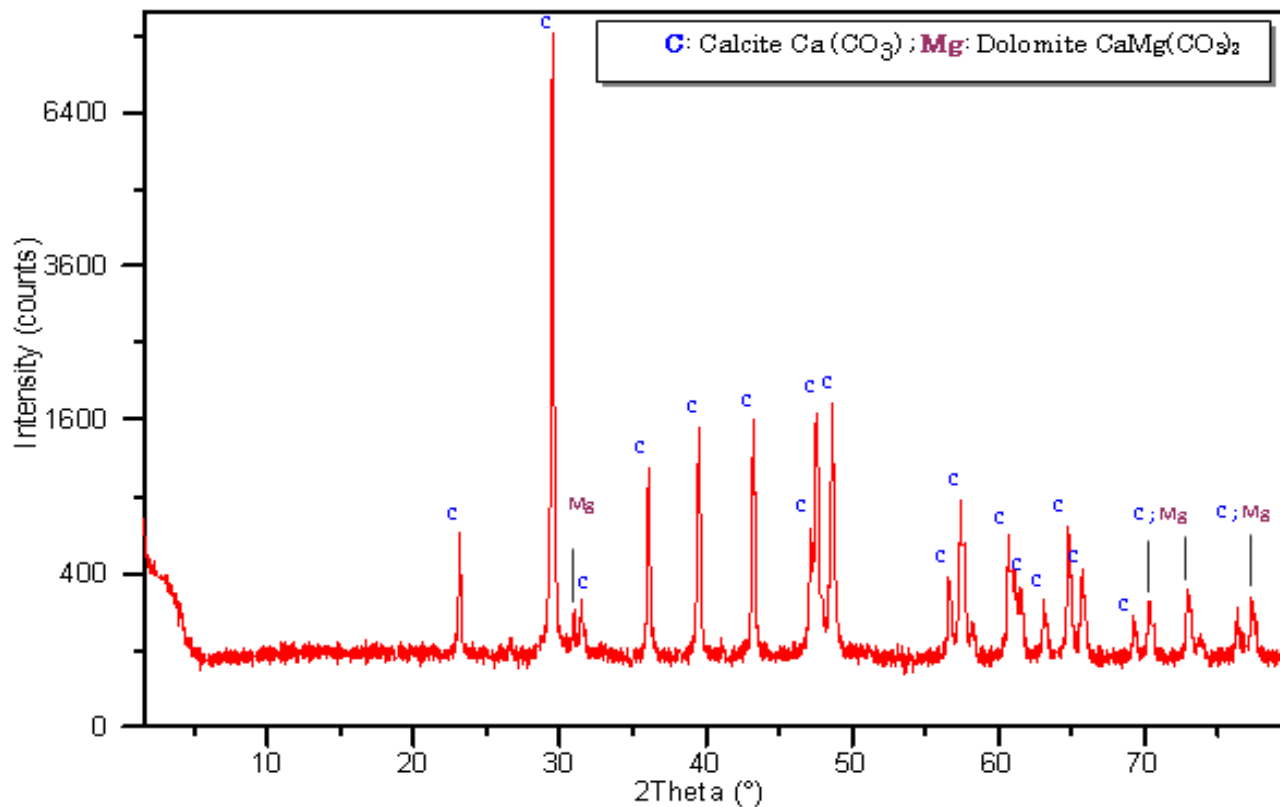


Figure (III-24) : Spectre de la DRX d'échantillon -B-

Echantillon -C- :

Tableau (III-11) : Analyse par Diffraction RX de l'échantillon -C-

N° Pics	Position 2θ	Intensité relative(%)	CaCO <sub>3</sub>
1	23.0640	6.55	+
2	29.4416	100.00	+
3	31.5470	1.03	+
4	35.9927	10.25	+
5	39.4476	16.76	+
6	43.1908	12.64	+
7	47.5570	14.85	+
8	48.5495	12.87	+
9	56.5123	2.31	+
10	57.4096	5.26	+
11	60.7886	2.14	+
12	63.0523	0.82	+
13	64.7500	3.56	+
14	65.7117	2.69	+
15	69.7340	0.72	+
16	70.5621	0.79	+
17	73.0136	0.85	+
18	76.8927	0.76	+
19	77.2690	1.29	+

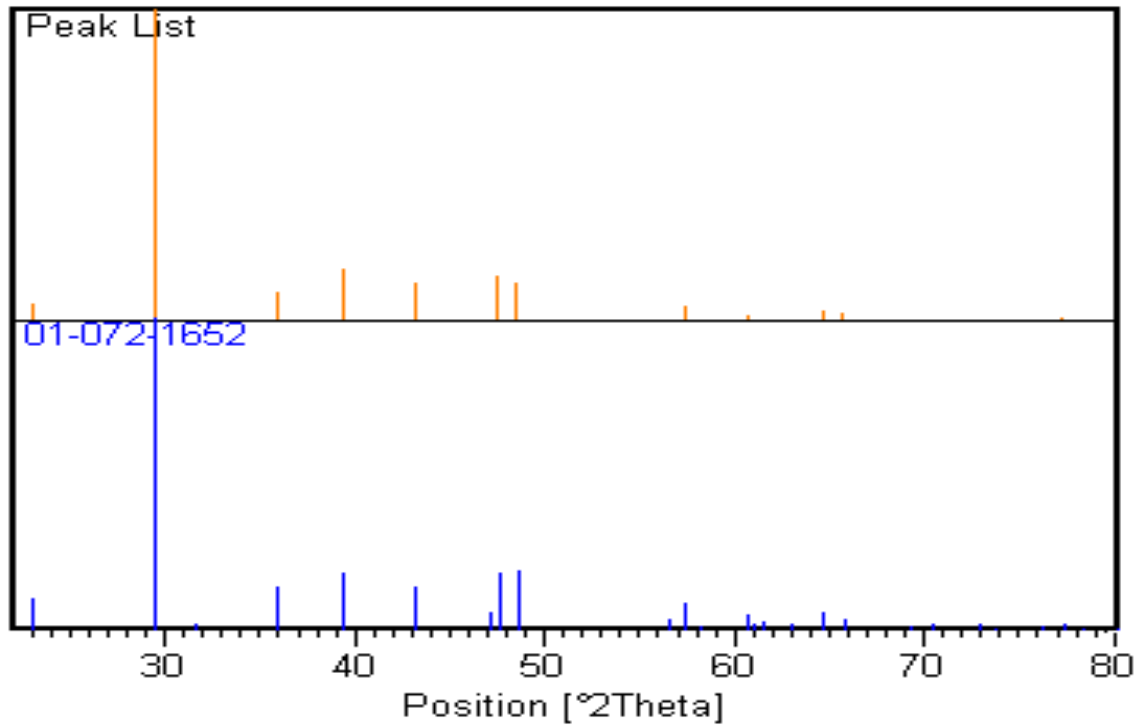


Figure (III-25) : Paternes d'identification d'échantillon -C-

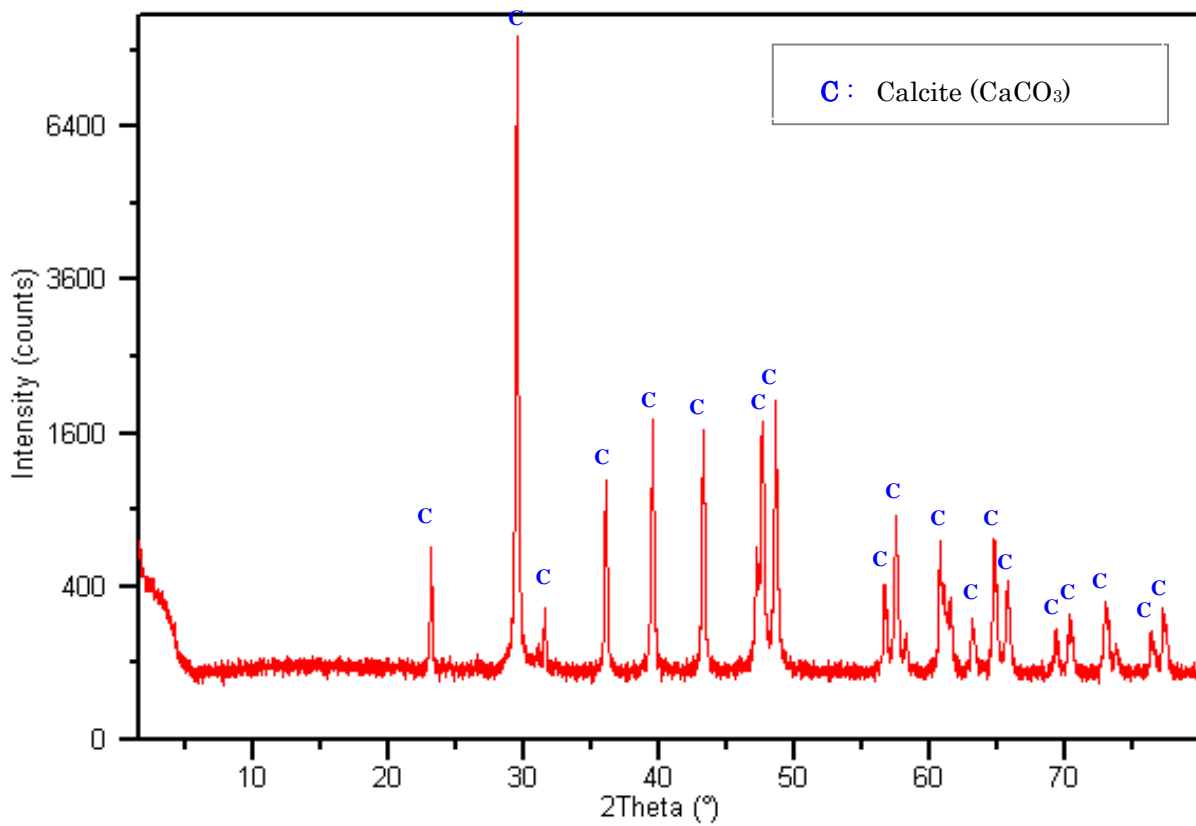


Figure (III-26) : Spectre de la DRX d'échantillon -C-



### **Chapitre III : Etat actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB**

---

Le spectre RX figure (III-22) montre l'existence de trois phases minérales à savoir : la Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la Dolomite ferroan  $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$  ainsi de la Goethite ( $\text{FeHO}_2$ ) dans la composition minéralogique de l'échantillon A. Pour le spectre RX figure (III-24) d'échantillon B on remarque que ce dernier est composé de deux phases minérales :

- La Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ).
- la Dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Par contre pour le spectre RX d'échantillon C figure (III-26) l'unique phase minérale que contient c'est de la Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), Ce qui confirme les résultats de calcimètre ; pourcentage de  $\text{CaCO}_3 = 96.66\%$ .

L'analyse minéralogique a mis en évidence les principaux résultats de l'analyse Pétrographique, ainsi celle de Calcimètre trouvés pour les trois échantillons.

#### **III-3-1-4 : Caractéristique mécanique des granulats ; Essai Los Angeles : [NFP-18573]**

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression. Par contre, il existe des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats (fragmentation sous l'action du trafic routier).

##### **III-3-1-4-1 : But de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la masse  $m$  d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètre compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumit aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15 minutes.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires suivantes :

4 - 6,3 mm ; 6,3 - 10 mm ; 10 - 14 mm ; 10 - 25 mm ; 16 - 31,5 mm ; 25 - 50 mm tel que :

- La classe granulaire 10 - 25 mm doit contenir 60 % de 10 - 16 mm.
- La classe granulaire 16 - 31,25 mm doit contenir 60% de 16 - 25 mm.
- La classe granulaire 25 - 50 mm doit contenir 60% de 25 - 40 mm.

La masse de la charge de boulets varie suivant les classes granulaires comme suit :

Tableau (III-12) : La charge des boulets correspond à chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Nombres de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 – 6,3	7	3080	+ 20 à – 50
6,3 – 10	9	3960	
10 – 14	11	4840	
10 – 25	11	4840	+ 20 à – 50
16 – 31,5	12	5280	
25 – 50	12	5280	

**III-3-1-4-2 : Formulation :**

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs est exprimée par le coefficient Los Angeles  $L_A$  :

$$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100$$

**III-3-1-4-3 : Classification :**

La classification des granulats selon leur dureté en se basant sur le coefficient de Los Angeles est la suivante :

Tableau (III-13) : classification des granulats d'après le coefficient  $L_A$ .

Coefficient $L_A$	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
> 50	Très tendre

Plus le coefficient Los Angeles est petit plus la roche est bonne, ce qui se traduit ,en résistance du béton composé avec, car la dureté est synonyme de très grande résistance.

### III-3-1-4-4 : Équipements utilisés :

1. Tamis d'ouverture : 1,6 - 4 - 6,3 - 10 - 14 - 16 - 20 - 25 mm.
2. La machine Los Angeles :

Cette machine comporte un cylindre creux pouvant tourner autour de son axe et où on introduit l'échantillon ainsi que des boulets d'acier jouant le rôle de charges abrasives ; figure (III-27)

3. Charge de boulets.
4. Un bac destiné à récupérer le matériau après essai.
5. Une balance.
6. Etuve.



Figure (III- 27) : Machine Los Angeles.

### III-3-1-4-5 : Préparation de l'échantillon pour l'essai :

La masse de l'échantillon de laboratoire doit être égale au moins à 15 Kg et elle doit être préparée suivant les prescriptions de la norme expérimentale P 18-553.

L'échantillon pour essai sera préparé comme suit :

- tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de classe granulaire choisie.
- Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante.

La masse de l'échantillon pour essai sera de 5000 g  $\pm$  5g.

### III-3-1-4-6 : protocole expérimental :

- Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 tr / min et 33 tr / min.
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.
- Laver le refus au tamis 1,6 mm, égoutter et sécher à l'étuve à 105C° jusqu'à une masse constante. Soit m' le résultat du refus.

### III-3-1-4-7 : Expression des résultats :

Le coefficient Los Angeles ( $L_A$ ) est, par définition le rapport :  $100 [m / 5000]$

Ou :  $m = 5000 - m'$  : est la masse sèche en grammes de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm..

$$L_A = 100[(5000 - m') / 5000]$$

Les résultats obtenus pour les granulats étudiés sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau (III-14) : Valeurs du coefficient de Los Angeles.**

Nature de matériau	Classe granulaire	Poids (gramme)			Coefficient LA
		initial	Finale > 1.6 mm	m=5000-m'	
15/25	10-25	5000	3606	1394	27.88
8/15	10-14	5000	3486	1514	30.28
8/15	6.3-10	5000	3500	1500	30
3/8	4 -6.3	5000	3630	1370	27.4

### III-3-1-4-8 : Spécification pour le coefficient $L_A$ :

La norme (P18-541) spécifie que la valeur du coefficient Los-Angeles doit être  $\leq 40$ , sauf dans le cas des bétons pour les quels la résistance à 28 jours doit être supérieur à 36 MPA ou l'on doit avoir  $L_A \leq 30$  MPA.

### III-3-1-4-9 : Interprétation des résultats :

D'après le tableau (III-13) les valeurs de coefficients  $L_A$  de toutes les classes granulaires étudiées sont comprises entre 25 et 30 ce qui correspond à des granulats assez dure, qui sont bons pour la confection des bétons courants et même les bétons de haute résistance.

### III-3-1-5 : détermination de la masse volumique absolue : [37]

La masse volumique absolue ( $\rho_s$ ) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue les granulats sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

#### III-3-1-5-1 : But de l'essai :

Cet essai a pour but de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

#### III-3-1-5-2 : Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple, très rapide, et elle utilise un matériel très courant de laboratoire, on procède de la manière suivante :

1. Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.
2. Peser un échantillon sec  $M$  de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
3. Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume  $V_2$ .

La masse volumique est alors :  $\rho_s = \left[ \frac{m}{(V_2 - V_1)} \right]$

Cet essai est effectué trois fois pour chaque classe granulaire avec un volume initial  $V_1$  égal à  $500 \text{ cm}^3$  est une masse  $m= 300 \text{ g}$ , les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau (III-15) : Les masses volumiques absolues.

Classe granulaire	V <sub>2</sub> (Cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>S</sub> (g/Cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>S</sub> moyenne
0/3	615	2.60	2.62
	613	2.65	
	614	2.63	
3/8	618	2.54	2.62
	615	2.60	
	610	2.72	
8/15	610	2.72	2.72
	610	2.72	
	610	2.72	
15/25	614	2.63	2.62
	613	2.65	
	615	2.60	

**III-3-2 : Caractéristiques liées au mode d'élaboration :**

**III-3-2-1 : Analyse granulométrique :** [NFP 18-56] [37]

**III-3-2-1-1 : But de l'essai :**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

**III-3-2-1-2 : Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

**III-3-2-1-3 : Matériel nécessaire :**

- Des tamis : de dimension normalisée, dont les dimensions nominales sont données dans le tableau suivant :

Tableau (III-16) : Dimensions nominales des tamis.

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis(mm)	0.08	0.10	0.125	0.160	0.20	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.80
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis(mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis(mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

- Etuve.
- Balance.

### III-3-2-1-4 : Conduite de l'essai :

#### III-3-2-1-4-1 : Dimensions des tamis utilisés :

Pour le sable (0/3) on utilisera les tamis de modules 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38. Pour les matériaux plus grossiers gravillons (3/8, 8/15, 15/25), tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

#### III-3-2-1-4-2 : Préparation de l'échantillon :

L'échantillon doit représenter le plus fidèlement possible la composition du matériau à essayer. Des ségrégations ont pu se produire pendant le transport donc le prélèvement sera d'abord bien brassé et mis en tas conique, à l'aide d'un échantillonneur ou par la méthode des quartages successifs, on formera l'échantillon à analyser.

D'après la Norme [NFP 18-560], la masse à utiliser sera telle que :  $M \geq 0,2 D$  avec :

M : masse de l'échantillon en Kg ; D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

**Gravillons** : 15/25 :  $M \geq (0,2).25 = 5$  Kg.

**Gravillons** : 8/15 :  $M \geq (0,2).15 = 3$  Kg.

**Gravillons** : 3/8 :  $M \geq (0,2).8 = 1.6$  Kg.

**Sable** : 0/3 :  $M \geq (0,2).3 = 0.6$  Kg.

#### III-3-2-1-4-3 : Description de l'essai :

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C. On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soient croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose d'un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera tamisât le poids du matériau passant à travers un tamis donné, et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

- ❖ Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration soit à l'aide de la tamiseuse électrique ou manuelle.
- ❖ On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations.
- ❖ Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé ; soit  $R_1$  la masse de ce refus.
- ❖ le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent ; soit  $R_2$  la masse du deuxième refus.

### Chapitre III : Etat actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés  $R_n$  aux différents niveaux de la colonne des tamis.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne.

La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2 % du poids total de l'échantillon de départ.

#### III-3-2-1-5 : Résultats :

Les résultats de l'analyse granulométrique de différentes classes granulaires 0/3, 3/8, 8/15, 15/25 sont présentées ci-dessous :

- Classe granulaires : gravillons 3/8 :

**Tableau (III-17) : Analyse granulométrique du gravier 3/8.**

Masse échantillon = 1900 grammes				
Ouvertures Des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât cumulé %
10	0	0	0	100
6.3	922.4	922.4	48.54	51.46
4	638.95	1561.35	82.17	17.83
3.15	104.85	1666.02	87.68	12.32
2	66.66	1732.68	91.19	8.81
1	54.06	1786.74	94.03	5.97
0.5	33.15	1819.89	95.78	4.22
0.25	79.31	1899.20	99.95	0.04



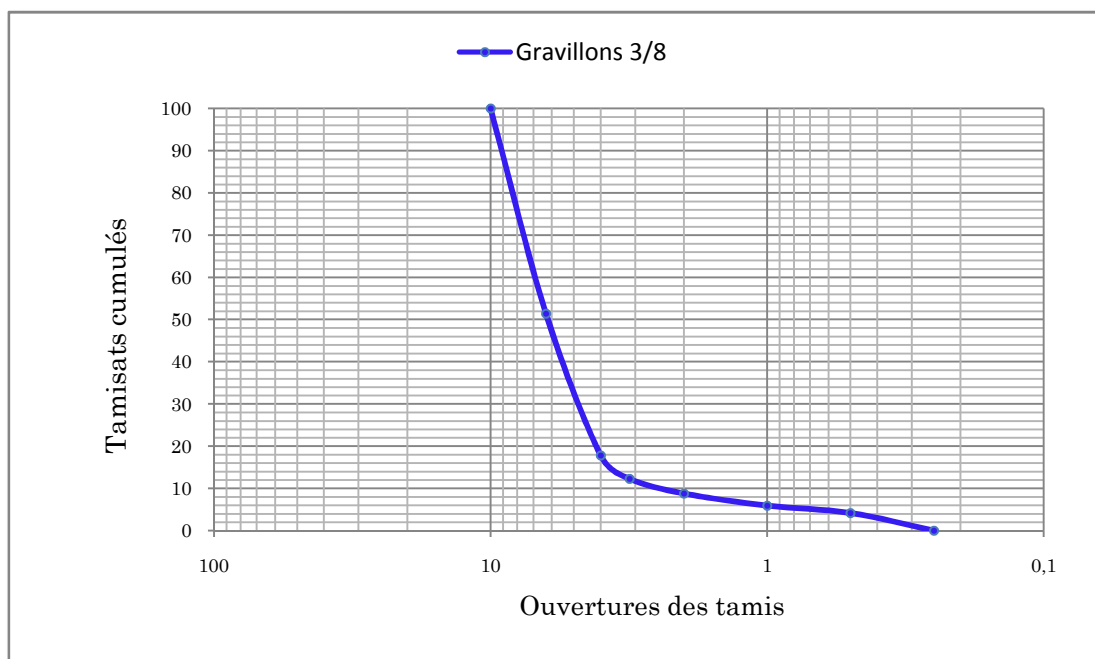


Figure (III-28) : Courbe granulométrique de gravillon 3/8.

- Classe granulaires : gravillons 8/15 :

Tableau (III-18) : Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Masse échantillon = 3800 grammes				
Ouvertures Des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
16	892.24	892.24	23.48	76.52
14	725.68	1617.92	42.57	57.43
10	1129.12	2747.04	72.29	27.71
6.3	551.18	3298.22	86.79	13.21
4	297.5	3595.72	94.62	5.38
3.15	51.71	3647.43	95.98	4.02
2	37.65	3685.08	96.97	3.03
1	30.35	3715.43	97.77	2.23
0.5	82.59	3798.02	99.94	0.052

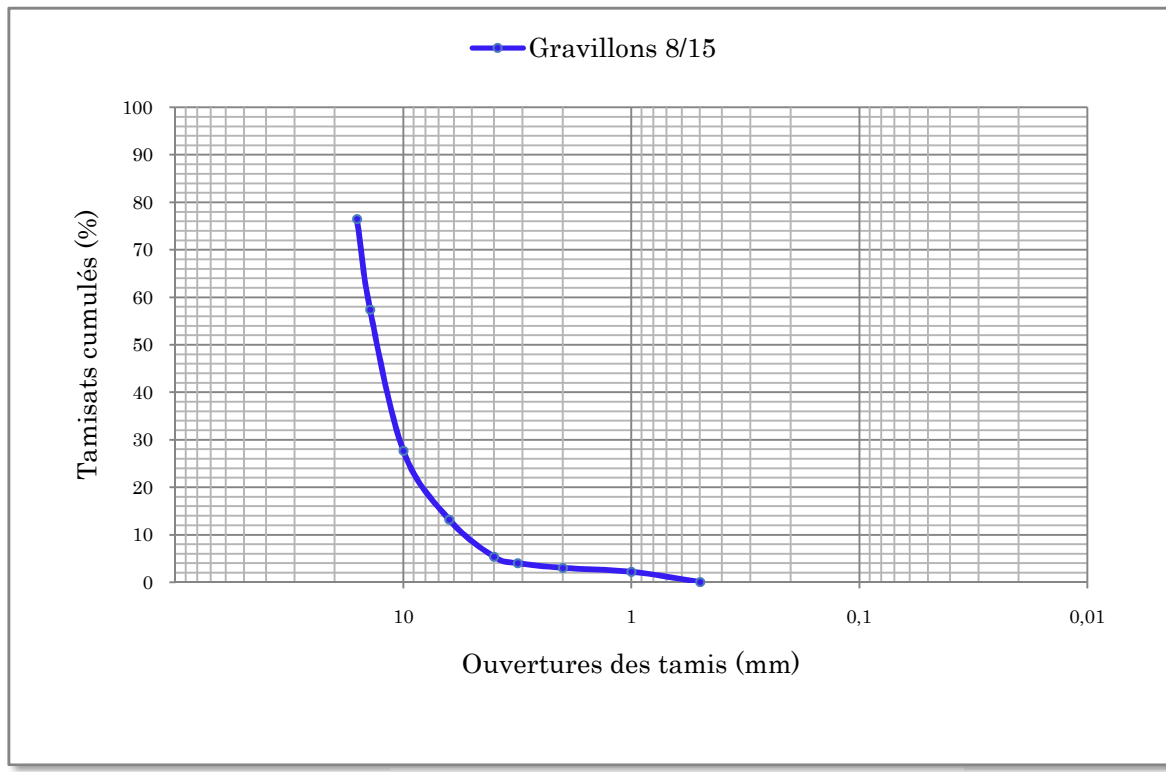


Figure (III-29) : Courbe granulométrique de gravillon 8/15.

- Classe granulaires : gravillon 15/25 :

Tableau (III-19) : Analyse granulométrique du gravier 15/25.

M ech = 5500 grammes				
Ouvertures Des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
25	171.46	171.46	3.11	96.89
20	2663.94	2835.40	51.52	48.48
16	2203.65	5039.05	91.61	8.39
14	254.52	5293.57	96.24	3.76
10	123.98	5417.55	98.50	1.5
6.3	37.68	5455.23	99.186	0.81
4	15.95	5471.18	99.476	0.53
3.15	26.10	5497.28	99.95	0.049

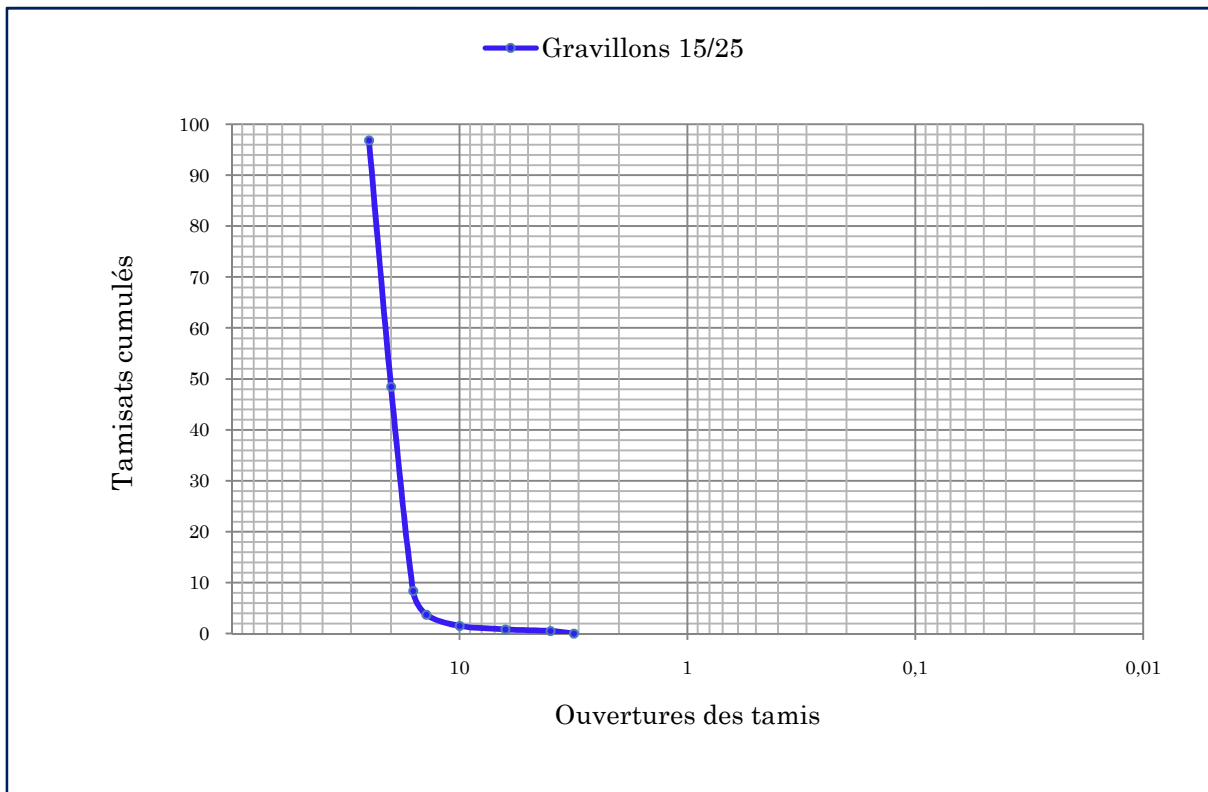


Figure (III-30) : Courbe granulométrique de gravillon 15/25.

- Sable 0/3 :

Tableau (III-20) Analyse granulométrique de Sable.

Masse échantillon = 1000 grammes				
Ouvertures Des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5	0	0	0	100
2,5	192	192	19,2	80,8
1,25	224	416	41,6	58,4
0,63	152	568	56,8	43,2
0,31	110	678	67,8	32,2
0,16	132	810	81,0	19,0
0,08	22	832	83,2	16,8

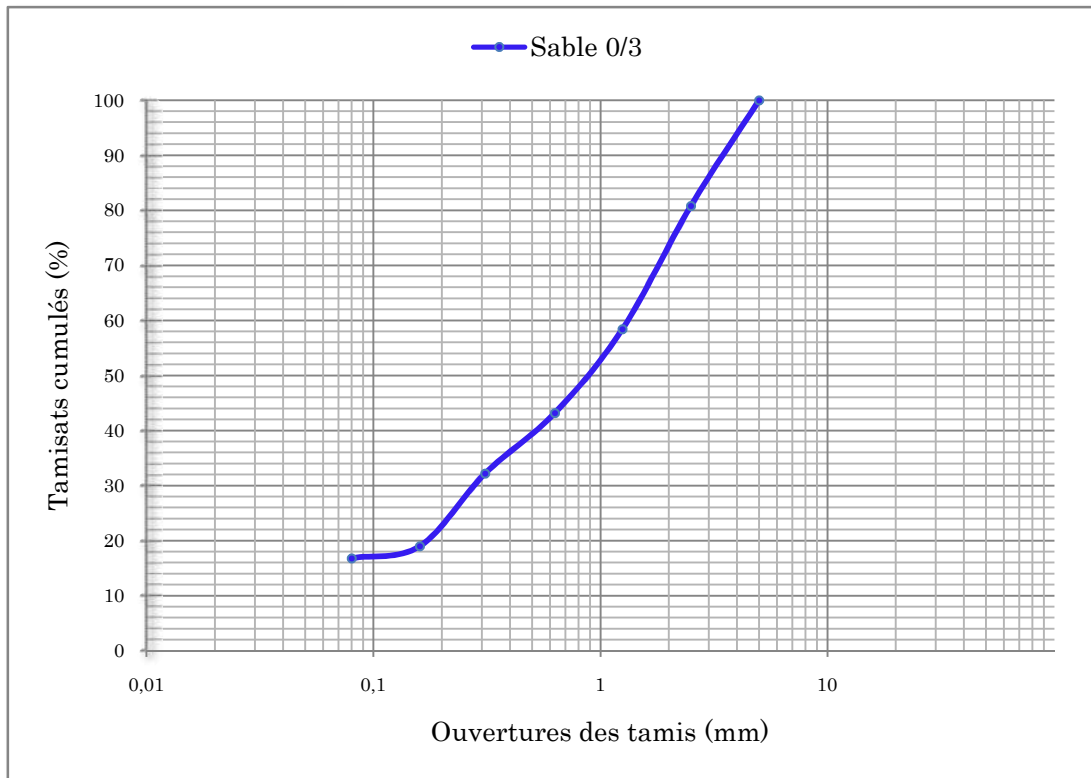


Figure (III-31) : Courbe granulométrique de sable 0/3.

### III-3-2-2 : Module de finesse : [13]

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme du refus cumulés exprimé en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm

Dans le cas du sable de SOMACOB :  $MF = (0 + 19,2 + 41,6 + 56,8 + 67,8 + 81)/100 = 2,66$ .

