

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté des Sciences de la Terre

Département des Mines

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN MINES

Option : valorisation et gestion des ressources minérales

Titre

***ETUDE DE L'ENRICHISSEMENT DU GRES PAR CLASSIFICATION
GRAVIMETRIQUE ET SEPARATION MAGNETIQUE:
CAS DU GISEMENT D'EL AOUANA -JIJEL- "AFRICAVER"***

Par

Chaib Abd slam

Soutenu le 17/01/2011 devant le jury composé de :

<u>Président :</u>	BOUKELLOUL.M.L	M.C.A	Université Badji Mokhtar Annaba
<u>Rapporteur :</u>	BOUNOUALA.M	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba
<u>Examineurs :</u>	CHETTIBI.M	M.C.A	Université Badji Mokhtar Annaba
	BOUHEDJA.A	M.C.A	Université Badji Mokhtar Annaba
	IDRES.A	M.C.A	Université Badji Mokhtar Annaba

Année universitaire 2010/2011

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier le Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et la foi et de m'avoir permis d'arriver à ce stade là, Au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement le professeur **BONOUALA. MOHAMED** qui a assuré ma direction scientifique pour la qualité de son encadrement, Je le remercie pour ces nombreux conseils et sa disponibilité et son soutien sans faille tout au long de ce travail, qu'il trouve ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

J'adresse mes vifs remerciements au docteur **BOUKELLOUL.M.L**, pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

J'exprime également mes remerciements aux docteurs :

✚ **IDRES. A**

✚ **CHETTIBI. M**

✚ **BOUHEDJA. A**

Pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir acceptés de faire partie du jury.

Je tiens à remercier tous les enseignants du département des mines.

Je tiens à remercier mes camarades d'étude de la promotion en particulier **Mr : NEFIS. MOULOUD** et **Mr : AYADI BRAHIM** pour son aide à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils.

Je tiens à remercier mes amis surtout **DRAOUI.A** et **CHEROUAT. H.**

Je tiens à remercier tous les cadres de la société d'**AFRICAVERRE** de m'avoir aidé et facilité la tâche durant mon stage à l'unité.

Chaib abd slam

chaib_as@yahoo.fr

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	01
CHAPITRE I: ANALYSE GEOLOGIQUE DU GISEMENT DE GRES D'EL AOUANA.....	03
1. Analyse de La géologie du gisement	04
1.1. Situation géographique.....	04
1.2. Géomorphologie, orohydrographie, climat.....	04
1.3. Reconnaissance géologique régionale	04
1.4. Litho-stratigraphie régionale	06
1.5. Formations de la nappe numidienne.....	09
1.5.1. Argiles et grès.....	09
1.5.2. Argiles de base.....	09
1.6. Géologie du gisement d'El-Aouana	10
1.6.1. Travaux de recherche sur le gisement d'El Aouana	11
1.6.1.1. Travaux de sondages	11
1.6.1.2. Travaux de laboratoire.....	12
1.6.2. Propriétés physiques du grès d'El Aouana.....	14
1.6.3. Composition chimique du grès d'El Aouana	15
1.7. Recherche bibliographique sur les grès	16
1.7.1. Classification du grès	17
Bibliographie et Web-graphie du premier chapitre.....	24
1.8. Conclusion	22
CHAPITRE II : EXPOITATION ET TRAITEMENT DES GRES ET ELABORATION DES VERRES.....	25
2.1. Exploitation du grès d'El Aouana	26
2.2. Préparation de la matière première.....	27
2.2.1. Concassage	28
2.2.2. Broyage	29
2.2.3. Classification	30
2.2.3.1. Criblage	30
2.2.3.2. Classification par classificateur à vis	30
2.2.4. Attrition	31
2.2.5. Criblage humide est Coupure de 630 à100 µm	31
2.2.6. Cyclonage	31
2.2.7. Séparation gravimétrique	33
2.2.8. Séchage	35
2.2.9. Stockage et homogénéisation	35
2.3. Élaboration du verre	37
2.3.1. Fabrication du verre	37
2.3.2. Composition du verre	37
2.3.2.1. Oxydes formateurs (Vitrifiant).....	37
2.3.2.2. Oxydes modificateurs ou fondants (oxydes alcalins).....	38
2.3.2.3. Stabilisants (oxydes alcalino-terreux)	39
2.3.2.4. Colorants	39
2.3.3. Différents types de verre	39
2.3.3.1. Verres silico-sodo calcique	40
2.3.3.2. Verres borosilicates	40
2.3.3.3. Verres au plomb	41
2.3.3.4. Verre de silice	41

2.3.3.5. Vitrocéramiques (Vitro cristallins)	42
2.3.4. Propriétés du verre.....	42
2.3.4.1. Propriétés physiques.....	42
2.3.4.2. Propriétés thermiques	43
2.3.4.3. Propriétés chimiques	43
2.3.5. État physique du verre	44
2.3.5.1. État vitreux	44
2.3.5.2. Passage de l'état vitreux à l'état cristallisé	44
2.3.5.3. Viscosité.....	45
2.3.7. Opérations de l'élaboration du verre	45
2.3.7.1. Formation des silicates	45
2.3.7.2. Formation du verre fondu (Formation de la fonte).....	47
2.3.7.3. Affinage et homogénéisation du verre.....	47
2.3.7.4. Conditionnement du verre pour obtenir la viscosité nécessaire au façonnage.....	48
Bibliographie et web-graphie du deuxième chapitre	49
CHAPITRE III: RECHERCHE SUR LES SCHEMAS DE TRAITEMENT DU GRES	50
3.1. Introduction.....	51
3.2. Flow-Sheet de traitement des grès.....	53
3.2.1. Traitement.....	53
3.2.2. Quelque exemple de l'enrichissement du grès (silice).....	54
3.2.2.1. Exemple de traitement du grès (sable siliceux). Jeddah, Arabie saoudite.....	54
Bibliographie et web-graphie de troisième chapitre.....	59
3.3. Conclusion	59
CHAPITRE IV: CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE	60
4.1. Introduction.....	61
4.2. Echantillonnage.....	61
4.3. preparation de l'échantillon pour l'analyse granulométrique.....	62
4.4. Analyse granulométrique.....	63
4.4.1. Analyse granulométrique par voie sèche du grès.....	64
4.4.2. But de l'essai	64
4.4.4. Dimension de tamis utilisés	65
4.4.5. Description de l'essai	65
4.4.6. Expression des résultats de la courbe granulométrique.....	66
4.5. Analyse chimique	70
4.6. Caractérisation minéralogique du grès	73
Bibliographie et web-graphie de quatrième chapitre.....	74
4.6. Conclusion	75
CHAPITRE V: ESSAIS DE SEPARATION PAR GRAVIMETRIE ET PAR SEPARATION MAGNETIQUE	76
5.1. Introduction.....	77
5.2. Concentration gravimétrique.....	77
5.2.1. Objectifs de la concentration gravimétrique.....	78
5.2.2. Mécanismes de séparation.....	78
5.2.2.1. Mécanisme par milieu dense	78
5.2.2.2. Mécanisme par pulsation et stratification.....	79
5.2.2.3. Mécanisme par nappe pelliculaire fluente.....	80
5.2.2.4. Mécanisme combiné (mixte).....	81
5.3. Séparation magnétique.....	83

5.3.1. Aspect théorique de la séparation magnétique.....	84
5.3.1.1. Notion du champ magnétique.....	84
5.3.1.2. Classification des substances minérales.....	84
5.3.1.3. Action des forces magnétiques et mécaniques.....	87
5.3.2. Aspect pratique de la séparation magnétique	89
5.3.2.1. Matrice d'extraction	89
5.3.2.2. Aimants permanents.....	89
5.3.2.3. Circuits conventionnels (électroaimants)	90
5.3.3. Classification des séparateurs	90
5.4. Essais de laboratoire	94
5.4.1. Essai de séparation gravimétrique	95
5.4.1.1. Interprétation des résultats de la séparation gravimétrique.....	97
5.4.2. Essai de séparation magnétique.....	99
5.4.2.1. Interprétation des résultats de la séparation magnétique.....	101
5.4.2.2. Essai supplémentaire	101
5.5. Elaboration d'un schéma de traitement des grés cas : du gisement d'El Aouana.....	104
5.6. Impact sur la sante et l'environnement.....	105
5.6.1. Lute contre la poussière.....	105
5.6.2. Contamination de l'eau.....	106
5.6.3. Présence des métaux dans les eaux.....	107
Bibliographie et web-graphie de cinquième chapitre.....	113
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	111
ANNEXE	114

LISTE DES FIGURES.

Figure 1: Carte géologique.....	08
Figure 2: Formation des grès.....	09
Figure 3: Classification du grès suivant Folk et Bokman.....	14
Figure 4: Grès siliceux.....	18
Figure 5: Roche du grès schisteux.....	19
Figure 6: Classification des grès suivant Dott (1964).....	20
Figure 7: Schéma d'une coté de la carrière du gisement de grès.....	26
Figure 8: Circuit de cancanage.....	29
Figure 9: Classificateur à vis.....	31
Figure 10: Hydro cyclone.....	32
Figure 11: Schéma d'une table à secousse.....	34
Figure 12: Etapes de traitement des grès de gisement d'El Aouana.....	36
Figure 13 (a, b, c, d et e): Composition massique de différents types de verre.....	42
Figure 14: Description de la molécule de silice.....	44
Figure 15.a: Schéma de traitement du sable de grès Wadi Si'al.....	57
Figure 15.b: Schéma de traitement du sable de grès Jabal Abu Siba.....	58
Figure 16: Mode de prélèvement de l'échantillon.....	62
Figure 17: Opération de quartage.....	63
Figure 18: Tamiseuse électrique.....	64
Figure 19: État des fractions granulométriques.....	66
Figure 20: Courbe granulométrique.....	67
Figure 21: Photos illustrant l'état de libération des particules de grès.....	69
Figure 22 (a, b, c et d): Histogramme des teneurs des éléments principaux dans les fractions granulométriques.....	71,72
Figure 23: Mécanisme de séparation par milieu dense.....	79
Figure 24 (a et b): Schéma d'un jig ; pulsations et stratification.....	79,80
Figure 25: Différent mécanismes de séparation gravimétrique.....	81
Figure 26: Schéma de principe de séparation magnétique.....	89
Figure 27: Séparateur magnétique à aimants céramique haut champ.....	93
Figure 28: Séparateur à bac piston.....	96
Figure 29: Rendement en fonction de la granulométrie.....	98
Figure 30: Degré d'extraction en fonction de la granulométrie.....	98
Figure 30.a : rendement et degré d'extraction de séparation magnétique.....	101
Figure 31: Produit obtenu après séparation gravimétrique.....	99
Figure 32: Séparation magnétique à H. I.....	99
Figure 33: Schéma d'essai de séparation.....	102
Figure 34: Schéma de traitement proposé.....	104
Figure 35: Différentes régions pulmonaires concernées.....	123
Figure 36: Bassin de décantation.....	108
Figure 37: Schéma de traitement du grès d'El Aouana (AFRICAVER).....	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01: Coordonnées des sondages.....	12
Tableau 02: Propriétés physiques des grès.....	15
Tableau 03: Résultats d'analyse chimique des échantillons.....	16
Tableau 04: Processus de formation des silicates.....	46
Tableau 05: Spécifications pour la silice en fonction de son usage dans les verreries.....	51
Tableau 06: Résultats de séparation par flottation de sable du grès de Jabal Abu Siba	55
Tableau 07: Résultats de séparation magnétique du concentré de flottation de sable de grès de Jabal Abu Siba.....	55
Tableau 08: Résultats de séparation par table à secousse suivait par une séparation magnétique échantillon de sable de grès de Jabal Abu Siba.....	55
Tableau 09: Résultats de séparation par flottation de sable de grès de Wadi Si'al.....	56
Tableau 10: Résultats de séparation magnétique du concentré de flottation de sable du grès Wadi Si'al.....	56
Tableau 11: Résultats de séparation par table à secousse de sable du grès de Wadi Si'al....	56
Tableau 12: Résultats de séparation magnétique du concentré de la séparation par table à secousse de sable du grès de Wadi Si'al.....	57
Tableau 13: Résultats d'analyse granulométrique.....	66
Tableau 14: Analyse chimique des fractions granulométriques.....	70
Tableau 15: Critère de concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules..	82
Tableau 16: Propriétés de principaux composants de minerai.....	95
Tableau 17: Résultats de séparation gravimétrique.....	96
Tableau 18: Relation entre l'intensité du champ magnétique et la granulométrie.....	100
Tableau 29: Résultats de séparation magnétique à haute intensité.....	100
Tableau 20: Paramètres des analyses.....	109
Tableau 21: Gestion différents types des déchets	112
Tableau 22: Composition minéralo-pétrographique.....	115
Tableau 23: Rapport d'essai.....	117

LISTE DES ABREVIATIONS.

<i>Symbole</i>	<i>nom</i>	<i>unité</i>
Sonarm	: Société Nationale de la Recherche Minière.....	-
Snmc	: Société National des Matériaux de Constriction.....	-
Drx	: Diffraction des rayons X	-
Orgm	: Office National de la Recherche Géologique et Minière.....	-
Dco	: Demande Chimique en Oxygène.....	-
Mes	: Matières En Suspension.....	-
Dbo ₅	: Pollution Organique.....	-
Enava	: Entreprise Nationale du Verre et Abrasif	-
γ	: Poids volumétrique.....	g/cm ³
D ₈₀	: Dimension d'une maille carrée laissant passer 80 % de la masse des particules	mm
D ₅₀	: Dimension d'une maille carrée laissant passer 50 % de la masse des particules.....	μ m
d _e	: Diamètre d'équicoupe.....	mm
v	: Vitesse de l'ascension des bulles dans un liquide	m/s
η	: Viscosité du liquide.....	poise
ρ_1	: Densité du liquide.....	g/cm ³
ρ_2	: Densité du gaz	g/cm ³
r	: Rayon de bulle de gaz.....	mm
g	: Valeur de la pesanteur	9.89 N
D _c	: Maille de coupure	mm
δ_c	: Résistance à la compression	(MPa
FX	: Fluorescence X	-
C _T	: Critère de Taggar	-
ρ_L	: Masse volumique de la phase solide lourde	g/cm ³
ρ_l	: Masse volumique de la phase solide légère.....	g/cm ³
ρ_f	: la masse volumique du fluide.....	g/cm ³
I	: Intensité du champ magnétique.....	Am/m
M	: Aimantation	Am/m
χ	: Susceptibilité magnétique.....	-
\vec{B}	: Induction magnétique.....	Tesla
μ	: Perméabilité de vide	H/m
H	: Champ magnétique.....	Tesla
\vec{F}_g	: Force de gravité	newton
\vec{F}_c	: Force centrifuge	newton
\vec{F}_m	: Force d'attraction magnétique	newton
\vec{F}_m	: Force d'entraînement par le fluide	newton
D	: Coefficient de démagnétisation des particules.....	-
Msat	: Aimantation à la saturation.....	Am/m
V _p	: Volume de particule.....	m ³
R _t	: Rayon du tambour (ou cylindre) de séparation.....	m
R _p	: Rayon de la particule.....	mm
\vec{g}	: Accélération due à la pesanteur.....	m/s ²
\vec{V}_F	: Vitesse angulaire de la particule.....	tr/min

$\vec{\nabla}$: Gradient du champ magnétique suivant les directions $0_x, 0_y, 0_z$	Am/m ³
ρ_p et ρ_f : Masses volumiques de la particule et du fluide.....	gr/m ³
n : Viscosité dynamique du fluide.....	poise
Q_a : Quantité de l'échantillon à l'alimentation.....	gr
Q_c : Quantité du concentré.....	Gr
Q_r : Quantité du rejet.....	gr
α_i : Teneur du minerai utile à l'alimentation.....	%
β_{ci} : Teneur du minerai utile dans le concentré	%
δ_{ci} : Rendement du concentré.....	%
δ_{ri} : Rendement du rejet.....	%
ζ_{ci} : Degré d'extraction du concentré.....	%
ζ_{ri} : Degré d'extraction du rejet.....	%
F. N. M : Fraction non magnétique.....	gr
F. M: Fraction magnétique.....	gr

RESUME

L'industrie du verre est trop fréquentée par des problèmes de qualité posés par la matière première qui est la silice. Ce dernier extrait à partir du gisement du grès d'El Aouana w. de Jijel. Le grès contient des inclusions nocives comme l'hématite, le rutil, la tourmaline, la pyrite, la limonite, l'illite, avec des teneurs supérieures aux normes de fabrication du verre. Donc l'objectif de cette recherche est de tester les possibilités d'enrichissement du grès pour améliorer la qualité de silice par des procédés minéralurgiques telle que la séparation gravimétrique et magnétique.