### III-3-2-3 : Fuseau granulométrique optimum :

Un bon sable est reconnu par sa courbe granulométrique qui doit se situer à l'intérieur d'un fuseau appelé fuseau granulométrique optimum (préférentiel) figure (III-32), et son module de finesse qui doit situer entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité.[13]

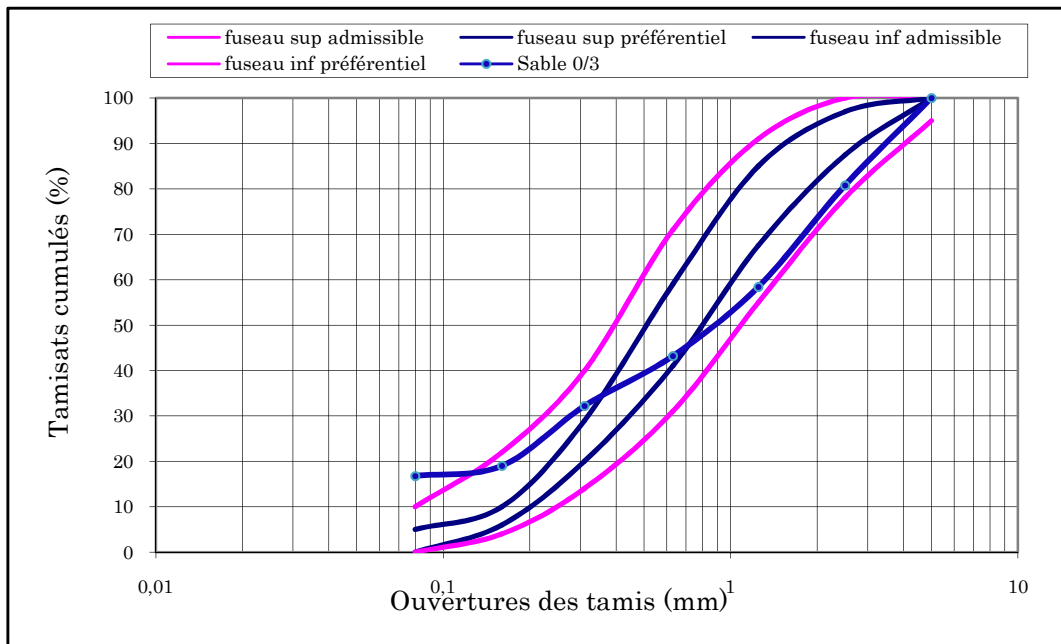


Figure (III-32) : Fuseau granulométrique optimum.

On remarque que la courbe granulométrique du sable 0/3 de SOMACOB ne rentre pas dans le fuseau préférentiel, et sort légèrement du fuseau admissible pour le point d'ouverture 0,08 mm avec un tamisât cumulé de 16,8 % qui dépasse le pourcentage fixé par les normes (10% NFP 18-301). Malgré que son  $M_f$  est compris entre 2,2 et 2,8 donc elle nécessite une correction granulométrique.

#### III-3-2-4 : Propreté des granulats : [37]

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérences entre les granulats et la pâte.

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons :

- propreté superficielle des granulats.
- par la teneur globale en fillers, qui est un paramètre important dans la composition des bétons, que le liant soit un ciment ou un bitume.
- En utilisant l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines qui permettent, selon un processus normalisé, de quantifier la notion de propreté d'un sable.
- Par l'essai au bleu de méthylène qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans une large mesure, de désordres et de non qualité dans les bétons.

### III-3-2-4-1 : Propreté superficielle : [NFP18- 591]

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieur à 2 mm.

#### III-3-2-4-1-1 : Principe de l'essai :

L'essai consiste à séparer par lavage sur le tamis de 0.5 mm, les particules inférieures à 0.5 mm contenues dans l'échantillon pour l'essai.

#### III-3-2-4-1-2 : Préparation de l'échantillon pour l'essai :

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NFP 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieur à 0.2 D, avec M en Kilogramme et D (plus grande dimension des grains) en millimètres.

#### III-3-2-4-1-3 : Appareillage :

- ❖ Tamis de 0.5 mm.
- ❖ Eventuellement un tamis de décharge.
- ❖ Balance compatible avec des masses à peser.
- ❖ Etuve réglable à 105 °C.

#### III-3-2-4-1-4 : Exécution de l'essai :

Préparer deux échantillons à partir de l'échantillon de laboratoire : l'un de masse  $M_{1h}$  pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai, l'autre de masse  $M_h$  pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à 0.5 mm.

#### III-3-2-4-1-5 : Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai :

- Peser les deux échantillons  $M_{1h}$  et  $M_h$ .
- Sécher le premier échantillon  $M_{1h}$  à l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante (deux pesées successives séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0.1 %)
- Le peser, soit  $M_{1S}$  sa masse sèche.

La masse sèche  $M_s$  de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$M_s = \frac{M_{1S}}{M_{1h}} M_h$$

### III-3-2-4-1-6 : Détermination de la masse sèche $m$ des éléments inférieurs à 0.5 mm :

- Effectuer l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l'essai.
- Tamiser sous l'eau l'échantillon  $M_h$  sur le tamis 0.5 mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.
- Récupérer le refus et le sécher à l'étuve à 105 °C jusqu'à une masse constante au gramme près. Le tamiser à nouveau sur le tamis 0.5 mm et le peser, soit  $m'$  sa masse sèche.

La masse sèche  $m$  des éléments inférieurs à 0.5 mm est égale à :  $m = M_s - m'$

### III-3-2-4-1-7 : Expression des résultats :

La propreté superficielle est donnée par le rapport :  $p = \frac{m}{M_s} 100$

### III-3-2-4-1-8 : Résultats obtenus :

Les résultats obtenus pour les différentes classes granulométriques produites par SOMACOB sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau (III-21) : Propreté des gravillons de SOMACOB.**

	3/8	8/15	15/25
Masse humide $M_{1h}$ (g)	2600	3500	5500
Masse humide $M_h$ (g)	2500	3600	5800
Masse sèche $M_{1s}$ (g)	2588	3486	5486
Masse sèche $M_s$ (g)	2488.46	3585.6	5785.2
Masse sèche $m'$ (g)	2398	3546	5748
Masse sèche $m$ (g)	90.46	39.6	37.23
Propreté superficielle	<b>3.63%</b>	<b>1.10 %</b>	<b>0.64 %</b>

D'après [NFP 18-540] les granulats de roches massives propres superficiellement, sont ceux qui ont un coefficient  $P < 3 \%$ . Ce qui est le cas pour les classes granulaires 8/15 et 15/25, par contre les gravillons 3/8 sont légèrement pollués ;  $P > 3\%$  donc ils nécessitent un lavage.

### III-3-2-4-2 : Equivalent de sable à 10% de fines : [NFP 18-597]

#### III-3-2-4-2-1 : But de l'essai :

L'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines, à pour but de mesurer la propreté d'un sable, cet essai est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur, lorsque celle-ci à l'état naturelle, est supérieur à 10 %. Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent.

La valeur de l'équivalent de sable à 10 % de fines (PS) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

Dans notre cas le pourcentage en fine de sable de SOMACOB est de l'ordre de 16,8%.

#### III-3-2-4-2-2 : Préparation de l'échantillon :

Le matériau (le sable) est sélectionné par quartage suivant la prescription de la norme NFP 18-553, dans un état légèrement humide afin de ne pas perdre de fines. Puis tamiser sur un tamis de 2 mm d'ouverture.

La masse de l'échantillon doit être telle que la fraction passant au tamis de 2 mm pèse 1500 g environ. Préparer quatre échantillons : un pour la détermination de la teneur en eau  $w$ , un pour la préparation du sable correcteur et la détermination de la teneur en fines et deux pour la préparation des échantillons pour essai.

##### 1) Détermination de la teneur en eau $W$ :

À partir du premier échantillon, on détermine la teneur en eau  $w$  exprimée en pourcentage sur deux prises de 100 g à 200 g par séchage à l'étuve à 105 °C.

$$W_1 = \frac{(M_{h1} - M_{s1})}{M_{s1}} \cdot 100$$

$$W_2 = \frac{(M_{h2} - M_{s2})}{M_{s2}} \cdot 100$$

$$W = \frac{(W_1 + W_2)}{2}$$

$M_{h1}$ ,  $M_{h2}$  : masse des deux échantillons humides.

$M_{s1}$ ,  $M_{s2}$  : masse des deux échantillons secs.



#### 2) Détermination de la teneur en fines et préparation du sable correcteur

Tamiser sous eau le deuxième échantillon de masse  $M_{h2}$  sur le tamis de 0,08 mm. Sécher et peser les éléments retenus sur ce tamis pour déterminer la teneur en fines  $f$ , exprimée en pourcentage, du sable ; ce refus servira de sable correcteur. Si  $m_s$  est la masse de ce refus à 0,08 mm après passage à l'étuve, on a :

$$f = 100 - \frac{m_s \cdot (100 + W)}{M_{h2}}$$

La masse  $m_{sc}$  de sable correcteur (refus sec à 0,08 mm) à ajouter pour la préparation d'un échantillon pour essai, exprimée en grammes, est donnée par la formule :

$$m_{sc} = 120 - \frac{1200}{f}$$

- ❖ Si  $f$  est inférieur à 11 %, il n'y a pas lieu d'utiliser de sable correcteur et l'essai s'effectue directement sur le troisième et le quatrième échantillon à leur teneur en fines d'origine. La masse de chaque échantillon pour essai, exprimée en grammes, est alors égale à :

$$M_{echan} = 120 \cdot \left(1 + \frac{W}{100}\right)$$

- ❖ Si  $f$  est supérieur à 11 % on prend une masse égale à :

$$M_{echan} = \frac{1200}{f} \cdot \left(1 + \frac{W}{100}\right)$$

Donc la masse de chaque échantillon pour essai, exprimée en grammes égale à :

$$M_{ech} = m_{sc} + \left[ \frac{1200}{f} \cdot \left(1 + \frac{W}{100}\right) \right]$$

#### III-3-2-4-2-3 : Conduit de l'essai :

Le sable étant préparé, on effectue les opérations dans l'ordre suivant :

- Remplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au trait repère inférieur.
- introduire la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$  de matériau, dans l'éprouvette posée verticalement.
- Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer dix minutes.
- Boucher les éprouvettes et les agiter en mouvement rectiligne horizontale.

- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles  $\pm$  1 cycle en 30 s  $\pm$  1 s à l'aide d'une machine automatisée.
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essai.
- Laver le sable pour faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale.
- Sortir le tube laveur lorsque le niveau du liquide (la solution) atteint le trait supérieur de l'éprouvette.
- Laisser reposer 20 mn en évitant toute vibration.
- Mesurer à vue les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ . La mesure de  $h_2$  n'est pas toujours aisée et l'équivalent de sable visuel ESV qui en résulte est donc entaché d'incertitude. Ceci conduit à procéder de manière plus précise, en utilisant la mesure au piston selon le mode opératoire suivant :
- Descendre lentement le piston dans le liquide à travers le floculats, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et l'immobiliser au contact du sable. Mesurer  $h'_2$ .

Ces opérations sont identiques pour les trois éprouvettes réalisées sur chaque échantillon, les résultats de : ESV et ESP seront la moyenne des trois résultats.

#### III-3-2-4-2-4 : Matériels utilisés :

1. Des éprouvettes avec deux traits repères, et leurs bouchons.
2. Entonnoir pour introduction du sable.
3. Bonbonne de 5L pour la solution lavante, un siphon et un tube souple de 1.5 m.
4. Tube laveur métallique plongeant.
5. Machine agitatrice.
6. Règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et floculats.
7. Piston à masse coulissante de 1Kg pour la mesure d'ESP

#### III-3-2-4-2-5 : Expression des résultats :

Le calcul de ESV et ESP sera la moyenne des résultats sur trois prises d'essais :

$$ESV = 100. (h_2 / h_1).$$

$$ESP = 100. (h'_2/h_1).$$

III-3-2-4-2-6 : Résultats obtenus :

Tableau (III-22) : Teneur en eau des échantillons

Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Mh1=165 (g)	Mh2=157.6 (g)	Mh3=178 (g)
Ms1= 157(g)	Ms2=149.9 (g)	Ms3=169.5 (g)
W1=5.09 %	W2=5.13 %	W3=5.01 %
W moy= 5.07 %		

Tableau (III-23) : Détermination de la teneur en fine et la masse du sable correcteur :

Masse humide du sable Mh (g)	1000
Masse sèche du sable Ms (g)	726
Teneur en fine du sable f (%)	23.71
Masse du sable correcteur Msc (g)	69.38
Masse de l'échantillon soumis à l'essai Méch(g)	122.5

Tableau (III-24) : Calcul de l'équivalent de sable.

éprouvette	H1(Cm)	H'2(Cm)	H2(Cm)	Résultats		Moyenne	
				ESP(%)	ESV(%)	ESP Moy	ESV Moy
1	11.6	8.8	9.5	75.86	81.89	77.40%	82.55%
2	10.3	8.5	8.6	82.52	83.49		
3	11.85	8.75	9.75	73.83	82.27		

### III-3-2-4-2-7 : Valeurs préconisées pour l'équivalent des sables naturels : [12]

**Tableau (III-25) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.**

ES a Vue	ES Piston	Nature et qualité du béton
ES < 65 %	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq ES < 75$	$60 < ES < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq ES \leq 85$	$70 < ES < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ES > 85	ES $\geq$ 80	Sable propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton.

D'après le tableau (III-25) on constate que notre sable est un sable d'une bonne propreté, avec un faible pourcentage de fines argileuses, donc ce sable convient pour des bétons de haute qualité.

### III-3-2-4-3 : Essai au bleu de méthylène : [NFP 94-068], [NFP 18-592]

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

#### III-3-2-4-3-1 : Principe de l'essai :

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre (test de la tache). Pour un simple contrôle de conformité, la quantité du bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

### III-3-2-4-3-2 : Prélèvement de l'échantillon :

- Prélever une masse  $m$  du matériau humide telle que  $m > 200D_{MAX}$  tel que :  
( $m$  en gramme,  $D_{max}$  en mm).  $m > 200 \times 3 = 600$  g.
- Quarter et homogénéiser la fraction 0/3 de manière à préparer trois prises d'essais de masses sensiblement égale de l'ordre de :
  - 30 à 60 grammes dans le cas des sols très argileux à argileux.
  - Supérieur à 60 grammes dans le cas des sols moyennement argileux à peu argileux.

La première prise d'essai de masse  $m_{h1}$  est introduite dans le récipient de 3000  $\text{Cm}^3$ , mise en suspension dans  $(500 \pm 10)$   $\text{Cm}^3$  d'eau déminéralisée, et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (vitesse de  $700 \pm 100$  tours par minute et positionnée à 5 mm environs du fond du récipient), au minimum durant 5 minutes et dans tous les cas jusqu'à la disparition visuelle de toute agglomérat de particules dans la suspension.

La deuxième prise d'essai de masse  $m_{h2}$  est utilisée pour déterminer la teneur en eau.

La troisième prise d'essai de masse  $m_{h3}$  est conservée dans l'éventualité où l'essai doit être renouvelé.

### III-3-2-4-3-3 : Appareillage et matériel d'essai :

L'appareillage nécessaire pour réaliser cet essai comporte :

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 10  $\text{cm}^3$ , 5  $\text{cm}^3$  et 2  $\text{cm}^3$  des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à  $\pm 1$   $\text{cm}^3$ .
- Un agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min. la forme et les dimensions des ailettes doivent permettre une mise en mouvement de la totalité des particules du sol.
- Un récipient cylindrique (en verre, plastique, métal inoxydable) d'une capacité minimale de 3 000  $\text{cm}^3$  et de diamètre intérieur  $(155 \pm 10)$  mm.
- Papier filtre blanc de masse surfacique  $(95 \pm 5)$   $\text{g/m}^2$ , d'épaisseur  $(0,2 \pm 0,02)$  mm, de vitesse de filtration  $(75 \pm 10)$  s pour 100 ml.
- Balance dont la portée est compatible avec les masses à peser.
- Chronomètre ou équivalent indiquant la seconde ; Etuve.

### III-3-2-4-3-4 : Mode opératoire :

La prise d'essai étant mise en suspension comme décrit précédemment, on procède au dosage du bleu de méthylène comme suit :

A l'aide de dispositif de dosage, on introduit dans la suspension 5 Cm<sup>3</sup> à 10 Cm<sup>3</sup> de solution de bleu (10 g /L) au bout d'une minute  $\pm$  10 seconds, on procède à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Poser le papier sur un support non absorbant.
- Prélever à l'aide d'une baguette de verre une goutte de suspension et de la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central du matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore.
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8mm à 12 mm de diamètre.

On procède à des injections successives par pas de 5 Cm<sup>3</sup> à 10 Cm<sup>3</sup> de solution de bleu jusqu'à ce que apparaisse une auréole périphérique dans la zone humide de la tache, l'essai est dit alors positif. A partir de ce moment on laisse se poursuivre l'absorption de bleu dans la solution et effectuer des taches de minute en minute sans ajouter de solution.

Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, on procède à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 Cm<sup>3</sup>, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation.

Dans tous les cas le volume v doit être supérieur à 10 Cm<sup>3</sup>, sinon l'essai doit être recommencé avec une nouvelle prise d'essai de masse supérieur.

### III-3-2-4-3-5 : Calcule et expression des résultats :

- La teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai :

$$W = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}}$$

- Masse sèche de la prise d'essai :

$$m_0 = \frac{m_{h1}}{1 - W}$$

- Masse de bleu introduit :

$$VB = \frac{B}{m_0} 100$$

Avec : B = V. 0,01

V : le volume de bleu nécessaire pour avoir un teste positif.

III-3-2-4-3-6 : Résultat obtenu pour le sable 0/3 de SOMACOB :

$$W = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}} = [(100 - 99.34) / 99.34] = 0.0066$$

$$m_0 = [100 / (1 + 0.0066)] = 99.34$$

Le volume de la solution de bleu qu'il faut pour obtenir un test positif est de l'ordre de : 25 ml. Figure (III-33).

$$B = 25 \times 0,01 = 0.25 \text{ g.}$$

Donc :

$$VBs = (0.3 / 99.34) \cdot 100 = 0.25 \text{ g.}$$

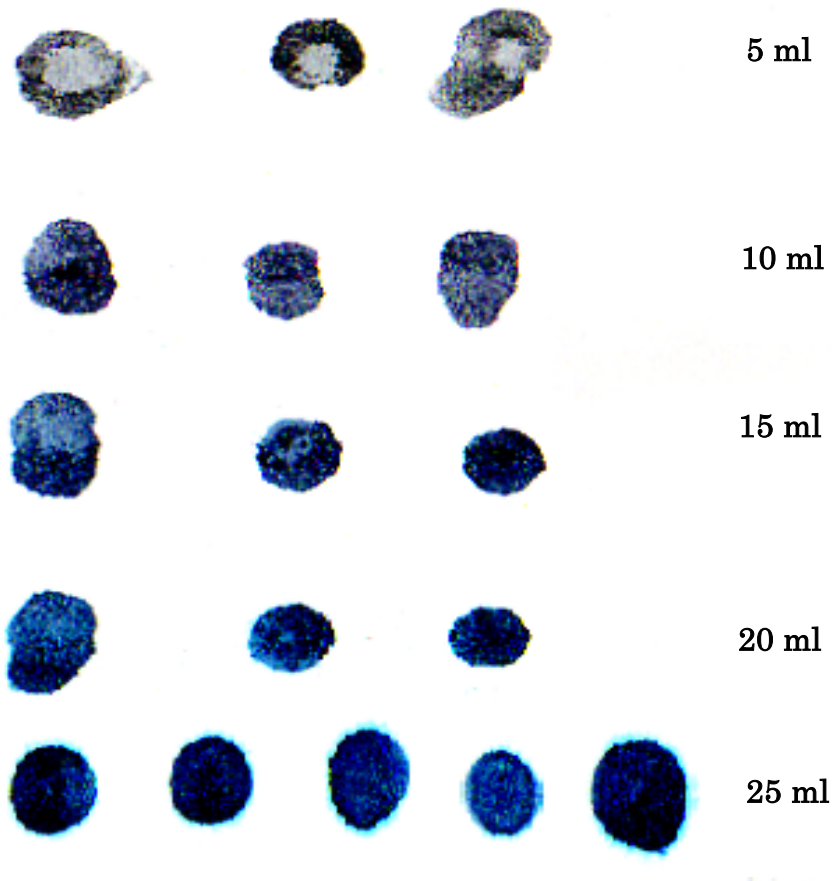


Figure (III-33) : Essai de la tache au bleu de méthylène.

$VB = 0.25 \text{ g} < 1$  : donc ce sable a une très faible proportion de fines argileuses

### III-4 : Influence des fines sur les propriétés des mortiers :

Les matériaux granulés de carrière plus spécialement les sables de concassage sont reconnus par leurs teneurs en fines plus élevées, généralement supérieures à 15 %. Dans le but d'étudier l'influence de ces derniers sur les propriétés des mortiers (résistances, retraits) et de voir la teneur optimale, cinq séries d'éprouvettes (SSF, S5%F, S10%F, S15%F, S20%F) de mortiers ont été réalisées pour chaque âge de mesure (2, 7, 14, 28 jours) pour les résistances à la flexion et à la compression, et six autres pour les mesures de variations linéaires (retraits). Tel que

**SSF** : sable sans fines, **S5%F** : Sable à 5% de fines, **S10%F** : Sable à 10% de fines, **S15%F** : Sable à 15% de fines, **S20%F** : Sable à 20% de fines.

D'une série à une autre nous avons varié la teneur en fines (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) de la masse de sable.

#### III-4-1 : L'influence des fines sur les propriétés mécaniques des mortiers :

##### III-4-1-1 : Mesure des résistances à la compression et à la flexion : [EN 169-1]

###### III-4-1-1-1 : Objectifs de l'essai :

Il s'agit de définir les qualités de résistance d'un mortier ; c'est-à-dire déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des mortiers en fonction du pourcentage des fines.

###### III-4-1-1-2 : Principe de l'essai :

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans notre cas la seule variable est le pourcentage des fines ; la résistance des mortiers est alors considérée comme significative par rapport au pourcentage des fines.

###### III-4-1-1-3 : Equipements nécessaires :

L'ensemble des équipements nécessaire pour cet essai est :

- Une salle maintenue à une température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  et à une humidité relative supérieure à 50 %.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 03 éprouvettes prismatiques de section carrée  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$  et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés : éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$ ).
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de  $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$  à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.



- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de  $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$ . La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la figure (III-34).
- Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN avec une vitesse de mise en charge de  $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ . Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure (III-35).

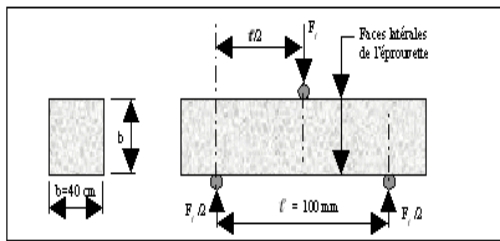


Figure (III-34) : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

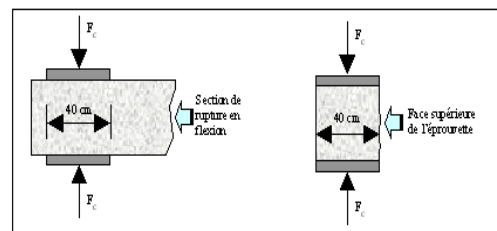


Figure (III-35) : Dispositif pour l'essai de rupture à la compression

#### III-4-1-1-4 : Conduite de l'essai :

La norme(EN196-1) décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal qui se compose en masse de trois parties de sable, une partie de ciment et d'une demi partie d'eau ( $E/C=0.5$ ). On remplit un moule  $4 \times 4 \times 16$ . Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. En suite le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démolies et entreposées dans de l'eau à  $20 \text{ C}^\circ \pm 2 \text{ C}^\circ$  jusqu'au moment de l'essai de rupture.

#### III-4-1-1-5 : Matériaux de base d'expérimentation :

**Ciment** : un seul type de ciment est utilisé, pour les essais de rupture par flexion et compression, dénommé CPJ 45.

**Eau de gâchage** : pour la confection des mortiers, nous avons utilisé l'eau du robinet.

**Sable** : le sable utilisé provient de la carrière de SOMACOB AKBOU, de granulométrie 0/3 préalablement lavé et dépourvu des éléments inférieurs à  $80 \mu\text{m}$  et au quel on rajoute différents pourcentages de fines (sable reconstitué : sable + fines).

**Fines** : les fines utilisées composées d'éléments fins passant à un tamis de mailles de  $80 \mu\text{m}$ .

### III-4-1-1-6 : Formulation du mortier :

D'après la norme (EN 196-1), les proportions nécessaires pour la préparation de trois éprouvettes de 4 x 4 x 16 du mortier normal sont les suivantes :

- Sable reconstitué (sable + fines) = 1350 g  $\pm$  5g.
- Ciment = 450g  $\pm$  2g.
- Eau = 225g  $\pm$  1g.

Donc les proportions des fines selon les pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) sont respectivement : 0g, 67.5g, 135g, 202.5g, 270g.

Les différentes proportions de matériaux de base d'expérimentation sont récapitulées dans le tableau suivant :

**Tableau (III-26) : Différentes proportions des matériaux d'expérimentation.**

série	Poids de sable (g)	Poids des fines (g)	Poids de ciment (g)	Poids d'eau (g)
MSSF	1350	0	450	225
MS5%	1282	67.5	450	225
MS10%	1215	135	450	225
MS15%	1147.5	202.5	450	225
MS20%	1080	270	450	225

### III-4-1-1-7 : Préparation du mortier :

Avant d'être utilisé pour les différents essais de résistance ou de retrait, on mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 seconds de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 secondes suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30 secondes supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 secondes. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

La totalité de ces opérations de malaxage sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau (III-27) : Opérations de malaxage d'un mortier normal.

Opérations	Introduction De l'eau	Introduction du ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 S	30 S	30 S	15 S	1min 15 S	60 S
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse Rapide	Arrêt		Vitesse rapide

III-4-1-2 : Essai de rupture par flexion :

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (III-34).

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f \cdot l / 4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions  $b$  et  $l$  (mm), Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f (MPa) = 0.234 \cdot F_f (N).$$

III-4-1-2-1 : Résultats obtenus :

L'ensemble des résultats ( $F_f$ ,  $R_f$ ) obtenus pour les différentes séries et pour les différents âges de mesure sont récapitulés dans les tableaux de l'Annexe (III-2), et sont représentés sur la figure suivante :

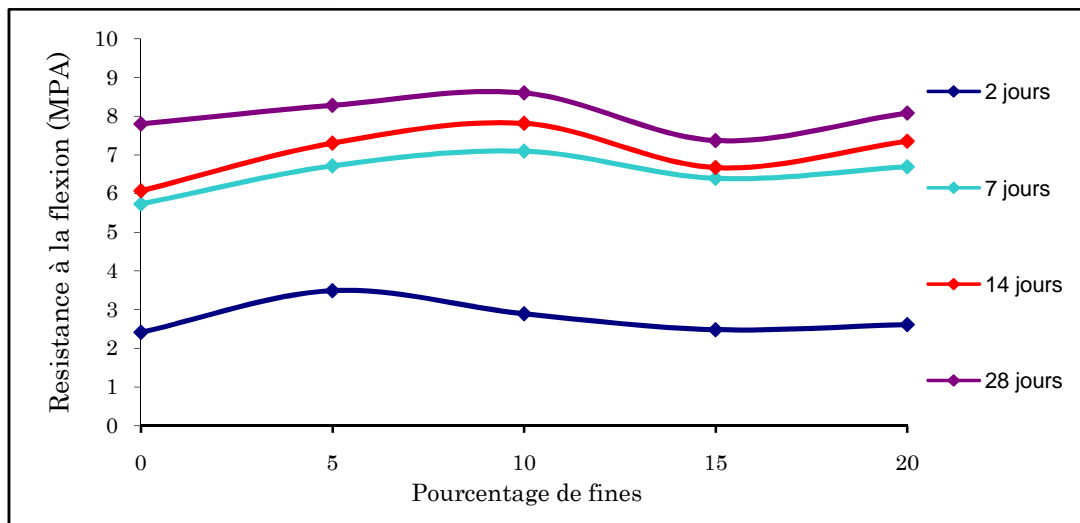


Figure (III-36) : Résistances en flexion des mortiers en fonction de la teneur en fines.

#### III-4-1-3 : Essai de rupture par compression :

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiquée sur la figure (III-35). Si  $F_c$  est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si  $F_c$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$$R_c(MPA) = \frac{F_c(N)}{1600}$$

#### III-4-1-3-1 : Résultats obtenus :

Les résultats ( $F_c$ ,  $R_c$ ) obtenus pour chacun des 6 demi- prismes pour les différents âges de mesure sont récapitulés dans les tableaux de l'Annexe (III-2) et sont illustrées dans la figure suivante :

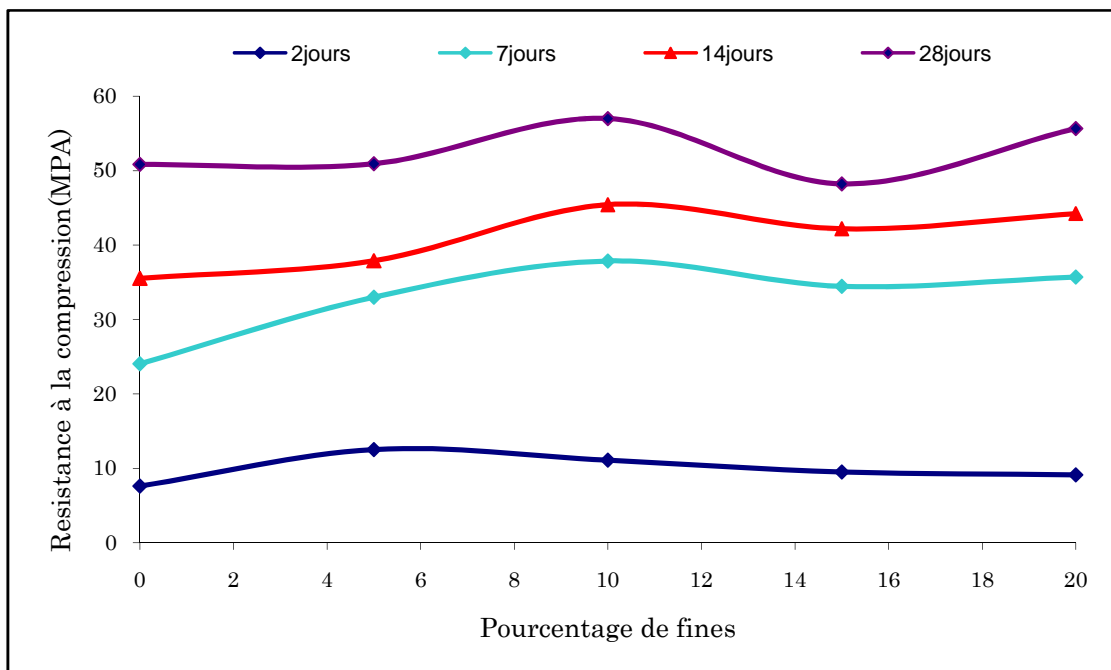


Figure (III-37) : Résistances en compression des mortiers en fonction de la teneur en fines.

### III-4-1-4 : Discussion des résultats :

On constate d'après les figures (III-36),(III-37) que les propriétés mécaniques (résistance à la flexion et à la compression) des mortiers évoluant en fonction du temps (l'âge de mesure) pour atteindre une valeur à 28 jours de 8,6 MPA à la flexion et 57 MPA à la compression , et les courbes présentant des allures similaires pour les différents âges de mesure.

Tout en notant une augmentation de résistance jusqu' à des optimums de 10% de fines pour les âges de mesure 7, 14, 28 jours, et de 5% pour 2 jours, ce ci peut s'expliquer par le fait que les fines comblent les vides existants entre les grains de sable et la pâte de ciment ce qui rend le mortier plus compacte. Une diminution rapide de 10 à 15 % puis une augmentation lente jusque à 20% de fines. Ce ci peut s'expliquer par le fait que les fines ont une surface spécifique très grande, ce qui forme une microstructure colloïdale qui retient l'eau jusqu'à la valeur de 10 %. Au-delà de cette valeur les fines joueront plutôt un rôle de fluidifiant [29], et devient défavorable car il accroît la demande d'eau, donc une chute dans les résistances.

### III-4-2 : Influence de la teneur en fines sur les retraits des mortiers :

La présente expérimentation vise à montrer l'effet d'un seul paramètre qui est le : pourcentage de fines dans les sables concassés, sur les retraits des mortiers. L'expérience porte sur des mortiers dont tous les paramètres sont fixés sauf le pourcentage de fines qu'on fait varier d'une série à une autre de 0 à 20 % avec un pas de 5%. Et une série de sable normalisé (SN) comme témoin.

#### III-4-2-1 : Objectif de l'essai :

Il s'agit d'étudier la variation de longueur des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 du mortier de différentes séries (SN,SSF, S5%F, S10%F, S15%F, S20%F) conservées à l'air libre en fonction du temps et de pourcentage de fines (0%,5%, 10%,15%, 20%).

#### III-4-2-2 : Principe de l'essai : [NFP 15-433] ;[37]

On compare, à différents temps  $t$ , la variation de longueur d'une éprouvette 4 x 4 x 16 cm, par rapport à sa longueur initiale à un temps  $t_0$  pris pour origine.

### III-4-2-3 : Equipement nécessaire :

- Une salle maintenue à une température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à  $50\% \pm 5\%$ .
- . Un malaxeur normalisé
- Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$  sont donc munies à leurs deux extrémités de plots comme indiqués sur la figure (III-38).
- Un déformètre tel que celui schématisé sur la figure ci-dessous équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à  $0,005\text{ mm}$ . Une tige de  $160\text{ mm}$  de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

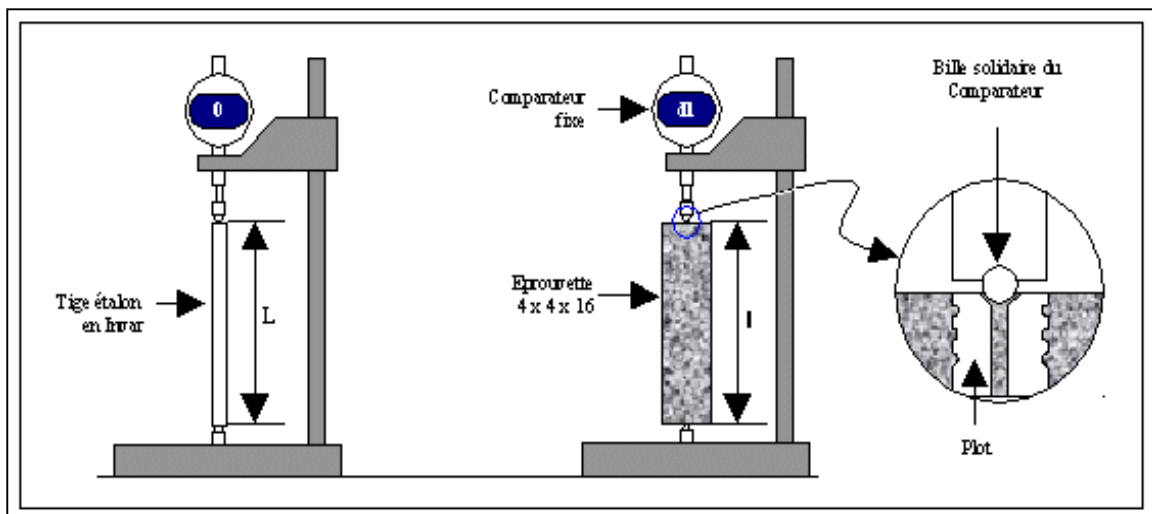


Figure (III-38) : Dispositif pour la mesure du retrait.

### III-4-2-4 : Conduite de l'essai :

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur  $L = 160\text{ mm}$ . Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$  ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré :

$$l = L + dl(t)$$

### Chapitre III : Etat actuel du système d'exploitation utilisé par la SOMACOB

Soit  $l(t_0)$  la longueur de l'éprouvette au temps  $t_0$  choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps  $t$  sera :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par  $\varepsilon$  et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$  est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air,  $\Delta l(t)$  est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau,  $\Delta l(t)$  peut être positif : il y a alors gonflement.

#### III-4-2-5 : Résultats et discussion :

Les résultats obtenus des différentes séries en fonction du temps (2, 7, 14, 21, 28, 60 jours) sont présentés dans l'Annexe (III-3), et leurs moyennes sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau (III-28) : Retrait des mortiers en fonction de la teneur en fines.**

Séries	$\Delta L$ en fonction de l'âge de mesure ( $10^{-6}$ mm)					
	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	2 mois
SN	24	69.66	85	93	107	128.33
SSF	27.66	67.33	80	87.33	96.33	106.66
S5%F	27.66	62.33	75	90.33	98	104.33
S10%F	23	62	72	82.33	94.33	103.66
S15%F	26.66	70.33	79.33	95	106.66	126.33
S20%F	22.66	72	89.33	96	108.66	118

L'ensemble des résultats du tableau (III-28) est représenté sur les figures ci-dessous :

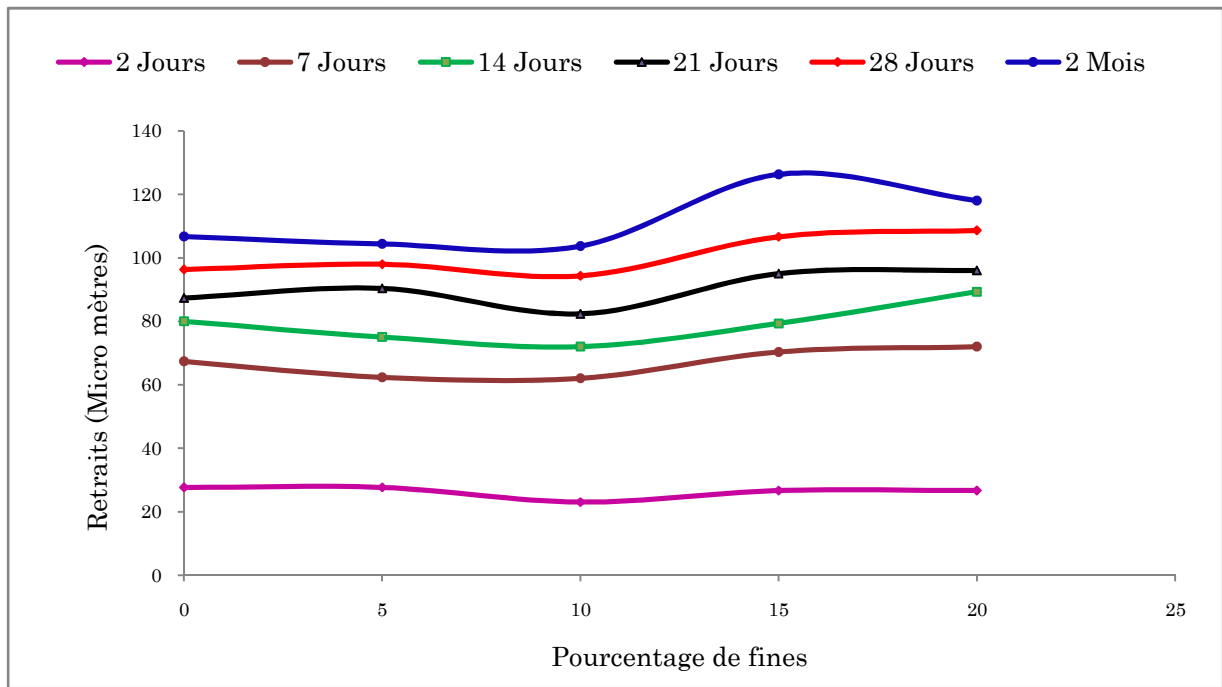


Figure (III-38) : Evolution des retraits en fonction de la teneur en fines.

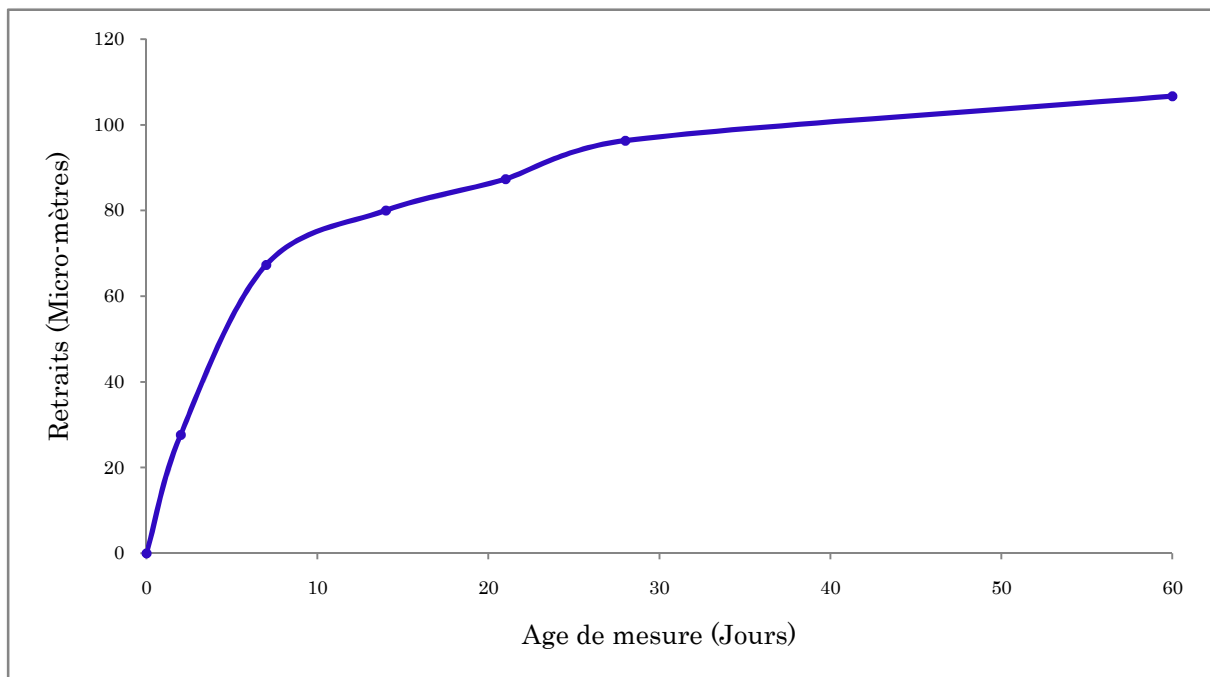


Figure (III-39) : Evolution des retraits de mortier normal en fonction du temps.

Le retrait est provoqué par un assèchement interne de l'éprouvette : étant consommée pour hydratation, la quantité d'eau libre diminue, finissant par assécher les plus petits capillaires de la pâte ; des ménisques apparaissent dans ces capillaires y induisant des contraintes de traction qui provoquent le retrait. [37]



D'après la figure (III-38) nous constatons que les courbes ont un comportement identique, et que les retraits augmentent en fonction du temps (l'âge de mesure 7, 14, 21, 28, 60 jours), et diminuent avec le pourcentage de fines tout en passant par un minimum pour 10 % de fines. Au delà de ce pourcentage les résultats s'inversent et augmentent rapidement pour tous les âges de mesure. Ce ci peut s'expliquer par le fait que les éprouvettes confectionnées avec des mortiers qui ont moins de 10 % de fines ont un nombre important de pores capillaires. Donc l'eau libre a plus d'avantage de s'évaporer (chemin court pour trouver la surface). Tout en notant que le volume des vides diminue en augmentant le pourcentage de fines. Tandis que pour les éprouvettes confectionnées avec un pourcentage de fines supérieures à 10%, l'augmentation de retrait est due au volume important de fines qui est responsable de l'absorption d'une grande quantité d'eau de gâchage par leurs grandes surfaces spécifiques qui sera libérer après durcissement de l'éprouvette donc une perte de poids qui correspond à une diminution de volume.

La courbe représentée sur la figure (III-39) montre l'évolution des retraits de mortier normal en fonction du temps. Une comparaison entre les valeurs des retraits obtenues pour le mortier normal et les autres séries (SSF, S5%F, S10%F, S15%F, S 20%F), montre que les retraits de la série (S10%F) confectionnée avec 10% de fines sont très voisins, de celle du mortier normal (témoin) pour tous les âges de mesure.

Par ailleurs on notera que le retrait minimal est obtenu à 10% de fines qui en accord avec les résultats obtenues des résistances à la compression et à la flexion.

En conclusion d'après les résultats des résistances à la compression et à la flexion et ceux des retraits des mortiers confectionnés avec différents pourcentages de fines on constate que le pourcentage optimal de fines dans les sables de concassage est de 10 %.

### III-5 : Conclusion :

Les granulats participent à la résistance mécanique et la durabilité des ouvrages de Génie civil par la compacité qu'ils confèrent à celles-ci. De ce point de vue, les caractéristiques géométriques des granulats jouent un rôle essentiel, mais les caractéristiques minéralogiques, physiques et mécaniques sont tout aussi importantes par l'influence nuisible qu'elles peuvent exercer sur la résistance au vieillissement de ces ouvrages. L'utilisateur doit donc choisir les granulats sur la base de spécifications bien fondées, à la fois techniquement et économiquement.

D'après le travail effectué dans ce chapitre sur l'état actuel de système d'exploitation et la caractérisation des granulats, de SOMACOB on conclut ce qui suit :

- Les résultats d'analyse pétrographique et de la diffraction à rayons X ont montré que La roche exploitée par la SOMACOB pour la production des graviers et du sable de concassage est une roche Calcaire à teneur en  $\text{CaCO}_3$  élevé pour les trois échantillons A, B, C.
- L'ensemble des classes granulaires (15/25, 8/15, 3/8, 0/3) produites par SOMACOB répond aux exigences des normes sur :
  - la propreté superficielle des granulats,
  - la propreté des sables de concassage (ESP, ESV, Valeur au Bleu)
  - la résistance mécanique mesurée par essai LOS Angeles.
- L'étude de l'influence des fines calcaires sur la résistance à la flexion et à la compression ainsi aux retraites mis en évidence un pourcentage optimal de 10% en cette substance.
- L'analyse granulométrique des gravillons 15/25, 8/15, 3/8, 0/3 montre des distributions continues des grains, néanmoins le sable 0/3 sort légèrement de fuseau réglementaire avec un pourcentage en fines de 16.8 % ce qui nous amènes à développer les chapitres suivants sur la « Modélisation de la station du traitement des granulats par les plans d'expériences »

## Chapitre IV :

**Théorie sur la méthode des plans  
d'expériences.**

**(Planification des expériences)**

**Chapitre IV :****Théorie sur les plans d'expériences.****IV-1 : Introduction :**

Depuis bien longtemps, l'observation et l'expérimentation sont deux outils essentiels de l'avancement des sciences.

Dans certaines disciplines, telles la médecine, l'économie, la métrologie et les sciences de la terre il n'est pas ou il n'est guère possible de provoquer la réalisation des phénomènes que l'on désire étudier. La vérification des hypothèses émises sous forme d'enquêtes.

Dans d'autres disciplines ou, au contraire, les phénomènes étudiés peuvent être provoqués assez facilement, telles la biologie, la physique et la chimie, le contrôle des hypothèses se fera par l'expérience ou l'expérimentation.

L'expérience est un des moyens privilégiés d'acquérir ou d'améliorer ces connaissances, mais l'expérimentation elle même doit être optimisée car son objectif est d'obtenir les informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais. [41].

La méthode intuitive n'est pas toujours la meilleure. Elle consiste généralement à fixer le niveau de toutes les variables sauf une et de mesurer la réponse pour plusieurs valeurs de la variable mobile. Si plusieurs paramètres doivent être étudiés, il faut répéter cette technique pour chaque paramètre. Ce nombre d'expériences représente un travail gigantesque et irréalisable. Pour résoudre ce problème, il faut adopter une démarche rigoureuse dans la réalisation des essais. La méthode des plans d'expériences (plusieurs facteurs à des niveaux différents à la fois pour chaque essai) repose sur des bases statistiques. Cette méthode conduit à établir un plan comportant le minimum d'expériences, tout en apportant le maximum de précision dans les résultats. [42]

Les principaux avantages de cette méthode sont : [43]

- Une diminution notable du nombre d'essai.
- Une possibilité d'augmenter le nombre de facteurs étudiés ou leurs niveaux.
- Une prise en compte d'éventuelles interactions entre facteurs.
- Une recherche de la réponse optimale.
- Une modélisation simple des résultats.

- Une bonne précision dans la détermination des résultats.

Il est important de retenir que le modèle expérimental du phénomène étudié n'est valide que dans le domaine des variations choisies des facteurs.

## IV-2 : Facteurs et réponses :

Un facteur est constitué d'une série d'éléments (différentes doses d'un même produit, différents réglages), qui peuvent être comparées au cours d'une même expérience ou d'un ensemble d'expériences. Un facteur est qualitatif quand les différents éléments qui le composent ne peuvent pas être classés à priori selon un ordre logique. Un facteur est au contraire quantitatif quand ces éléments se classent tous naturellement selon un ordre logique. Les différents éléments individuels qui constituent un même facteur sont appelés modalités, indifféremment pour les facteurs qualitatifs et les facteurs quantitatifs. On peut éventuellement introduire une distinction entre ces deux situations, en utilisant d'une part le terme variante, pour les facteurs qualitatifs, d'autre part le terme niveau, pour les facteurs quantitatifs. [41]

En général un facteur varie entre deux bornes, la borne inférieure que l'on note (-1), et la borne supérieure que l'on note (+1). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur. Les grandeurs qui nous intéressent et qui sont mesurées à chaque expérience sont appelées réponses. L'ensemble est considéré comme une boîte noire fig. (IV-1).

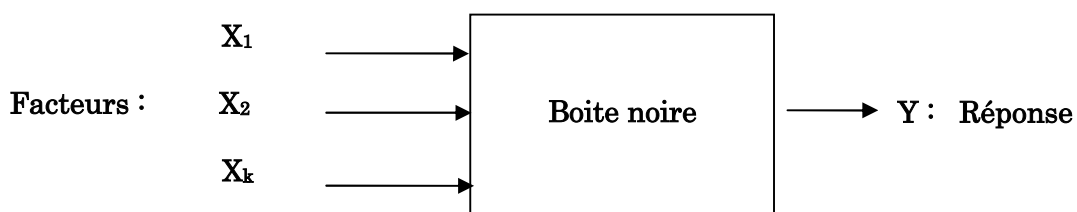


Figure (IV-1) : formulation du problème expérimental.

## IV-3 : Surface de réponse : [44]

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs on se donne, a priori, une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique ou le modèle postulé. La forme la plus générale de ce modèle est :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{IV-1})$$

Tel que :

$y$  : la grandeur d'intérêt (réponse) elle est mesurée au cours de l'expérimentation.

$X_i$  : représente les niveaux des différents facteurs. Ces valeurs sont parfaitement connues puisque elles sont définies au paravent.

L'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée surface de réponse (Représentation géométrique).

Pour un nombre de facteurs supérieur à trois nous adoptons une présentation en forme de tableau ou matrice d'expérimentation.

#### IV-4 : Les étapes chronologiques des plans d'expériences :

Le plan d'expériences, dans sa démarche d'acquisition de connaissance, vise à identifier, un modèle reliant les réponses aux facteurs, les étapes à suivre sont :

##### 1- formalisation du problème : [45]

Formaliser le problème expérimental, c'est décrire d'une part les objectifs du plan d'expériences, d'autre part les entrées et les sorties de la boîte noire symbolisant le phénomène. Il s'agit principalement de :

- Décrire le ou les objectifs de l'étude.
- Définir les facteurs les plus influents du processus.
- Définir le domaine expérimental dans lequel ces facteurs peuvent varier, les niveaux bas et haut de chaque facteur.
- Définir le (les) réponses à mesurer à l'issue de chaque essai.
- Préciser les connaissances disponibles sur le phénomène étudié.
- Choisir un modèle ou fonction mathématique susceptible d'approcher le phénomène étudié.

##### 2- Construction du plan (planification) :

A cette étape nous supposons valider le nombre nécessaire d'essai pour l'étude des paramètres détaillés dans la formalisation. Cette étape a pour but d'élaborer la

liste des essais expérimentaux et de fixer l'ordre de leurs réalisations. La liste des essais s'appelle plan d'expériences. Un plan bien ajusté à une étude nécessite une réflexion approfondie qui balise la préparation de l'expérimentation et qui prépare l'interprétation des résultats [44]

### 3- Expérimentation :

Les essais (l'expérimentation) consistent à mesurer la réponse pour toutes les combinaisons des facteurs indiqués dans la matrice d'essai [45], la réalisation des essais exige certaines précautions aussi bien d'ordre statique, que d'ordre pratique afin de minimiser les erreurs expérimentales. [44]

### 4- Analyse des résultats :

L'analyse des résultats consiste à ajuster un modèle de régression expliquant les influences.

### 5- Optimisation de la réponse :

L'objectif de cette étape est de faire la synthèse des connaissances acquises, de valider les conclusions et de décider des actions à entreprendre [45]. L'optimisation consiste à trouver les conditions expérimentales correspondant à un optimum de la réponse étudiée. Elle doit permettre d'affirmer avec un risque d'erreur raisonnable, qu'il n'existe pas d'autres conditions conduisant à une meilleure valeur de la réponse dans le domaine étudié. [46]

## IV- 5 : Modélisation de l'expérimentation : [41]

Les facteurs influents  $X_1, X_2, \dots, X_k$  étant connus, nous cherchons à représenter par une équation les variations d'une réponse  $Y$  en fonction de ces facteurs. L'intérêt d'une telle équation est, entre autre, de :

- Permettre de prévoir la réponse dans les conditions opératoires données.
- Servir de point de départ à une étude d'optimisation.

La réponse  $Y$  est liée aux variables opératoires par un modèle réel, qui peut être approché par un modèle linéaire de type :

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_i x_j + \dots + \alpha_q x_q \quad (\text{IV-2})$$

$X_j$  : peut représenter :

- l'un des facteurs.
- une fonction de ces facteurs.
- une interaction entre ces facteurs.

Les coefficients  $\alpha_j$  sont estimés par la méthode des moindres carrés :

$$\varepsilon(y_i) = \alpha_0 + \alpha_1 x_{i1} + \dots + \alpha_2 x_{i2} + \dots + \alpha_j x_{ij} + \dots + \alpha_q x_{iq} \quad (IV-3)$$

Lorsque les coefficients inconnus  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q$  sont estimés par  $a_1, a_2, \dots, a_q$ , nous pouvons calculer la réponse au point  $i$  par :

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_{i1} + \dots + a_2 x_{i2} + \dots + a_j x_{ij} + \dots + a_q x_{iq} \quad (IV-4)$$

La valeur ainsi obtenue diffère du résultat expérimental de la quantité  $e_i$  (de même que les  $a_j$  sont des estimations des  $\alpha_j$ , les  $e_i$  sont des estimations de  $\varepsilon_i$ ).

$$y_i = \hat{y}_i + e_i \quad (IV-5)$$

Ecrivons (IV-5) quelque soit  $i$ , nous obtenons le système d'équations linéaires suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = a_0 + a_1 x_{11} + a_2 x_{12} + \dots + a_j x_{1j} + \dots + a_q x_{1q} + e_1 \\ \dots \\ y_i = a_0 + a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + \dots + a_j x_{ij} + \dots + a_q x_{iq} + e_i \\ \dots \\ y_N = a_0 + a_1 x_{N1} + a_2 x_{N2} + \dots + a_j x_{Nj} + \dots + a_q x_{Nq} + e_N \end{array} \right. \quad (IV-6)$$

Avec :

$N > q+1$  ;  $N$  : nombre d'équations ;  $q$  : nombre de coefficients.



Nous cherchons les valeurs des  $a_j$  qui minimisent la somme des carrés des écarts  $\sum_1^N e_i^2$ . Concrètement nous cherchons le modèle linéaire qui passe au plus près de l'ensemble des points expérimentaux.

#### IV-6 : Forme matricielle des modèles mathématique : [41]

Adoptons la notation matricielle qui simplifie grandement l'écriture. Pour nous définissons :

- Le vecteur des réponses de dimension  $N \times 1$  :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (\text{IV-7})$$

- La matrice de la régression de dimension  $N \times (q+1)$  :

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{iq} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N1} & \dots & x_{Nj} & \dots & x_{Nq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-8})$$

La première colonne correspond à la constante du modèle :  $a_0$

- Le vecteur des coefficients de dimension  $(q+1) \times 1$  :

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ \dots \\ a_j \\ \dots \\ a_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV-9})$$

- Le vecteur des écarts de dimension  $N \times 1$  :

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_j \\ \dots \\ e_N \end{bmatrix} \quad (\text{IV-10})$$

Le système à résoudre s'écrit :  $Y = XA + E$  (IV-11)

Le critère des moindres carrés  $E'E =$  valeur minimale.

$$E'E = (Y - XA)(Y - XA) \quad (\text{IV-12})$$

$E'E$  Sera minimale par rapport aux coefficients si :  $\frac{\delta E'E}{\delta A} = 0$  (IV-13)

La valeur de A qui minimise  $E'E$  doit vérifier :  $X'XA = X'Y$  (IV-14)

D'où :  $A = (X'X)^{-1} X'Y$  (IV-15)

Nous obtenons Les estimations  $a_j$  des coefficients par identification avec les éléments du produit  $(X'X)^{-1} X'Y$

#### IV-7 : Détermination de l'équation du modèle :

##### IV-7-1 : Plan optimal à deux niveaux (plan $2^k$ ) :

Lors de la planification des expériences, les conditions d'essai constituent les valeurs d'un nombre fixé de niveaux. Si l'on conduit les expériences sur deux niveaux (niveaux supérieur  $Z_{\max}$  et niveau inférieur  $Z_{\min}$ ) et si l'on réalise au cours d'une expérience toute la combinaison possible de k facteurs, l'organisation des essais selon un tel plan porte le nom plans factoriels complets à deux niveaux ou plan  $2^k$ .

Les niveaux des facteurs  $Z_j$  constituent alors les frontières du domaine étudié. De façon générale, on a pour tout facteur  $Z_j$  :

$$Z_j^0 = \frac{Z_j^{\max} + Z_j^{\min}}{2} \quad (\text{IV-16})$$

$$\Delta Z_j = \frac{Z_j^{\max} - Z_j^{\min}}{2} \quad (\text{IV-17})$$

Le point de coordonnées  $Z_1^0, Z_2^0, \dots, Z_K^0$  est dénommé centre du plan ou le niveau fondamental ;  $\Delta Z_j$  est l'unité intervalle de variation suivant l'axe des  $Z_j$ .

#### IV-7-1-1: Variables centrées réduites : [43]

Le fait d'attribuer la valeur (-1) au niveau bas (inférieur) du facteur et (+1) au niveau haut (supérieur) revient à réaliser un changement d'unité de mesure et un changement d'origine qui permettent de traiter tous les facteurs de la même manière. Les variables sont alors dites centrées réduites ou codées.

L'utilisation des variables centrées réduites simplifie considérablement la théorie des plans factoriels à deux niveaux.

La formule qui permet de passer de variables courantes aux variables centrées réduites

est la suivante : 
$$X_j = \frac{Z_j - Z_j^0}{\Delta Z_j} ; j= 1,2,\dots,k \quad (\text{IV-18})$$

$X_j$  : la variable centrée réduite mesurée avec le pas comme unité.

$Z_j$  : la variable courante mesurée en unités habituelles.

$Z_j^0$  : est la valeur (mesuré en unités habituelles) que prend la véritable courante au milieu de domaine c'est-à-dire au point choisi comme origine pour la variable centrée réduite.

Le nombre N des combinaisons possibles (nombre d'essais dans la matrice d'expériences) sur les deux niveaux est égale à  $2^K$  ;  $N = 2^K$

K : le nombre de facteurs indépendants.

Le plan d'exécution des expériences (matrice de planification) pour les plans  $2^K$  ; si en prenant  $k=3$  s'écrit sous la forme du tableau qui suit :

**Tableau (IV-1) : Matrice de planification des expériences.**

Facteurs à dimensions naturelles				Valeur fictive	Valeurs centrées réduites			Réponse
N°	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> min	+1	-1	-1	-1	Y1
2	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> min	+1	+1	-1	-1	Y2
3	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> min	+1	-1	+1	-1	Y3
4	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> min	+1	+1	+1	-1	Y4
5	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> max	+1	-1	-1	+1	Y5
6	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> min	Z <sub>3</sub> max	+1	+1	-1	+1	Y6
7	Z <sub>1</sub> min	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> max	+1	-1	+1	+1	Y7
8	Z <sub>1</sub> max	Z <sub>2</sub> max	Z <sub>3</sub> max	+1	+1	+1	+1	Y8

**IV-7-1-2 : Calcul des effets des facteurs :**

L'effet de chaque facteur et d'interaction entre facteurs, est calculé à partir de la matrice de calcul des effets.

**Tableau (IV-2) : Matrice de calcul des effets à deux facteurs.**

N ° Essai	Réponse au centre	Effet de Facteur 1	Effet de facteur 2	Effet d'interaction entre 1 et 2	Réponse
1	+1	-1	-1	+1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	Y3
4	+1	+1	+1	+1	Y4

L'effet de facteur 1 est déterminé en multipliant chaque réponse  $y_i$  par la valeur du signe figurant dans la colonne du facteur 1 :

$$a_1 = \frac{1}{4}[-y_1 + y_2 - y_3 + y_4] \quad (\text{IV-19})$$

On a de même, l'effet de facteur 2 :

$$a_2 = \frac{1}{4}[-y_1 - y_2 + y_3 + y_4] \quad (\text{IV-20})$$

L'interaction  $a_{12}$  est donnée par la même technique de calcul mais en employant la colonne des signes de l'interaction :

$$a_{12} = \frac{1}{4}[+y_1 - y_2 - y_3 + y_4] \quad (\text{IV-21})$$

Ajoutons  $a_0$  la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude :

$$a_0 = \frac{1}{4}[+y_1 + y_2 + y_3 + y_4] \quad (\text{IV-22})$$

#### IV-7-2: Plans factoriels à trois niveaux (plan $3^K$ ) : [47]

Ce plan est approprié à l'étude des modèles du 2<sup>ème</sup> degré et est noté : plan  $3^K$  pour une réponse dépendante de K facteurs. Les variables codées  $X_i$  sont fixées non seulement aux valeurs -1 et +1, qui correspondent aux limites du domaine expérimental pour le facteur i, mais encore à la valeur 0 au centre de ce domaine

1 : borne inférieure.

$X_i = 0$  : centre du domaine expérimental.

+1 : borne supérieure.

La construction de la matrice des expériences, pour un plan factoriel complet à trois niveaux et K facteurs, est la suivante :

- Colonne  $X_1$  : répétition du motif : [- 1, 0, +1]
- Colonne  $X_2$  : répétition du motif : [- 1, -1, -1, 0, 0, 0, +1, +1, +1].
- Colonne  $X_i$  : répétition du motif : [  $3^{(i-1)}$  fois -1,  $3^{(i-1)}$  fois 0,  $3^{(i-1)}$  fois +1].

Les coefficients  $b_i, b_{ij}, \dots$  du modèle se calculent de la même façon que les plans linéaires.

**IV-8 : Teste de modèle (analyse de régression) :**

L'erreur commise sur les réponses mesurées dépend de la nature de l'expérimentation, du degré de précision de la technologie employée, du soin et habileté de l'expérimentateur, et de bien d'autres facteurs dont l'expérimentateur est responsable. Ces facteurs ne dépendent pas de la théorie des plans d'expériences mais de la pratique expérimentale. Pour séparer cette partie expérimentale de celle qui dépend de la théorie. On introduit la notion de l'analyse de régression [44],

Il s'agit de juger successivement [41] :

- la signification globale du modèle.
- La signification individuelle de chacun des termes du modèle.
- L'adéquation du modèle : L'équation obtenue est-elle une approximation suffisante du modèle réel ?
- Les écarts : le calcul des écarts pour chaque expérience du tableau initial permet de détecter un problème éventuel sur un essai.

Pour conduire l'analyse de régression, il faut remplir les conditions suivantes : [47],[48]

- 1- le paramètre d'entrée X est mesuré avec une erreur négligeable, l'apparition d'une erreur dans la détermination de Y (réponse) s'explique par la présence dans le processus de variables non exploitées qui ne figurent pas dans l'équation de régression.
- 2- les résultats des observations sur les variables de sortie  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$  sont des grandeurs indépendantes à distribution normale.
- 3- lorsque on fait une expérience sur un échantillon d'étendu N, avec condition que chaque essai soit répété m fois. Les variances de sondage :  $S_1^2 = S_2^2 = \dots = S_N^2$  doivent être homogènes.

**IV-8-1 : Homogénéité des variances :****IV-8-1-1 : Test de CORCHAN :**

On suppose que les N populations admettent respectivement  $S_1^2, S_2^2, \dots, S_N^2$  comme variances, si le nombre de degré de liberté  $f_i$  sont égaux entre eux :

$$f_1 = f_2 = \dots = f_k = m-1$$

m : nombre de répétition de chaque essai.

On utilise la statistique de Corchan pour vérifier l'homogénéité des variances :

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (\text{IV-23})$$

Où :  $S_{\max}^2$  : variation maximale des sondages.