Pour ce faire on a opté à une séparation par gravimétrie avec un bac à piston suivie d'une séparation magnétique à haute intensité à l'aide d'un séparateur magnétique à tambour. Bien sûr avant d'entamer ces procédés, nous avons procédé à une étude d'identification de minerai à séparer par caractérisation minéralurgique et chimique (analyse granulométrique, analyse chimique, détection par lame mince et diffraction par rayon X).

Le procédé d'enrichissement adopté a permis d'améliorer la teneur en silice de 97.82 % à 99.10 %, et un abaissement des teneurs en fer Fe_2O_3 , Argile Al_2O_3 et rutil TiO_2 respectivement de 0.15 % à 0.09 %, de 0.95 % à 0.27 % et de 0.11 % à <0.05 %, et par conséquent ses résultats est satisfaisants pour la fabrication du verre, surtout le verre plat, le verre feuilleté et le verre coloré.

Mots clés: El Aouana, grès, Silice, caractérisation, classification, granulométrie, séparation, gravimétrie, magnétique, verre.

ABSTRACT

Glass industry is too much frequented by problems of quality caused by the raw material that is the silica. The layer of the sandstone of El Aouana w. Jijel, contains some inclusions of iron as hematite, gleams, tourmaline, pyrites, limonite, illite, etc... with contents above of norms to manufacture the glass. The objective of this research is to try to find a solution will contribute to the improvement of the quality of silica by minerals processing as gravimetric, magnetic separation. For that we have opted to a separation by gravimetry with a ferry to piston followed of a magnetic separation to high intensity with the help of a magnetic separator to drum, of course before starting these processes, we proceeded to a survey of identification of ore to separate by mineral characterization and chemical (grading analysis, chemical analysis, detection by thin blade and diffraction by X ray).

The process of Improvement adopted permitted to improve the content in silica of 97.82% to 99.10% with a lowering of the contents, in Fe_2O_3 " iron ", Clay " Al_2O_3 " and gleamed " respectively TiO_2 " of 0.15 % to 0.09 %, of 0.95 % to 0.27 % and 0.11 % to <0.05 %, and gave satisfactory results therefore especially for the manufacture of the glass the flat glass, thumbed glass and the colorful glass.

Keywords: El Aouana, Sandstone, Silica, Characterization, Classification, Particle size, Separation, Gravity, Magnetic, Glass.

ملخص

إن صناعة الزجاج تطرح حقيقة مشكلة النوعية بسبب نوعية المادة الخام المستعملة "السيليكا" هذه الأخيرة مستخرجة من مكمن الحجر الرملي بالعوانة - جيجل - . السيليكا تحت توي على شوائب غير مرغوب فيها؛ مثل الهيماتيت ، الروتيل ، التورماليين ، البيريت ، ليمونيت ، إيت بكميات أعلى من القواعد المطلوبة في صنع الزجاج .

يهدف هذا البحث إلى محاولة ترقق وتحسين جودة السيليكا من خلال العمليات المعدنية مثل الفصل باستعمال الكثافة و الثقل ، الفصل المغناطيسي ، للوصول إلى هذا الهدف استعملنا الجمع بين عملية الفصل باستعمال الكثافة و الثقل تليه عملية الفصل المغناطيسي بكثافة عالية عن طريق فاصل مغناطيسي ذو كثافة عالية ، وقبل الخوض في هذه العمليات قمنا بدراسة معدنية و كيميائية لتشخيص هذه المادة الأولية المراد تحسين نوعيتها (تحليل حجج الجسميات ، التحليل الكيميائي ، الصفيحة الدقيقة و اشعة س).

عملية المعالجة المستخدمة أعطت نتائج مقبولة ومشجعة لصناعة الزجاج خاصة الزجاج المسطح ، الزجاج الورقي ، والزجاج الملون. حيث تم تحسين المادة الأولية - السيليكا - أي رفع نسبة السليسيوم من 97.82 % إلى 99.10 % وانخفاض نسبة الحديد " Fe_2O_3 " ، الطين " Al_2O_3 " و أكسيد التتانيوم " TiO_2 " على التوالي من 0.15 % إلى 0.09 % من 0.95 % إلى 0.27 % من 0.11 % إلى > 0.05 % .

كلمات المفتاح: العوانة ، الحجر الرملي ، السيليكا ، التشخيص ، الترتيب ، حجج الجسميات ، الفصل ، الكثافة و الثقل ، المغناطيس ، الزجاج .

INTRODUCTION

Le verre est l'un des plus anciens matériaux utilisé par l'homme dès l'âge de pierre. Les propriétés du verre et leur amélioration constante en font un matériau presque omniprésent, en plein ou à l'abri des regards, dans l'industrie de verre produire de différents types du verre tels que, le verre sodo-calcique, silico-sodocalcique, verre plat ...

Par ailleurs, la silice qui est l'élément principal du verre (formateur de réseau), dans la composition du verre, la silice est apportée à partir du gisement de sable ou bien du gisement des grès. Cependant, la silice naturelle ne possède pas en général les caractéristiques nécessaires pour la production du verre, parce qu'elle forme des minéraux complexes avec d'autres oxydes comme le fer (Fe_2O_3), rutile (TiO_2), les argiles (Al_2O_3), ce qui influe sur la qualité du verre. Pour cela on doit respecter les caractéristiques strictes de pureté et de granulométrie, et cela est réalisable par des traitements minéralurgiques par son enrichissement et calibration afin qu'il puisse être utilisé par l'industrie de verre.

L'Algérie, dans ce domaine a prouvé son importance en créant des entreprises exerçant dans la fabrication des verres, il s'agit en particulier d'Africaver qui est considérée comme la plus importante dans la production et la transformation du verre.

Le gisement des grès d'El Aouana (w. Jijel) est la principale source de la silice utilisé pour la verrerie. Les grés provenant du gisement subissent un traitement pour éliminer les impuretés néfastes à l'élaboration des verres et leur qualité, à savoir les oxydes de fer (Fe_2O_3), le rutile (TiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) ainsi que les métaux lourds.

La qualité des différents types de verre suivant les propriétés (résistance au choc et mécanique, dilatation, réflexion des rayons, ...etc) dépend fortement de la qualité de la matière première. Donc, le choix d'un procédé adéquat de traitement de cette dernière permettra d'atteindre les qualités désirées, et cela fait l'objet de notre présente recherche sur l'étude du grès par classification gravimétrique et séparation magnétique : cas de gisement d'El Aouana.

Les chapitres développés dans ce mémoire traitent les objectifs visés par cette recherche :

- ❖ Le premier chapitre a trait l'analyse géologique du gisement du grès d'El- Aouana qui est la source principale de la matière première de la silice utilisée pour l'élaboration du verre.
- ❖ Le deuxième chapitre porte sur l'analyse de la méthode d'exploitation, de la préparation de la matière première et de son enrichissement au niveau de l'unité de verre. Ainsi que le mode d'élaboration du verre.

- ❖ Le troisième chapitre est consacré à l'analyse bibliographique de la flow-scheet de traitement des grès appliqués à l'échelle mondiale.
- ❖ L'échantillonnage, caractérisation minéralogique, chimique et l'étude granulométrique sont abordés au quatrième chapitre.
- ❖ Le dernier chapitre de ces travaux de recherche s'articule autour des expériences réalisées par séparation gravimétrique et magnétique en vue de réduire les quantités d'inclusions ferrifères et de titane dans la matière initiale pour avoir un produit répondant aux normes strictes de la fabrication du verre. Dans ce volet nous avons aussi analysé les effets néfastes des minéraux lourds sur l'environnement, en particulier l'eau.

CHAPITRE I

***ETUDE ET ANALYSE GEOLOGIQUE DU GISEMENT
DE GRES D'EL-AOUANA.***

I. ANALYSE GEOLOGIQUE DU GISEMENT DE GRES D'EL-AOUANA.

1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le site d'étude est situé sur le littoral méditerranéen de la wilaya de Jijel au Nord de l'Algérie. Géographiquement, elle fait partie de la petite Kabylie, la wilaya a une superficie de 3600 Km² et entourée par la wilaya de Skikda, Constantine, Bejaia et de Sétif.

Le gisement étudié se trouve à 9 Km au Nord de Jijel, le long de la RN 43 à proximité de la côte. L'usine de verre est située dans la ville de Taher, à 15 Km au Sud Est de Jijel, (Voir cf. 1 - l'historique de l'unité -).

1.2. GEOMORPHOLOGIE, OROHYDROGRAPHIE, CLIMAT

La majeure partie de la wilaya, à l'exception de quelques larges vallées et la bande du littoral à l'Est de Jijel, est une région montagneuse très accidentée.

Dans la région montagneuse de la petite Kabylie, suite à la résistance très forte des roches dures sédimentaires, magmatiques et métamorphiques face à l'érosion, les dénivellations relativement importantes, les flancs de montagnes abrupts, les vallées étroites qui souvent se sont formées le long des lignes tectoniques sont caractéristiques. Les points culminants les plus importants sont :

Djebel Tameskida (1217 m), Djebel Riafa (1490 m) et kef Sidi Marouf (1217 m). Dans ces régions montagneuses méditerranéennes et pluvieuses, les petits ruisseaux et grands Oueds à cours d'eaux permanents sont fréquents.

Les cours d'eaux les plus importants qui prennent sources dans les régions montagneuses de la petite Kabylie se jettent dans la mer à travers les vallées de direction principale Sud Nord.

Le climat de la région est caractéristique au climat méditerranéen, avec Hiver très pluvieux et un été relativement sec et chaud. Dans ces régions montagneuses à fortes précipitations, des forêts caractéristiques se sont formées avec souvent des pins, chêne-liège et des forêts méditerranéens à végétation diverse (cf.1).

1.3. RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE REGIONALE

La documentation géologique se rapportant à la géologie de la wilaya est composée principalement des rapports concernant la recherche de différentes matières premières minérales. Les données géologiques concernent seulement quelques régions étroites.

Notre résumé ne comprend que les rapports qui touchent notre région d'étude ou comprennent des informations relatives à la recherche de sable ou de grès pour l'industrie du verre. Ces rapports se résument comme suit :

- En 1976, lors des recherches sur les quartzites pour la production de ferrosilicium dans la région avoisinante la ville de Jijel, une série d'indices de grès numidiens quartzitoides a été mise en relief. Les travaux de prospection n'ont pas eu lieu. La recherche est effectuée par la Société Nationale de la Recherche Minières (SONARM 1976) dans le rapport, il a des indices de la région de l'Oued kebir, M'Zara, Seddana, Texenna, Jijel, Teioussem, Kef Arzouli, Djebble El Hadjar, Oued Zhour. L'indice de Jijel est un grès quartzeux appartenant au complexe numidien supérieur, qui est l'actuelle carrière de grès de l'usine de verre.
- En 1978, la Société National des Matériaux de Construction (SNMC) a effectué des recherches pour les matériaux de construction pour réaliser le projet du briqueterie-tuile Jijel.
- En 1978, des grandes recherches de sables quartzeux pour la verrerie et le moulage ont été exécutées dans tout L'Est Algérien. Sur le territoire de la wilaya de Jijel, les indices de sable dunaires mis en évidence (Oued El kebir, Oued Nil, Oued Zhour, Ech-chouf) présentent un intérêt en tant que matière première de construction et éventuellement de moulage. Par contre on n'a pas mis en évidence des indices de sable apte à la production de verre car la matière première est souillée par des impuretés nuisibles dont l'élimination nécessite une technologie appropriée. D'après la prospection de la Société Nationale de Recherche Minière (SONAREM 1979).

Aux résultats des travaux régionaux de recherche exécutés en 1976-1978 dans les régions de l'Algérie du Nord-Est, deux complexes litho-stratigraphiques principaux de roches perspectives pour mettre en évidence de gîtes industriels de sables quartzeux de moulage et de verre ont été dégagés. L'un de ces complexes est constitué par les dépôts éoliens quaternaires du littoral, le deuxième, par les dépôts du Miocène de bassin peu profond. Les gîtes des sables quartzeux de moulage qui ne nécessitent pas de traitement (ou ceux qui ne nécessitent pas une correction partielle de la composition granulométrique)

peuvent être dégagés parmi les deux complexes avec des réserves suffisantes pour l'exploitation. Selon les données des travaux de recherche 20 indices et 5 chantiers de sables quartzeux ont été délimités (Regia, M'Barek, Negrine, ainsi que les indices de Rédim, El kala, et El Horia sont perspectifs pour la production de verre.

Les sables de ces chantiers possèdent la teneur la plus élevée en silice et celle la plus basse en oxydes colorants. Selon les analyses chimiques, minéralogiques et spectrales, leur teneur est comprise entre 0.3 - 0.5 %, leur majeure partie est liée avec la fraction fine (< 0.1 mm), avec la fraction électromagnétique et lourde, la teneur des autres oxydes (TiO₂, CuO₂, V₂O₅) ne dépasse pas les exigences de l'industrie pour les sables de verre.

- Selon les travaux de recherche de la SONAREM, les différents indices et gisements de quartzite et de grès quartzeux sont situés à :
 - M'Zara (30 Km au SE de Jijel)
 - Seddana (20 Km au SE de Jijel)
 - Texenna et Jijel.

Les deux premiers sont des quartzites précambriens, et les autres sont des grès quartzitoides. L'indice de Jijel, identique avec celui de notre recherche actuelle, l'indice est situé sur le littoral à 6 Km vers l'Ouest de Jijel à proximité de la RN 43, l'indice est associé au flanc Nord du massif des grès numidiens. Dans leur majorité les grès sont faiblement cimentés, sur l'indice, il existe une carrière pour la construction du port, au fond de la carrière affleurent des grès quartzitoides. Ils se reposent parmi les variétés faiblement consolidées en forme de couche, dont la puissance va jusqu'à 25 m avec un pendage de direction Nord Est sous un angle de pendage 70° – 80 °. Parmi les grès, on observe des interlits de schistes argileux, dont la puissance est de 0,2 - 0,3 m.

1.4. LITHO-STRATIGRAPHIE REGIONALE

Le territoire de la wilaya de Jijel constitue la partie de la zone tectonique de la petite Kabylie, les parties Est et centrale sont liées avec plongement de la grande saillie de Skikda - Texenna du fondement précambrien qui passe vers le Sud et l'Ouest dans le complexe plissé des dépôts mézo - cénozoïques de Tell Atlas.

Le complexe précambrien (Kabylie) est bien disloqué, métamorphisé et déchiré par des roches intrusives. Le complexe métamorphique est représenté en général, par les gneiss, des schistes cristallins variant aux interlits des quartzites ainsi que des calcaires métamorphisés. Parmi les roches intrusives, on distingue les intrusions du précambrien de composition

basique et acide, intensément métamorphisées ainsi que les intrusions du néogène, en général granite-porphires. Les formations volcanogènes de composition andésitique sont développées dans la région de Cap Cavallo.

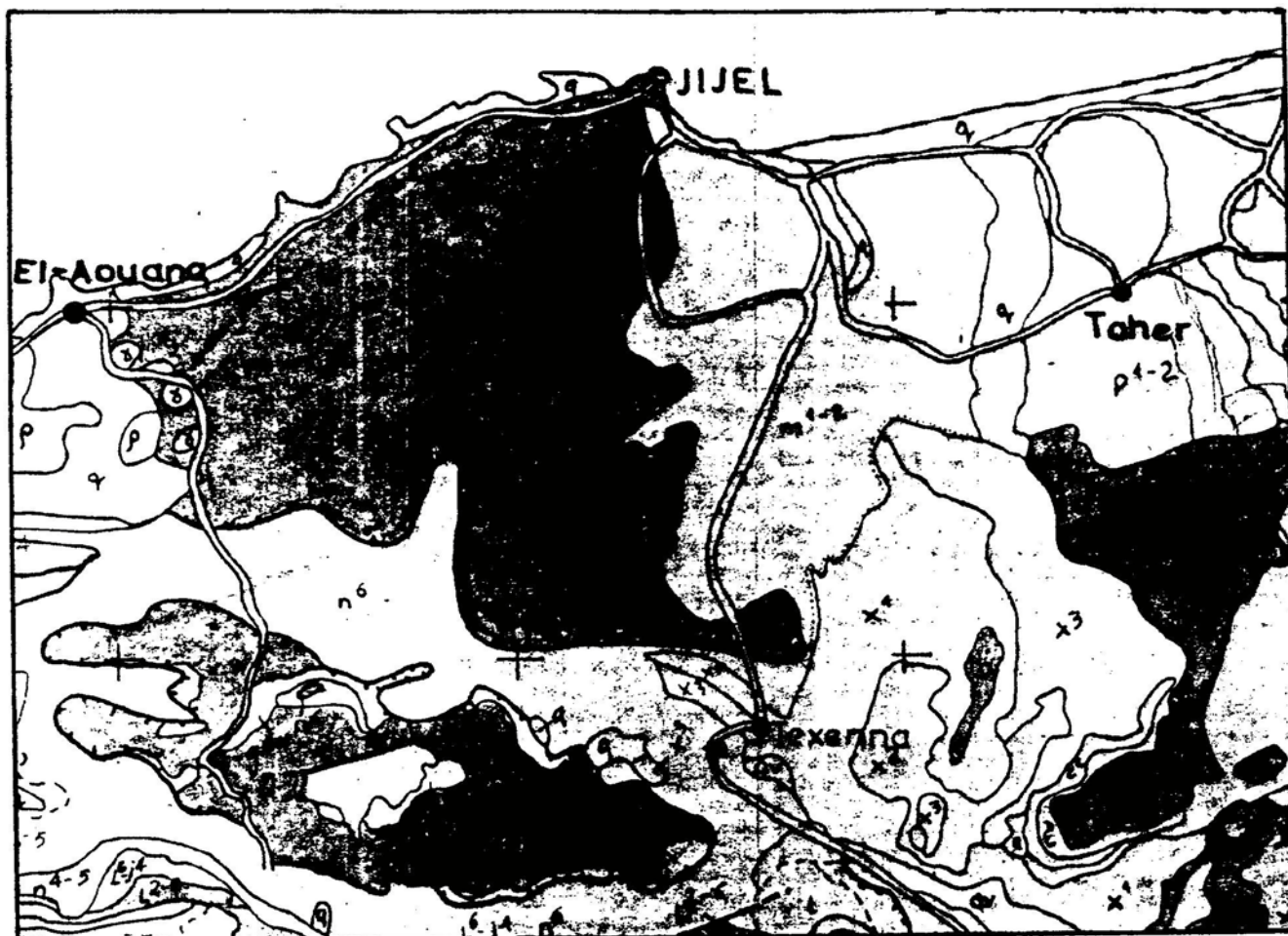
Dans la partie Ouest, les formations triasique sont représentées par des roches argilo-marneuses gypsifères et salifères, les dépôts jurassiques sont développés aussi dans cette partie en général de composition dolimito-calcaireuse.

Les marnes du Crétacé Supérieur ainsi que l'éocène sont bien développés, la plus part du territoire est recouvert par les dépôts du Numidien, dans la partie Sud les formations molassiques du miocène et du pliocène sont bien développés.

- les gneiss scillés du précambrien à partir desquels se sont formées les croûtes d'altération de kaolin.
- Les dépôts triasiques sont perspectifs pour le sel et le gypse.
- Les dépôts jurassiques constitués des assises des dolomies et des calcaires constituent des matières premières pour la métallurgie, les réfractaires, les matériaux de construction, les industries chimiques, etc.
- Les dépôts du crétacé et de l'éocène constitués de marnes et de calcaires peuvent présenter un intérêt comme matière première pour la fabrication du ciment.
- Les grès numidiens ; les variétés pures sont intéressante comme matière première pour le ferrosilicium, les verreries, les réfractaires de dînas, du flux pour la métallurgie non ferreuse. Les variétés moins pures, mais aussi dures, peuvent être utilisées pour la construction des ouvrages terrestres du port.
- Les argiles du miocène peuvent être perspectives comme matières premières pour la brique.
- Les sables du quaternaire des dunes du littoral comme matière première pour la construction.

La région formée par le triangle El-Aouana, Jijel et Texenna est représentée par les formations de la nappe numidienne (argile et grès).

Le gisement se trouve sur le flanc Nord de cette région (Figure 1) [1].



É = 1:200 000

Figure 1. Carte géologique

COMPLEXE MAGMATIQUE.

av - intrusions précambrienne : ortho amphibolites roches éruptives basiques.

p - intrusions néogène : rhyolites, dacites et tufs associés.

γ - intrusions néogène : granites, granodiorites -porphyres.

TERRAINS SEDIMENTAIRES ET METAMORPHIQUES

X³ - Précambrienne : phillites quartzite, schistes sériciteux, cloriteux, muscoviteux, grès, calcaire.

X^{4φ} - Précambrienne : gneiss ocellés.

X⁴ - Précambrienne : gneiss biotiteux, quartzites, marbres, schistes avec cipolin.

t - Trias : argiles et marnes bariolées, grès compacts.

L^{6-j⁴} - Jurassique, Domérien-oxfordien : marnes et calcaires.

L⁺² - Jurassique, Rhétien- Hettangien : dolomites, calcaires dolomités.

n⁶ - Crétacé inf. Aptien Albien : argiles, aleurolites, grès, calcaires, marnes (flysch).

C¹⁻² - Crétacé sup. Cénomaniens Turonien : calcaires massifs.

C⁴ - Crétacé sup. Cénomaniens : calcaires marneux.

g^{n-an} - Oligocène, Numidien : grès quartzeux, argiles, argilites, grès.

m²⁻¹ - Miocène, Burdigalien Helvétien : grès, argilites, marnes, conglomérats, argiles.

α - Quaternaire : sables dunaires et de plage ; dépôts d'alluvions grésos-galets-cailloutes.

1.5. FORMATIONS DE LA NAPPE NUMIDIENNE

1.5.1. Argiles et grès

Le flysch numidien correspond à plusieurs centaines de mètres d'alternance de grès grossiers hétérométriques à dragées de quartz et d'argiles claires kaoliniques, à petits bancs quartzitiques.

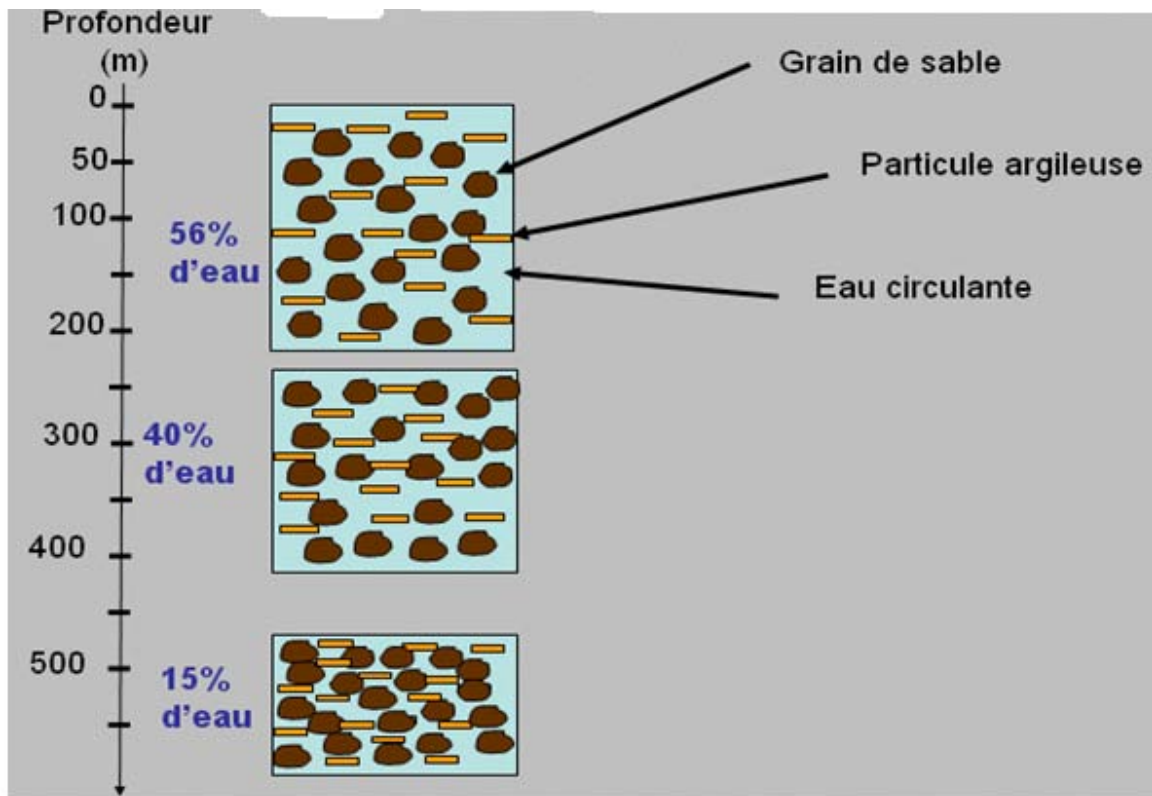


Figure 2. Formation du grès

1.5.2. Argiles de base

Ce sont des argiles verdâtres dures, passant à des alternances argile quartzite, pauvres en microfaune sauf en ce concerne les arénacés, ces argiles sont riches en kaolinite, illite et en interstratifiés illite montmorillonite.

Ces mêmes formations se trouvent en surface sur des étendues importantes à l'ouest de Texenna et au Sud de Taher dans les régions de Djebel El kebir. Les formations relatives à la nappe numidienne et à la nappe du flysch relatées par M.KIEKEN dans son ouvrage "traits essentiels de l'Algérie" sont résumées comme suit : " comme son nom l'indique, cette nappe comprend essentiellement de l'oligocène à faciès numidien ; mais par endroits, du crétacé à faciès flysch s'y incorpore" [2].

Les séries se présentent sous le même aspect dans le crétacé de la nappe numidienne et dans celui de la nappe du flysch. Il est manifesté que ces séries proviennent d'un même bassin

sédimentaire et que la nappe numidienne, surincombante à la nappe du flysch, provient des zones plus internes de ce bassin.

- Les flysch crétaé :

Ils correspondent à une formation compréhensive allant du Tithonique à l'Eocène moyen.

- Le flysch oligocène à faciès numidien :

Ce régime sédimentaire se poursuit dans les assises de base de Numidien. Dans sa partie inférieure, il est formé par des argilites bariolées contenant localement des lits de galets, des calcaires à Globigérines (du crétaé), des quartzites, d'abondantes dragées de quartz de 3 – 5 cm de section et des brèches polygéniques à grandes Nummulites Lutéciennes.

Dans la partie supérieure du Numidien se présente sous un faciès extrêmement caractéristique avec des grès anisométriques, ou les grains de 4 à 5 mm de section, sont amalgamés par des grains plus fins ou par un ciment quartzitique, ou des conglomérats entièrement formés de graviers de quartz et il n'est pas rare que certains élément atteignent 5 cm de section, Son épaisseur est supérieur à 1.000 m , une telle accumulation du matériel détritique postule le déblaiements d'un vaste bâti ancien durant tout le Numidien.

1.6. GEOLOGIE DU GISEMENT D'EL-AOUANA

Dans la géologie du gisement, seules les formations appartenant au Numidien de l'oligocène prennent part, à côté du grès utilisé pour la fabrication du verre, il y a aussi, sur le territoire du gisement, des marnes argileuses de même âge.

Le gisement s'édifie sur une série de changements alternatifs de ces deux formations. La carrière a été ouverte sur une couche de grès large de 70-80 mètres comprise dans une large bande de marnes argileuses, comprise elle-même dans la série de formations

Les marnes argileuses ainsi que les grès sont des formations d'origine marine.

Du point de vue pétrographique, la matière première est un quartzite mal classifié, à texture compacte, contenant des grains fins, moyens et grossiers, avec plus ou moins de grains fins de gravier.

La couleur est jaune grisâtre et jaune brunâtre dans la zone d'oxydation près de la surface et grise claire dans les parties profondes, le liant des grés est régulièrement le quartz ou la silice et par endroit , représenté par une matière liante argileuse (illite et kaolinite) , qui (selon les analyses) , forme une fine pellicule sur la surface des grains de sable selon la dominance et l'importance du liant , la dureté varie entre moyennement dure et dure , les grés sont de manière irrégulière et surtout le long des fissures, souillés de limonite et dans les

parties profondes de pyrite et, par endroits contiennent des stratifications de marnes argileuses d'épaisseur allant de quelques cm à quelques dizaines de cm .

Les marnes argileuses considérées comme stérile sont du point de vue pétrographique homogène, texture compacte régulière à fine stratification, poussiéreuses, et par endroits sableuses.

Près de la surface, sous l'influence des conditions climatologiques, elles sont meubles et se transforment en sol, plus bas, par contre, elles gardent leur couleur grise, grise foncée, les couches épaisses de marnes argileuses contiennent toujours des bandes fines de grés allant jusqu' à quelques dizaines de cm.

Depuis l'oligocène, la région a été soumise à de très fortes influences tectoniques, ceci s'observe d'abord par la position culbutée des différentes couches, les couches stratigraphiques d'origine horizontale sont aujourd'hui presque verticales, et dans la carrière, l'inclinaison des couches des grés à exploiter varie entre 70° et 90°, et par endroits, dans la partie Nord de la carrière, les couches ont basculé de 10°-20° par rapport à la verticale.

L'inclinaison des couches de la région étudiée par sondage varie entre 70° et 80° et la direction du pendage qui jusque à présent était NNE, s'est transformés en SSE sous l'influence tectonique très forte, les couches ont non seulement culbuté, mais se sont fissurées et agglomérées en plus petits blocs le long des failles, la direction des failles est presque perpendiculaire à la direction de pendage des couches de grés et des dislocations d'environ 10 mètres ont lieu plusieurs fois le long de ces failles .

Toutes ces conditions surtout la position fortement culbutée et l'agglomération tectonique influenceront négativement l'exploitation dans cette région.

En ce qui concerne les conditions hydrologiques, les roches ne contiennent pas d'eau libre, et lors de l'exploitation à ciel ouvert, il n'y aura pas de problème d'eau, les couches de marnes argileuses grâce à leur imperméabilité n'absorberont pas les eaux atmosphériques mais les draineront plus bas, les couches de grés grâce à leur structure poreuse et au réseau de fissures conduiront les eaux atmosphériques en profondeur, par conséquent ces eaux ne s'accumuleront pas dans la roche [1].

1.6.1. Travaux de recherche sur le gisement d'El Aouana

1.6.1.1. Travaux de sondages

Les travaux de sondages ont été réalisés par l'UREG /ENDMC de Boumerdès à la demande de l'ENAVA, les sondages ont été approfondis à l'aide d'une foreuse de type ACKER.

Les sondages ont été implantés le long de profils parallèles à la direction des profils est perpendiculaire à la direction du pendage des couches.

Les sondages étaient en partie verticaux et inclinés et ceci en fonction de la structure de la matière première et des possibilités offertes par la carrière.

Les coordonnées des sondages sont les suivantes :

Tableau 1. Coordonnées des sondages.

Numéro	x	y	z
1	739 320.0	4076 029.5	52.50
2	739 372.5	4075 986.5	60.00
3	739 349.0	4076 011.1	60.00
4	739 346.0	4076 071.0	67.20
5	739 324.0	4076 126.5	60.00
6	739 381.5	4076 132.0	83.00
7	739 412.0	4076 077.5	90.50
8	739 434.0	4076 035.0	94.00
9	739 445.0	4076 001.5	92.25
10	739 344.5	4076 040.0	61.00

1.6.1.2. Travaux de laboratoire

Les échantillons sont préparés pour les analyses chimiques et minéralogiques et les résultats obtenus sont interprétés dans le Tableau 19 (cf.2).

Les lames minces sont préparées pour déterminer les compositions minéralo-péetrographiques des grès composant la substance utile ainsi que des roches stériles formant les couches sus-et sous jacentes et intercalaires.

Les résultats des analyses de lames minces sont résumés comme suite :

- Grés

Grés à grains fins, moyens et grossiers par endroit plus ou moins graveleux, généralement mal classifié, l'intensité d'usure des grains varie. Les grains fins sont faiblement arrondis, les gros sont fortement arrondis. Le composant principal de la roche est le quartz.