$S_i^2$  : variance de sondage du facteur i.

Si  $G_{\max} < G_{\alpha}(N, m-1)$  : Donc les variances sont homogènes.

Où :  $G_{\alpha}(N, m-1)$  : est la valeur tabulée du test de Corchan pour le niveau de signification  $\alpha$ .

**IV-8-2 : Test de signification des coefficients : (test de STUDENT)**

La signification des coefficients de l'équation de régression se fait par le test de Student

$$t_j = \frac{|a_j|}{S_{bj}} \quad (\text{IV-30})$$

$a_j$  : le  $j^{\text{ème}}$  coefficient de l'équation de régression.

$S_{bj}$  : écart quadratique moyen.

La démarche est la suivante :

On détermine la moyenne des résultats des essais :

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{u=1}^m y_{iu}}{m} \quad i = 1, \dots, N. \quad (\text{IV-31})$$

Puis la variance du sondage :

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y})^2 \quad i = 1, \dots, N. \quad (\text{IV-32})$$

$m$  : le nombre de répétitions pour chaque essai.

$N$  : le nombre d'expériences.

$$S_{bj}^2 = \frac{S_{repr}^2}{m \cdot N} = S_b^2 \quad (\text{IV-33})$$

$$\text{Avec : } S_{repr}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} \quad (\text{IV-34})$$

Si la valeur  $t_j$  de Student est plus grande que la valeur tabulée  $t_\alpha(f)$  pour le niveau de signification  $\alpha$  choisie, et le nombre de degrés de liberté  $f$ , alors le coefficient  $b_j$  est significativement différent de zéro. Les coefficients non significatifs sont exclus de l'équation du modèle. [49]

### IV-8-3 : Test d'adéquation (test de FISCHER) : [41]

On pose l'hypothèse  $H_0$ .

On a :

$$\sum_{i=1}^8 (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^8 (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{IV-35})$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^8 y_i \quad (\text{IV-36})$$

$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$  : C'est la somme des carrés des écarts totaux.

$\sum_{i=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)^2$  : C'est la somme des carrés des écarts résiduels.

$\sum_{i=1}^8 (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  : C'est la somme des carrés dus à la régression.

$$F = \frac{S_{\hat{y}}^2}{S_y^2} \quad (\text{IV-37})$$



$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (y_i - \hat{y}_i)^2}{k-1} \text{ Avec un degré de liberté } f_1 = k-1.$$

$$S_{\hat{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{N-k} \text{ Avec un degré de liberté } f_2 = N-k.$$

Donc :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k-1}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / N-k} \quad (\text{IV-38})$$

Si  $F > F_{1-\alpha}(f_1, f_2)$  on rejette l'hypothèse ce qui veut dire que notre modèle est validé.

$F_{1-\alpha}(f_1, f_2)$  : Valeur tabulée de la loi de FISHER avec un niveau de signification égale à  $1-\alpha$

#### IV-8-4 : Coefficient de détermination (coefficient de corrélation multiple) :

Le coefficient de corrélation  $R^2$ , ou le coefficient de détermination qui est le rapport entre variation due à la régression et à la variation totale, il se calcule comme suit : [47]

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{IV-38})$$

Lorsque l'échantillon est d'étendu assez faible, il est nécessaire d'adopter une correction pour l'erreur systématique. La Formule de correction est :

$$R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-l} \quad (\text{IV-39})$$

$R^2$  : la valeur corrigée du coefficient de régression multiple

Plus le coefficient de détermination s'approche de 1 plus notre modèle est représentatif (meilleur).

# Chapitre V

## Modélisation par plan d'expériences d'une station de traitement des granulats

### V-1 : Introduction :

L'objectif de cette partie est de modéliser la station de traitement des granulats et d'obtenir un réglage optimal de celle-ci, afin d'avoir un sable qui répond aux prescriptions de la Norme **NFP- 18- 301**, qui fixe la teneur en fines des sables de concassage à 10%, et d'amener la courbe granulométrique du sable à s'inscrire à l'intérieur du fuseau admissible des sables à béton figure (V-1). Le module de finesse optimal doit être compris entre 2.6 et 2.8.

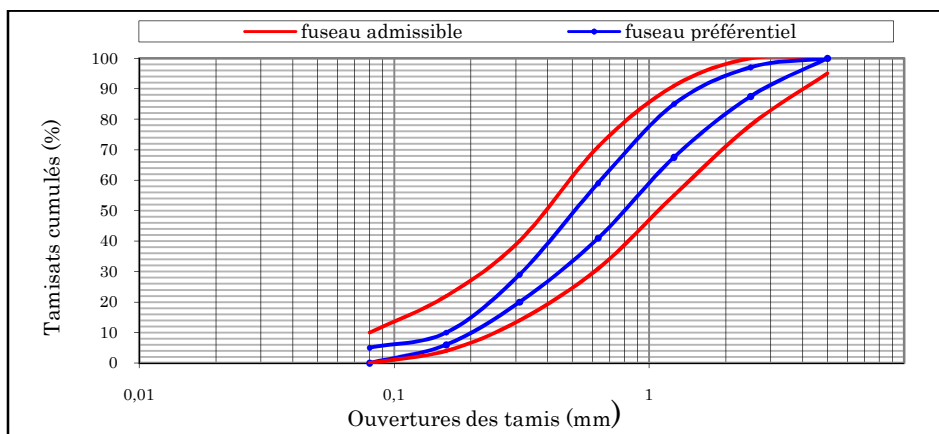


Figure (V-1) : Fuseaux de la granularité des sables à béton. [13]

### V-2 : Description de la station de traitement des granulats :

La fabrication du sable de concassage au sein de notre carrière est le résultat d'un processus de traitement qui comporte plusieurs étapes qui sont schématisées sur la figure suivante :

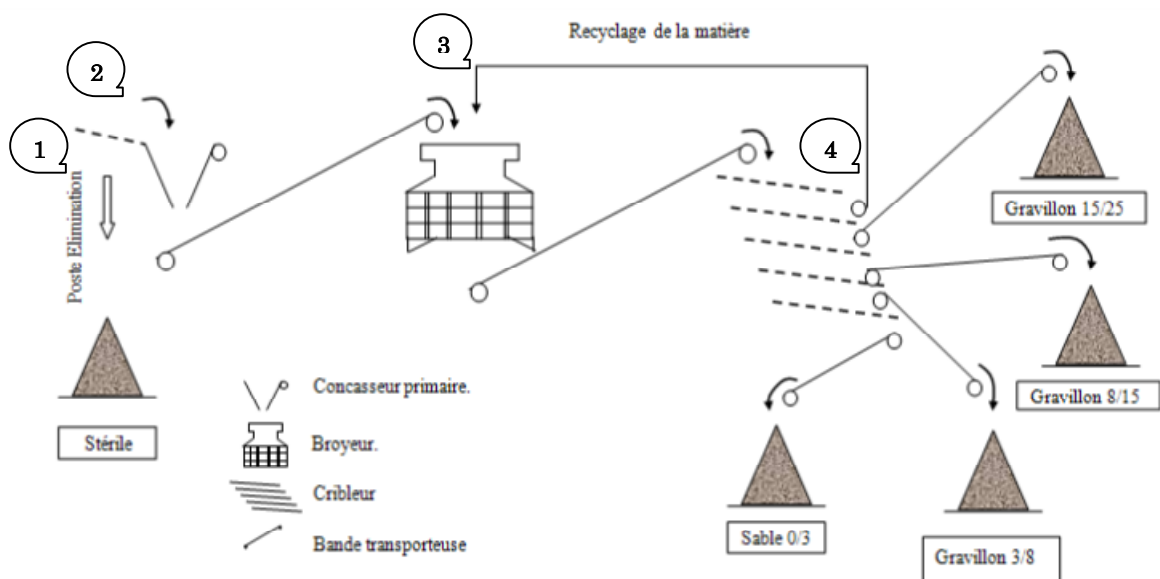


Figure (V-2) : Schéma de la station de concassage de SOMACOB AKBOU.

**V-2-1 : Etape 1 - Poste Elimination :**

La première opération de traitement après l'abattage à l'explosif et le marinage des gros blocs de roche, c'est l'élimination des matériaux indésirables tel que les terres, les argiles, ... etc par un scalpeur de maille 0/40 mm qui permet de mettre ces matériaux en dehors du circuit, et laisse passer les roches saines au concasseur primaire.

**V-2-2 : Etape 2- Concassage primaire :**

Le matériau scalpé, est ensuite concassé par un concasseur à mâchoires à simple volet de type VB 0806 figure (V-3) qui travaille par compression. Il est constitué de deux mâchoires disposées face à face, l'une des mâchoires est animée d'un double mouvement d'oscillations verticale et horizontale. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe, la compression apparaît dans le lit de matière provoque l'éclatement des particules solides. L'éloignement de la mâchoire mobile permet à celles-ci de descendre, où elles subissent plusieurs réductions de taille successives avant d'être déchargées à sa partie inférieure. Cette opération permet une réduction grossière du tout-venant.

**Tableau (V-1) : Caractéristiques du concasseur à mâchoires simple volet type VB 0806[50]**

paramètres	Valeurs
Ouverture du gueulard	800 x 600 mm
Ouverture de Sortie	Max : 135 mm Min : 60 mm
Puissance du moteur	75 Kw

Le réglage de l'ouverture de sortie du concasseur se fait mécaniquement sur la mâchoire mobile par l'intermédiaire des cales que l'on introduit entre celle-ci et le bâti. Ces cales permettent une plage de réglage de 60 mm à 135 mm.

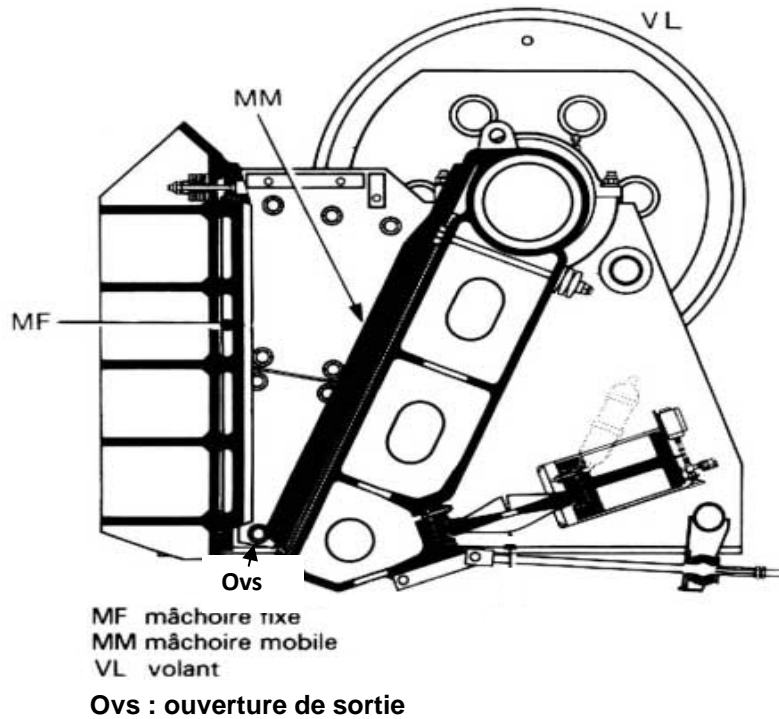


Figure (V-3) : Concasseur à mâchoires simple volet type VB 0806.

**V-2-3 : Etape 3- Concassage secondaire (broyage) :**

Cette opération est assurée par un broyeur à cône SYMONS 4' ST figure (V-4) qui reprend les matériaux pré concassés au poste primaire à fin de les ramener à une dimension admissible pour les cribles (appareils finisseurs). Les caractéristiques du broyeur sont présentées dans le tableau (V-2) :

**Tableau (V-2) : Caractéristiques d'un broyeur à cône SYMONS 4' ST. [51]**

Paramètre	valeurs
Puissance	3 KW
Vitesse	1450 tr/mn
Débit	90 l/min
Ouverture de sortie	Min = 13 mm Max = 25 mm

L'ouverture de sortie des broyeurs giratoire secondaire peut être réglée soit en faisant descendre le bol par rapport à l'arbre principal dont les niveaux restent fixés, soit en faisant monter l'arbre par rapport au bol fixe.

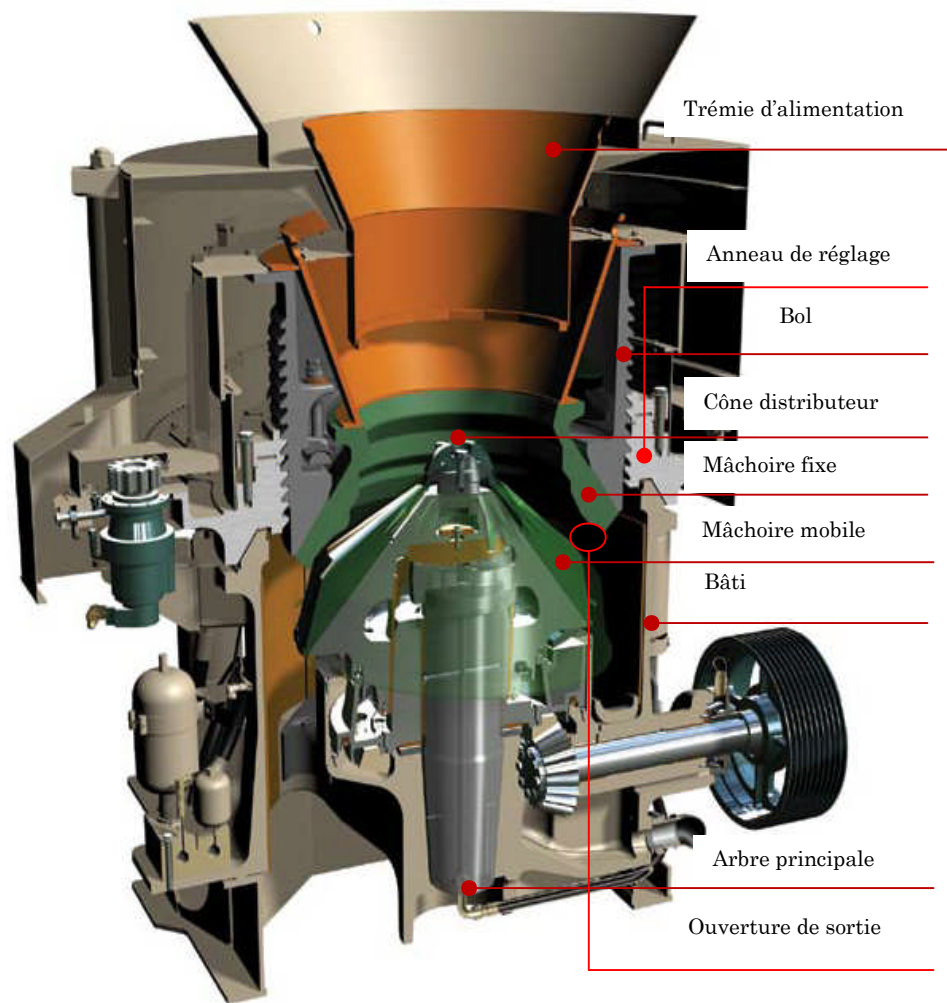


Figure (V-4) : Schéma d'un broyeur à cône SYMONS.

#### V-2-4 : Etape 4 - Séparation granulométrique (Criblage) :

La séparation granulométrique est la dernière étape de traitement des granulats avant la livraison, cette opération se fait à l'aide des cribles vibrants à balourd de type CVB 1540, où les matériaux subissent dès leur arrivée sur ces surfaces perforées des mouvements de vibrations qui permettent la séparation des différentes classes granulométriques de haut en bas, sous l'action de la pesanteur.

La forme de la vibration à une allure circulaire qui provoque une ségrégation rapide du lit de matériaux, qui amène les fins au contact de la surface de criblage et facilite leurs passages au travers de ses ouvertures. Pour bénéficier de l'action de la pesanteur, et pour faire avancer ces matériaux, ces cribles sont inclinés.

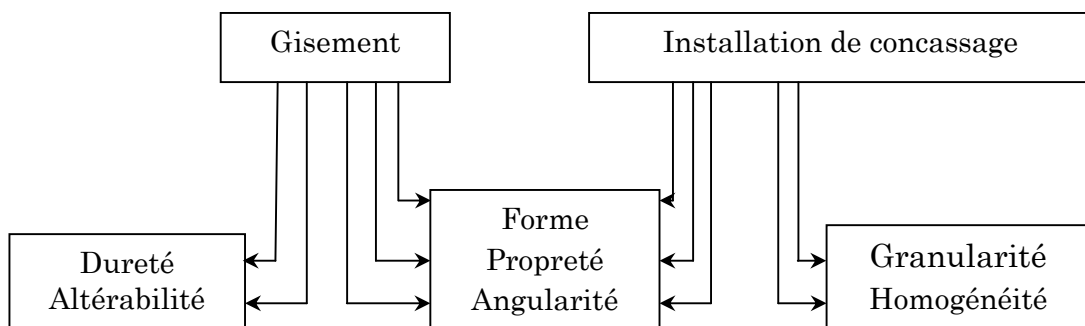
**Tableau (V-3) : Caractéristiques des cribles vibrants à balourd de type CVB 1540. [52]**

Paramètres	Valeurs
Largeur	1500 mm
Longueur	4000 mm
Surface de criblage	6 m <sup>2</sup>
Nombre d'étages	IV
Inclinaison	18°
Puissance	15 KW
Vitesse de criblage	Min : 800 tr/min Max : 1000 tr/mn
Amplitude de vibration	Min : 6 mm Max : 10 mm

Le réglage de l'amplitude de la vibration se fait en variant la vitesse de criblage de 800 tr/mn (Amplitude 6mm), à une vitesse maximale de 1000 tr/mn (Amplitude 10 mm).

**V-3 : Choix des facteurs du modèle : [10], [24]**

De nombreuses propriétés des granulats de carrières sont intimement liées aux propriétés des massifs rocheux d'origine. C'est à dire la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance et la couleur. D'autres caractéristiques dérivent du mode d'élaboration, il s'agit principalement des paramètres liés à la distribution dimensionnelle des grains (granularité), ceci est complété par des caractéristiques liées à la propreté des matériaux (figure V-5).



**Figure (V-5) : Paramètres influençant la qualité des granulats.**

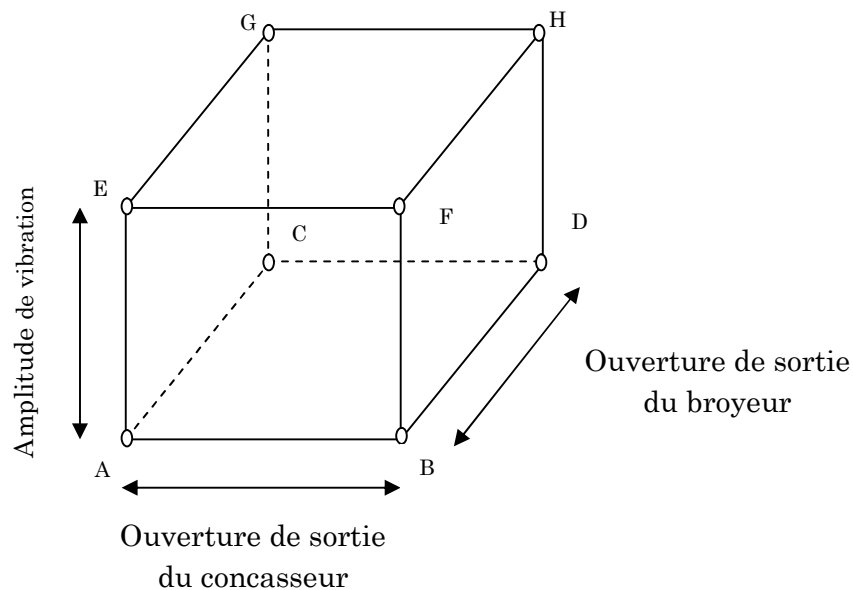
Durant toute notre expérimentation nous gardons les paramètres liés aux propriétés de gisement à leurs états naturelles, et on intervient sur le réglage de la station de traitement par le biais des facteurs suivants :

- **Facteur 1** : Ouverture de sortie du concasseur primaire.
- **Facteur 2** : Ouverture de sortie du broyeur.
- **Facteur 3** : Amplitude de vibration.

#### V-4 : Domaine d'étude :

Les installations de la station de traitement des granulats au niveau de la carrière de SOMACOB permettent de faire varier, l'ouverture de sortie du concasseur primaire entre 60 et 135 mm, ainsi que l'ouverture de sortie du broyeur entre 13 et 25 mm et l'amplitude de vibration entre 6 et 10 mm. Le domaine d'étude figure (V-6) est alors défini par les huit points : A, B, C, D, E, F, G, et H.

A	$\left\{ \begin{array}{l} 60 \text{ mm.} \\ 13 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \end{array} \right.$	B	$\left\{ \begin{array}{l} 135 \text{ mm.} \\ 13 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \end{array} \right.$	C	$\left\{ \begin{array}{l} 60 \text{ mm.} \\ 25 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \end{array} \right.$	D	$\left\{ \begin{array}{l} 135 \text{ mm.} \\ 25 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \end{array} \right.$
E	$\left\{ \begin{array}{l} 60 \text{ mm.} \\ 13 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$	F	$\left\{ \begin{array}{l} 135 \text{ mm.} \\ 13 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$	G	$\left\{ \begin{array}{l} 60 \text{ mm.} \\ 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$	H	$\left\{ \begin{array}{l} 135 \text{ mm.} \\ 25 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$





**Figure (V-6) : Domaine d'étude pour la teneur en fines d'un sable de concassage.**

**V-5 : Choix de la réponse :**

La réponse choisie est tout simplement la teneur en fines (les grains inférieur à 80  $\mu\text{m}$ ) dans un échantillon de sable concassé après avoir procédé à l'analyse granulométrique de ce dernier. Le prélèvement des échantillons est effectué dans les mêmes conditions opératoires, chaque échantillon est prélevé par la procédure d'échantillonnage en cours d'écoulement.

**V-6 : Choix du plan expérimental :**

On a trois facteurs et deux niveaux par facteur (niveau minimum et niveau maximum) le plan retenu est un plan factoriel  $2^3$  complet. On aura huit expériences.

**V-7 : Expérimentation :**

Les réponses  $Y_i$  qui sont les teneurs en fines des échantillons de sable concassé récupéré à la fin de chaque réglage de la station du traitement des granulats, ont été mesurées pour chacun des points expérimentaux A, B, C, D, E, F, G et H.

Pour chaque essai on fixe un paramètre (ouverture de sortie du concasseur primaire) à l'un de ces extremums, et on fait régler les deux autres (ouverture de sortie du broyeur ; amplitude de vibration) à leur niveaux maximum et minimum, pour toutes les combinaisons possibles.

Pour chaque point expérimental on répète l'essai cinq fois, pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. L'ensemble des résultats de plan d'expériences est rassemblé dans le tableau (V-4).

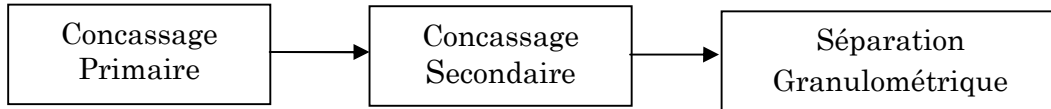
Le prélèvement des échantillons à la station du traitement des granulats se fait conformément aux prescriptions de la norme NFP 18-552 : Prélèvement de matériaux en cours d'écoulement. La préparation d'un échantillon au laboratoire de masse égale à 1 Kg pour l'analyse granulométrique se fait conformément aux prescriptions de la norme NFP 18-553. L'ensemble des résultats de l'analyse granulométrique est présenté dans l'Annexe (V-1).

**Tableau (V-4) : Matrice d'expérience et résultats d'essais.**

Pt Expérimental	N° Essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	y <sub>i</sub>	Y moy
A	01	-1	-1	-1	16.660	16.2068
	02	-1	-1	-1	14.826	
	03	-1	-1	-1	16.633	
	04	-1	-1	-1	15.790	
	05	-1	-1	-1	15.095	
B	06	+1	-1	-1	14.177	13.4416
	07	+1	-1	-1	13.077	
	08	+1	-1	-1	14.003	
	09	+1	-1	-1	13.170	
	10	+1	-1	-1	12.781	
C	11	-1	+1	-1	10.462	11.1608
	12	-1	+1	-1	11.64	
	13	-1	+1	-1	10.400	
	14	-1	+1	-1	11.100	
	15	-1	+1	-1	12.200	
D	16	+1	+1	-1	10.877	12.6996
	17	+1	+1	-1	11.077	
	18	+1	+1	-1	13.897	
	19	+1	+1	-1	14.702	
	20	+1	+1	-1	13,005	
E	21	-1	-1	+1	19.845	18.7648
	22	-1	-1	+1	17.724	
	23	-1	-1	+1	20.170	
	24	-1	-1	+1	20.771	
	25	-1	-1	+1	15.314	
F	26	+1	-1	+1	14.800	15.470
	27	+1	-1	+1	16.643	
	28	+1	-1	+1	12.676	
	29	+1	-1	+1	14.115	
	30	+1	-1	+1	14.116	
G	31	-1	+1	+1	8.583	9.318
	32	-1	+1	+1	11.072	
	33	-1	+1	+1	8.257	
	34	-1	+1	+1	8,687	
	35	-1	+1	+1	10.037	
H	36	+1	+1	+1	11.500	11.5600
	37	+1	+1	+1	10,600	
	38	+1	+1	+1	12.100	
	39	+1	+1	+1	11.100	
	40	+1	+1	+1	12.500	
Niveau (-)		60 mm	13 mm	6 mm		
Niveau (+)		130 mm	25 mm	10 mm		

## V-8 : Modélisation :

La modélisation du processus de fabrication des granulats nécessite l'analyser des étapes suivantes :



**Figure (V-7) : Les grandes étapes de traitement des granulats de carrière**

### V-8-1 : Détermination de l'équation du modèle :

Une meilleur teneur en fine dans un sable de concassage est liée en grande partie au réglage des paramètres de la station du traitement des granulats préalablement choisies (ouverture de sortie du concasseur primaire, ouverture de sortie du broyeur et amplitude de vibration). Le but de notre modélisation est de calculer l'effet de chaque facteur sur la réponse, et de trouver, par le biais d'un modèle mathématique, une relation fidele et simple entre ces trois paramètres et la teneur en fines d'un sable de concassage.

### V-8-2 : Calcul des coefficients :

Les résultats obtenus se prêtent mal à une interprétation. Il est donc nécessaire de calculer les effets principaux et les effets d'interaction pour connaître l'influence propre de chacun des facteurs. Nous allons effectuer ce calcul selon la méthode matricielle, pour ce faire nous partons du modèle mathématique associé aux plans factoriels qui s'écrit :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

- y : la réponse.
- $x_1$  : l'abscisse du point expérimental pour le facteur 1.
- $x_2$  : l'abscisse du point expérimental pour le facteur 2.
- $x_3$  : l'abscisse du point expérimental pour le facteur 3.
- $a_0$  : la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- $a_1$  : effet de facteur 1.
- $a_2$  : effet de facteur 2.
- $a_3$  : effet de facteur 3.
- $a_{12}$  : interaction entre les facteurs 1 et 2.
- $a_{13}$  : interaction entre les facteurs 1 et 3.
- $a_{23}$  : interaction entre les facteurs 2 et 3.

- $a_{123}$  : interaction entre les facteurs 1,2 et 3.

D'après GOUPY-J [44], Nous pouvons appliquer la formule générale des plans factoriels à chacun des huit points expérimentaux, nous obtenons ainsi un système de huit équations à huit inconnus qui, compte tenue des niveaux que prennent chaque facteur ( $x_i = -1$  ou  $x_i = +1$ ) s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = a_0 - a_1 - a_2 - a_3 + a_{12} + a_{13} + a_{23} - a_{123} \\ y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_3 - a_{12} - a_{13} + a_{23} + a_{123} \\ y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 - a_{12} + a_{13} - a_{23} + a_{123} \\ y_4 = a_0 + a_1 + a_2 - a_3 + a_{12} - a_{13} - a_{23} - a_{123} \\ y_5 = a_0 - a_1 - a_2 + a_3 + a_{12} - a_{13} - a_{23} + a_{123} \\ y_6 = a_0 + a_1 - a_2 + a_3 - a_{12} + a_{13} - a_{23} - a_{123} \\ y_7 = a_0 - a_1 + a_2 + a_3 - a_{12} - a_{13} + a_{23} - a_{123} \\ y_8 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_{12} + a_{13} + a_{23} + a_{123} \end{array} \right. \quad (V-1)$$

L'écriture sous forme matricielle nous donne le système suivant :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{123} \end{bmatrix} \quad (V-2)$$

$$Y = Xa$$

Les calculs qui suivront seront effectués en utilisant le logiciel MATLAB.

La matrice colonne Y rassemble les huit réponses mesurées au cours des essais granulométriques. L'ordre des éléments est celui de la septième colonne du tableau (V-4)

$$Y = \begin{bmatrix} 16.2068 \\ 13.4416 \\ 11.1608 \\ 12.6996 \\ 18.7648 \\ 15.4700 \\ 09.3180 \\ 11.5600 \end{bmatrix} \quad (V-3)$$

Connaissons la réponse Y on aura :

$$\begin{bmatrix} 16.2068 \\ 13.4416 \\ 11.1608 \\ 12.6996 \\ 18.7648 \\ 15.4700 \\ 09.3180 \\ 11.5600 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \\ a_{123} \end{bmatrix} \quad (V-4)$$

Ce qui nous donne le vecteur colonne a :

$$a = X^{-1} Y = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 16.2068 \\ 13.4416 \\ 11.1608 \\ 12.6996 \\ 18.7648 \\ 15.4700 \\ 09.3180 \\ 11.5600 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.5777 \\ -0.2849 \\ -2.3930 \\ 0.2005 \\ 1.2300 \\ 0.0021 \\ -0.9460 \\ 0.1540 \end{bmatrix} \quad (V-5)$$

Par identification on a les valeurs des effets principaux et d'interactions :

**Tableau (V-5) : Effet des facteurs sur la teneur en fine d'un sable concassé.**

Effets principaux			
a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
13.5777	- 0.2849	- 2.3930	0.2005
Effets d'interactions			
a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>	a <sub>123</sub>
1.2300	0.0021	- 0.9460	0.1540

**V-9 : Validation du modèle :**

**V-9-1 : Teste d'homogénéité des variances (Test de CORCHAN) :**

On vérifie l'homogénéité des variances on appliquant le teste de CORCHAN, les valeurs des variances pour chaque essai sont regroupées dans le Tableau suivant :

**Tableau (V-6) : Valeurs des variances.**

$S_1^2$	$S_2^2$	$S_3^2$	$S_4^2$	$S_5^2$	$S_6^2$	$S_7^2$	$S_8^2$
2.38868	0.37476	0.59558	2.92241	5.03938	6.190151	1.4314397	0.578000

D'après le tableau (V-6) on a :

$$S_{max}^2 = 6.190151.$$

$$\sum S_i^2 = 19.5204254.$$

$$G_{max} = \frac{S_{i_{max}}^2}{\sum_{i=1}^8 S_i^2} = 0.317115 \quad (V-6)$$

Pour le niveau de signification  $\alpha = 0.05$  d'après la table de Corchan Annexe (V-2) on à :

$$G_{0.05} (8,4) = 0.4377$$

$$G_{max} < G_{0.05} (8,4) \quad (V-7)$$

Donc la condition l'homogénéité des variances de sondages est vérifiée, on peut mener l'analyse de régression.

**V-9-2 : Signification des coefficients de régression (Test de STUDENT) :**

Le test de STUDENT permet de déterminer si parmi les coefficients du modèle, il existe des coefficients non significatifs, les quels seront éliminés de l'équation de régression car leur influences sur la teneur en fines est négligeable.

La procédure de calcul est celle qui est illustrée dans le chapitre IV.

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S_i^2}{8} = 2.4400$$

$$S_b = \sqrt{\frac{2.4400}{5 * 8}} = 0.24698$$

$$t_j = \frac{|a_j|}{S_b}$$

L'ensemble des coefficients  $t_j$  sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau (V-7) : Coefficients de test de STUDENT.**

t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>12</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>23</sub>	t <sub>123</sub>
54.97400	1.15361	9.68917	0.81189	4.98037	0.08775	3.83050	0.62382

Pour le niveau de signification  $\alpha=0.05$  et le nombre de degrés de liberté  $f = (N.(m-1))$  :  $f = (8*4) = 32$ , la valeur tabulée du test de STUDENT Annexe(V-3) est comprise entre 1.697 et 1.684. La valeur des coefficients  $t_1, t_3, t_{13}, t_{123}$  étant inférieure à la valeur tabulée donc le coefficient  $b_1, b_3, b_{13}$  et  $b_{123}$  est à supprimé de l'équation de régression.