Le quartz minéral, composé de silice pure ou oxyde de silicium (SiO_2), se présente sous forme de prismes hexagonaux, transparents à translucides (d'origine magmatique et métamorphique) de grandeur variable.

La quantité totale des minéraux accessoires ne forme que quelques pourcents, ces minéraux sont:

"Muscovite, biotite, tourmaline, rutile, zircon, titanite, pyrite, leucoxènes, quartzite, silex, verre volcanique dévitrifié, fluorite."(cf. 2).

La quantité du liant est aussi petite, les grains sont cimentés par une matière siliceuse ou argileuse (illite, kaolinite), par fois limoniteuse. Le quartz liant forme souvent des accroissements autour des grains. Les minéraux argileux sont par fois remplissent les pores et d'autre forment des pellicules fines autour des grains de quartz. La pyrite porteuse du principal élément souillant le fer (Fe) est généralement sous forme saupoudrée répandue dans les pores entre les grains de quartz.

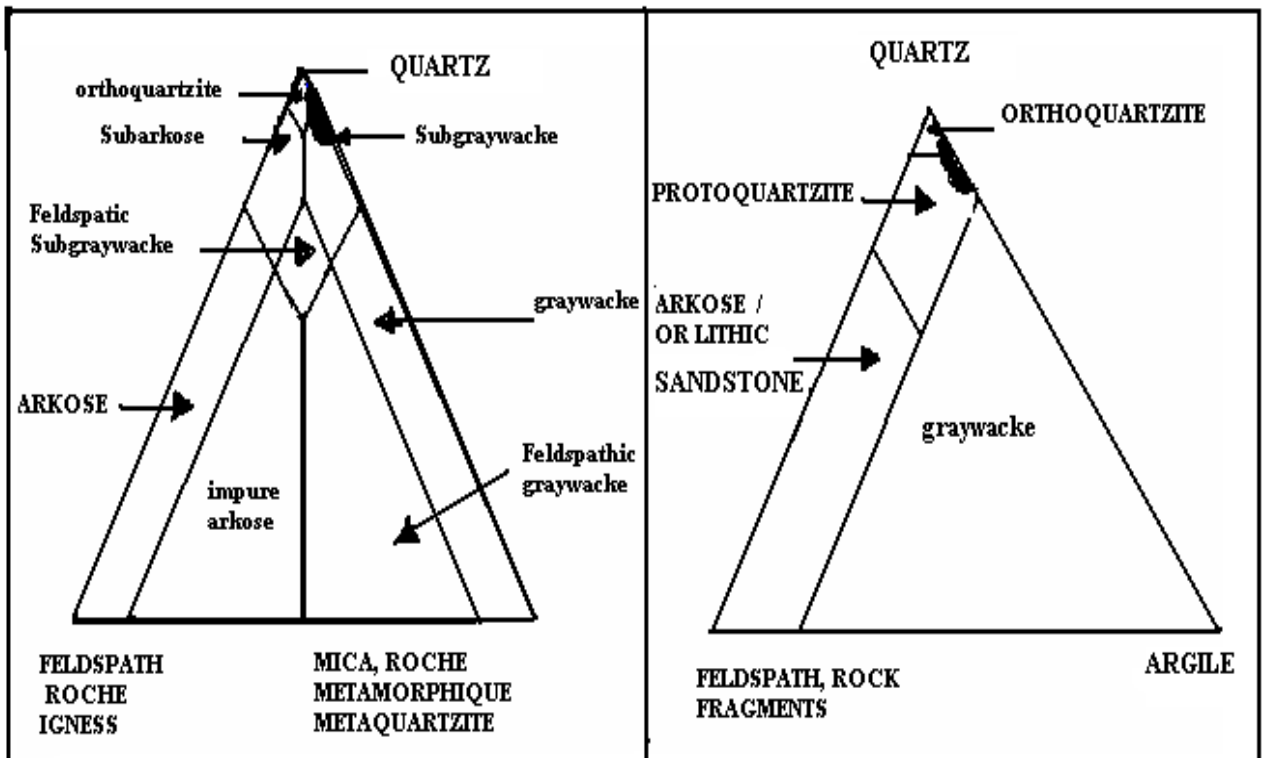
D'après les analyses, le grès est selon la classification de Folk (1954) un orthoquartzite ou subgrauwacke. Selon la classification de Bokman (1955), le grès est aussi qualifié d'orthoquartzite ou protoquartzite (Figure 3).

- Roches stériles

Grès à texture variable, à structure et composition argileuse, grès micacés, grès graveleux, argilite sableuse, argilite aleurolitique, Aleurolite calcaire. Chez les grès argileux, les grains graveleux allant de l'Aleurolite au sable grossier se répandent dans une matrice argileuse, à porte matière organique de couleur foncée. Dans la fraction lourde du lavage, selon les analyses micro-minéralogiques, la majeure partie de la fraction (-0.1 ; +0.06) mm est composée par le Zircon. Qui est en partie idiomorphe, mais souvent arrondi, en prismes hypidiomorphes par fois fissurés dans un ou deux cas il présente aussi des accumulations. Les cristaux sont transparents et jaunâtres -brunâtres et y sont en quantité égale. A côté de zircon, on trouve en petite quantité du rutile, de la tourmaline, de la pyrite, de la magnétite et du disthène. Parmi les tourmalines il y a de la tourmaline alcaline.

La majeure partie de la fraction (-0.2 + 0.1) mm est aussi composée de zircon à coté duquel on trouve en petite quantité de la tourmaline alcaline, de la pyrite, du rutile, disthène, de la titanite et de l'épidote.

L'analyse de phase par diffraction des rayons X montre aussi que le zircon forme la pyrite dominante et parmi les composants accessoires en plus de ceux cités on trouve aussi en très petite quantité la présence d'anathase. Les échantillons représentent les différents types de grès et l'analyse de phase par " DRX" montre en plus du quartz en quantité dominante, des minéraux argileux formant la matière remplissant les grès (illite, kaolinite) et dans quelques échantillons de petite quantités de fer souillant sous forme de pyrite et d'hématite.



FOLK, 1954

BOKMAN, 1955

Figure 3. Classification du grès d'El Aouana selon le diagramme de FOLK et BOKMAN.

1.6.2. Propriétés physiques du grès d'El Aouana

D'après les essais réalisés, les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau 2 :

Tableau 2. Propriétés physiques des grès

N° de l'éprouvette	Résistance à la compression (δ_c) (MPa)	Poids volumétrique (γ) (g/cm³)
s-1/10.00	75.8	2.41
s-1/16.40	59.22	2.43
s-2/23.80	/	2.53
s-3/27.00	/	2.35
s-4/16.20	35.7	2.38
s-6/69.50	/	2.49
s-7/47.50	54.8	2.35
s-9/76.80	37.9	2.51
s-10/20.00	36.0	2.38
moyenne	49.9	2.43

1.6.3. Composition chimique du grès d'El Aouana

Selon les analyses chimiques, le grès est relativement homogène, les valeurs varient dans des intervalles très étroits. Seules les valeurs du fer global montrent un plus grand écart par rapport à la moyenne, ce qui s'explique par la répartition irrégulière des concrétions de la pyrite secondaire.

Les grès frais de couleur claire forment une matière première de très bonne qualité leur teneur en fer est très faible (0.01 à 0.03) %

Dans le cas des grès gris, gris foncé les fortes teneurs en fer hématite, limonite (Fe_2O_3) et en alumine (Al_2O_3) indiquent une forte souillure en pyrite et en argiles.

La teneur de TiO_2 dans la roche est de 0.2 % (Tableau 3).

Tableau 3. Résultats d'analyse chimique des échantillons

Comp Ech	SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	FeO	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	SO₃	PaF
3/23	97.18	0.18	1.23	0.18	0.08	0.07	0.07	0.06	0.24	0.09	0.62
3/38	91.48	0.40	4.40	0.50	0.12	0.09	0.20	0.06	0.84	0.13	1.77
4/34	97.96	0.19	0.93	0.01	0.07	0.07	0.08	0.07	0.17	-	0.49
4/46.7	97.85	0.18	1.04	0.05	0.07	0.06	0.06	-	0.18	-	0.54
5/13.3	97.78	0.17	1.11	-	0.07	0.07	0.06	0.05	0.21	-	0.51
5/28	97.26	0.18	1.32	0.16	0.07	0.07	0.07	0.03	0.20	-	0.66
6/35	97.33	0.16	1.44	0.01	0.06	0.07	0.08	0.01	0.20	-	0.68
6/62.4	98.02	0.15	0.97	0.09	0.06	0.07	0.06	-	0.15	-	0.46
6/80.3	96.76	0.19	1.37	0.23	0.10	0.07	0.09	0.06	0.26	0.13	0.76
8/12.9	97.55	0.15	1.29	0.03	0.06	0.07	0.08	-	0.23	-	0.59
8/71	97.79	0.15	0.99	0.08	0.07	0.07	0.04	0.05	0.19	0.02	0.54
9/44.8	97.43	0.17	1.36	0.05	0.06	0.06	0.05	-	0.26	-	0.59
9/62.3	97.58	0.15	1.13	0.09	0.08	0.06	0.07	0.05	0.19	0.01	0.58
9/90.3	86.43	0.30	2.92	4.22	0.17	0.08	0.13	0.03	0.58	1.88	3.27
10/6	97.69	0.21	1.25	0.01	0.06	0.07	0.05	-	0.26	-	0.46
10/27	97.72	0.19	1.00	0.13	0.06	0.06	0.08	0.01	0.20	-	0.56
10/49.	97.38	0.13	1.05	0.21	0.06	0.07	0.07	0.05	0.18	0.11	0.69
moyenne	96.54	0.20	1.46	0.36	0.08	0.07	0.08	0.03	0.27	0.14	0.81

1.7. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES GRES

Le grès est une roche sédimentaire composée de grains de quartz consolidés par un minéral agglomérant. Les grès dans lesquels l'argile, la calcite ou l'oxyde de fer constituent le minéral agglomérant sont généralement très friables et se désagrègent facilement en grains. D'autres grès, comme ceux dont le ciment est siliceux, peuvent l'être moins et se désagrègent moins facilement. La plupart des grès sont blancs, gris ou bruns et renferment des quantités variables d'impuretés minérales attribuables, par exemple, au feldspath, à la hornblende, à la magnétite, à la pyrite, à des taches d'oxyde de fer et au mica.

Le quartzite est un grès métamorphisé dur et compact qui se compose de grains de quartz solidement consolidés par un ciment siliceux. Après leur fusion avec le ciment siliceux, les grains de quartz d'origine forment une masse homogène et uniforme et deviennent ainsi invisibles à l'oeil nu.

La cimentation progressive des grains de quartz peut combler tout ou partie des espaces intergranulaires, ce qui explique que certains grès soient particulièrement peu poreux.

Ces roches peuvent être soumises à d'importantes charges provenant des matériaux sus-jacents, ou être confrontées aux facteurs du métamorphisme. Il s'en suit une recristallisation de la silice, donnant de nouvelles roches parfaitement cohérentes, particulièrement dures et résistantes [3].

1.7.1. Classification du grès

Le constituant essentiel des grès est le quartz, forme de silice très dure, ses grains donnent aux roches gréseuses leur résistance et leur dureté. Plusieurs types de ciments peuvent réunir ces grains et assurer aux pierres leur cohérence. On distingue ainsi des grès siliceux, cimentés par de la silice (que ce soit de la calcédoine, de l'opale ou une autre forme), des grès argileux, des grès calcaires et des grès ferrugineux, où le ciment est l'oxyde ou l'hydroxyde de fer, qui colore la roche en brun ou en rouge. La cassure de ces roches est grenue on y distingue encore les grains de quartz. Il est difficile de préciser les limites entre des grès vrais et les roches vers lesquelles ils évoluent par diminution de la charge quartzeuse. Entre un grès calcaire et un calcaire gréseux, la différence peut être tenue pour la classification.

Lorsque les grains sont unis par du quartz cristallisé en continuité avec les éléments originaux, on nomme la roche "quartzite". Une véritable interpénétration des grains de quartz rend la roche beaucoup plus dure et plus cohérente. C'est vers les quartzites que les grès évoluent lorsqu'ils sont soumis au métamorphisme.

Les grès peuvent se charger d'autres minéraux que le simple quartz mentionné jusqu'à présent. Ces minéraux proviennent de la désagrégation d'autres roches soumises à l'érosion. Parmi celles-ci figurent des granites vrais, pierres magmatiques constituées de quartz, de feldspath et de mica. Lorsque les grès contiennent d'abondants micas, ils sont nommés psammites, reconnaissables aux petites paillettes scintillantes accumulées sur les surfaces de stratification.

Les grès riches en débris de feldspath sont appelés arkoses, teintées souvent de coloris pastel. Lorsque les grès sont riches en matières argileuses, ils peuvent développer une schistosité plus ou moins prononcée, ici aussi, la transition vers de vrais schistes est très progressive et il est délicat de fixer des limites strictes et de nommer les variétés intermédiaires.

Nous parlerons plus tard de ces grès schisteux, en même temps que des schistes, les principaux types de grès selon la cimentation sont :

- Les grès siliceux

Composés essentiellement de grains de quartz, liés par de la silice, ces roches sont généralement plus résistantes, comme le grès des Vosges qui appartient à cette classification, mais on peut citer aussi ceux de Fontaine bleue et de Belleau.

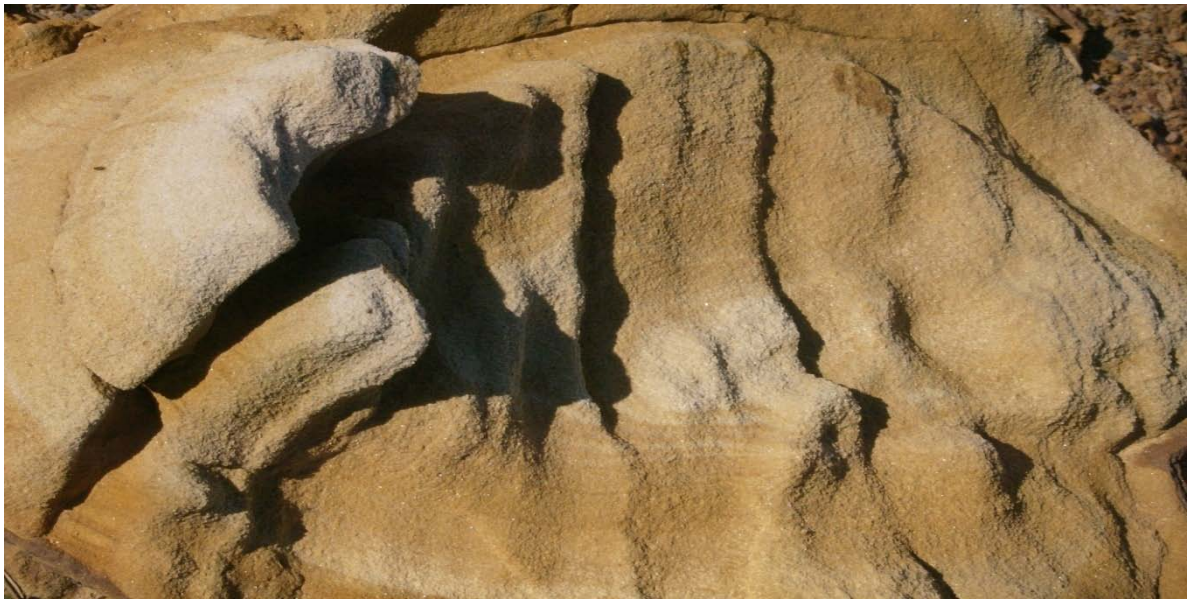


Figure 4. Grès siliceux

- Les grès argileux

Composés de quartz cimentés avec un liant argileux, ce type de roche correspond aux grès rencontrés en Alsace. Le pourcentage d'argile correspondant au liant ne doit pas excéder 20%, au-delà, ce sont des grès schisteux, ou encore des schistes gréseux si la proportion dépasse 50%. Dans ce cas, ils peuvent présenter une schistosité (structure feuilletée tendant à se diviser en dalles minces) plus ou moins marquée, en fonction de la teneur en argile. Ces roches ne sont alors plus utilisées pour la taille, mais plutôt pour le moellonnage, les dallages rustiques ou en chaperon de murs.

- Les grès calcaires

Grès dont les grains de quartz sont liés par de la calcite. Parfois de grands cristaux de calcite englobent plusieurs grains de quartz. Si le ciment n'est qu'en partie calcaire, se sont alors des grès calcarifères. Ces grès sont plus tendres et moins résistants aux épreuves du temps que les grès siliceux (monominérales).

Exemple : Le bigarré des Vosges est un grès à ciment silico-calcaire ; celui de Rouffach est un grès calcaire jaune ocre.

- Les grès schisteux

Dans les gisements de grès schisteux, les bancs de grès alternent avec des schistes. A grain fin et plus argileux que les psammites, ils se caractérisent en général par un faciès feuilleté. Leur aspect varie en fonction de leur composition propre, plus compacte ou plus fissile selon les cas. La gamme de teintes souvent foncées est très variable, parfois au sein d'une même carrière, et se décline selon une palette de gris et gris bleu, ou, pour les zones riches en fer, brun ou rouille.



Figure 5. Exemple de roche du grès schisteux

Les grès schisteux se prêtent en extérieur aux moellonnages plats – accompagnés d'angles, de têtes de moule et de linteaux – pour parements traditionnels ou maçonneries sèches, mais également aux dallages, couvre murs, tablettes et seuils. Ils sont également largement utilisés pour l'aménagement des espaces verts sous forme de moellons, pas japonais, murs à sec, murs de berge, bacs, tables et bancs.

La décoration intérieure et l'art funéraire trouvent dans ces matériaux des applications originales. Leur composition minéralogique est un Assemblage de silice, de minéraux argileux, ferrugineux et alumineux. Selon leur origine on distingue :

- Les arkoses

Les grès d'origines détritiques résultent de la détérioration par les agents d'érosion, Les arkoses sont issues plus particulièrement de la désagrégation de roches primaires. Rappelons que les granites, roches primaires, sont principalement composés de quartz, micas et feldspaths, ce qui explique la forte concentration de feldspaths au moins 25% dans les arkoses, le ciment est souvent argileux.

L'arkose de Blavosy est blanchâtre à grains moyens liés par un ciment siliceux.

- Les psammites

Les psammites résultent de la désagrégation des roches primaires. Les micas abondants sont groupés en minces lits et facilitent dans le plan de clivage un délitage en dalles. Ces roches sont reconnaissables au scintillement des paillettes de micas sur les plans de stratification. Comme le grès de la Rhune.

- Les quartzites

Ils dérivent le plus souvent de grès siliceux dont le ciment a recristallisé autour des grains de quartz. Un quartzite peut être d'origine diagénétique (grès de Fontainebleau) ou métamorphique (grès quartzite d'Erquy); la distinction entre les deux n'est pas toujours évidente et nécessite une étude complète (contexte d'apparition, structure et texture de l'échantillon). Ce sont des roches siliceuses compactes, très dures, à cassure luisante, de teinte généralement assez claire. On peut citer ceux d'Erquy et de Brando. La plupart des classifications modernes font intervenir la composition minéralogique du grès et sa teneur en matrice fine (<30 µm), Dott a choisi de diviser les grès en trois grands groupes : les arénites, les wackes et les mudrocks.

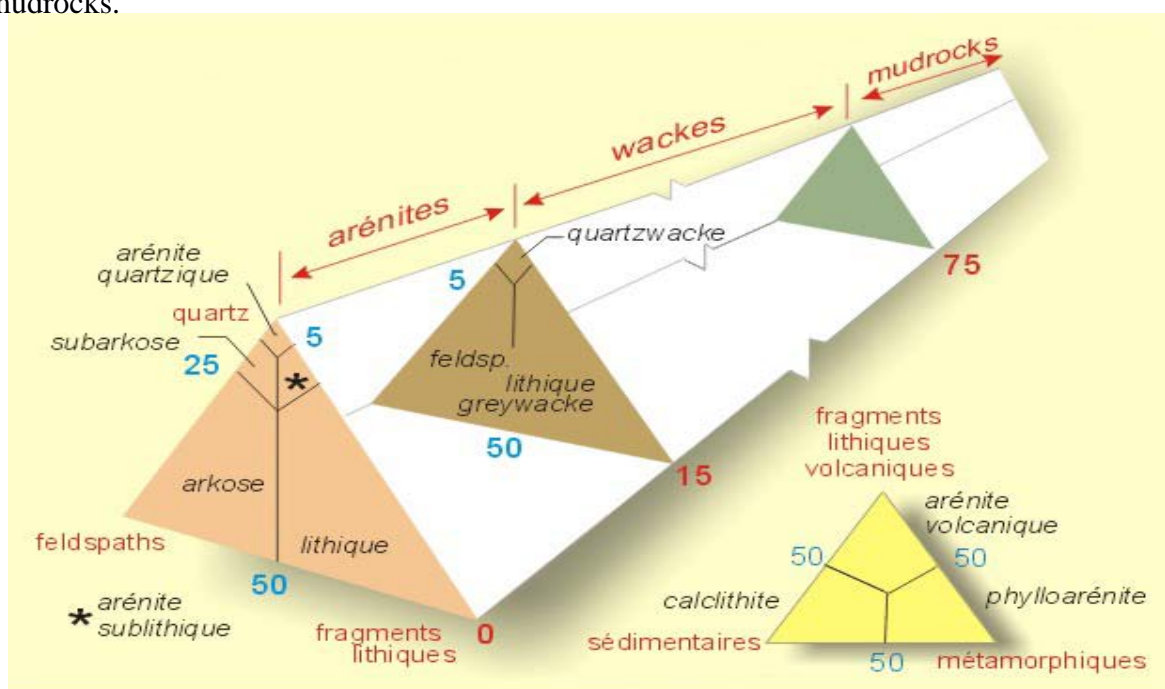


Figure 6. Classification des grès suivant Dott (1964).

Le petit triangle à droite suggère une classification des greywackes lithiques sur base de la nature des fragments rocheux.

- Il s'agit d'une classification pétrographique, elle ne tient pas compte de toutes les données de terrain, souvent très importantes dans l'interprétation d'un grès, structures sédimentaires, géométrie du corps sédimentaire, autres faciès associés latéralement et verticalement.
- les grains autres que le quartz, les feldspaths et les fragments lithiques ne sont pas pris en compte.
- La matrice est définie comme la fraction inférieure à 30 μm . A vrai dire, une matrice représente la fraction granulométrique plus fine comblant les interstices entre les plus gros grains d'un sédiment. Le terme implique donc une taille relative et une disposition particulière et non pas une granulométrie particulière ;
- Les teneurs en matrice qui délimitent les domaines des arénites, des wackes et des mudrocks ont été choisies arbitrairement et varient en conséquence d'un auteur à l'autre. Il est clair que ces valeurs arbitraires deviendraient inutiles si l'on prenait en considération la structure d'agrégat : structure jointive pour les arénites et structure empâtée pour les wackes.

Nonobstant ces remarques, cette classification a l'avantage d'être très utilisée et elle permet de distinguer quatre grandes familles de roches, correspondant à des origines distinctes, les arénites quartziques, les arkoses, les arénites lithiques et les wackes.

Les arénites quartziques sont constituées essentiellement de grains de quartz, chert, quartzite associés à quelques minéraux lourds résistants. Leur couleur est claire. Ce sont des sédiments matures, c'est à dire débarrassés des constituants instables, généralement bien triés et dont les grains possèdent un bon arrondi. Ce type de sédiment s'observe depuis la base de la zone d'action des vagues de tempête jusqu'au milieu continental : plages, dunes, barrières, rides, etc. Le matériau provient typiquement de l'érosion de zones continentales stables à relief faible.

Les arkoses ou arénites feldspathiques sont composées principalement de quartz et de feldspath. Ce sont des roches claires, souvent roses ou rougeâtres. L'orthose et le microcline sont plus abondants que les plagioclases quand la croûte continentale représente la source principale du sédiment ; dans le cas contraire, une source volcanique doit être suspectée.

On y observe aussi des micas et des fragments de roches. Les arkoses ne sont pas des sédiments aussi matures que les arénites quartziques, elles sont généralement plus grossières et moins bien triées que ces dernières (sauf certaines arkoses éoliennes de milieu désertique). Beaucoup d'arkoses sont des sédiments continentaux, de type cône alluvial, "point bar" de rivière, voire plage. La présence du feldspath implique, comme dit plus haut, un climat aride (désertique ou arctique) et/ou un relief accusé (soulèvements récents, failles actives). Certaines arkoses sont des "reliques", accumulées en tout début de transgression marine et surmontées par des arénites quartziques.

Les arénites lithiques sont constituées de fragments de quartz et de roches diverses. Le mélange de quartz et de débris divers leur donne un aspect "poivre et sel". Les feldspaths sont généralement peu abondants, les micas sont communs. Ces sédiments s'observent aussi bien dans des cônes alluviaux que des turbidités. Il s'agit de dépôts immatures, à proximité de reliefs vigoureux. Les wackes (gray wackes): ce sont des roches généralement sombres, constituées d'une matrice et de grains de quartz, de chert, de calcaire, de roches volcaniques, de schiste, de feldspath (souvent anguleux). Il s'agit de sédiments immatures, mis en place par des courants de turbidité. On y retrouve en effet les grano-classements et les autres structures sédimentaires produites par ce type d'agent de transport et de dépôt. Il faut faire attention au caractère primaire de la matrice et veiller, pour l'interprétation, à ce qu'il ne s'agisse pas plutôt d'une arkose dont les grains de feldspath ont été complètement altérés. Pour les sédiments "mixtes", comprenant à la fois des grains de quartz et de carbonate ou de la boue calcaire et siliciclastique, la classification de Mount (1985) est recommandée [6].

7. CONCLUSION

La carrière assure la demande de matière première gréseuse pour l'usine de verre de l'ENAVA (Entreprise Nationale du Verre et Abrasif) à Taher.

Les conditions infrastructurelles sont bonnes le transport de la matière première concassée de la carrière à l'usine se fait par des camions sur une route asphaltée.

Le gisement est situé dans la partie formée par le triangle El- Aouana, Jijel et Texanna, sur le flanc Nord du complexe grès marnes argileuses appartenant à la nappe numidienne.

Les formations délimitant le complexe du flysch oligocène sont :

- Miocène : grès, argilites, marnes, conglomérats, argiles.
- Crétacé inférieur : argiles, aleurolitites, grès, calcaires, marnes (flysch).
- Intrusions néogènes : granites, granodiorites, porphyres, rhyolites et tufs associés.

La matière première du gisement est une suite des couches de grès quartzeux formée par une bande large de 70 - 80 mètres avec un pendage de direction Nord- Est ; dans cette suite de couches, il y a des intercalations de marnes argileuses schisteuses.

Les couches stratigraphiques sus et sous –jacentes du grès stratifié à gros bancs sont des marnes argileuses de couleur brune noire. Ces roches stériles délimitent la couche de grès au Nord et au Sud, la suite des couches fortement tectonisée a une inclinaison de 70°-80° vers l'Est. Par d'autres endroits les couches sont verticales.

La matière première d'après les analyses de laboratoire est un quartzite mal classifié, à texture compacte, contenant des grains fins, moyens et grossiers avec plus ou moins de grains fins de gravier, son composant principal est le quartz, en petite quantité par des minéraux argileux.

La matière première est relativement homogène, la teneur moyenne des composants principaux est de :

SiO ₂	96.90 %
Al ₂ O ₃	01.45 %
Fe ₂ O ₃	00.29 %

Les principaux composants nuisibles sont les minéraux du fer (pyrite, limonite) et les minéraux argileux (illite, kaolinite). Selon les analyses des échantillons :

- la teneur de zircon est d'importante quantité par rapport aux autres.
- les grès de couleur claire considérés macroscopiquement comme de bonne qualité ont une faible teneur en fer (Fe₂O₃=0.01% ; FeO=0.06 à 0.07%).
- les grès argileux de couleur foncée sont, en plus de la fraction pélitique souillés (taché) par la pyrite et par une matière organique.

Les réserves géologiques totales en catégorie (B), de la bande de grès de la région délimitée par les sondages, sont de millions de tonnes. Les réserves exploitables selon la catégorie (A) sont de 1.47 million de tonnes [1].

BIBLIOGRAPHIE ET WEBGRAPHIE DE PREMIERE CHAPITRE.

[1] : Rapport géologique du gisement de grès d'El Aouana.

- Janos LINGAUER (géologue).

- Imre OROSZ (géologue et cartographe).

Edition 1990, 74 p.

[2] : Traits essentiels de l'Algérie. M.KIEKEN.

[3] : Silice et quartz, par Michel Dumont. Ressource naturelle de canada.

[4] : Tiré du NIT 205 – page séminaire septembre 1997.

[5] : www.2ulg.ac.be ; (Les roches de construction et de décoration).

[6] : www.2ulg.ac.be/geolsed ; (Roches détritiques).

CHAPITRE II

***ANALYSE DE LA METHODE D'EXPLOITATION,
PREPARATION-ENRICHISSEMENT DU GRES ET
ELABORATION DU VERRE.***

II. EXPLOITATION ET TRAITEMENT DES GRES, ET ELABORATION DES VERRES.

2.1. EXPLOITATION DU GRES D'EL AOUANA

Le grès est généralement extrait à ciel ouvert dans des carrières au moyen de techniques classiques d'abattage. Après son concassage primaire, la roche est camionnée jusqu'à l'usine où elle est davantage broyée, traitée et valorisée.

L'exploitation de la matière première dans notre cas se fait par la méthode à ciel ouvert, l'extraction est réalisée par forage et tir. La production de la matière première est assurée suivant la demande au niveau de l'usine de fabrication du verre (verrerie).



Figure 7. Schéma d'une partie de la carrière du grès.

Les réserves du gisement sont estimées comme suit:

Le grès se situe entre deux blocs relativement bien délimités, ainsi le calcul des réserves a été fait par la méthode dite "méthode des blocs géologiques".

Le bloc N° I se situe au Sud de la partie actuellement en exploitation. IL est limité au Nord par le gradin, à l'Est et à l'Ouest par la limite des couches et au Sud par la faille.

Le bloc N° II se trouve au Sud de cette faille. Ainsi ses limites sont, au Nord le plan de la faille, à l'Est et à l'Ouest les limites des couches et au Sud une plus grande faille caractérisée par la morphologie. Pour simplifier les calculs, les couches supérieures (N) et inférieure (W) du corps gréseux sont considérées parallèles. La limite inférieure pour le calcul des réserves est le niveau plus 20 m. Les surfaces des deux blocs ont été calculées à l'aide du pontographe. Les résultats ont été obtenus comme suit: Bloc N° I = 8840 m², Bloc N° II = 10870 m².

La hauteur du bloc N° I comprise entre la surface et le niveau + 20 mètres est en moyenne de 50 mètres, ceci donne un volume de: $8840 \text{ m}^2 * 50 \text{ m} = 442000 \text{ m}^3$.

La hauteur du bloc N° II comprise entre la surface et le niveau plus 20 mètres est en moyenne de 55 mètres, ceci donne un volume de: $10870 \text{ m}^2 * 55 = 597850 \text{ m}^3$.

Le volume total des deux blocs est: $442000 \text{ m}^3 + 597850 \text{ m}^3 = 1039850 \text{ m}^3$ avec un volume de stérile de 15000 m³, le volume des réserves géologiques du grès est égale à 2.9 millions de tonne compte tenu que la densité du grès est de 2.49 g/m³.

2.2.PREPARATION DE LA MATIERE PREMIERE

L'objectif principal de la fragmentation dans les usines de traitement de minerais est la libération des espèces minérales de valeur. Une libération parfaite n'étant pas possible, pour des raisons techniques et économiques, on se contente en général d'un degré de libération tel que la séparation soit économiquement faisable. Comme le degré de libération est une variable impossible à évaluer en continu, on utilise habituellement la dimension des particules comme une estimation du degré de libération.

La dimension optimale des particules contenues dans le produit de l'atelier de broyage est normalement déterminée par le procédé de séparation suivant le broyage (par exemple, l'unité de flottation, de lixiviation ou de séparation gravimétrique).

Comme le produit du broyage possède un large spectre de dimensions des particules, on utilise comme référence une caractéristique dite « finesse » de la répartition granulométrique, par exemple D₈₀ (dimension d'une maille carrée laissant passer 80 % de la masse des particules) ou le pourcentage de particules plus petites qu'une dimension de référence. Ce n'est cependant pas le seul critère possible pour définir la qualité du broyage. Pour la plupart des procédés, il est aussi important que le produit de broyage ne contienne pas de particules trop petites, car la séparation en aval peut être gênée par la présence de schlamms, ni de

particules trop grossières qui ne seraient pas libérées ou réduiraient le rendement de récupération du minéral de valeur.