**V-9-3 : Validation de l'équation par le test de FISHER :**

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k - 1}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / N - k} \quad (V-8)$$

Le nombre de coefficients significatifs est  $k = 4$  d'après le test de STUDENT.

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^8 y_i = 13.57772$$

Le modèle s'écrit à priori comme suit :

$$\hat{y}_i = b_0 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (V-9)$$

$$\hat{y}_i = 13.5777 - 2.3930 \cdot x_2 + 1.2300 x_1 \cdot x_2 + 0.9460 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Les réponses fournies par le modèle pour les huit points du domaine d'étude sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau (V-8) : Réponses données par le modèle.**

$\hat{y}_1$	$\hat{y}_2$	$\hat{y}_3$	$\hat{y}_4$	$\hat{y}_5$	$\hat{y}_6$	$\hat{y}_7$	$\hat{y}_8$
16.2548	13.7946	10.9006	13.3608	18.14695	15.6868	9.0085	11.4686

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k - 1 &= 21.693201. \\ \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / N - k &= 0.292028. \end{aligned} \right\} \Rightarrow F = 74.495144$$

La valeur tabulée du test de Fisher Annexe (V-4) pour le niveau de signification  $\alpha=0.05$  et le nombre de degré de liberté ( $f_1= k-1 = 3$ ) et ( $f_2 = N-k = 4$ ) est de 6.59. Comme la valeur F calculée ( $F = 74.495144$ ) est supérieure à celle tabulée, L'équation de régression est donc très significative sur la réponse. Le test de Fisher a montré que l'équation de régression retenue (modèle) décrit l'expérience de façon adéquate.

V-9-4 : Coefficient de corrélation :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (V-10)$$

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}) = 65.0796029.$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} = 8.13906717 * 8.067193 = 65.6594258.$$

$$R = 0.99116924.$$

La valeur R est très proche de 1 ce qui explique une forte relation linéaire entre les réponses expérimentales et celle du modèle. Donc l'équation du modèle choisi peut représenter l'expérience.

V-9-5 : Analyse des résidus :

L'évaluation de la qualité du modèle du premier degré peut se faire par l'analyse des résidus [44]. Les valeurs de ces derniers regroupées dans le tableau (V-9), sont tracées en fonction des réponses prédites (figure V-8). L'allure du graphe montre une distribution aléatoire des points, ce qui confirme l'inexistence d'une relation entre les réponses prédites et les résidus. Donc le modèle de premier degré que nous avons établi explique bien les résultats expérimentaux.

**Tableau (V-9) : Calcul des résidus.**

N° Essai	Réponse Expérimentales	Réponses prédites	Résidus
1	16.2068	16.2548	-0,048
2	13.4416	13.7946	-0,35305
3	11.1608	10.9006	0,26015
4	12.6996	13.3608	-0,6612
5	18.7648	18.1469	0,61785
6	15.4700	15.6868	-0,2168
7	9.3182	9.0085	0,3097
8	11.5600	11.4686	0,09135



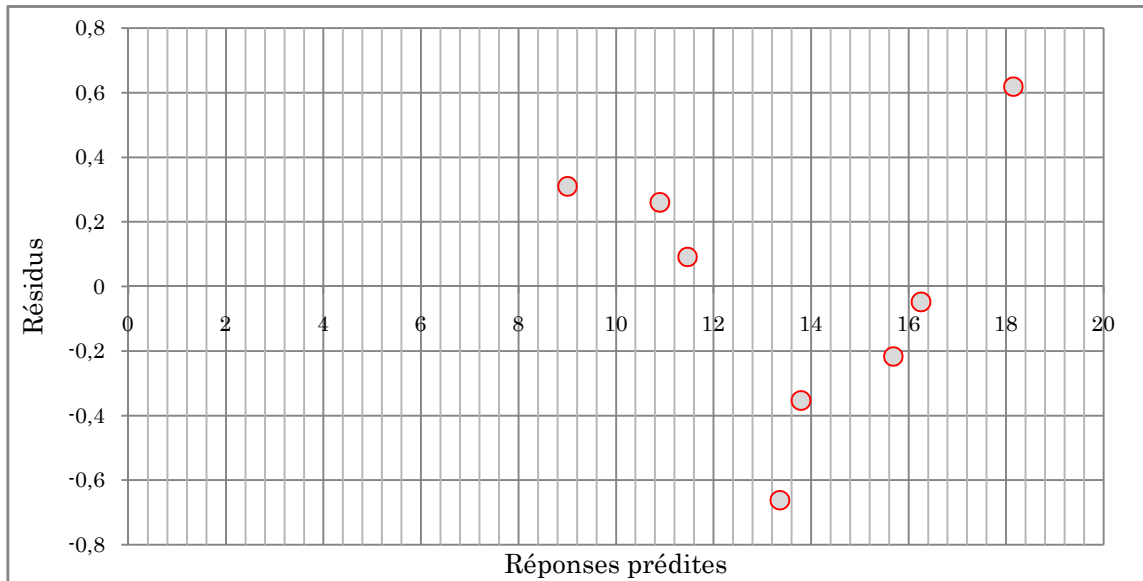


Figure (V-8) : Diagramme des résidus.

V-9-6 : Test graphique :

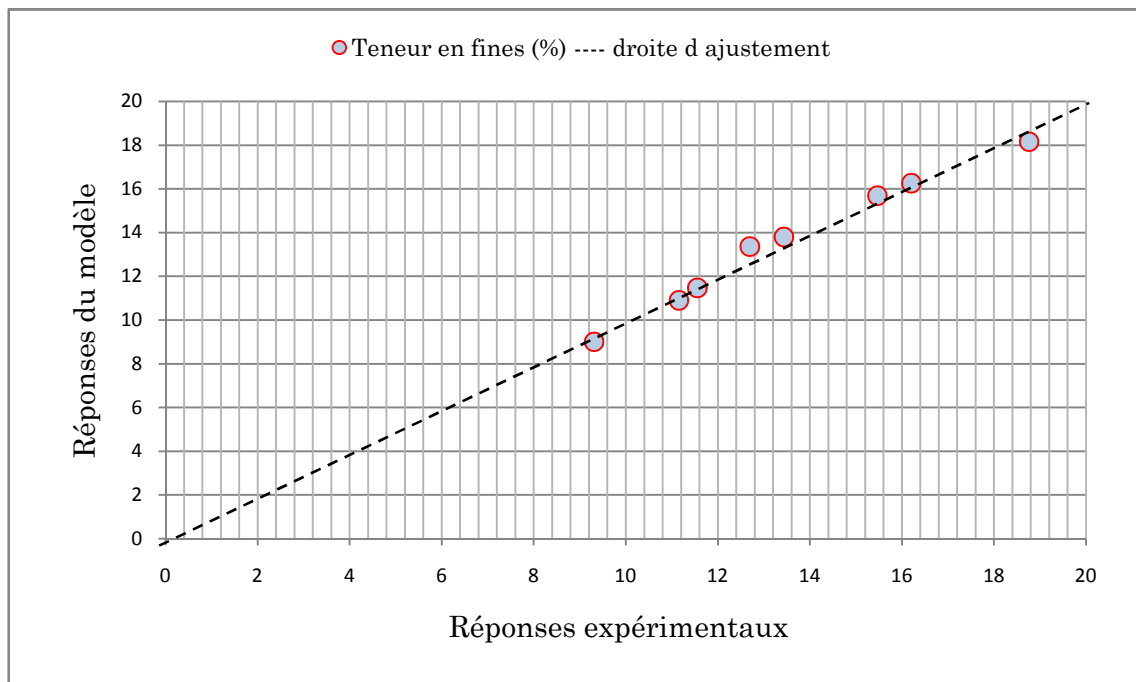


Figure (V-9) : Droite d'ajustements entre les réponses expérimentales et les réponses théoriques.

En Partant de l'hypothèse suivante : réponses expérimentales = réponses théoriques, un modèle qui reproduit exactement l'expérimentation, on aura donc une droite qui passe par l'origine du plan, ayant comme équation  $Y_{exp} = a.Y_{théo}$

Avec  $a = 1$  : pente de la droite.

Si on se contente de la droite d'ajustement figure (V-8) qui passe par l'origine du plan ( $y_{exp} = 0, y_{théo} = 0$ ), et qui passe pratiquement par la majorité des points du domaine, on aura donc une droite de pente :  $a = \frac{9.0085}{9.3128} = 0.9667 \cong 1$ . Ce qui nous permet de confirmer l'adéquation du modèle.

Finalement le modèle peut s'écrire comme suit :

$$\hat{y}_i = 13.5777 - 2.3930.x_2 + 1.2300x_1.x_2 - 0.9460.x_2.x_3 \quad (V-11)$$

### V-9 : Conclusion :

En conclusion, les testes statistiques et graphiques permettent de considérer notre modèle comme étant bon pour représenter les résultats du plan d'expériences. Ce modèle nous permettra de faire des prévisions de la teneur en fines des sables de concassage dans notre domaine d'étude.

# Chapitre VI

## Analyse des résultats et Optimisation des paramètres du modèle

## Chapitre VI :

### Analyse des résultats et Optimisation des paramètres du modèle.

Dans cette partie du travail, on utilise les résultats obtenus par la planification des expériences ainsi que le modèle élaboré, pour chercher un réglage optimal des paramètres de la station choisis auparavant.

#### VI-1 : Résultats du plan d'expériences :

L'objectif de cette étude est de régler la station de traitement pour produire un sable qui contient de 10 à 12 % de fines.

Les résultats du plan d'expériences obtenus pour chaque point du domaine d'étude qui correspondent à un réglage bien défini de la station, sont exprimés par des courbes granulométriques moyennes, représentées dans les figures ci dessous :

##### VI-1-1 : Résultats au Point A :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : minimal
- Ouverture de sortie du broyeur : minimal
- Amplitude de vibration : minimal

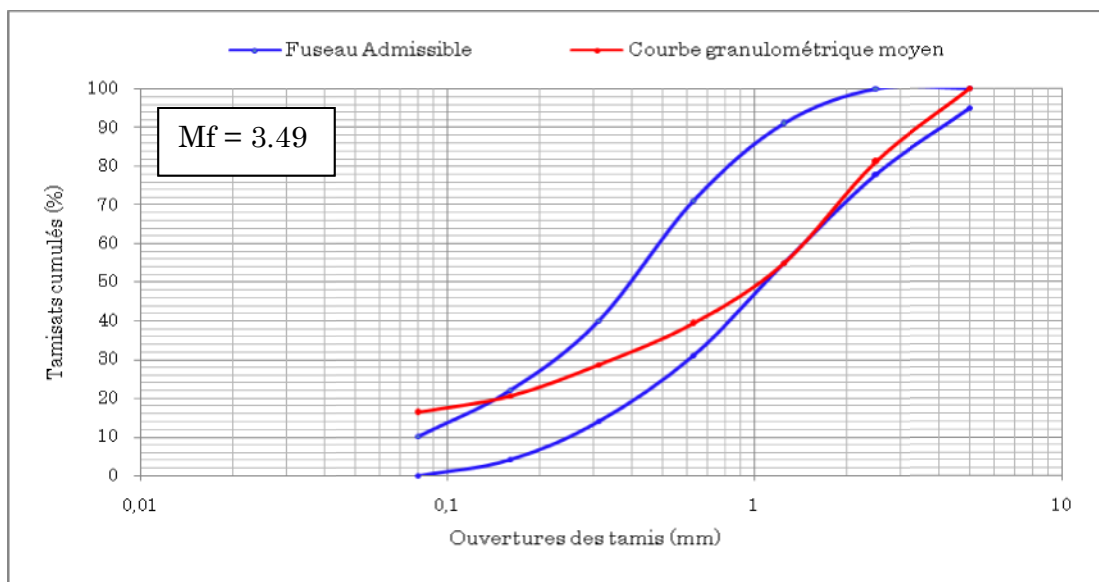


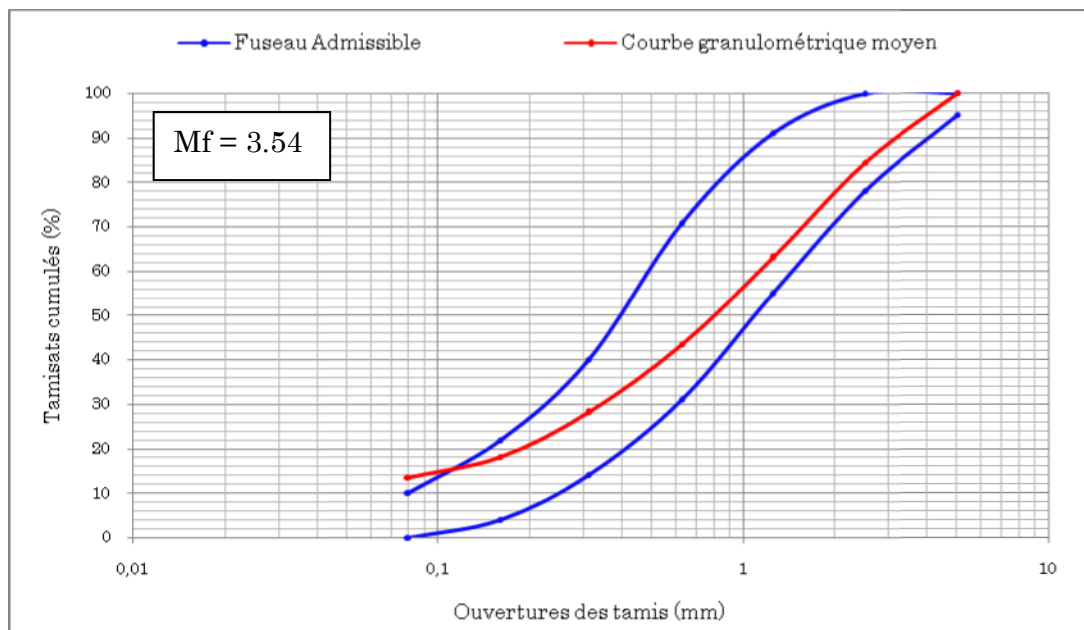
Figure (VI-1) : Analyse granulométrique au point -A- du domaine d'étude.

La courbe granulométrique correspondant à ce réglage est une courbe qui s'inscrit bien à l'intérieur de fuseau admissible dans l'intervalle de 0.016 à 5 mm, et en dehors de celui-ci pour les grains de diamètres inférieurs à 0.016 mm. Avec un pourcentage des éléments inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  égale à 16.2 ce qui dépasse largement le maximum fixé à 10%.

Le module de finesse de cette courbe est de 3.493 ce qui explique que ce sable contient beaucoup d'éléments grossiers malgré que le pourcentage des fines soit important ce qui explique le contact de la courbe avec la limite inférieure de fuseau.

### VI-1-2 : Résultats au Point B :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : maximal.
- Ouverture de sortie du broyeur : minimal
- Amplitude de vibration : minimal



**Figure (VI-2) : Analyse granulométrique au point -B- du domaine d'étude.**

On voit bien que tous les points de la courbe moyenne sont à l'intérieur du fuseau admissible sauf le point d'ouverture 80  $\mu\text{m}$  qui sort légèrement du fuseau, avec un tamisât de 13.54% ce qui dépasse légèrement les 10%. Le module de finesse de cette courbe est égale à 3.54, cette valeur montre que ce sable est composé de grains de granulométrie moyenne (un sable normal).

### VI-1-3 : Résultats au Point C :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : minimal.
- Ouverture de sortie du broyeur : maximal.
- Amplitude de vibration : minimal.

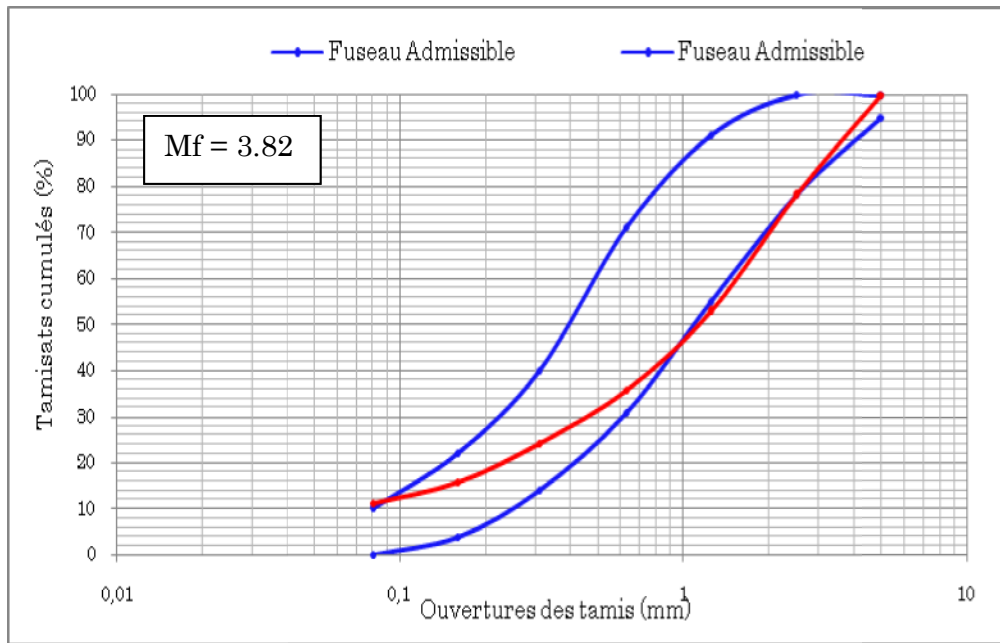


Figure (VI-3) : Analyse granulométrique au point -C- du domaine d'étude.

Le module de finesse de cette courbe égale à 3.82 ce qui explique l'allure de cette courbe qui dépasse le fuseau admissible dans sa partie inférieure, donc on peut conclure que le sable représenté par cette courbe est un sable gros.

Le pourcentage des éléments fins est de 11.6 ce qui est très proche de 10%.

### VI-1-4 : Résultats au Point D :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : maximal.
- Ouverture de sortie du broyeur : maximal.
- Amplitude de vibration : minimal.

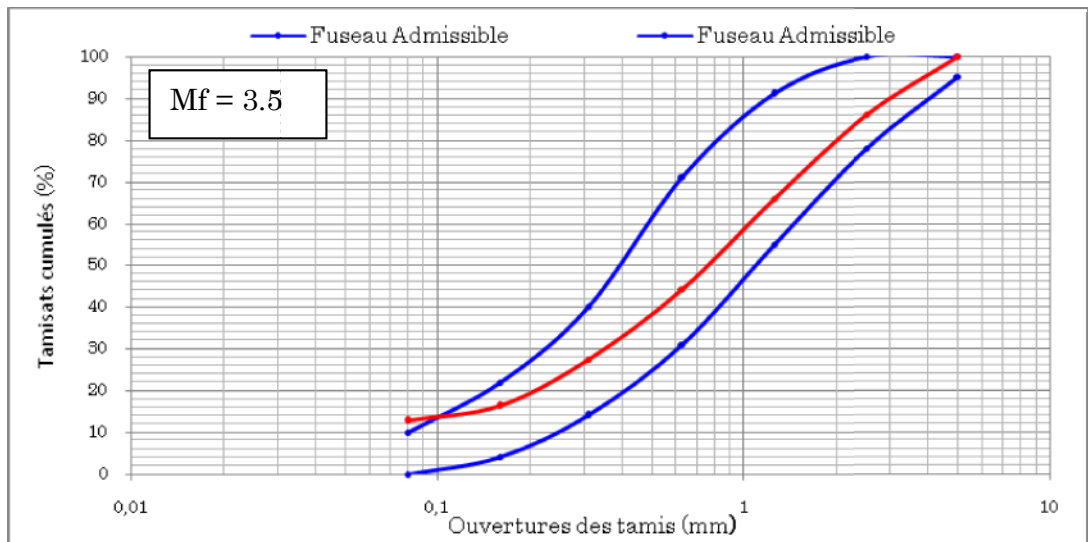


Figure (VI-4) : Analyse granulométrique au point -D- du domaine d'étude.

La courbe granulométrique du sable correspond aux réglages du point D du domaine à une allure qui suit presque celle de fuseau admissible, avec un module de finesse égale à 3,5. Le pourcentage des grains inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  égale à 12.71 qui est proche de 10 % le maximum fixé par la réglementation. Donc le sable représenté par cette courbe est un sable normal.

#### VI-1-5 : Résultats au Point E :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : minimal
- Ouverture de sortie du broyeur : minimal
- Amplitude de vibration : maximal.

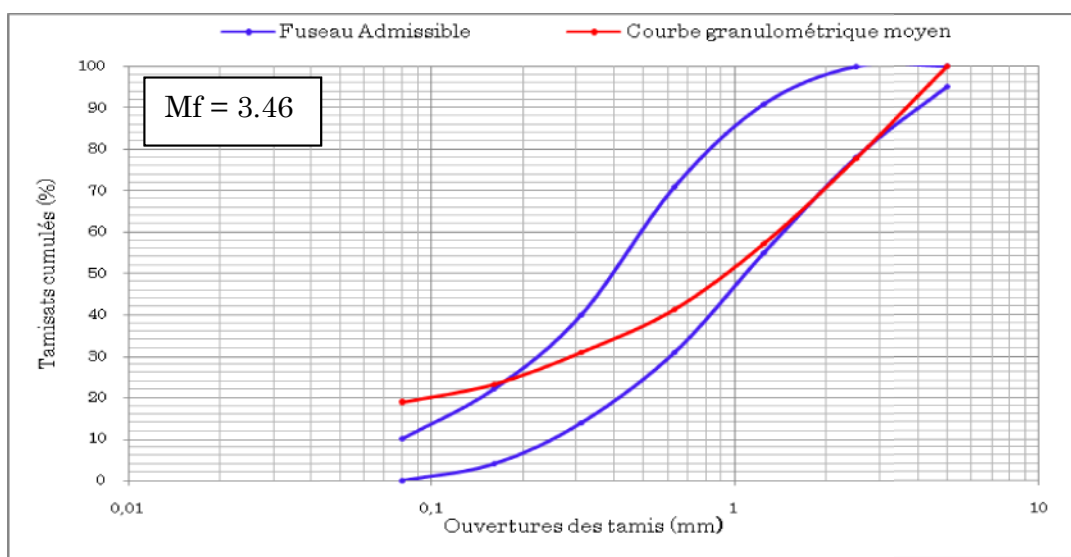


Figure (VI-5) : Analyse granulométrique au point -E- du domaine d'étude.

La courbe granulométrique moyenne des essais au point E du domaine d'étude a une allure différente de celle de fuseau admissible, ou elle le touche dans sa partie inférieure pour les ouvertures 2.5 et 1.25 mm, et elle s'inscrit en dehors de celui-ci pour l'ouverture 80  $\mu\text{m}$  avec un tamisât de 18.69 % ce qui représente le double de 10%. Le module de finesse de cette courbe égale à 3.46 malgré que le pourcentage des éléments fins soit très élevé. Cet équilibre dans la finesse est dû à la présence des gros grains entre les ouvertures 1.25 et 2.5 mm.

### VI-1-6 : Résultats au Point F :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : minimal
- Ouverture de sortie du broyeur : minimal
- Amplitude de vibration : maximal.

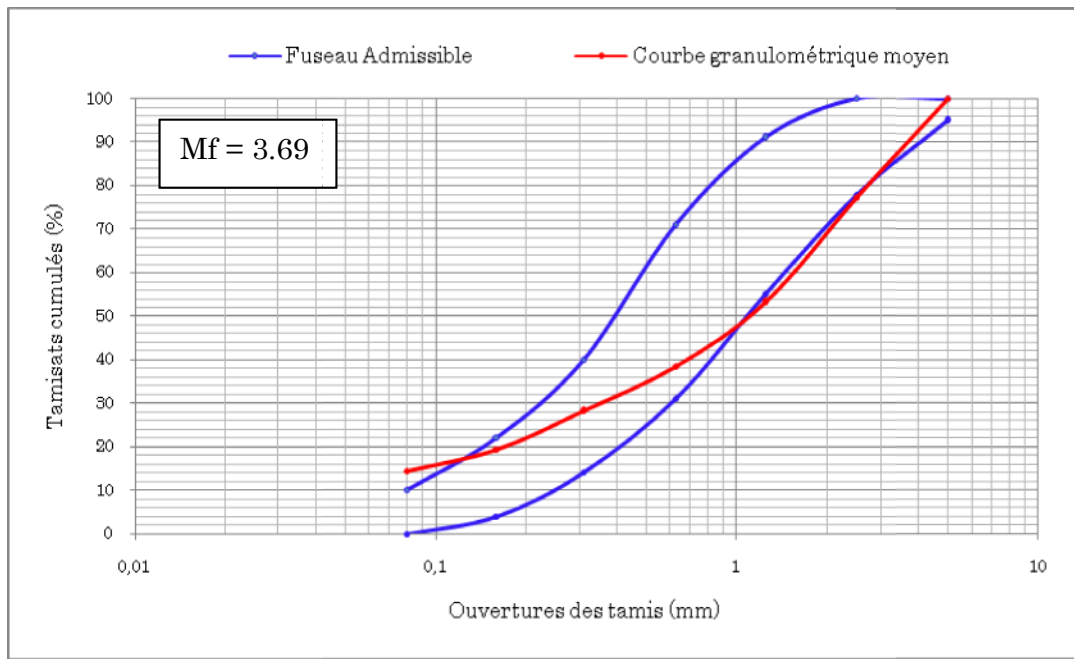


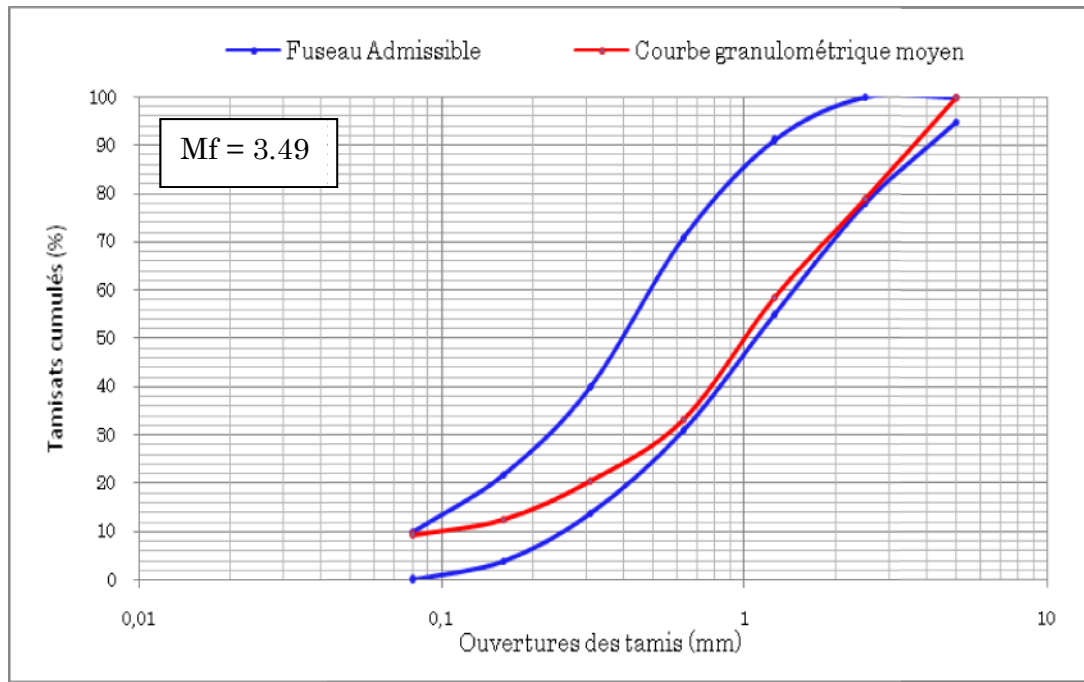
Figure (VI-6) : Analyse granulométrique au point -F- du domaine d'étude.

Les réglages au point F du domaine nous donnent une courbe granulométrique moyenne de mauvaise allure par rapport à l'allure des courbes de fuseau admissible. Les grains qui constituent ce sable sont des grains trop gros qui dépassent en diamètre les grains de la courbe inférieure de fuseau admissible pour l'intervalle de 5 à 2.5 mm. La teneur en fines de ce sable est de 14.53 qui dépassent les 10 %. Le module de finesse de ce sable est de 3.69 un sable un peut gros.



### VI-1-7 : Résultats au Point G :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : minimal.
- Ouverture de sortie du broyeur : maximal.
- Amplitude de vibration : maximal.

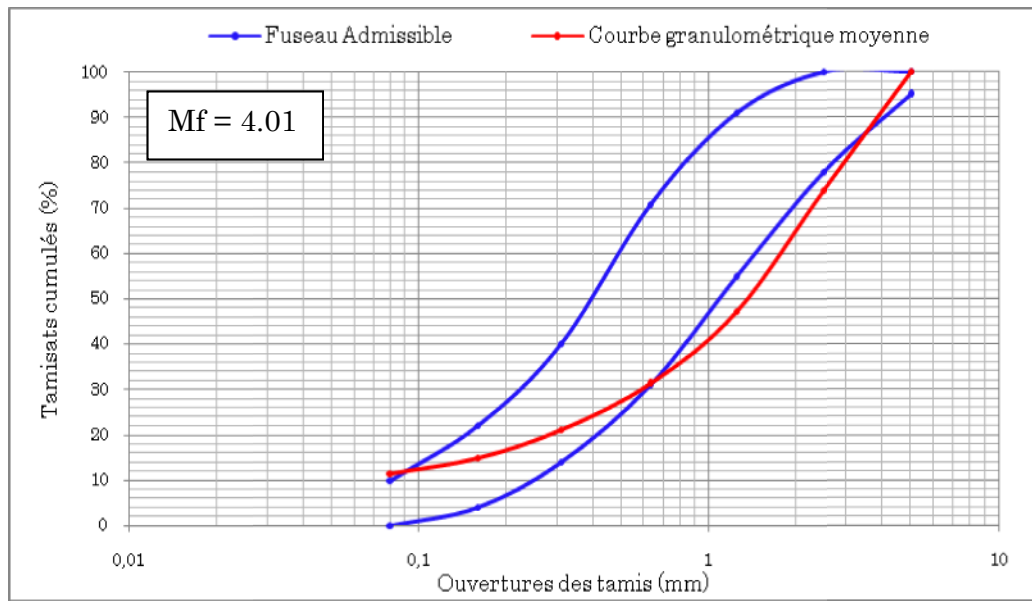


**Figure (VI-7) : Analyse granulométrique au point -G- du domaine d'étude.**

La courbe granulométrique moyenne des essais au point G est située entièrement à l'intérieur de fuseau admissible, mais elle est plus proche à la courbe inférieure du fuseau admissible ce qui explique la valeur un peu élevée du module de finesse  $M_f = 3.49$ . Le pourcentage des fines pour ce réglage est de 9.26 % qui est inférieur à 10%.

### VI-1-8 : Résultats au Point H :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire : maximal.
- Ouverture de sortie du broyeur : maximal.
- Amplitude de vibration : maximal



**Figure (VI-8) : Analyse granulométrique au point -H- du domaine d'étude.**

La figure (VI-8) montre une grande partie de la courbe granulométrique moyenne qui correspond aux réglages de point H du domaine d'étude, qui s'inscrit en dehors de la courbe inférieure de fuseau admissible. Ce qui nous donne une idée sur la grosseur des grains constituant ce sable dans l'intervalle de 0.63 à 5 mm. Le pourcentage de fines égale à 11.56 % ce qui est très proche de 10% valeur optimal, le module de finesse de ce sable est très élevé ( $M_f = 4.01$ ) sable trop gros.

Les résultats bruts de l'ensemble des courbes granulométriques moyennes se prêtent mal pour une interprétation, il est nécessaire de porter une étude d'optimisation des paramètres gouvernant cette réponse.

## VI-2 : Etude de l'équation du modèle :

Après avoir déterminé l'équation du modèle linéaire, testé sa validité et la signification des coefficients, nous pouvons donc discuter les résultats.

Rappelons l'équation du modèle linéaire obtenu :

$$\hat{y}_i = 13.5777 - 2.3930.x_2 + 1.2300x_1.x_2 - 0.9460.x_2.x_3$$

D'après ce modèle, le coefficient qui semble avoir une grande influence sur la réponse (teneur en fines) est l'ouverture de sortie du broyeur ( $X_2$ ), puis l'interaction : Ouverture de sortie du concasseur primaire-Ouverture de sortie du broyeur, ainsi que l'interaction : Ouverture de sortie du broyeur - Amplitude de vibration.