Un autre critère normalement considéré dans les objectifs du broyage est la capacité de production du circuit. Généralement les deux critères, finesse du produit et capacité de production, sont antagonistes, d'où la nécessité d'un compromis qui est différent d'une usine à l'autre en raison des caractéristiques propres à chaque minerai traité. Par exemple, pour une installation de grande capacité traitant un minerai de faible teneur, ce compromis est difficile à établir, car une plus grande capacité de production implique un degré inférieur de finesse du produit, et donc une réduction du rendement de séparation. Le point d'équilibre doit être déterminé par une analyse soignée des différentes variables qui influent sur le rendement économique du procédé de séparation, On doit donc considérer :

- Les relations entre la puissance consommée, la dureté du minerai, la capacité du circuit et la finesse du produit ;
- La relation entre le degré de libération ou la finesse et le rendement de séparation ;
- La relation entre le rendement de séparation et le temps de séjour, lié à la capacité.

Le procédé de broyage doit non seulement atteindre le taux de libération et la capacité de production voulus mais doit aussi satisfaire à des objectifs économiques. Cela implique une utilisation optimale de l'énergie, une consommation raisonnable de corps broyant et un coût optimal pour l'entretien des broyeurs. De plus, la finesse recherchée devrait être révisée de façon continue en fonction de critères économiques tenant compte des variations des coûts des produits et de l'énergie consommée et de la valeur des produits fabriqués.

2.2.1. Concassage

Dans les usines de traitement de minéraux, le concassage vise principalement à faciliter la manutention du minerai et à le préparer pour la fragmentation ultérieure.

Le concassage primaire et le concassage secondaire visent à libérer les minéraux de valeur de la gangue pour que la séparation des minéraux devienne techniquement et économiquement faisable.

Dans notre cas, après l'extraction de la matière première, la roche subit un concassage préalable à l'aide d'un concasseur à mâchoire au niveau de la carrière, les grains obtenus d'une grosseur maximale de 60 mm, puis le produit obtenu subit notre opération de concassage secondaire par concasseur giratoire avec une ouverture de déchargement de 15 mm (Figure 8), la matière concassée est transportée par des camions vers l'usine de traitement.



Figure 8. Circuit de concassage

2.2.2. Broyage

Le broyage des matériaux est un procédé industriel dont l'incidence économique est très lourde, aussi bien à cause des investissements réalisés, des frais d'entretien, de la consommation des corps broyant, que de l'énergie électrique consommée.

Un objectif secondaire du broyage est la création de nouvelles surfaces pour l'adsorption des réactifs chimiques utilisés lors de la séparation par flottation.

Dans d'autres cas, l'objectif du broyage est d'augmenter la surface spécifique des particules. Par exemple, dans le cas des usines de traitement d'or par cyanuration, l'augmentation de la surface est essentielle pour réussir la lixiviation.

Dans les cimenteries, l'objectif est aussi la production de surface spécifique, pour obtenir soit une bonne réactivité de clinkérisation pour les matériaux crus, soit une résistance mécanique spécifiée pour le ciment.

L'équipement d'un atelier de broyage doit permettre non seulement de traiter un certain débit de minerai, mais aussi de livrer un produit ayant une distribution granulométrique donnée tout en tenant compte des contraintes imposées par les équipements et le matériau lui-même, et par les étapes de traitement ultérieures [1].

Dans notre cas, l'unité installe un broyeur à barre pour l'obtention d'un produit de granulométrie inférieure à 1mm. La matière broyée est transportée par un convoyeur à bande vers la section de classification et lavage.

2.2.3. Classification

Séparation d'un ensemble de particules en fonction de leur taille sur le principe des vitesses terminales de chute différentes dans un fluide.

Pour quoi faire une classification par taille ?

- Pour éliminer assez tôt les particules déjà fines comme les argiles, en évitant ainsi leur sur-broyage.
- Pour limiter le broyage aux particules grossières qui nécessitent véritablement une fragmentation.
- Pour obtenir des produits respectant des spécifications précises de dimension.

2.2.3.1. Criblage

Le criblage est une opération unitaire qui permet de séparer une population de fragments de matière suivant leur dimension en deux (ou plusieurs) parties. Pour cela, on utilise une surface perforée qui laisse passer les fragments de dimensions inférieures aux dimensions des perforations et qui retient les fragments de dimensions supérieures.

2.2.3.2. Classification par classificateur à vis

Le produit passe par une autre opération de classification qui a pour objet d'éliminer les agiles et les matières organiques. Cette opération est basée sur la différencier de densité entre les particules. On y distingue trois zones d'opération :

- Zone Inférieure, sédimentent les particules grossières.
- Zone Intermédiaire, sédimentation entravée.
- Zone Supérieure, la sédimentation libre prévaut et d'où un flux horizontal d'eau déborde.



Figure 9. Classificateur à vis

2.2.4. Attrition

Le produit évacué directement dans une cellule d'attrition. Cette opération visant à détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules et à nettoyer les particules de minerai utile par friction des particules les unes contre les autres.

2.2.5. Criblage humide et Coupure de 630 à 100 μm

Le produit sortant du cellule d'attrition évacuée dans un bache puis pompé vers un crible ou subi une classification granulométrique, les particules supérieure à 630 μm (refus) sont rejetées et éventuellement retraitées, ou les particules inférieure à 100 μm (passants) sont envoyées vers le bassin de décantation et clarification des eaux pour objet de récupérer l'eau, alors que la tranche comprise entre (-630 +100) μm est acheminée vers une série des hydrocyclones.

2.2.6. Cyclonage

Parmi les appareils de classification par dimension l'hydro cyclone, est les plus utilisés en raison de sa simplicité et de ses coûts en capital et d'opération peu élevés. Dans cet appareil, la séparation se fait sur la base de différence de comportement hydrodynamique des particules dans un écoulement centrifuge que l'on suppose dépendant de la dimension des particules. Le liquide, contenant les solides entre à l'intérieur de la coquille supérieure du cyclone et la force centrifuge développée par le mouvement de rotation tend à retenir les

particules grossières à la périphérie du cyclone alors que le liquide et les particules fines y étant suspendues quittent le cyclone par le vortex. Les particules grossières et une petite fraction du liquide sont déchargées à l'apex du cône. Cependant, la performance du hydro cyclone est loin d'être parfaite.

Parmi les paramètres qui caractérisent la performance de l'opération de classification on retrouve :

- Le court-circuitage de fines particules à la sousverse ;
- Le diamètre d'équicoupe et l'intensité de séparation (coefficient d'imperfection).

Ces paramètres peuvent être évalués à partir de la courbe de partage corrigée de l'hydro cyclone, courbe qui doit être obtenue expérimentalement [2].

Les principales variables de conception et d'opération d'un cyclone ayant une influence sur la qualité de la classification sont :

- La vitesse angulaire d'entrée de la pulpe,
- L'angle d'entrée de la pulpe,
- Le diamètre du cyclone,
- L'angle du cône,
- Les diamètres et longueurs du vortex et de l'apex. Le différentiel de pression entre l'entrée et la sortie.
- La vitesse angulaire à laquelle la pulpe entre dans le cyclone est reliée au diamètre de la conduite d'alimentation (Figure 10).

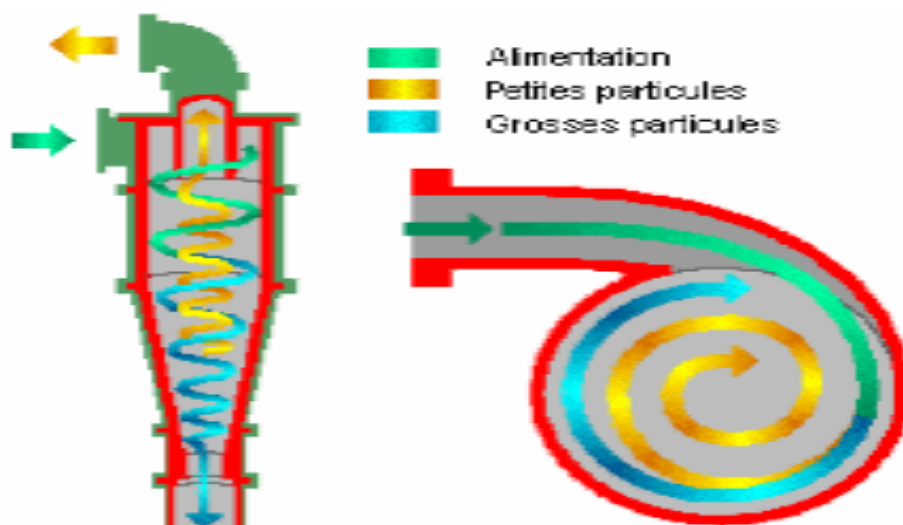


Figure 10. Schéma d'un hydro cyclone

Plus le diamètre de la conduite d'alimentation est petit, plus la vitesse d'entrée est élevée. Concernant l'angle d'entrée de la pulpe, on peut dire qu'il existe deux types de conception. Le premier type est une conception où la conduite d'alimentation est fixée perpendiculairement à la paroi du cyclone. Ce n'est malheureusement pas le meilleur type de conception étant donné qu'une turbulence non négligeable s'installe dans le cyclone entravant du même coup la qualité de la séparation.

Le deuxième type de conception, et le meilleur, consiste en une conduite tangentielle à la paroi engendrant un mouvement hélicoïdal d'entrée de la Pulpe tout en minimisant la turbulence.

Le diamètre d'équicoupe d'un cyclone (d_e) varie de 425 à 45 μm et est proportionnel au diamètre du cyclone sélectionné. On peut s'attendre à un diamètre d'équicoupe de l'ordre de 10 à 30 μm . Le différentiel de pression entre l'entrée et la sur verse est un bon indice de la performance du cyclone étant donné qu'il varie avec le débit et la dimension de l'apex. Le différentiel de pression est la pression à l'entrée du cyclone. Aussi, le fait de décharger à une élévation supérieure à la décharge de l'apex évite de créer un effet de siphon pouvant compromettre la constance dans la pression d'opération et limite la quantité de particules grossières court-circuitées à la sur verse.

Au cours de l'expérience, Finalement, on peut mentionner que le diamètre d'apex utilisé ne doit jamais être utilisé dans le but de contrôler le diamètre d'équicoupe d'un cyclone. Cependant, on doit s'assurer que l'angle de décharge de la sous verse est de forme conique avec un angle se situant entre 20° et 30° de façon à ne pas créer un étranglement trop prononcé à l'apex. Un angle supérieur à 30° implique que la sous verse n'évacue pas toutes les particules grossières et que certaines de ces particules grossières quittent à la sur verse au lieu de passer à la sous verse. Un angle inférieur à 15° - 20° implique que la pression d'opération est trop faible ou que le cyclone est trop gros. Dans un tel cas, la qualité de la séparation est entravée et beaucoup trop d'eau se retrouve à la sous verse. [2]

2.2.7. Séparation gravimétrique

Il a plusieurs mécanismes de séparation gravimétrique tel que la séparation par milieu dense, par table à secousse, par jigs ...etc. le choix de tel méthode est dépend des propriétés physico chimique et minéralurgique du minerai à séparer. Dans notre cas la séparation est se fait par table à secousse.

Les tables à secousses sont composées d'une table légèrement inclinée (réglable de 0° à 6°) dans le sens de la largeur et équipée d'un mécanisme qui lui communique longitudinalement

un mouvement de va-et-vient asymétrique. L'amplitude et la vitesse de ce mouvement sont aussi réglables, la surface de la table est couverte de rainures longitudinales et parallèles dont la profondeur diminue progressivement à partir du point d'alimentation de la pulpe jusqu'à la sortie qui est diamétralement opposée (figure 11).

L'eau de lavage qui s'écoule sur la table entraîne les particules légères dans la direction transversale (vers le bas). La stratification des particules entre les rainures se produit sous l'action des secousses et du courant d'eau de lavage. Les secousses contribuent à dilater le lit de particules afin de permettre aux grosses particules denses de le traverser jusqu'à la surface de la table. L'effet des secousses entraîne la formation de deux couches de particules distinctes dont l'une est composée des particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre des particules de masse volumique faible (couche supérieure). Les particules lourdes sont acheminées longitudinalement à l'autre extrémité de la table grâce à la direction et à la nature asymétrique des secousses, à l'accompagnement de la répartition des différents produits récupérés en fonction de leur masse volumique, et à l'aide de collecteurs réglables la bordure longitudinale permet de récupérer deux produits différents dont l'un consiste de grosses particules de masse volumique faible et l'autre en un mélange de particules mixtes et de petites particules légères. De la même façon, il est possible de récupérer le long de la bordure transversale deux produits différents, l'un d'eux comporte un concentré de fines particules denses alors que l'autre est constitué de grosses particules denses mélangées à des particules mixtes. Les tables à secousses sont employées pour le traitement des particules dont le diamètre varie entre 75 μm et 4,75 mm.

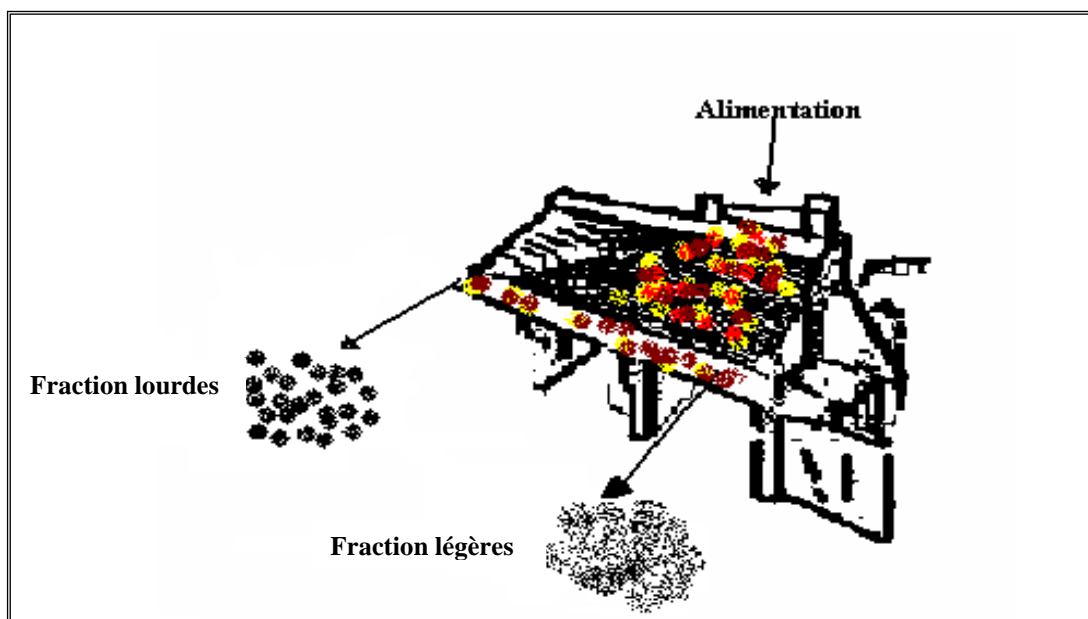


Figure 11: Schéma d'une table à secousse.

2.2.7. Séchage

Le grès traité (la silice) pompés dans la bêche sont séché dans le cyclone incorporé au filtre le sousverse du cyclone alimente le plateau de filtration du filtre sécheur, sous l'effet de la dépression crée sous la toile filtrante par deux ventilateurs, l'eau traverse la toile filtrante et recueillie dans l'hydro séparateur placé sous le filtre et qui sert en même temps de joint hydraulique.

La vapeur nécessaire au séchage est produite dans une chaudière alimentée avec de l'eau traitée dans l'unité, la vapeur est injectée sur le filtre a travers d'une hotte.

2.2.8. Stockage et homogénéisation

L'homogénéisation est une opération très importante pour but d'obtenir une matière première d'une teneur homogène (produit finis).

La matière traité (silice) est envoyé par un convoyeur à bande vers un silo de stockage a partir de ce dernier le grès et évacuer dans un hangar pour le stockage et l'homogénéisation (figures 12). Le schéma détaillé de traitement du grès au niveau de l'usine de traitement de l'ENAVA est illustré dans (cf.3).

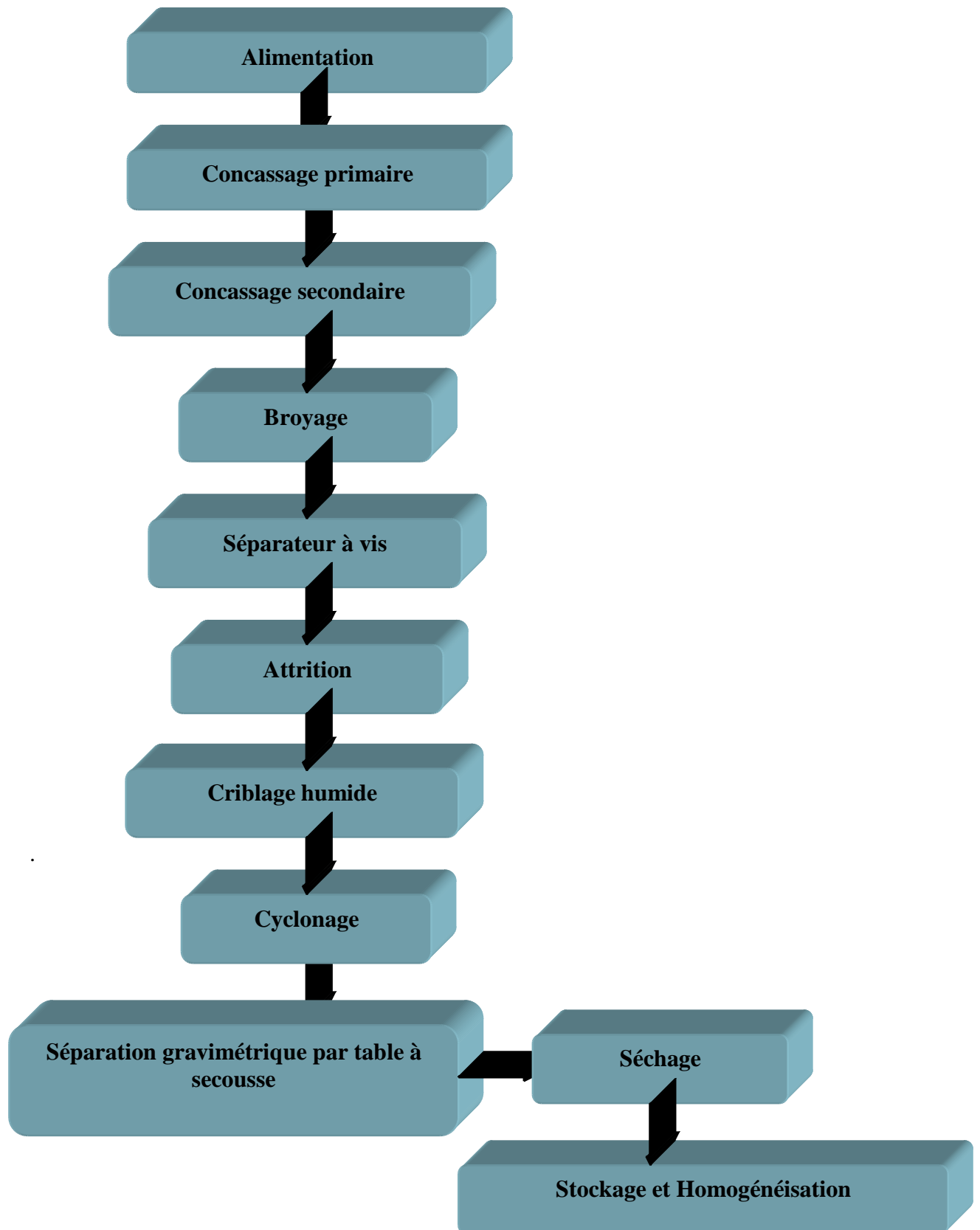


Figure 12: Etapes de traitement des grès de gisement d'El Aouana

2.3. ÉLABORATION DU VERRE

Par définition le verre est un corps solide, transparent, obtenu par la fusion du sable mêlé de chaux et de potasse ou de soude. Il existe de nombreuses catégories de verre définies par des verriers ou par des scientifiques. Pour les verriers, c'est un solide altérable par les agents atmosphériques et renfermant plus de 60% de silice. Pour les scientifiques, c'est une substance amorphe, présentant l'état solide ou de liquide surfondu, transparent, translucide ou opaque, sonore, doué d'une cassure brillante et pouvant passer par toutes les phases de l'état pâteux par élévation de température.

2.3.1. Fabrication du verre

Les procédés de fabrication du verre (ou méthodes de façonnage) varient selon le type de produit verrier (verre creux ou verre plat) et selon la quantité que l'on souhaite produire. Autrefois, les verreries étaient construites près des forêts et des rivières pour le bois et le sable. Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, la fabrication se faisait dans des fours à pots chauffés au bois. Cette technique est encore utilisée aujourd'hui pour les verres de luxe (cristal) ou pour les verres spéciaux (vitrail, optique) bien que le bois ne soit plus utilisé comme combustible. Au siècle dernier, une véritable révolution apparaît : l'invention du four à bassin ; utilisé pour les procédés de fabrication mécanique où la production est continue et standardisée [3].

2.3.2. Composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec l'oxygène (SiO_2) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes formateurs car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont :

Les fondants, qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C). Les stabilisants, qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

2.3.2.1. Oxydes formateurs (les vitrifiant)

- La silice (dioxyde de silicium SiO_2) : C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C .

Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Cette qualité, est très recherchée pour la fabrication de verres. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant.

- L'anhydride borique (le bore ou borax anhydre B_2O_3) : Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à $2300^\circ C$. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.
- L'anhydride phosphorique (le phosphore P_2O_5) : Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois.

2.3.2.2. Oxydes modificateurs ou les fondants (oxydes alcalins)

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé ($1730^\circ C$). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à $1400^\circ C$ (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge. Un même verre peut associer plusieurs fondants, soude et chaux (verre sodo calcique), soude et plomb (cristal).

- Oxyde de sodium (la soude Na_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitron). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.
- Oxyde de potassium (K_2O) : Il entrait autrefois dans la composition sous forme de cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage.
- Oxyde de magnésium (MgO) : Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté,

le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

2.3.2.3. Les stabilisants (oxydes alcalino-terreux)

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si-O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

- L'oxyde de calcium (CaO) : Se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques.
- L'oxyde de zinc (ZnO) : Il augmente l'éclat et l'élasticité.
- L'oxyde de fer (Fe₂O₃) : C'est un stabilisant et un colorant, souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO₂) (savon des verriers).
- L'oxyde de plomb (PbO) : Entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler.

2.3.2.4. Colorants

Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse ; cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert). La coloration dans la masse est due à la présence dans le verre d'ions de métaux de transition [4].

2.3.3. Différents types de verre

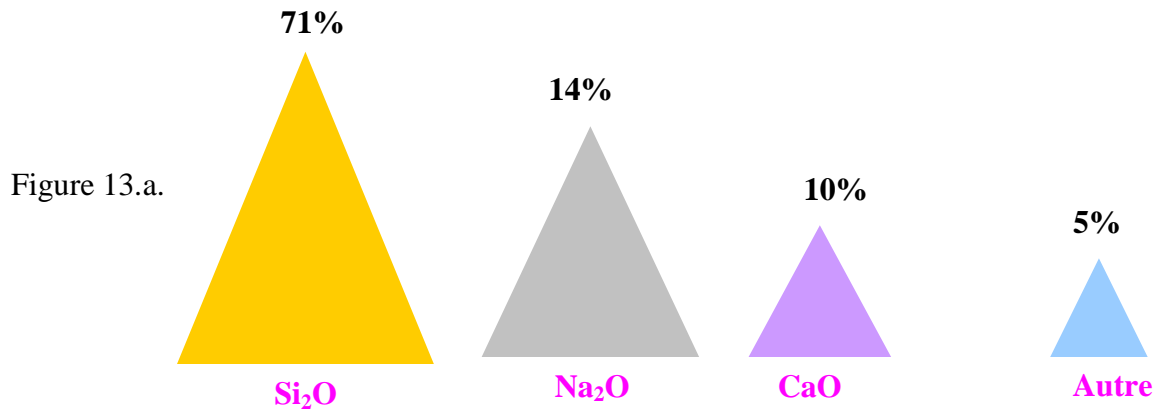
Il existe une infinité de verres dont les compositions varient en fonction de l'usage et des propriétés désirés. Les verres les plus courants sont :

Le verre silico-sodo-calcique, le verre borosilicate, le verre céramique et les verres au plomb.

2.3.3.1. Verres silico-sodo calcique

Exemple : Silice (71%) + soude (14%) + chaux (10%) + autres (5%).

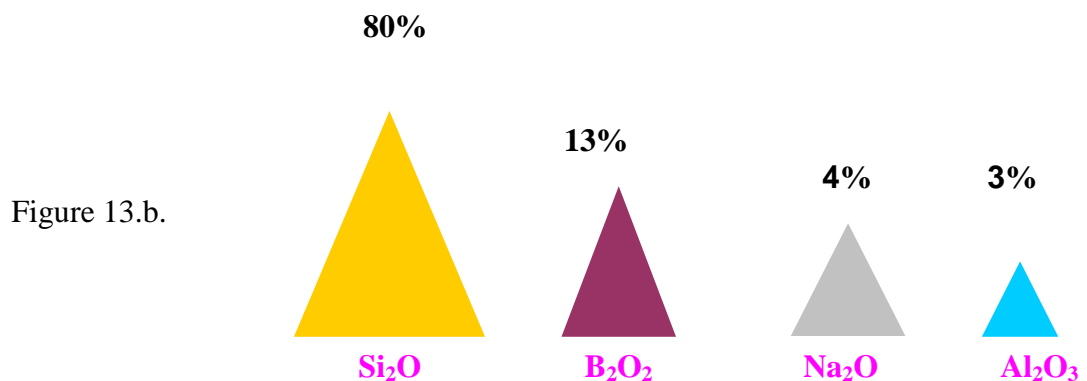
C'est le plus commun des verres. Il a une bonne stabilité chimique, mais il est sensible aux chocs thermiques. Il est utilisé pour la fabrication des verres plats et creux, des ampoules électriques et en bouteillerie. Température de ramollissement pour 70% de silice = 700°C. Son coefficient de dilatation est élevé : 86×10^{-7} de 0 à 300° C.



2.3.3.2. Verres borosilicates

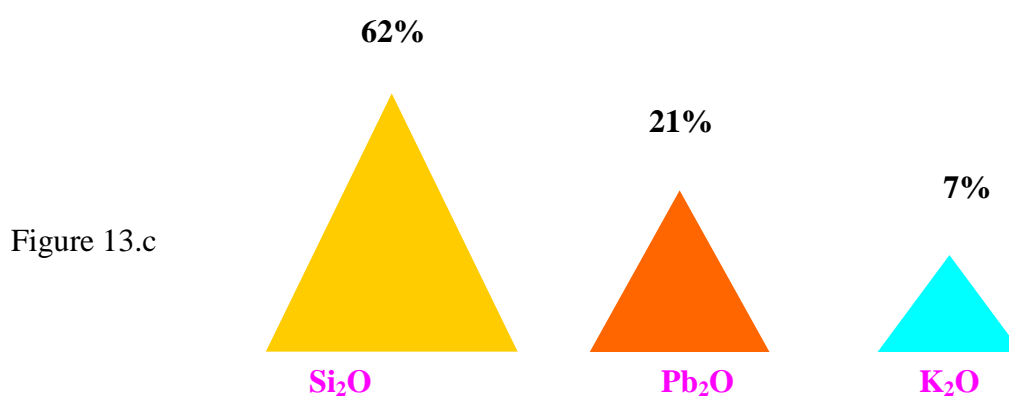
Exemple : Silice (80%) + anhydride borique (13%) + soude (4%) + alumine (3%)

Le plus connu est le Pyrex (1915) qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. On en fait des ustensiles de laboratoire et de cuisine (résistance à la chaleur et aux agents chimiques). Il sert aussi pour l'isolation (fibres de verre) et le stockage de déchets radioactifs. Température de ramollissement pour 80% de silice = 820° C. Son coefficient de dilatation est très faible : 32×10^{-7} (de 0 à 300° C).



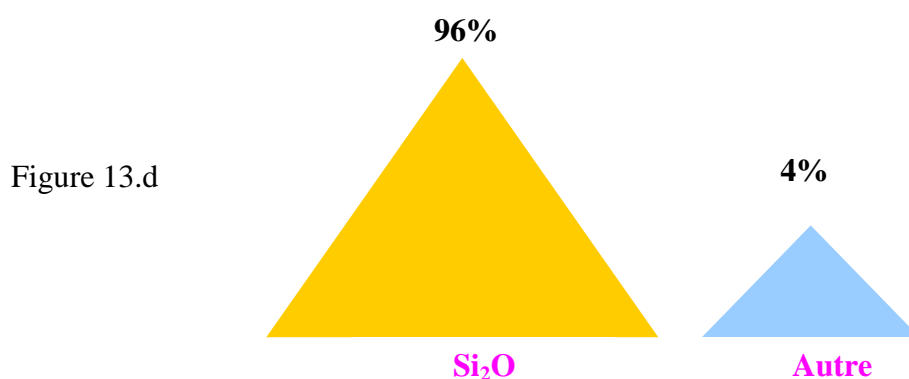
2.3.3.3. Verres au plomb

Exemple : Silice (62%) + oxyde de plomb (21%) + potasse (7%), On l'appelle cristal si la teneur en oxyde de plomb est supérieure à 24 %. Il sert en gobeletterie et en verrerie d'art, pour les téléviseurs et en électronique. Le cristal est limpide, très sonore, très résistant à la dévittrification (attention : sa matière n'a rien de cristallisé). En élevant la teneur en plomb (60%), on obtient un verre dense utilisé pour la protection des rayons X. Le verre contient du plomb s'il noircit lorsqu'on le chauffe au chalumeau. Température de ramollissement pour 60% de silice et 25% d'oxyde de plomb = 630° C, Son coefficient de dilatation est très élevé 90×10^{-7} (de 0 à 300° C)



2.3.3.4. Verre de silice

Il contient au moins 96% de silice. Il est très employé grâce à sa grande pureté (transparence optique) et pour sa résistance aux températures élevées, à la corrosion et aux chocs thermiques. On l'utilise pour la fabrication de tubes de lampe à halogène, des éléments d'optique et des miroirs de télescope. Température de ramollissement pour plus de 96% de silice = 1700°C. Son coefficient de dilatation est très faible : $5,6 \times 10^{-7}$ (de 0 à 300°C).



2.3.3.4. Vitrocéramiques (ou vitro cristallins)

Exemple de composition : Silice (75%) + alumine (15%) + oxyde de titane (5%) + oxyde de lithium (3%) C'est des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de dévitrification. La transformation en céramique semi cristalline s'obtient par un traitement thermique appelé "céramisation" qui permet d'obtenir un début de cristallisation.

La température de cristallisation est à environ 800° et la cristallisation dure environ 2 heures [3].

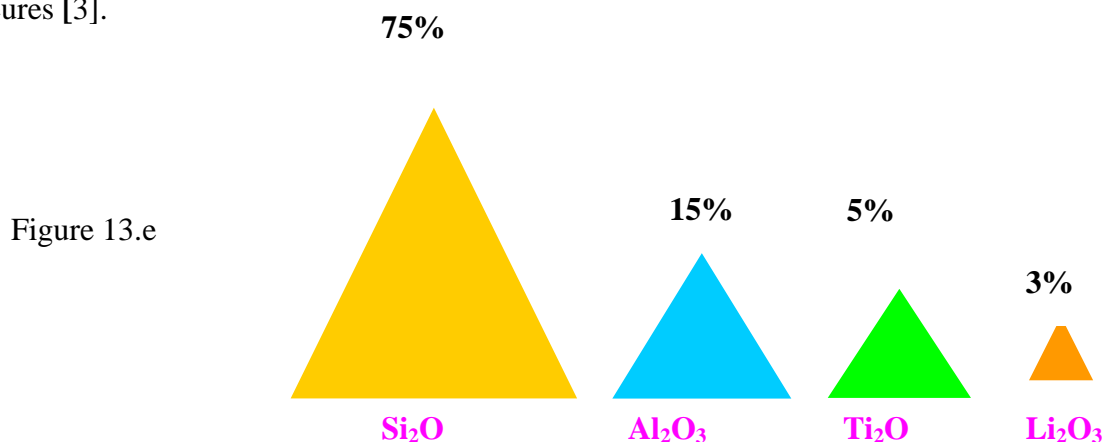


Figure 13 (a, b, c, d et e). Composition massique de différents types de verre.