**VI-2-1 : Effet de l'ouverture de sortie du broyeur :**

L'effet principal 2 qui concerne le réglage d'ouverture de sortie du broyeur, a un effet important sur la teneur en fines des sables de concassage,  $a_2 = - 2.393$ . C'est à ce niveau d'élaboration que se fait le contrôle de la teneur en fines des sables de concassage. Car les matériaux subissent une réduction importante de volume au niveau de la chambre du broyage ce qui laisse la roche calcaire du gisement de la SOMACOB, reconnue par sa structure pétrographique (taille fines des grains, un ciment micrite), à rejeté des quantités importante de fines.

**VI-2-2 : Etude des interactions :**

L'effet d'interaction 1-2 ( $a_{12} = 1.23$ ) est relatif à l'influence combinée de la dimension d'ouverture de sortie du concasseur primaire et la dimension d'ouverture de sortie du broyeur. Il est de même pour l'interaction 2-3 donnant l'influence combinée de la dimension d'ouverture de sortie du broyeur et celle de l'amplitude de vibration ( $a_{23} = 0.946$ ).

**VI-2-3 : Etude d'interaction 1-2 :**

L'étude de cette interaction nécessite la suppression de l'effet 3 (Amplitude de vibration), par le choix des expériences ou les couples de valeurs ( $x_1, x_2$ ) identiques :

Regroupons les expériences réalisées pour des couples de valeurs ( $x_1, x_2$ ) identiques :

- Couple 1 : ( $X_1 = 1, X_2 = 1$ ) :

Deux expériences remplissent cette condition :

Pt expérimental	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\bar{Y}$
D	+1	+1	-1	12.6996
H	+1	+1	+1	11.5600

En sommant les résultats de ces deux expériences, l'effet de troisième facteur et les interactions mettant en jeu cet effet (2-3) s'annulent, ainsi on peut évaluer l'action de l'interaction des facteurs 1 et 2 sur la réponse. Cette opération donne ce qui suit :

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = 1 \\ X_2 = 1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (12.6996 + 11.5600)/2 = 12.1289$$

De même pour :

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = -1 \\ X_2 = -1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (16.2068 + 18.7648)/2 = 17.4858$$

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = -1 \\ X_2 = +1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (11.1608 + 9.318)/2 = 10.2394$$

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = +1 \\ X_2 = -1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (15.47 + 13.4416)/2 = 14.4558$$

Ces résultats peuvent être représentés sur le graphique ci-dessous :

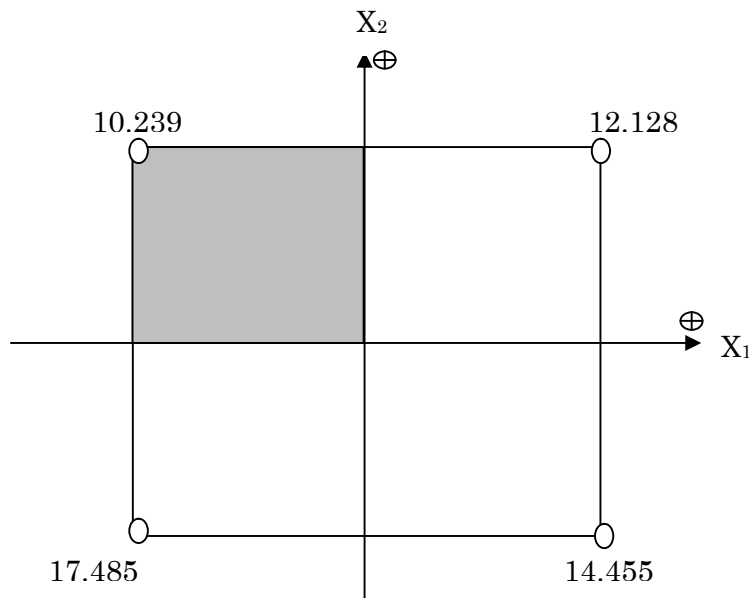


Figure (VI-9) : Diagramme d'interaction 1-2.

La meilleure réponse (10.239 %) est obtenue quand l'ouverture de sortie du concasseur à mâchoire est minimale et celle du broyeur est maximale. Car dans ces conditions le matériau subit une réduction plus importante dans la chambre de concasseur primaire, arrivant à la chambre de broyage qui est à son réglage maximal, il n'y aura pas de fortes pressions sur les particules des roches, donc moins de fines.

Les réglages optimaux des facteurs doivent être recherchés dans la zone hachurée, plus l'ouverture de sortie de concasseur primaire est faible et l'ouverture de broyeur est élevée plus la teneur en fines est minimale. Ce résultat est constaté par les observations expérimentales.

VI-2-4 : Etude d'interaction 2-3 :

Regroupant les expériences réalisées pour des couples de valeurs ( $X_2, X_3$ ) identiques pour supprimer l'effet du facteur 1 (Ouverture du concasseur primaire).

- Couple 1 : ( $X_2 = 1, X_3 = 1$ ) :

Deux expériences remplissent cette condition :

N° Essai	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\bar{Y}$
07	-1	+1	+1	9.318
08	+1	+1	+1	11.56

En sommant les résultats de ces deux expériences, l'effet de premier facteur et les interactions mettant en jeu cet effet (1-2) s'annulent. Ainsi on peut évaluer l'action de l'interaction des facteurs 2 et 3. Cette opération donne ce qui suit :

$$\left. \begin{array}{l} X_2 = 1 \\ X_3 = 1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (9.318 + 11.56)/2 = 10.439$$

De même pour les autres couples de valeurs identiques on obtient :

$$\left. \begin{array}{l} X_2 = -1 \\ X_3 = -1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (16.268 + 13.4416)/2 = 14.854$$

$$\left. \begin{array}{l} X_2 = -1 \\ X_3 = +1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (18.7648 + 15.470)/2 = 17.1174$$

$$\left. \begin{array}{l} X_2 = +1 \\ X_3 = -1 \end{array} \right\} \bar{Y}_{moy} = (11.1608 + 12.6996)/2 = 11.9302$$

Ces résultats peuvent être représentés sur le graphique ci-dessous :

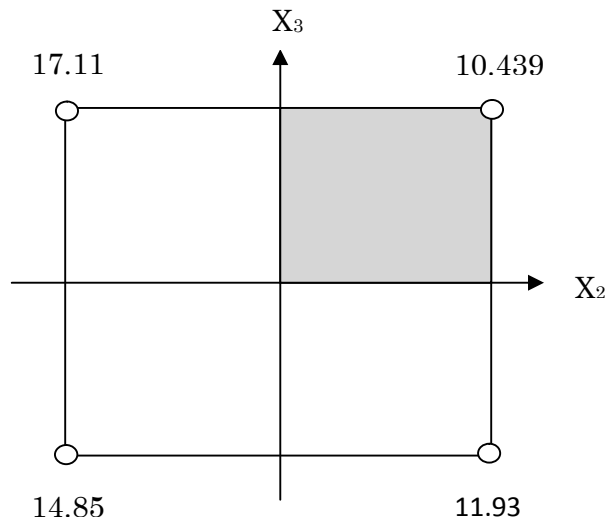


Figure (VI-10) : Diagramme d'interaction 1-2.

En augmentant l'ouverture de sortie du broyeur et l'amplitude de vibration on aura des quantités de fines moins importante.

### VI-3 : Evolution de la teneur en fines des sables de concassage :

#### VI-3-1 : Influence de l'ouverture de sortie du broyeur :

Les figures ci-dessous représentent la variation de la teneur en fines du sable 0/3 de la Somacob en fonction de l'ouverture de sortie du broyeur et pour une amplitude de vibration de 6 mm figure (VI-11) et 10 mm figure (VI-12) :

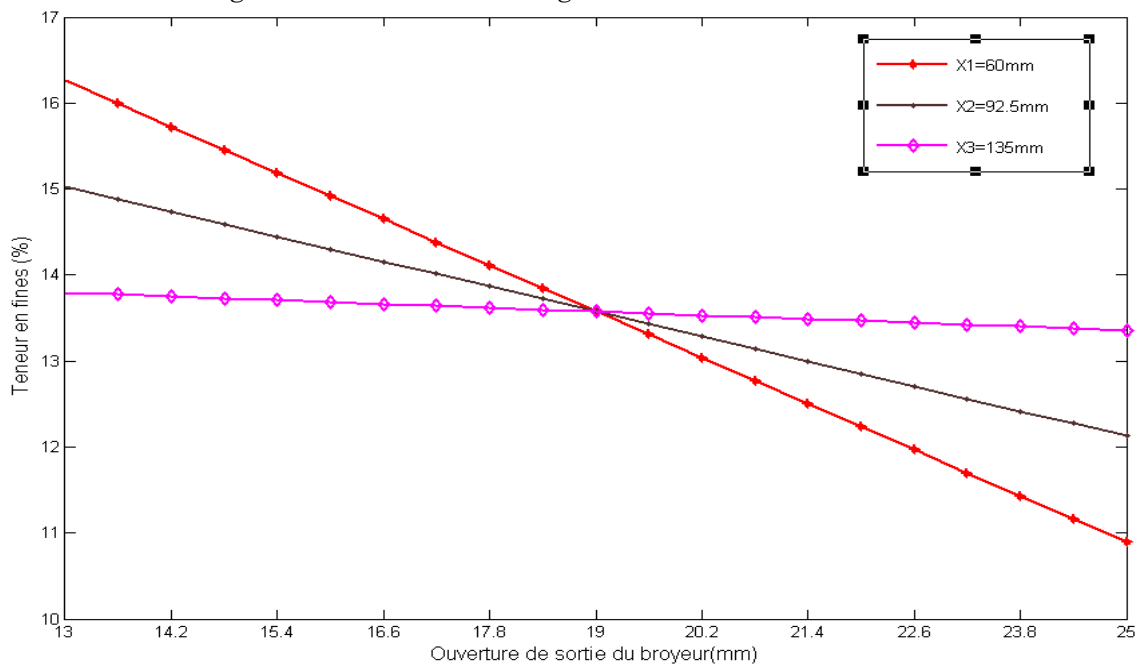
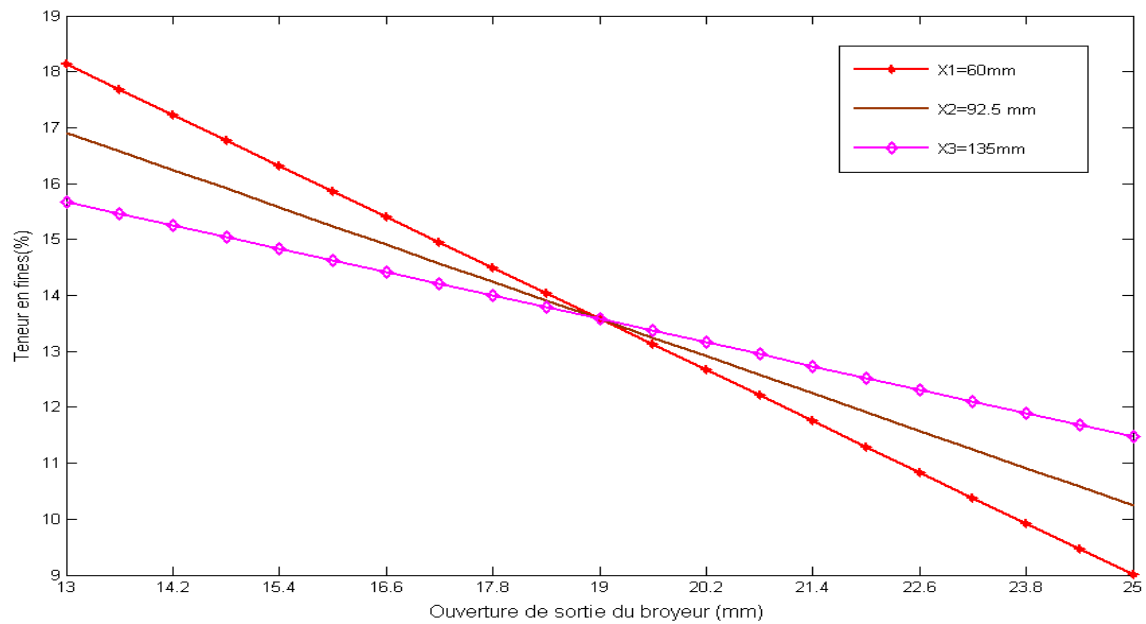


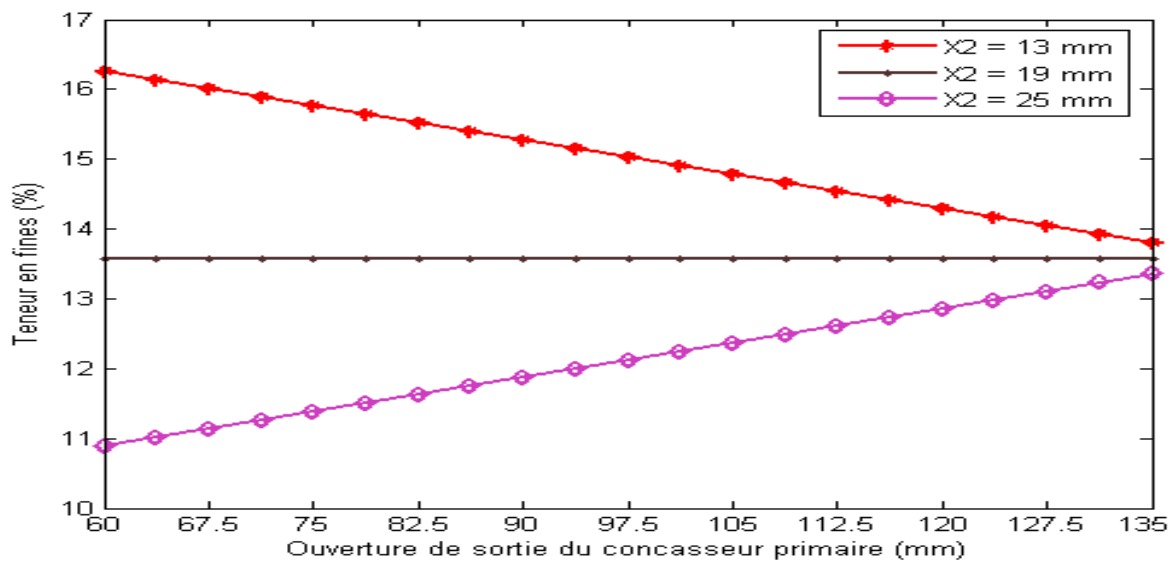
Figure (VI-11) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du broyeur pour une amplitude de 6mm.



**Figure (VI-12) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du broyeur pour une amplitude de 10mm.**

L'analyse des graphiques figure (VI-11 ), (VI-12 ) montre que l'amplitude de vibration a peu de signification sur la teneur en fines,  $y_{max}$  passe de 16.2 % à 18 % lorsque l'amplitude de vibration passe de 6 mm à 10 mm, par ailleurs la teneur en fines augmente inversement avec l'ouverture de sortie du broyeur, ainsi de même pour l'ouverture de sortie de concasseur primaire, mais cette fois ci cette remarque est valable pour des ouvertures de sortie du broyeur inférieur à 19mm, au delà de cette valeur c'est le contraire qui se passe.

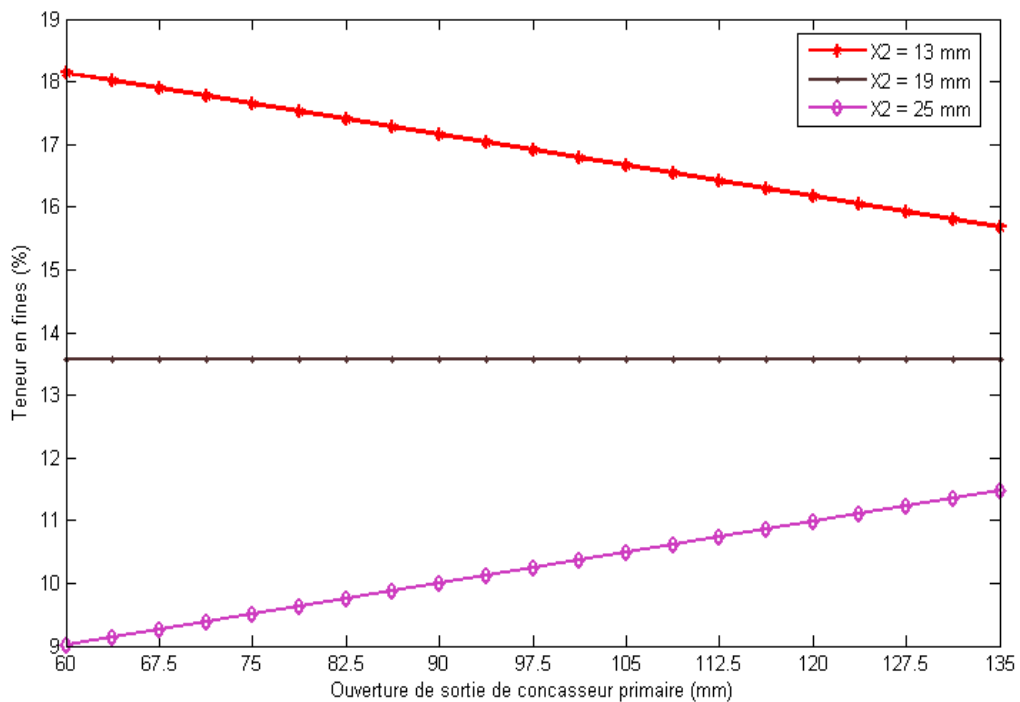
**VI-3-2 : Influence de l'ouverture de sortie du concasseur primaire:**



**Figure (VI-13) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'ouverture de sortie du concasseur primaire pour une amplitude de 6 mm.**

L'examen de la figure (VI-13) montre que la teneur en fines décroît avec l'augmentation de l'ouverture de sortie du concasseur primaire, si l'ouverture de sortie du broyeur est inférieure à 19 mm. Par contre, pour des ouvertures de sortie du broyeur supérieur à 19 mm la réponse augmente avec la diminution de l'ouverture de sortie du concasseur primaire.

Pour une ouverture de sortie de broyeur égale à 19 mm (valeur au centre d'intervalle) la teneur en fines ne varie pas en fonction de l'ouverture de sortie du concasseur primaire.



### concasseur primaire pour une amplitude de 10 mm.

L'allure de la figure (VI-14) est semblable à celle de la figure (VI-13), par ailleurs un décalage de 2% de la réponse est remarquable lorsque on passe d'une amplitude de vibration minimale à une amplitude maximale, pour des ouvertures de sortie du broyeurs égale à 13 mm (ouverture minimale), et 25 mm (ouverture maximale).



VI-3-3 : Influence de l'amplitude de vibration :

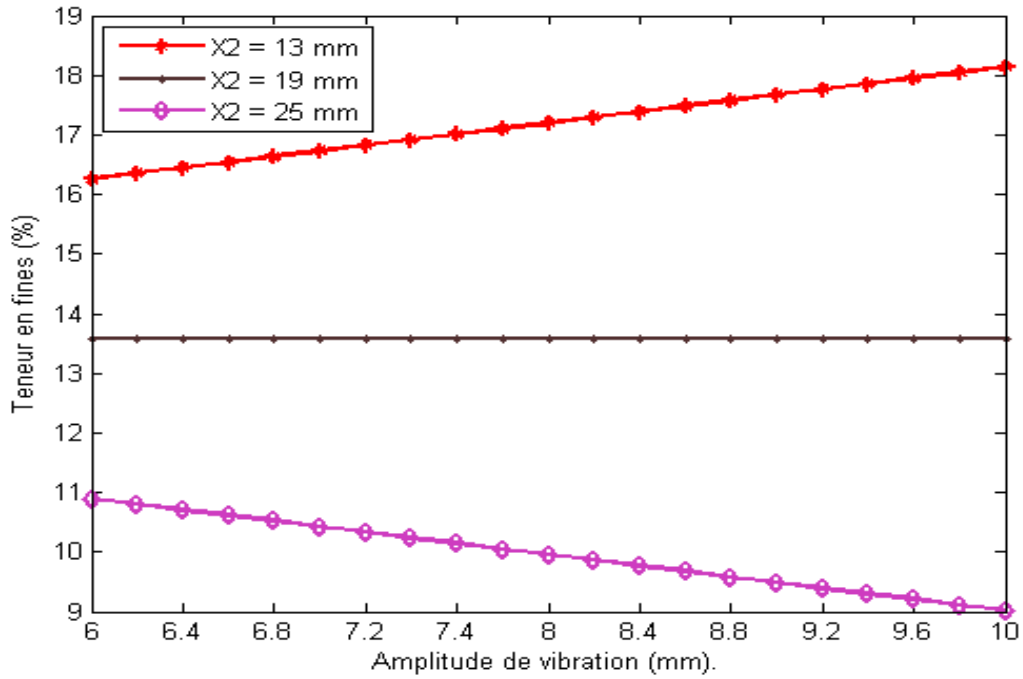


Figure (IV-15) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'amplitude de vibration Pour une ouverture de sortie du concasseur de 60 mm.

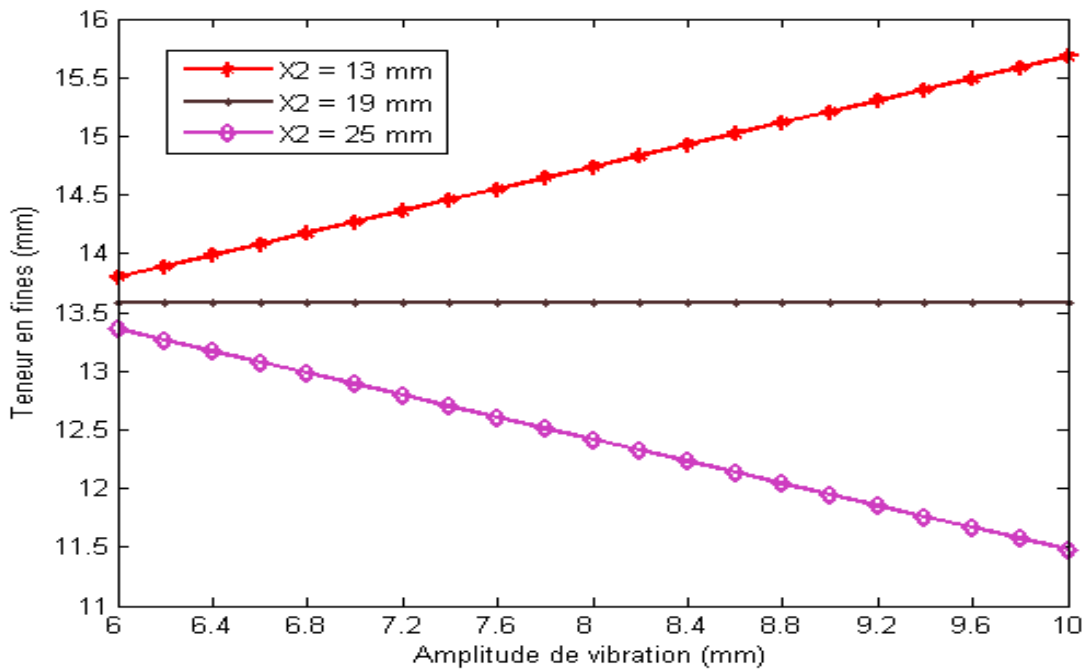


Figure (IV-16) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'amplitude de vibration pour une ouverture de sortie du concasseur de 135 mm.

L'examen des figures (VI-15), (VI-16) montrent que la teneur en fines des sables de concassage croît en fonction de l'amplitude de vibration pour des ouverture de sortie du broyeur inférieur à 19 mm valeur critique, cependant pour une ouverture de sortie de broyeur égale à 19 mm la moyenne de l'intervalle, la teneur en fines est constante quelque soit l'amplitude de vibration.

Par contre pour des ouvertures supérieures à 19 mm la teneur en fines décroît avec l'augmentation des amplitudes de vibration.

Ce ci est valable quelque soit l'ouverture de sortie du concasseur primaire.

### **VI-4 : Optimisation des paramètres :**

Le but de cette étape consiste à trouver l'ensemble des valeurs opératoires de nos paramètres :

- Ouverture de sortie du concasseur primaire.
- Ouverture de sortie du broyeur.
- Amplitude de vibration

Qui entraînent un état souhaité pour la station : l'objectif est d'avoir un sable concassé qui contient 10 à 12 % de fines ; En utilisant l'optimisation graphique ( courbes iso-réponses) nous fixons l'un des paramètres et nous cherchons la teneur en fines en fonction des deux autres paramètres.

Pour cela on a élaboré un programme qui trace les courbes d'iso- valeurs à l'aide du MATLAB ; Annexe (VI-1)

#### **VI-4-1 : Ouverture de sortie du concasseur primaire/Ouverture de sortie du broyeur :**

Les courbes d'iso-teneurs en fines suivantes illustrent la relation entre l'ouverture de sortie du concasseur primaire( $O_{scp}$ ) et l'ouverture de sortie du broyeur ( $O_{sb}$ ), pour des amplitudes de vibration( $A_v$ ) fixés, figure (VI-17), figure (VI-18) et permet le choix du couple ( $O_{scp} - O_{sb}$ ).

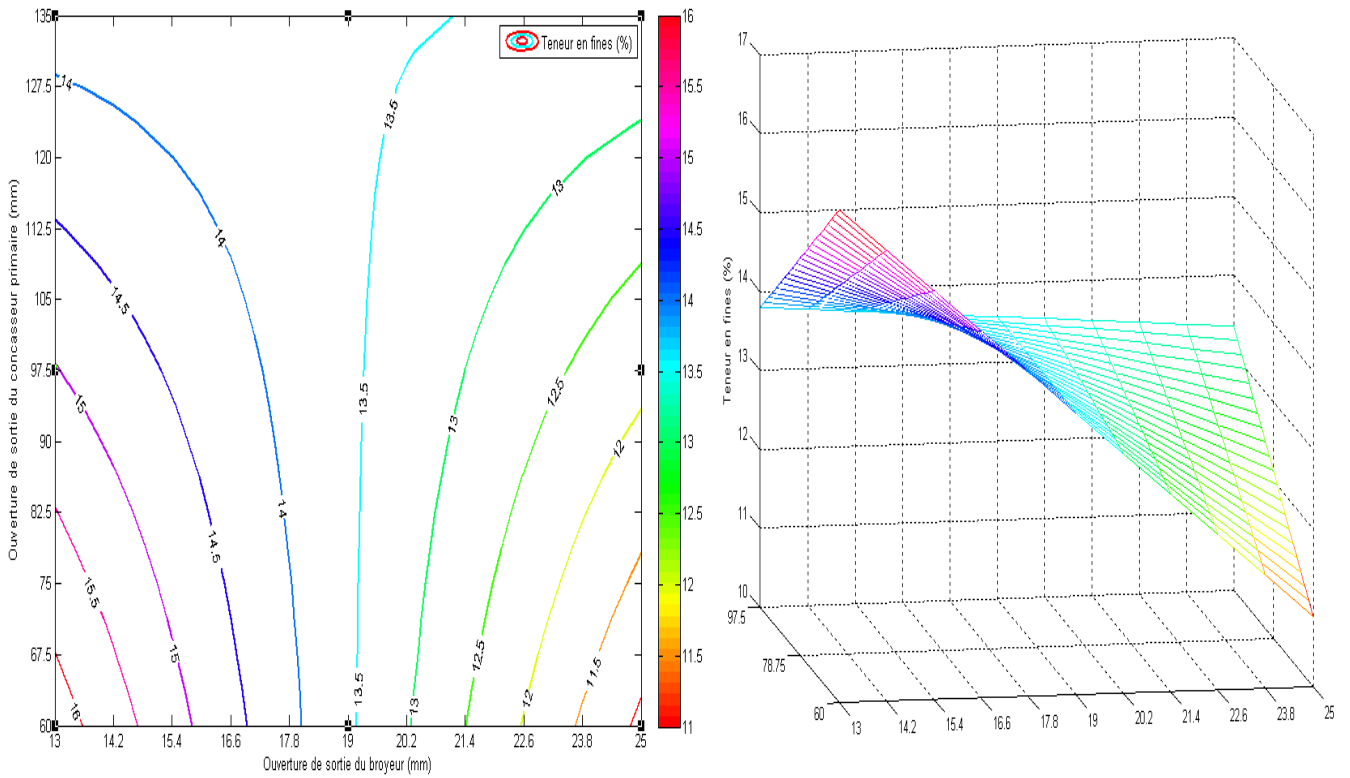


Figure (VI-17) : Iso- teneurs en fines pour  $X_3 = 6$  mm.

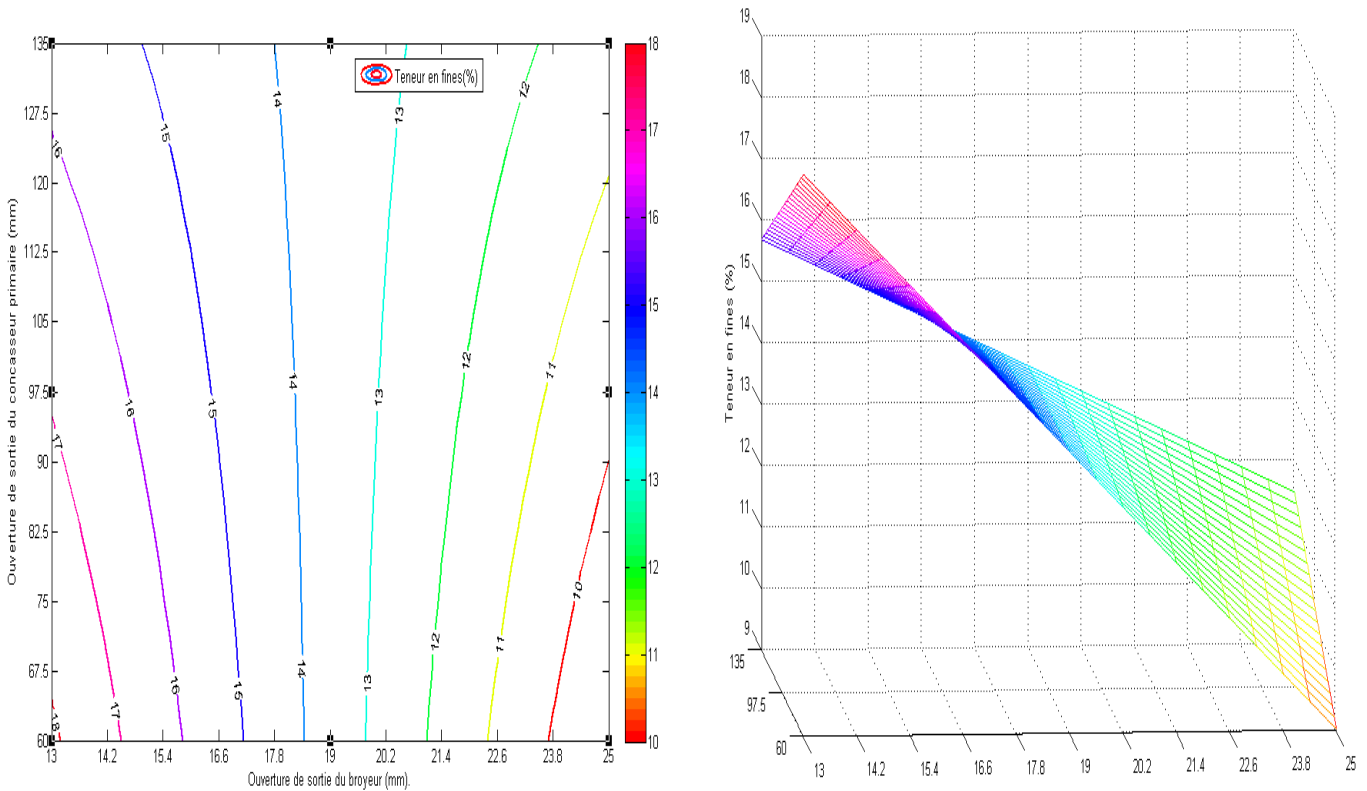


Figure (VI-18) : Iso- teneurs en fines pour  $X_3 = 10$  mm.

L'analyse des courbes d'iso-réponses figure (VI-17), (VI-18) nous permet de constater ce qui suit :

- La réponse voulue peut être atteinte dans le domaine d'étude.
- Les iso-teneurs en fines du plan  $X_2X_1$  varient assez peu quand  $X_3$  passe de sa valeur minimale 6 mm à sa valeur maximale 10mm, ce qui nous permet de confirmer la non signification de l'amplitude de vibration sur la teneur en fines des sables de concassage.
- L'objectif (pourcentage de fines entre 10 et 12 %) peut être atteint dans les cas suivants :
  - Intervalles de [60 à 93.75 mm] pour  $X_1$  ( $O_{scp}$ ), [22.6 à 25 mm] pour  $X_2$  ( $O_{sb}$ ), et ce pour une amplitude de vibration ( $A_v$ ) égale à son minimum ; 6 mm.
  - Intervalles de [60 à 135 mm] pour  $X_1$  ( $O_{scp}$ ), [20.3 à 23.8 mm] pour  $X_2$  ( $O_{sb}$ ), et ce pour une amplitude de vibration ( $A_v$ ) égale au maximum ; 10 mm.
- Pour garder  $Y$  constant (la teneur en fines), l'ouverture de sortie du concasseur primaire et l'ouverture de sortie du broyeur doivent être variées dans le sens contraire. Ce résultat peut concorder avec l'étude de l'interaction 1-2 qui précède.
- La teneur en fines augmente lorsque l'ouverture de sortie du broyeur diminue, cette remarque peut s'expliquer physiquement par les frottements qui augmentent entre les particules des roches au niveau de la chambre de broyage, lorsque les dents de broyeur s'approchent entre elles.

### VI-4-2 : Ouverture de broyeur / Amplitude de vibration :

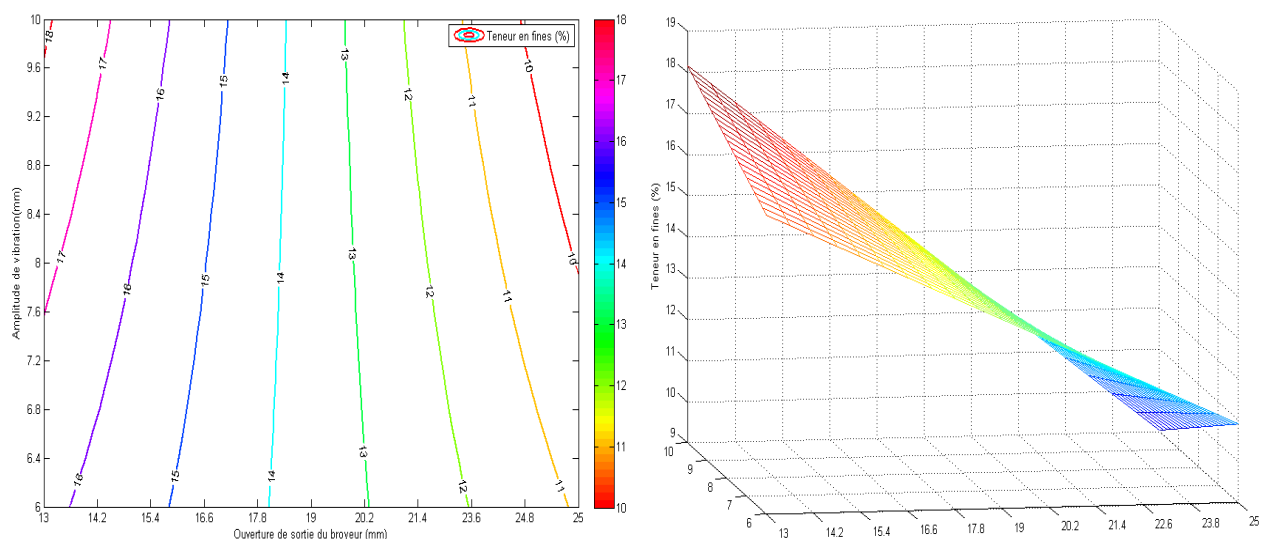
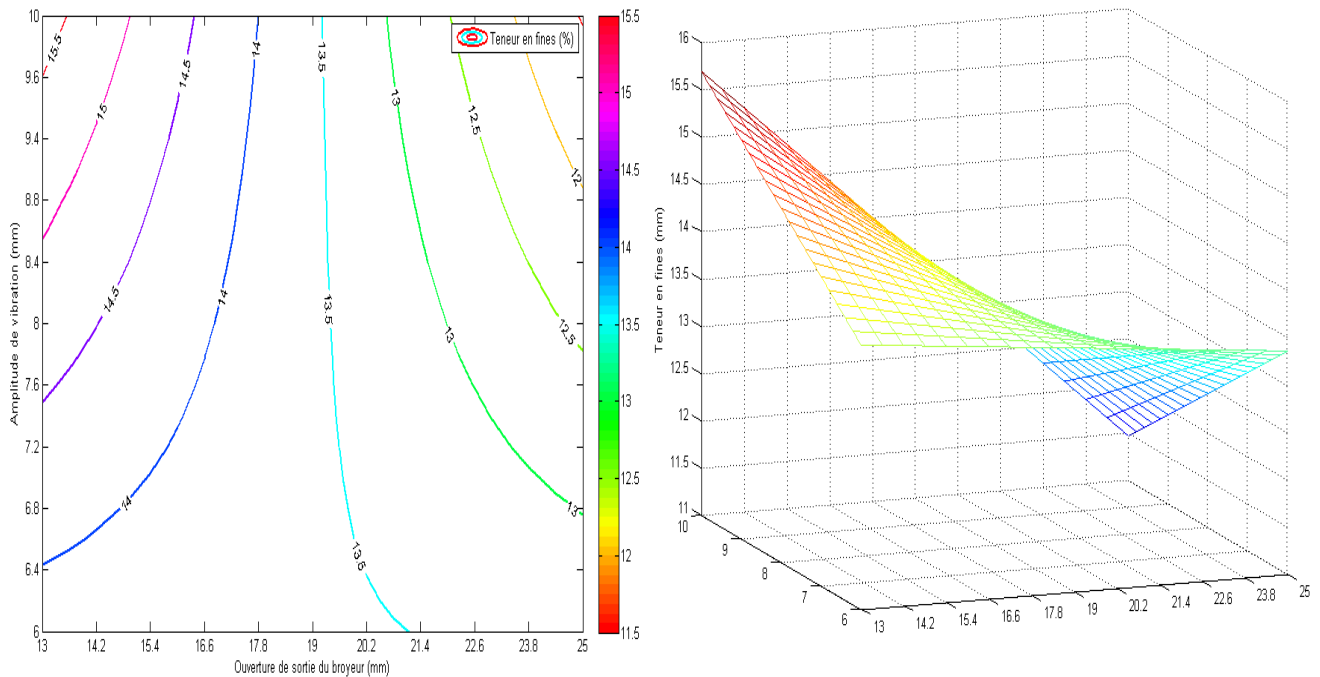


Figure (VI-19) : Iso- teneurs en fines pour  $X_1 = 60$  mm.



**Figure (VI-20) : Iso- teneurs en fines pour  $X_1 = 135$  mm.**

Cette exploitation du modèle va permettre le choix du couple : Ouverture de broyeur et amplitude de vibration, l'optimisation graphique de ces deux paramètres est représentée sur les figures ci-dessus. (VI-19 et VI-20)

L'ensemble des constatations qu'on peut tirer de ces figures sont :

- La réponse voulue peut être atteinte dans le domaine d'étude.
- Les courbes d'iso-teneurs en fines divergent plus dans le sens des ouvertures du broyeur, quand l'ouverture du concasseur primaire passe de son minimum 60 mm à son maximum 135 mm. Ce ci peut s'expliquer par le coefficient d'interaction  $a_{23}$  qui égale à - 0.94.
- La production des fines est à son maximum lorsque l'amplitude de vibration est maximale et l'ouverture du broyeur est minimale quel que soit l'ouverture de sortie du concasseur primaire. Ce ci s'explique par le fait que les fines produites en quantités élevée lorsque l'ouverture de broyeur est minimale, passeront toutes si l'amplitude de vibration est maximale.
- Le pourcentage en fines optimal peut être atteint dans les intervalles suivants :
  - [23.6 à 25 mm] pour l'Osb et quelque soit l'amplitude de vibration, avec Oscp fixée à son minimum 60 mm.
  - [22.5 à 25 mm] pour l'Osb et [9 à 10 mm] pour Av, avec Oscp fixée à son maximum 135 mm.

**VI-5 : Conclusion :**

En fin, l'examen de l'ensemble des résultats de ce modèle, nous amène à tirer les conclusions rassemblées dans les tableaux suivants :

**Tableau (VI-1) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'Ouverture de sortie du broyeur.**

Oscp	Y(%) en fonction d'Osb [13 à 25 mm]	
	Av : minimal 6 mm	Av : maximal 10 mm
Oscp minimal 60 mm	Y : diminue de 16.2 à 10.9	Y : diminue de 18.1 à 9
Oscp moyenne 92.5 mm	Y : diminue de 15 à 12.2	Y : diminue de 16.9 à 10.2
Oscp maximal 135mm	Y : diminue de 13.8 à 13.4	Y : diminue de 15.7 à 11.5
Y diminue en augmentant l'Oscp jusque à une valeur critique 19 mm, puis c'est le contraire qui se passe.		

**Tableau (VI-2) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'Ouverture de sortie du concasseur primaire.**

Osb	Y(%) en fonction d'Oscp [60 à 135 mm]	
	Av : minimal 6 mm	Av : maximal 10 mm
Osb minimal 13 mm	Y : diminue de 16.2 à 13.8	Y : diminue de 18.2 à 15.8
Osb moyenne 19 mm	Y : constante 13.5	Y : constante 13.5
Osb maximal 25 mm	Y : augmente de 10.8 à 13.8	Y : augmente de 9 à 11.5
Y diminue en augmentant l'Osb.		

**Tableau (VI-3) : Evolution de la teneur en fines en fonction d'amplitude de vibration.**

Osb	Y(%) en fonction d'Av [6 à 10 mm]	
	Oscp : minimal 60 mm	Oscp : maximal 135 mm
Osb minimal 13 mm	Y : augmente de 16.2 à 18.2	Y : augmente de 13.8 à 15.7
Osb moyenne 19 mm	Y : constante 13.6	Y : constante 13.6
Osb maximal 25 mm	Y : diminue de 11 à 9	Y : diminue de 13.4 à 11.5
Y diminue en augmentant l'Osb.		

L'analyse des courbes d'évolution de la teneur en fines des sables de concassage et des courbes d'iso-teneur en fines dans le domaine d'étude, permet de sélectionner le réglage optimal des valeurs opératoires de nos trois paramètres.

Pour avoir un sable de teneur en fines de 10 à 12%, en prenant comme réglage l'amplitude de vibration à son minimum 6 mm (pour des raisons de gain d'énergie de vibration, et de ne pas mettre le cribleur à sa puissance maximale), et d'après l'optimisation graphique figure (IV-17) on aura les réglages suivants pour les deux autres facteurs :

- [60 à 93.75 mm] pour l'ouverture de sortie du concasseur primaire.
- [22.6 à 25 mm] pour l'ouverture de sortie du broyeur.

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**



### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a pour objectif de valoriser les matériaux granulaires issus des gisements de roches massives de la wilaya de Bejaia, la conception de la carte locale des gisements des granulats de cette wilaya constitue un bilan des ressources en cette matière qui nous permet d'avoir des éléments de base sur la production et la nature de ces granulats. Ainsi, cette carte peut servir comme outil pour l'administration locale pour prendre des décisions dont l'objectif est de répondre aux besoins locaux et d'améliorer la qualité de ces matériaux.

Les résultats des essais de caractérisation des granulats de la carrière de SOMACOB nous a permis de conclure que :

- Les résultats d'analyse pétrographique et de la diffraction à rayons X ont montrés que la roche exploitée pour la production des graviers et du sable de concassage est une roche Calcaire à teneur en  $\text{CaCO}_3$  élevé.
- Les produits finis 3/8, 8/15, 15/25 présentent :
  - De bonnes résistances aux chocs  $LA < 30$ .
  - Une bonne propreté superficielle pour la 8/15 et 15/25, par contre la 3/8 nécessite un lavage.
  - Une distribution granulométrique continue.
- Le sable 0/3 contient 16.8% de fines ce qui dépasse les teneurs prescrites dans les normes utilisées en l'Algérie.
- Le sable 0/3 a un équivalent de sable visuel de 82.55 et un équivalent de sable à piston de 77.40 avec une  $VB = 0.25$  ce qui nous permet d'affirmer sa propreté.
- Les résultats des essais mécaniques et des mesures des retraits des mortiers confectionnés à base du sable concassé à différents pourcentages de fines (0, 5, 10, 15, 20%), ont permis d'avoir un optimum à 10 % de fines.

L'utilisation de la méthode des plans d'expériences ; plan factoriel complet à deux niveaux ( $2^K$ ) pour la modélisation de la station de traitement des granulats de la SOMACOB d'Akbou afin d'avoir l'optimum en fines, a aboutit à une fonction mathématique (modèle) de premier degré, qui relie la grandeur d'intérêt c'est-à-dire la teneur en fines des sables concassés, aux trois paramètres opératoires choisis (Ouverture de sortie du concasseur primaire, ouverture de sortie du broyeur, amplitude de vibration). Cette fonction semble décrire correctement le fonctionnement du processus d'élaboration des granulats.

## Conclusion

---

L'analyse du modèle a montré que le paramètre le plus influent est l'ouverture de sortie du broyeur avec un effet de (- 2.393), et une forte interaction entre l'ouverture de sortie du concasseur primaire et l'ouverture de sortie du broyeur (1.23 ). La validation du modèle est réalisée en utilisant les tests statistiques et graphiques.

Les conditions optimales pour l'obtention d'un sable concassé de 10 à 12 % de fines jugé de qualité adéquate ont été déterminées en utilisant une optimisation graphique à l'aide d'un programme élaboré avec MATLAB, qui consiste à fixer un des paramètres et chercher les iso-teneurs en fines en fonction des deux autres paramètres.

Les valeurs optimales des paramètres obtenues sont adimensionnelles, et peuvent être transformées en valeurs réelles par un simple remplacement des valeurs codées (-1) et (+1) par leurs vraies valeurs opératoires.

Les iso-teneurs en fines obtenus sont à l'intérieur du domaine d'étude, ce qui permet de conclure que le modèle mathématique adopté est applicable dans les conditions opératoires considérées.

Parmi les réglages des paramètres qui semblent être optimums on cite :

- L'amplitude de vibration minimale : ( $A_v = 6 \text{ mm}$ ).
- L'ouverture de sortie de concasseur primaire : ( $60 \text{ mm} < O_{scp} < 93.75 \text{ mm}$ ).
- L'ouverture de sortie du broyeur : ( $22.6 \text{ mm} < O_{sb} < 25 \text{ mm}$ ).

En guise de perspectives, il est intéressant de poursuivre cette étude en faisant le même travail de modélisation avec la réponse en terme de module de finesse, et d'essayer d'optimiser les paramètres opératoires afin de satisfaire les deux réponses au même temps. (Teneur en fines et module de finesse des sables de concassage). Il est aussi intéressant de généraliser cette modélisation à d'autre station en tenant compte des spécificités de chacune (nature de matériaux, type de matériels) et d'étudier l'influence d'autres paramètres tels que le débit du matériau versé vers le concasseur , lavage...etc.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : BENAYOUB. A « La problématique de l'utilisation des sables de concassage dans les bétons hydraulique » Revue du secteur d'énergie et des mines N°5 Avril 2006.
- [2] : BENACHOUR.Y, ADJALI. S et KOUTCHOUKALI. N; « Reconnaissance des sable de concassage, cas de la région de Constantine », Séminaire "Ciment et Béton" Bejaia ; Juin 1992.
- [3]: DEGOUET. C « Caractérisation des matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux ; Mise en œuvre d'une méthode d'investigation expérimentale et numérique » Thèse Doctorat ; Université de Bretagne Occidentale Brest.
- [4]: BROWN. R-L. & RICHARDS. J-C « Principles of powder mechanics» Pergamon Press ; 1970.
- [5] : BOUARROUDJ. M-T « Bilan des activités minière année 2005 » Communication ministre de l'énergie et des mines Direction générale des mines ; Alger Septembre 2006.
- [6]: Normalisation française pour la classification « Granulats » NFP 18-540.
- [7]: ADDAM. M-N « Propriétés des bétons » Edition Eyrolles ; Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton SHERBROOKE- LAVAL 2000.
- [8]: TOURENQ.C, DENIS. A « Propriétés des granulats – Essais et Spécifications » Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées Paris 1990.
- [9]: JEMMALI. N « Influence de la forme de la rugosité des particules d'un granulats sur les propriétés et les coûts de béton compacté au rouleau »; Mémoire de maitrise sciences appliquées Spécialité: génie civil ; Sherbrooke -Québec, CANADA.
- [10] : TOURENQ. C , PRIMEL. L « Propriétés et prospection des roches et des granulats », Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées ; 1990.
- [11]:BIZET. A ; Communication « Valorisation des sables de concassage » Séminaire PUBLITECH Hotel SOFITEL (Alger) ; Juin 1995.
- [12] : BENNA.Y « Communication sur la valorisation des sables de concassage » Séminaire PUBLITECH ; Alger ; Juin 1995.
- [13] : DREUX .G, FESTA. J « Nouveau Guide du Béton » Eyrolles ; 1995.
- [14]: (SABLOCRATE) ; Projet national de recherche/développement « Béton de sable ; Caractéristiques et pratiques d'utilisation »; presse de l'école national des ponts chaussées ; 1994.
- [15] : DELILLI.J-P, MOUTOT.J-P « LE CRIBLAGE » Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées ; 1990.
- [16] : BERTON. Y, BERRE.P « Guide de Prospection des matériaux de carrière » BRGM.

- [17] : TOURENQ.C « Granulats ; Sables, gravier et concassés de carrières » ; Technique de l'ingénieur, Traité construction ; 1989.
- [18] : ARCHIMBAUD.C, BERTHAIL.J, Claude. J, EXBRAYAT.A, MISHELLANY « Lavage des granulats et traitement des sables » ; Presse de l'école nationale des ponts chaussées ; 1990.
- [19] : ARDOUIN, G « La propreté des sables fillerisés » ; Revue général des routes et aérodromes N° 592 Décembre 1982.
- [20] : DENIAU. M , ARCHIMBAUD.C « Installation temporaires de production de granulats » presse de l'école national des ponts chaussées ; 1990.
- [21] : CAMPANAC. R , DAMIAN. L , MASSON. M « Schéma d'approvisionnement en granulats du département des Bouches-du-Rhone,France » Bulletin de liaison des laboratoires des Pontes et chaussées ; Décembre 1984.
- [22] : ARQUIE.G, GUIZOL.CH, LASSARTESE.J « Présentation d'une exploitation » Presse de l'école nationale des ponts chaussées ; 1990.
- [23] : BENDAOU. E ; « Contrôle de qualité des granulats destinés à la construction routière » journées d'étude à Alger du 21 au 22 décembre 1997
- [24] : BOULARAK. M , BENACHOUR. Y « Rôle des laboratoires dans la qualité ». 1<sup>eres</sup> rencontres nationales sur les granulats. Alger. Décembres 1993.
- [25] : Audit technique des carrières ; Organisme national de contrôle technique des travaux publics ; 2002.
- [26] : ARQUI. G , CAMUS. A , CHARREAU. M « Le marché des granulats en France » Presse de l'école nationale des ponts chaussés ; 1990.
- [27] : ARQUIE. G , DUPAIN. P , FAVREAU. R « Politique des granulats » Presse de l'école nationale des ponts chaussés ; 1990.
- [28] : BENSEBTI. S-E, FERKOUS. S, HOUARI. H , GOUMMADI. Z « Mécanique des bétons sous conditions locales ; Paramètres de composition » Revue Sciences & Technologie B-N°24 ; Décembre 2005.
- [29] : BERTRANDY. R « Influence des fillers calcaires sur la maniabilité des bétons » Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux publics ; N° 328, PARIS ; Mai 1975.
- [30] : BERTRANDY. R « les granulats calcaires dans les mortiers et bétons » ; Revue Scientifique et Industrie ; Pont de Saint – Florent ; Le vieil N° 400 Juillet 1968.
- [31] : GUEMMADI. Z « Valorisation des granulats Calcaires – contribution à l'étude du comportement du béton à base de sable calcaire à teneur en fillers variable : Condition locales » Thèse Magister, Université Mentouri , Constantine (1999).

- [32] : GUMMADI.Z , HOUARI.H « Influence de l'ajout de fines calcaires sur les performances des bétons dans l'EST Algérien » Annales de bâtiment et des Travaux publics N°6 ; Décembre 2002.
- [33] : Y.BENACHOUR ; L.T.P.est Constantine- ; « Contribution à l'étude de l'influence des fines sur les caractéristiques mécaniques du béton ».Thèse de magister soutenue a l'université de Constantine.
- [34] : BENACHOUR.Y, .ADJALI.S et KOUTCHOUKALI.N ; «Amélioration de la quantité du béton par correction du sable de concassage, cas de la région de Constantine», Séminaire «Ciment et béton » Bejaia Juin 1992.
- [35] : URBAIN. F , NIKOLOV. S et LEMAIRE. R , LUCION.CH « Défillélisation des sables de concassage par voie pneumatique et effet Corona » Revue N° 20 ; les Techniques de l'industrie minérale ; Décembre 2003.
- [36] : Document carrière SOMACOB Akbou.
- [37] : DUPAIN.R , LANCHON.R et SAINT-ARROMAIN.JC « GRANULAT, SOL, CIMENT, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » Edition CASTEILLA Paris 1999.
- [38] : Document du ministre de l'Urbanisme et du logement - Ministre des transports ; Laboratoire des Ponts et Chaussées ; Juillet 1982.
- [39] : PIELTAIN.F , MATHIEU.C « Analyse physique des sols Méthode choisies » ; PARIS Lavoisier TEC et DOC 1997.
- [40] : COUTELLE. J, DAUTRIA.J-M , VITEL. G ; AZZOUNIA « Détermination des minéraux au microscope polarisant ». OPU
- [41] : SADO. G , SADO. M-CH « plans d'expérience de l'expérience à l'assurance de qualité » ; Edition AFNOR 2000.
- [42] : GILLON.F « Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur a commutation » Thèse : doctorat ; université des sciences et de technologie de Lille ; Décembre 1997.
- [43] : GOUPY.J « Introduction aux plans d'expériences » DUNOD 2éme édition paris 2001.
- [44] : GOUPY.J « plans d'expériences pour surface de réponse » ; DUNOD paris 1999.
- [45] : TOURBIER.Y, BENOIST.D, TOURBIER.S-G « Plans d'expériences : Construction et Analyse » Lavoisier ; 1994.
- [46] : ROBERT. P, SCHAREF. J-P « Chimie Industrielle » Dunod Paris ; 1997.
- [47] : SAPORTA.G « Théorie et méthodes de la statistique » ; Edition TECHNIP 1978.

[48] : KAFAROV.V « Méthode cybernétique et technologie chimique » ; Edition MIR  
Moscou 1974.

[49] : GILLBERT.N « STATISTIQUE » Edition HRW LTée Montréal 1978.

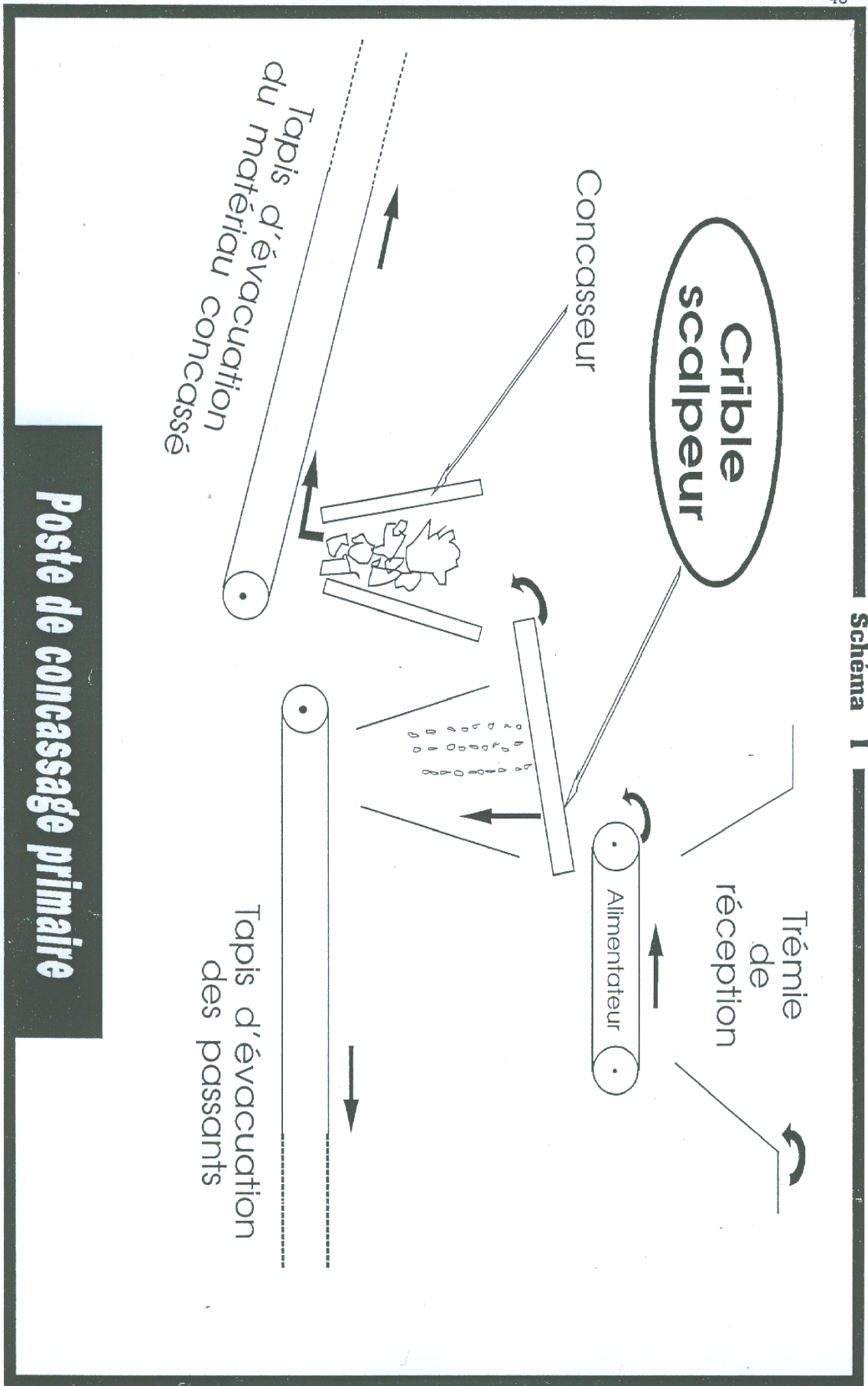
[50] : Document technique « concasseur à mâchoires simple volet type VB 0806 »  
SOMACOB.

[51] : Document technique « Broyeur à cône SYMONS 4' ST » SOMACOB.

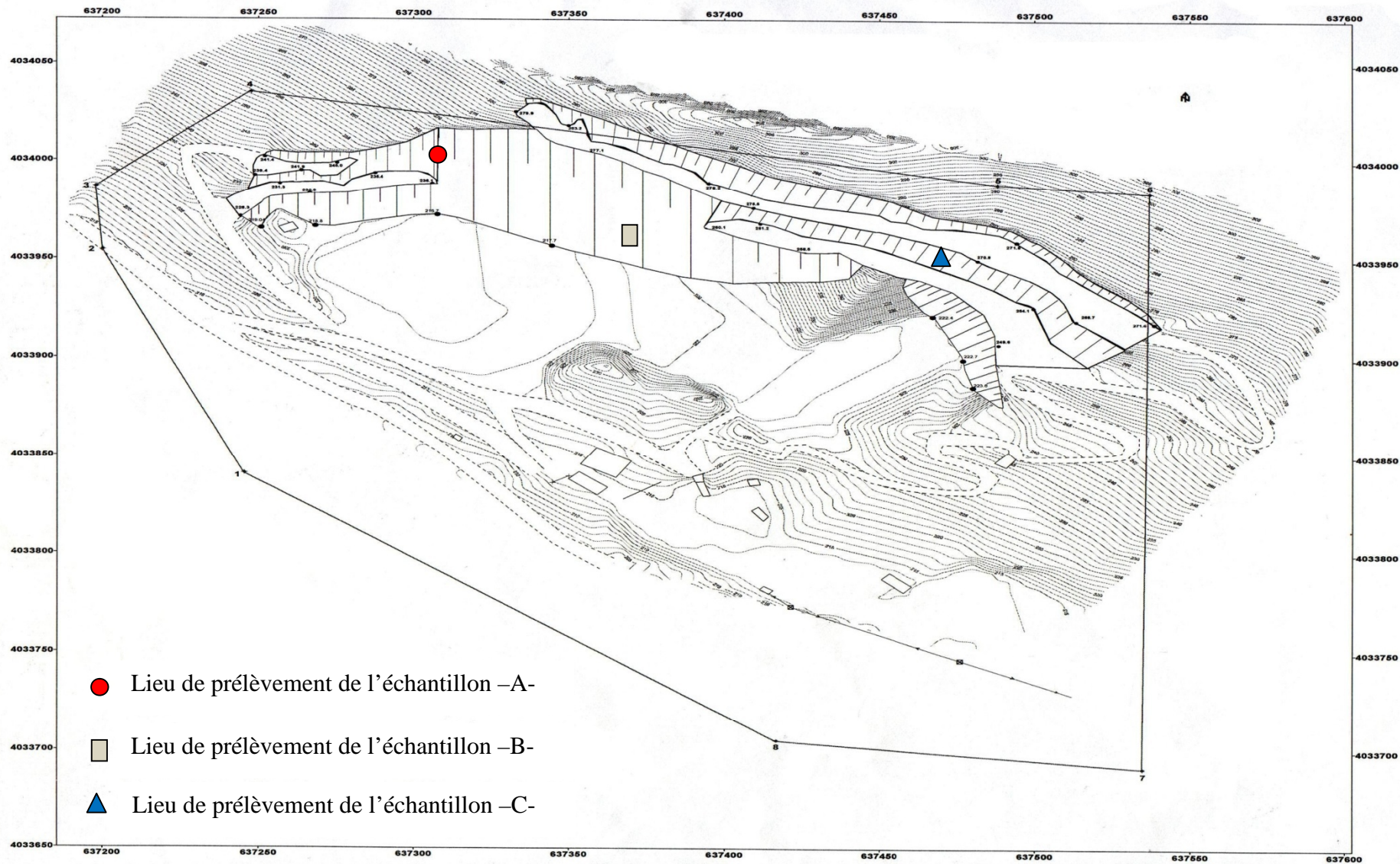
[52] : Document technique « Cribles vibrants à balourd de type CVB 1540 » SOMACOB.

# ANNEXES





# LEVE TOPOGRAPHIQUE DE LA CARRIERE SOMACOB AKBOU



- Lieu de prélèvement de l'échantillon -A-
- Lieu de prélèvement de l'échantillon -B-
- ▲ Lieu de prélèvement de l'échantillon -C-

## LEGENDE

1 - point de delimitation	- courbe de niveau
- limite de la concession	- talus
- piste	- gradin
⊞ - poteau électrique	- concasseur
⊞ - transformateur	- giratoire
□ - bureau	- sauterelle
— mur	□ - debarras
++ - barriere	

Systeme de coordonnées : " U.T.M / Clarke 1880 "ANGLAIS"  
 Echelle: 1/500  
 Equidistance des courbes: 01m

Echelle 1/500	Année 2007
<b>SOMACOB AKBOU</b>	
LEVE TOPOGRAPHIQUE DE LA CARRIERE DE SOMACOB AKBOU	
Réalisé par :	
OFFICE NATIONAL DE LA RECHERCHE GEOLOGIQUE ET MINIERE	
Direction Régionale Centre YEP OUEBOU	
D.R.G.M	
Chargé d'Antenne Régionale Centre	M.C. IYASSI
Technicien Topographe	O. OUDJILI
Technicien Topographe	R. WELAÏFA

Annexe (III-1)

## Annexe (III-2)

### Résultats des essais : flexion – Compression à 2 jours :

Série	N°	Essai de flexion		Essai de compression	
		F <sub>f</sub> (KN)	R <sub>f</sub> (MPA)	F <sub>c</sub> (KN)	R <sub>c</sub> (MPA)
SN	1	0.58	1.36	6.83	4.27
				6.74	4.21
	2	0.53	1.26	6.35	3.97
				6.53	4.08
	3	0.57	1.37	6.67	4.17
			5.71	3.57	
SSF %	1	1.01	2.38	12.51	7.82
				11.77	7.36
	2	0.95	2.25	12.08	7.55
				12.22	7.64
	3	1.10	2.60	12.17	7.61
			12.57	7.85	
S5 %F	1	1.61	3.78	20.78	12.99
				20.75	12.97
	2	1.42	3.34	20.00	12.50
				19.42	12.13
	3	1.43	3.37	19.92	12.45
			19.44	12.15	
S10 %F	1	1.41	3.31	19.41	12.13
				17.34	10.84
	2	1.13	2.66	18.42	11.51
				17.13	10.71
	3	1.15	2.71	17.20	10.75
			17.18	10.74	
S15 %F	1	1.07	2.53	11.58	7.24
				16.36	10.23
	2	1.02	2.40	16.10	10.06
				14.88	9.30
	3	1.07	2.52	16.24	10.15
			16.27	10.16	
S20 %F	1	1.21	2.85	16.98	10.61
				18.15	11.34
	2	1.08	2.53	17.96	11.23
				17.46	10.91
	3	1.05	2.47	17.48	10.92
			17.24	10.77	

## Annexe (III-2)

### Résultats des essais : flexion – compression à 7 jours :

Série	N°	Essai de flexion		Essai de compression	
		F <sub>f</sub> (KN)	R <sub>f</sub> (MPA)	F <sub>c</sub> (KN)	R <sub>c</sub> (MPA)
SSN	1	1.48	3.48	20.45	12.78
				20.64	12.90
	2	1.29	3.05	20.95	14.34
				21.11	13.19
	3	1.47	3.46	20.44	12.78
				21.00	13.13
S0 %F	1	2.44	5.74	39.16	24.47
				32.99	20.62
	2	2.39	5.61	38.04	23.77
				39.68	24.80
	3	2.49	5.84	39.55	24.72
				41.31	25.82
S5 %F	1	2.90	6.82	57.43	35.89
				50.85	35.78
	2	2.81	6.59	54.29	33.39
				55.24	34.52
	3	2.87	6.73	48.28	30.18
				45.00	28.13
S10 %F	1	3.02	7.10	61.56	38.48
				54.07	33.80
	2	3.01	7.06	61.59	38.49
				63.30	39.56
	3	3.03	7.11	62.30	38.93
				60.46	37.79
S15 %F	1	2.58	6.06	56.87	37.57
				59.35	37.09
	2	2.83	6.64	60.22	37.64
				39.02	30.64
	3	2.76	6.47	54.09	33.81
				51.22	32.01
S20 %F	1	2.86	6.72	59.78	37.36
				54.96	34.35
	2	2.90	6.81	57.80	36.12
				56.61	35.38
	3	2.79	6.55	60.07	37.54
				53.53	33.45

## Annexe (III-2)

### Résultats des essais flexion – compression à 14 jours :

Série	N°	Essai de flexion		Essai de compression	
		F <sub>f</sub> (KN)	R <sub>f</sub> (MPA)	F <sub>c</sub> (KN)	R <sub>c</sub> (MPA)
SN	1	2.26	5.31	58.22	36.39
				62.89	39.31
	2	2.16	5.07	65.54	40.97
				62.58	39.11
	3	2.31	5.42	64.45	40.28
				62.88	39.30
SSF	1	2.84	6.67	57.49	35.93
				57.39	35.87
	2	2.48	5.82	53.98	33.74
				57.14	35.91
	3	2.37	5.56	55.82	34.89
				59.73	37.33
S5 %F	1	2.99	7.02	58.01	36.25
				52.61	32.88
	2	3.46	8.13	53.99	33.74
				60.10	37.56
	3	2.87	6.75	70.82	44.26
				68.72	42.59
S10 %F	1	3.12	7.32	69.88	43.69
				71.99	45.00
	2	3.65	8.56	75.45	47.15
				73.24	45.77
	3	3.22	7.55	75.39	47.12
				70.40	43.84
S15 %F	1	2.69	6.32	64.50	40.31
				65.11	40.69
	2	2.68	6.30	72.23	45.15
				68.90	43.06
	3	3.00	7.04	65.03	41.02
				68.67	42.92
S20 %F	1	2.87	6.73	71.46	44.66
				70.89	44.31
	2	2.94	6.90	40.63	44.14
				70.53	44.08
	3	3.59	8.42	69.37	43.35
				71.78	44.86

## Annexe (III-2)

### Résultats des essais flexion – compression à 28 jours :

Série	N°	Essai de flexion		Essai de compression	
		F <sub>f</sub> (KN)	R <sub>f</sub> (MPA)	F <sub>c</sub> (KN)	R <sub>c</sub> (MPA)
SN	1	2.47	5.80	71.36	44.60
				69.04	43.15
	2	2.90	6.80	66.97	41.85
				67.42	42.14
	3	2.87	6.72	68.44	42.77
				69.51	43.44
SSF	1	3.13	7.34	78.94	49.34
				78.39	48.99
	2	3.14	8.01	79.83	49.90
				81.16	50.72
	3	3.15	8.03	85.67	53.54
				83.03	52.52
S5 %F	1	3.26	7.66	86.07	53.79
				71.68	44.80
	2	3.24	7.59	82.81	51.76
				83.28	52.05
	3	4.09	9.60	81.71	51.07
				83.23	52.02
S10 %F	1	3.21	7.54	97.75	61.10
				72.93	45.58
	2	3.90	9.16	95.41	59.63
				95.78	59.86
	3	3.88	9.11	92.62	57.88
				92.72	57.95
S15 %F	1	3.11	7.30	58.24	53.28
				86.84	54.27
	2	3.29	7.72	78.3	49.27
				69.87	43.67
	3	3.03	7.11	67.36	42.10
				74.86	46.79
S20 %F	1	3.58	8.40	87.01	54.38
				88.12	55.08
	2	3.08	7.23	86.86	54.29
				90.15	56.35
	3	3.68	8.63	92.41	57.75
				89.50	55.94

## Annexe (III-3)

### Résultats des Retraits en fonction de l'âge de mesure

Série	N°	$\Delta L$ en fonction de l'âge de mesure ( $10^{-6}mm$ )					
		$\Delta L$ 2 jours	$\Delta L$ 7jours	$\Delta L$ 14jours	$\Delta L$ 21jours	$\Delta L$ 28jours	$\Delta L$ 60jours
SN	1	27	73	90	94	106	131
	2	23	66	84	95	112	130
	3	22	70	81	90	103	124
SSF	1	33	76	94	103	112	121
	2	27	71	79	87	97	106
	3	23	55	67	72	80	93
S5F %	1	27	67	77	86	107	110
	2	24	59	70	98	90	99
	3	32	61	78	87	97	104
S10F %	1	25	66	77	88	97	104
	2	20	60	69	79	92	100
	3	24	60	70	80	94	107
S15F %	1	30	72	84	94	104	132
	2	19	64	77	81	92	61
	3	31	75	77	110	124	186
S20F %	1	19	70	86	91	101	117
	2	35	77	92	97	102	109
	3	34	69	90	100	123	128



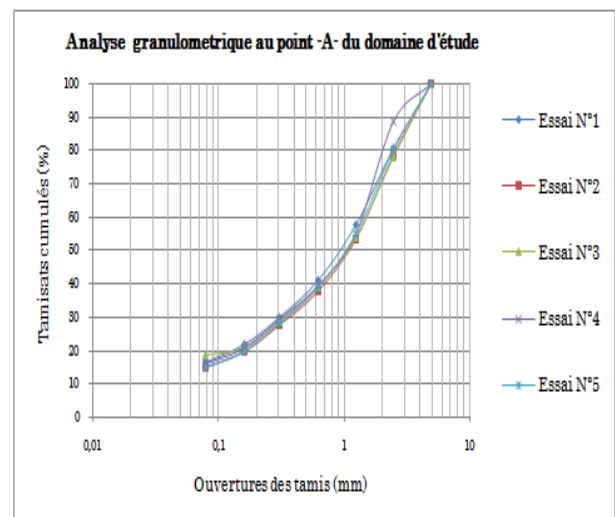
Essai N° 1 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	293,49	193.49	19.349	80.651
1,25	229,32	422.81	42.281	57.719
0,63	166.44	589.25	58.925	41.075
0,31	111.28	700.53	70.053	29.947
0,16	83.59	784.12	78.412	21.588
0,08	49.28	833.4	83.34	16.66

Essai N° 2 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	214,57	214.47	21.447	78.54
1,25	254.79	469.36	46.936	53.064
0,63	154.34	623.7	62.37	37.63
0,31	102.34	726.04	72.604	27.396
0,16	78.16	804.2	80.42	19.58
0,08	47.57	851.74	85.174	14.826

Essai N° 3 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	222.01	222.01	22.201	77.79
1,25	239.22	461.23	46.123	53.877
0,63	147.76	608.99	60.899	39.101
0,31	104.85	713.84	71.384	28.616
0,16	77.53	791.37	79.137	20.863
0,08	22.00	813.37	81.337	18.663

Essai N° 4 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	216.13	216.13	21.613	88.787
1,25	235.99	452.12	45.212	54.788
0,63	154.77	606.89	60.689	39.311
0,31	102.07	708.96	70.896	29.104
0,16	84.66	793.62	79.362	20.638
0,08	48.48	842.1	84.21	15.79

Essai N° 5 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	201.66	201.66	20.166	79.84
1,25	251.60	453.2	45.32	54.68
0,63	156.25	609.45	60.945	39.055
0,31	106.13	715.58	71.558	28.442
0,16	85.56	801.14	80.114	19.886
0,08	47.91	849.05	84.90	15.095



## Essais granulométriques au point -A-



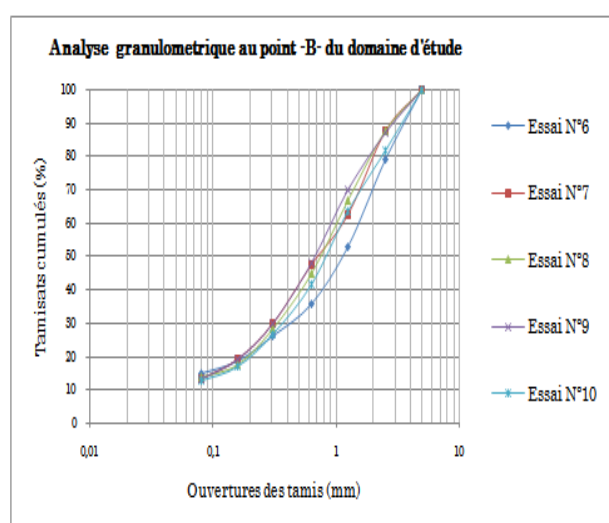
Essai N°6: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	212.77	212.77	21.277	78.723
1,25	257.24	470.01	47.001	52.999
0,63	170.07	640.08	64.008	35.92
0,31	98.52	738.6	73.86	26.14
0,16	75.91	814.51	81.451	18.549
0,08	45.72	858.23	85.823	14.77

Essai N°7: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	126.32	126.32	12.632	87.287
1,25	180.81	307.13	30.713	62.287
0,63	217.25	524.38	52.438	47.56
0,31	178.04	703.42	70.342	29.65
0,16	107.58	811	81.1	18.9
0,08	58.23	869.23	86.923	13.07

Essai N°8 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	125.15	125.51	12.551	87.49
1,25	209.6	334.75	33.475	66.525
0,63	218.53	553.28	55.328	44.672
0,31	165.86	719.14	71.914	28.086
0,16	106.89	826.03	82.603	17.397
0,08	33.94	859.97	85.997	14.003

Essai N°9 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	129.09	129.09	12.909	87.09
1,25	175.62	304.71	30.471	69.6
0,63	275.77	580.48	58.048	48.12
0,31	183.38	763.86	76.386	29.78
0,16	138.58	902.44	90.244	18.86
0,08	57.44	959.88	95.988	13.11

Essai N°10: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	182.27	182.87	18.287	81.773
1,25	183.17	365.44	36.544	63.456
0,63	220.13	585.57	58.557	41.443
0,31	147.6	733.17	73.317	26.68
0,16	98.78	831.95	83.195	16.81
0,08	40.24	872.19	87.219	12.78



## Essais granulométriques au point -B-

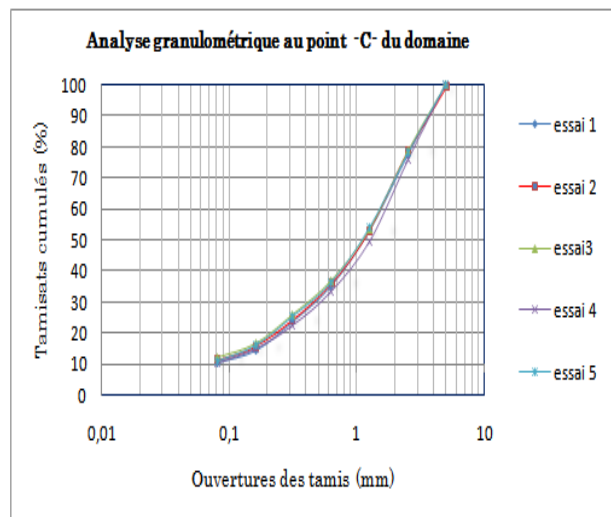
Essai N°11 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	225	225	22.5	77.5
1,25	248	473	47.3	52.7
0,63	175	648	64.8	35.2
0,31	114.74	762.75	76.275	23.8
0,16	91.3	854.05	85.405	14.6
0,08	41.33	895.38	89.538	10.46

Essai N°12 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	210.13	210.13	21.013	78.99
1,25	255.85	465.99	46.599	53.41
0,63	169.32	635.31	63.351	36.47
0,31	121.47	756.78	75.678	24.33
0,16	82.5	839.28	83.28	16.08
0,08	44.3	883.58	88.358	11.64

Essai N°13 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	241	241	24.1	75.9
1,25	262	503	50.3	49.7
0,63	165	668	66.8	33.2
0,31	110	778	77.8	22.2
0,16	72	850	85.0	15
0,08	46	896	89.6	10.4

Essai N°14 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	216	216	21.6	78.4
1,25	243	459	45.9	54.1
0,63	176	635	63.5	36.5
0,31	113	748	74.8	25.2
0,16	91	839	83.9	16.1
0,08	50	889	88.9	11.1

Essai N°15 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	211	211	21.1	78.9
1,25	252	463	46.3	53.7
0,63	166	629	62.9	37.1
0,31	112	741	74.1	25.8
0,16	92	833	83.3	16.7
0,08	45	878	87.8	12.2



## Essais granulométriques au point -C-

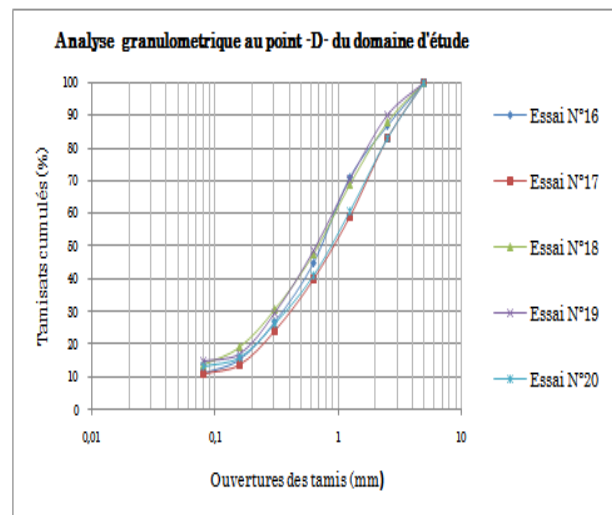
Essai N°16 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	132.80	132.80	13.280	86.620
1,25	158.61	291.41	29.141	70.859
0,63	262.07	553.48	55.348	44.652
0,31	178.39	731.87	73.187	26.813
0,16	115.91	847.78	84.778	15.222
0,08	43.45	891.23	89.123	10.877

Essai N°17: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	172.55	172.55	17.255	82.745
1,25	235.3	407.85	40.785	59.215
0,63	195.81	603.36	60.336	39.664
0,31	154.46	757.82	75.782	24.218
0,16	104.23	86.205	86.205	13.795
0,08	27.78	88.583	88.583	11.017

Essai N°18 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	122.87	122.87	12.287	87.713
1,25	187.49	310.36	31.036	68.964
0,63	212.62	522.98	52.298	47.702
0,31	173.18	696.16	69.616	30.384
0,16	114.31	810.47	81.047	18.953
0,08	49.66	860.13	86.013	13.987

Essai N°19 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	102.55	102.55	10.255	89.745
1,25	193.67	296.22	29.622	70.378
0,63	216.29	512.51	51.257	48.749
0,31	190.06	703.07	70.307	29.693
0,16	123.98	827.98	82.705	17.295
0,08	25.93	996.07	99.607	14.702

Essai N°20 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	170.45	170.45	17.045	82.955
1,25	221.55	391.55	39.155	60.845
0,63	206.09	597.64	59.764	40.845
0,31	136.92	734.56	73.456	26.544
0,16	105.33	839.89	83.989	16.011
0,08	30.06	869.95	86.995	13.005



### Essais granulométriques au point -D-

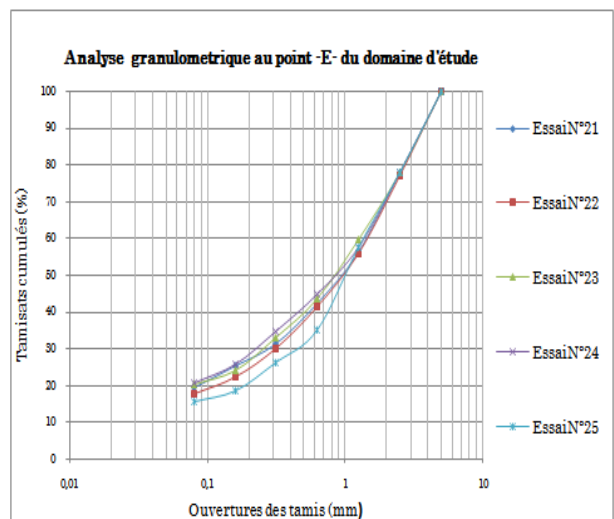
Essai N°21: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	222.49	222.49	22.249	77.751
1,25	216.43	438.92	43.892	56.108
0,63	137.78	576.7	57.67	42.33
0,31	111.15	688.2	68.82	31.18
0,16	59.77	747.97	74.797	25.203
0,08	57.18	805.15	80.515	19.485

Essai N°22: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	229.61	229.61	22.96	77.039
1,25	213.11	442.72	44.272	55.728
0,63	145.74	588.46	58.846	41.154
0,31	212.06	700.52	70.052	29.948
0,16	77.76	778.28	77.828	22.172
0,08	44.48	822.76	82.276	17.724

Essai N°23: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	224.02	224.02	22.402	77.59
1,25	181.95	405.97	40.597	59.403
0,63	160.94	566.91	56.691	43.309
0,31	103.81	670.72	67.072	32.928
0,16	80.19	750.91	75.091	24.09
0,08	40.92	791.83	79.183	20.17

Essai N°24: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	220.46	220.46	22.046	77.954
1,25	204.94	425.4	42.54	57.46
0,63	128.32	553.72	55.372	44.63
0,31	100.10	653.82	65.382	34.62
0,16	88.70	742.52	74.252	25.749
0,08	49.77	792.29	79.229	20.77

Essai N°25: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	220.35	220.35	22.035	77.97
1,25	204.26	424.61	42.461	57.539
0,63	227.70	652.31	65.231	34.769
0,31	87.06	739.37	73.937	26.063
0,16	77.40	816.77	81.677	18.323
0,08	34.09	846.86	84.686	15.314



## Essais granulométriques au point -E-

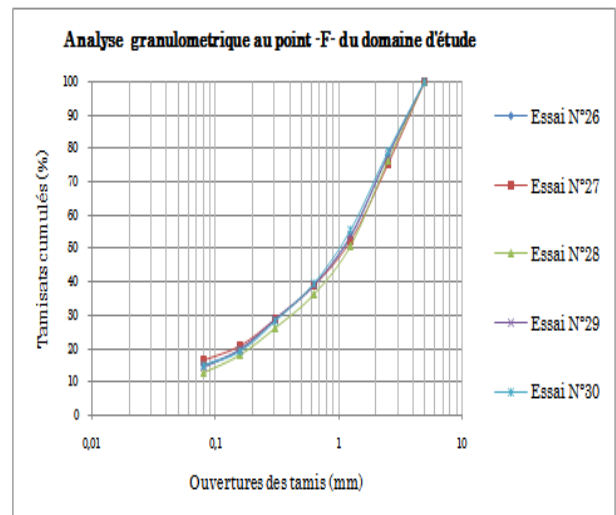
Essai N°26 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	220	220	22.0	78
1,25	245	465	46.5	53.5
0,63	144	609	60.9	39.1
0,31	103	712	71.2	28.8
0,16	94	806	80.6	19.4
0,08	46	852	85.2	14.8

Essai N°27 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	249.07	249.07	24.907	75.09
1,25	231	480.07	48.007	51.993
0,63	131.35	611.42	61.142	38.85
0,31	101.18	712.6	71.26	28.74
0,16	78.88	791.48	79.148	20.85
0,08	43.89	835.37	83.537	16.46

Essai N°28 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	237.8	237.8	23.78	76.22
1,25	253.67	491.47	49.147	50.85
0,63	147.47	638.94	63.894	36.106
0,31	99.67	738.61	73.861	26.139
0,16	82.2	820.81	82.081	17.919
0,08	52.43	873.24	87.324	12.676

Essai N°29 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	220.43	220.43	22.043	77.95
1,25	243.26	463.69	46.369	53.631
0,63	147.10	610.79	61.079	38.92
0,31	102.20	712.99	71.299	28.701
0,16	92.38	805.37	80.537	19.46
0,08	53.48	858.85	85.885	14.11

Essai N°30: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	211.03	211.03	21.103	78.897
1,25	234.02	445.05	44.505	55.495
0,63	158.35	603.4	60.34	39.66
0,31	114.34	717.74	71.774	28.226
0,16	91.140	808.84	80.884	19.116
0,08	44.66	853.5	85.35	14.65



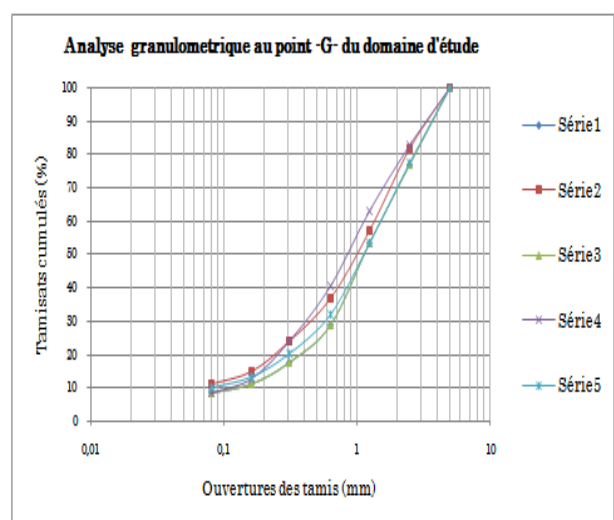
Essai N°31: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	119.53	119.53	11.953	88.047
1,25	139.73	259.28	25.928	74.072
0,63	294.42	553.70	55.370	44.63
0,31	181.88	735.58	73.558	26.44
0,16	141.18	876.74	87.674	12.33
0,08	37.88	914.62	91.46	8.40

Essai N°32: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	183.49	183.49	18.349	81.651
1,25	248.64	432.13	43.213	56.787
0,63	201.63	633.76	63.376	36.624
0,31	128.11	761.87	76.187	23.813
0,16	89.13	851.17	85.117	14.883
0,08	38.11	996.18	99.618	11.072

Essai N°33: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	233.62	233.62	23.362	76.67
1,25	232.23	465.85	46.585	53.42
0,63	245.66	711.51	71.151	28.85
0,31	113.77	825.28	82.528	17.48
0,16	65.38	890.66	89.066	10.94
0,08	96.77	917.43	91.743	8.26

Essai N°34: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	157.54	175.54	17.554	82.446
1,25	193.21	368.75	36.875	63.125
0,63	226.25	594.96	59.496	40.504
0,31	165.68	760.64	76.064	23.936
0,16	112.73	873.37	87.337	12.66
0,08	39.76	913.13	91.313	8.687

Essai N°35: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	225.39	225.39	22.539	77.46
1,25	239.15	464.54	46.454	53.54
0,63	214.86	679.40	67.90	32.06
0,31	116.93	796.33	79.633	20.36
0,16	71.57	867.90	86.790	13.21
0,08	31.73	899.63	89.963	10.03



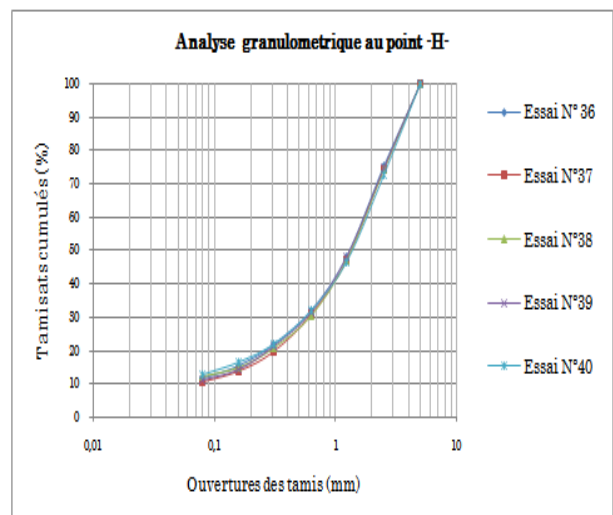
Essai N°36 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	250	250	25.0	75
1,25	271	521	52.1	47.9
0,63	161	682	68.2	31.8
0,31	101	783	78.3	21.7
0,16	65	848	84.8	15.2
0,08	37	885	88.5	11.5

Essai N°37 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	258	258	25.8	74.2
1,25	273	531	53.1	46.9
0,63	163	694	69.4	30.6
0,31	109	803	80.3	19.7
0,16	58	961	96.1	13.9
0,08	33	894	89.4	10.6

Essai N°38 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	258	258	25.8	74.2
1,25	272	530	53.0	47
0,63	165	695	69.5	30.5
0,31	99	794	79.4	20.6
0,16	57	851	85.1	14.9
0,08	28	879	87.9	12.1

Essai N°39 : Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	253	253	25.3	74.7
1,25	272	525	52.5	47.8
0,63	160	685	68.5	31.5
0,31	100	785	78.5	21.5
0,16	73	858	85.8	14.2
0,08	31	889	88.9	11.1

Essai N°40: Masse d'échantillon 1000 grs				
Ouverture De tamis	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0	0	0	100
2,5	276	276	27.6	72.4
1,25	260	536	53.6	46.4
0,63	147	683	68.3	31.7
0,31	97	780	78.0	22
0,16	56	836	83.6	16.4
0,08	39	875	87.5	12.5



Essais granulométriques au point -H-



## Annexe (V-2)

### Table de Cochran

$\alpha = 0.05$							
$k \backslash n \rightarrow$	2	3	4	5	6	7	8
2	0.9985	0.9750	0.9392	0.9057	0.8772	0.8534	0.8332
3	0.9669	0.8709	0.7977	0.7457	0.7071	0.6771	0.6530
4	0.9065	0.7679	0.6841	0.6287	0.5895	0.5598	0.5365
5	0.8412	0.6838	0.5981	0.5441	0.5065	0.4783	0.4564
6	0.7808	0.6161	0.5321	0.4803	0.4447	0.4184	0.3980
7	0.7271	0.5612	0.4800	0.4307	0.3974	0.3726	0.3535
8	0.6798	0.5157	0.4377	0.3910	0.3595	0.3362	0.3185
9	0.6385	0.4775	0.4027	0.3584	0.3286	0.3067	0.2901
10	0.6020	0.4450	0.3733	0.3311	0.3029	0.2823	0.2666
12	0.5410	0.3924	0.3264	0.2880	0.2624	0.2439	0.2299
15	0.4709	0.3346	0.2758	0.2419	0.2195	0.2034	0.1911
20	0.3894	0.2705	0.2205	0.1921	0.1735	0.1602	0.1501
24	0.3434	0.2354	0.1907	0.1656	0.1493	0.1374	0.1286
30	0.2929	0.1980	0.1593	0.1377	0.1237	0.1137	0.1061
40	0.2370	0.1576	0.1259	0.1082	0.0968	0.0887	0.0827
60	0.1737	0.1131	0.0895	0.0765	0.0682	0.0623	0.0312
120	0.0998	0.0632	0.0495	0.0419	0.0371	0.0337	0.0312
$\infty$	0	0	0	0	0	0	0

$\alpha = 0.05$							
$k \backslash n \rightarrow$	9	10	11	17	37	145	$\infty$
2	0.8159	0.8010	0.7880	0.7341	0.6602	0.5813	0.5000
3	0.6333	0.6167	0.6025	0.5466	0.4748	0.4031	0.3333
4	0.5175	0.5017	0.4884	0.4366	0.3720	0.3093	0.2500
5	0.4387	0.4241	0.4118	0.3645	0.3066	0.2513	0.2000
6	0.3817	0.3682	0.3568	0.3135	0.2612	0.2119	0.1667
7	0.3384	0.3259	0.3154	0.2756	0.2278	0.1833	0.1429
8	0.3043	0.2926	0.2829	0.2462	0.2022	0.1616	0.1250
9	0.2768	0.2659	0.2568	0.2226	0.1820	0.1446	0.1111
10	0.2541	0.2439	0.2353	0.2032	0.1655	0.1308	0.1000
12	0.2187	0.2098	0.2020	0.1737	0.1403	0.1100	0.0833
15	0.1815	0.1736	0.1671	0.1429	0.1144	0.0889	0.0667
20	0.1422	0.1357	0.1303	0.1108	0.0879	0.0675	0.0500
24	0.1216	0.1160	0.1113	0.0942	0.0743	0.0567	0.0417
30	0.1002	0.0958	0.0921	0.0771	0.0604	0.0457	0.0333
40	0.0780	0.0745	0.0713	0.0595	0.0462	0.0347	0.0250
60	0.0552	0.0520	0.0497	0.0411	0.0316	0.0234	0.0167
120	0.0292	0.0279	0.0266	0.0218	0.0165	0.0120	0.0083
$\infty$	0	0	0	0	0	0	0

TAB. 8.13 - Valeurs critiques pour le test de Cochran d'homogénéité des variances



## Annexe (V-3)

### 8 Table de la loi de Student

$\nu \backslash \alpha -$	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0005
1	0.168	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.708	31.82	63.05	636.61
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.929
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920	1.166	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.130	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.358	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.128	0.258	0.392	0.535	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.127	0.257	0.392	0.534	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.127	0.257	0.391	0.533	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.127	0.257	0.391	0.533	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.088	2.528	2.846	3.850
21	0.127	0.257	0.391	0.532	0.686	1.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.127	0.256	0.390	0.532	0.686	1.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.127	0.256	0.390	0.532	0.685	1.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	1.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	1.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.127	0.256	0.389	0.530	0.684	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.126	0.255	0.388	0.529	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
80	0.126	0.254	0.387	0.527	0.679	0.848	1.046	1.298	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.126	0.254	0.386	0.526	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
$\infty$	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

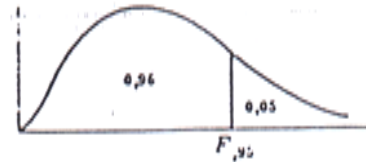
TAB. 3 - Valeurs de  $t$  ayant la probabilité  $\alpha$  d'être dépassées



# Annexe (V-4)

Valeurs des 95ièmes centiles (niveaux 0,05)  
 $F_{0,05}$  pour la distribution  $F$

$\nu_1$  degrés de liberté au numérateur  
 $\nu_2$  degrés de liberté au dénominateur



$\nu_2 \backslash \nu_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,65	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,06	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,46	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
$\infty$	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Source : E.S. Pearson and H. O. Hartley, *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. 2  
 (1972), table 5, page 178. Reproduction autorisée.

## Annexe (VI-1)

```
% Programme : Tracé d'iso-teneur en fines des sables de concassage:
% X1: Ouverture de sortie du concasseur primaire (mm).
% X2: Ouverture de sortie du broyeur (mm).
% X3: Amplitude de vibration (mm).
% Y : la teneur en fines(%)
% +1 : le niveau maximal du paramètre.
% -1 : le niveau minimal du paramètre.

Clear
clc

X3 = -1 % Amplitude de vibration minimal 10 mm.
% Limitation et subdivision des axes du graphe.
[X2,X1] = meshgrid(-1:0.1:1,-1:0.1:1);
% fonction du modèle Y f(X1, X2, X3)
Y=(13.5777)-(2.393.*X2)+(1.23.*X1.*X2)-(0.946.*X2.*X3)
% Courbe iso-teneur en fines en 2Dimensions.
figure;[C,h] = contour(X2,X1,Y);
set(h,'ShowText','on','TextStep',get(h,'LevelStep')*1)
% Courbe iso-teneur en fines en 3Dimensions.
Figure:mesh(X2, X1, Y)
```