2.3.4. Propriétés du verre

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

2.3.4.1. Propriétés physiques

- **Transparence** : mais il peut être opaque ou opalescent.
- **Dureté** : Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre.
- **Densité** : Elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.

- **Résistance et l'élasticité** : La cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.
- **Imperméabilité** : Elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

2.3.4.2. Propriétés thermiques

- **Dilatation** : C'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre métal. Ce coefficient varie selon la composition.
- **Conductivité** : Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille, Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C. Il est ininflammable et incombustible.

2.3.4.3. Propriétés chimiques

- **L'action de l'eau** : L'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.
- **L'action de l'air** : Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- **L'action de la lumière** : Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.
- **L'action des acides** : Ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué, le verre peut donc être dissout.

- Description de la molécule de silice :

Chaque atome de silicium est placé au centre d'un tétraèdre et lié à quatre atomes d'oxygène. Ces tétraèdres sont liés ensemble par le sommet de telle sorte que chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium. Le verre, à l'état pur, est du bioxyde de silicium.

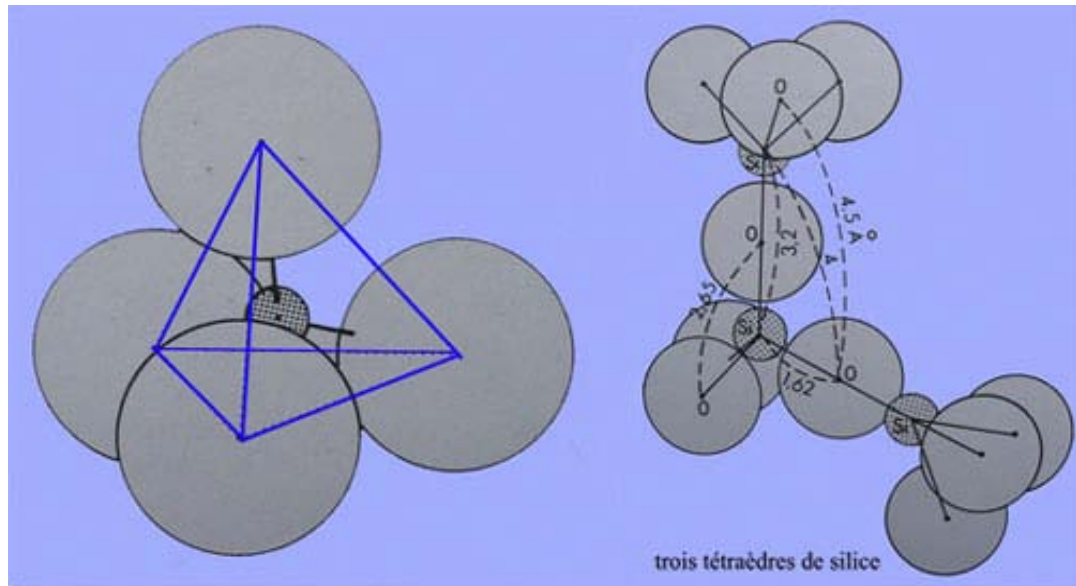


Figure 14. Description de la molécule de silice.

2.3.5. État physique du verre

2.3.5.1. État vitreux

L'état vitreux est observé dans une matière si ses molécules sont toutes identiques tandis que leur distribution est désordonnée. C'est le cas du verre où chaque molécule de silice est identique (tétraèdre) mais où l'organisation des unes et des autres est désordonnée. Cette fausse organisation se situe entre celle des solides (ordonnée, cristallisée) et celles des liquides (en mouvement donc amorphe). L'état vitreux est cet état "solide amorphe" (non cristallisé) caractérisé par la distribution désordonnée des molécules qui conservent néanmoins des distances fixes entre elles.

2.3.5.2. Passage de l'état vitreux à l'état cristallisé

La dévitrification du verre peut apparaître sous certaines conditions. L'état vitreux disparaît en même temps que sa structure s'organise, se cristallise. Le verre devient opalin, il perd sa solidité et sa transparence. Ce défaut est plus observable sur les verres à base de potasse. Elle a aussi lieu dans le cas d'un refroidissement trop prolongé après fusion du verre. On appelle

zone de dévitrification, la zone de température dans laquelle une cristallisation est susceptible de se créer.

2.3.5.3. Viscosité

La viscosité est une qualité qui permet d'opposer une résistance à l'écoulement de la matière sur une surface donnée ; c'est le cas du verre lorsqu'il est chauffé entre 1000° et 1400°C. Les molécules sont liées ensemble et possèdent un degré de liberté pour se déplacer les unes par rapport aux autres : ceci s'appelle la viscosité. A savoir que le verre même fortement chauffé n'est jamais fluide, il devient progressivement malléable, puis de 1000° à 1400°C, il devient visqueux (consistance du miel). Dans le sens inverse, en se refroidissant, la matière est de moins en moins visqueuse, elle redevient plastique, (on peut la déformer car elle est encore déformable) puis elle redevient finalement solide et rigide. Le verre peut donc être qualifié de liquide figé (solide non cristallisé) obtenu après figement d'une matière surfondue dont la viscosité est extrêmement élevée [4].

2.3.6. Opérations de l'élaboration du verre

L'élaboration du verre est un procédé chimique, étant l'ensemble des opérations physiques, physico-chimiques et chimique au cours desquelles avec l'aide de calories le mélange vitrifiable (en état de phase solide) est transformé en une masse liquide, homogène, de viscosité convenable pour pouvoir être mis en forme par des procédés manuels ou mécaniques. Les dispositifs, dans lesquels l'élaboration du verre est réalisée sont des fours verriers. Le produit des fours verriers est le verre apte pour le façonnage.

- L'élaboration du verre correspond à quatre opérations successives :
- La formation des silicates (en phase solide).
- La formation du verre fondu (la phase liquide).
- L'affinage et l'homogénéisation du verre.
- Le conditionnement thermique du verre, pour assurer la viscosité nécessaire au façonnage.

2.3.6.1. Formation des silicates

Le tableau au dessous montre les réactions se réalisant dans le système $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Na}_2\text{O}$, système de base des verres. La phase partielle formation des silicates est elle-même, les processus se réalisant dans le système de quatre composants sous l'action de chaleur.

Pendant cet intervalle se déroulent la plupart des réactions chimiques, et les changements physiques se réalisent aussi. La première fois c'est l'humidité qui sorte de composition se chauffante. A la température 300°-400° C, les réactions commencent de dissociations, les carbonates doubles commencent à se former. A une température de 575° C le quartz se transforme (α quartz----> β quartz), cette transformation est accompagnée par un changement de volume, et par une augmentation brusque de coefficient de dilatation, c'est un phénomène très important qui cause les fissures sur les grains quartzeux facilitant les réactions avec les autres composant du mélange vitrifiable, de cette manière la formation des silicates devient plus rapide. Les réactions chimiques déroulent en phase solide, en général au dessous de 1000° C, accompagnées par un fort dégagement gazeux. Les réactions résultent les silicates alcalins et alcalino-terreux.

Tableau 4. Processus de formation des silicates

Les processus	Température (C°)
Formation de $MgNa_2 (CO_3)_2$, Début de la dissociation de $MgCO_3$	300
Formation de $CaNa_2 (CO_3)_2$, début de la dissociation de $CaCO_3$	400-420
$MgCO_3 (CO_3)_2 + 2SiO_2 = MgSiO_3 + NaSiO_3 + CO_2$.	340-620
$MgCO_3 + SiO_2 = MgSiO_3 + CO_2$	450-700
α Quartz----> β quartz	575
$CaNa_2(CO_3)_2 + 2SiO_2 = CaSiO_3 + NaSiO_2 + 2CO_2$	585-900
$Na_2CO_3 + SiO_2 = Na_2SiO_3 + CO_2$	700-900
$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$	600-920
Le maximum de la dissociation de $MgCO_3$	620
Le maximum de la dissociation de $CaCO_3$	915
$MgO + SiO_2 = MgSiO_3$	980-1150
$CaO + SiO_2 = CaSiO_3$	1010-1150
$CaSiO_3 + MgSiO_3 = CaMg (SiO_3)_2$	600-1200

Les phénomènes figurants dans le tableau précédent sont caractérisés par les équations des réactions chimiques se réalisantes, et par les températures correspondantes. Notons, que ces équations chimiques elle mêmes ne caractérisent pas correctement le phénomène donne, et les températures données ne sont valables que dans certaines conditions. Les réactions thermiques sont à interpréter comme un processus en considérant l'influence des conditions, de la température et de temps.

2.3.6.2. Formation du verre fondu (la formation de la fonte)

Pendant la phase partielle, la formation du verre se déroule tout d'abord des processus physiques (les silicates). A titre d'exemple la décarbonisation du carbonate de calcium, la vitesse de la dissociation thermique de CaCO_3 dépende :

- de la température,
- de l'atmosphère ambiante,
- d'épaisseur de la couche du vitrifiable,
- des conditions de transfert de chaleur...

Par exemple l'action de température, on trouve beaucoup de variantes ; la décarbonisation peut être déroulé dans des conditions isotherme, ou bien à la température se changeant ; on ce cas dernier la vitesse d'échauffement peut être déférente.

On peut assurer la décarbonisation de 880°C , ainsi que à 915°C mais à cette température plus élevée la décarbonisation est plus rapide. Elle se termine en cas d'un échauffement très rapide, il est fort possible, que la décarbonisation ne se commence qu'au dessus de 400°C .

2.3.6.3. Affinage et l'homogénéisation du verre

Lors de l'affinage et de l'homogénéisation les bulles de gaz présentes dans le verre fondu sortent, A l'issue de cette phase partielle le verre fondu devient une fonte caractérisée par une composition chimique homogène, qui ne contient plus les phases différentielles.

La teneur en gaz de la fonte du verre est d'origines suivantes :

- Les gazes absorbées chimiquement des matières premières.
- L'humidité et les composants volatils du mélange vitrifiable.
- L'air enfermé par les grains du mélange vitrifiable.
- Les fumées des combustibles.

La plupart des gazes de la fonte est d'origine de mélange vitrifiable, et les gazes présents dans la fonte sont les suivants : CO_2 , N_2 , SO_2 , mais aussi de vapeur d'eau, et des autres gaz peuvent être présent selon la composition chimique du mélange vitrifiable.

Il est connu que la vitesse (v) de l'ascension des bulles dans un liquide est déterminée par la loi de Stocks, selon la formule suivante :

$$v = \frac{2(\rho_1 - \rho_2)}{9\eta} gr^2 \quad (1).$$

Où

ρ_1 : densité du liquide en g/cm^3

ρ_2 : densité du gaz en g/cm^3 ,

η : Viscosité du liquide,

r : rayon de bulle de gaz en mm,

g : valeur de la pesanteur = 9.89 N.

Selon cette formule l'affinage est plus rapide si la viscosité de la fonte est plus petite. Alors pour faciliter et accélérer l'affinage la viscosité doit être diminuée, qui est assurée par l'augmentation de la température.

La vitesse du processus d'affinage est influencée par les courants de la fonte et par l'atmosphère du four. Pour activer les courants de la fonte on utilise souvent les bouillonneurs mécanique, l'affinage peut être amélioré par la prolongation de la phase fusion. Toutes les méthodes favorisant l'affinage du verre améliore en même temps l'homogénéisation de la fonte aussi. L'homogénéisation assure la composition chimique uniforme du verre fondu. Etant donné que l'homogénéisation complète de mélange vitrifiable est impossible à réaliser, et lors de l'élaboration du verre cette homogénéisation incomplète est influencée défavorablement par exemple : par la dissolution des grains quartzes, causant un enrichissement local en SiO_2 . Le dégagement des bulles gazeuses par les mouvements d'ascension des bulles élimine les larmées et les cordes (défauts de verre). L'homogénéisation de la fonte se réalise par la diffusion de cette manière la température élevée, la viscosité faible. Les courants intenses de la fonte favorisent l'homogénéisation ainsi que l'affinage [5].

On discute souvent les processus affinage et homogénéisation séparément, comme deux phases partielles séparées, en réalité il s'agit vraiment de deux processus mais ils déroulent en même temps parallèlement en étroite interaction (les deux processus n'est pas indépendant l'un à l'autre); et les méthodes d'accélération appliqués favorisent tous les deux processus. C'est pourquoi la discussion commune de deux processus est nécessaire.

2.3.6.4. Conditionnement du verre pour obtenir la viscosité nécessaire au façonnage

A la température de l'affinage et de l'homogénéisation le verre fondu est très liquide ayant une viscosité trop faible pour le façonnage. Lors d'un refroidissement lent la viscosité augmente, le verre fondu devient de plus en plus visqueux, la viscosité nécessaire pour le façonnage on obtient à la température de façonnage. Dans la pratique de l'industrie de verre

la mesure directe de la viscosité est devenue difficile et compliqué, c'est pourquoi on mesure la température qui est facile à réaliser.

Cette substitution est possible sur la base de la corrélation stricte entre la viscosité et la température du verre [6].

BIBLIOGRAPHIE ET WEBGRAPHIE DE DEUXIEME CHAPITRE

[1] : [www. Pagesperso orange.fr](http://www.Pagesperso.orange.fr)

[2] : [www. Pagesperso orange.fr](http://www.Pagesperso.orange.fr) « Analyse de la performance d'un hydrocyclone ». 21 p

[3] : www.infovitrail.com/verre/fabrication-du-verre (Dévitrification des verres).

[4] : le recyclage de verre par MARTIN benjamin et SAJE Stéphane, 2001-2004 p 5, 6, 11,12 et13

[5] : Verre, L'élaboration du verre par Gérard Pajean, VOL.13 N°5. Octobre 2007.

[6] : Rapport géologique du gisement de grès d"El Aouana.

- LINGAUER Janos (géologue).

- OROSZ Imre (géologue et cartographe).

Edition 1990, 74 p.

CHAPITRE III

***ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES FLOW SCHEET
DE TRAITEMENT DU GRES A L'ECHELLE
MONDIALE***

III.RECHERCHE SUR LES SCHEMAS DE TRAITEMENT DU GRES

3.1. INTRODUCTION

Le grès est une roche sédimentaire composée de grains de quartz consolidés par un minéral agglomérant. Les grès dans lesquels l'argile, la calcite ou l'oxyde de fer constitue le minéral agglomérant sont généralement très friables et se désagrègent facilement en grains. D'autres grès, comme ceux dont le ciment est siliceux, peuvent l'être moins et se désagréger moins facilement. La plupart des grès sont blancs, gris ou bruns et renferment des quantités variables d'impuretés minérales attribuables, par exemple, au feldspath, à la hornblende, à la magnétite, à la pyrite, à des taches d'oxyde de fer et au mica. Le quartzite est un grès métamorphisé dur et compact qui se compose de grains de quartz solidement consolidés par un ciment siliceux. Après leur fusion avec le ciment siliceux, les grains de quartz d'origine forment une masse homogène et uniforme et deviennent ainsi invisibles à l'oeil nu.

La silice est le composant principal de presque tous les types de verres pour les récipients (bouteilles et pots), le verre plat (vitres, miroirs, pare-brise), la vaisselle (verres, récipients, carafes), le verre d'éclairage (ampoules, tubes fluorescents), les écrans de TV et d'ordinateurs (y compris les écrans plats), le verre de décoration, le verre optique, etc. Les fibres de verre, utilisées surtout pour renforcer les matériaux composites ou dans les tissus décoratifs sont fabriqués à partir de poudre finement broyée. Quant à la laine de verre, elle est utilisée pour l'isolation.

Tableau 5. Spécifications pour la silice en fonction de leur usage dans les verreries

Usages	Min. SiO ₂ (%)	Max. Al ₂ O ₃ (%)	Max. Fe ₂ O ₃ (%)	Max. TiO ₂ (%)	Granulométrie	Remarques
Sable de verre					0,1-0,5 mm	Autres éléments majeurs aussi à contrôler ; < 2 ppm Cr/ Co pour le verre plat ; Cu et Ni aussi à éviter
verre coloré	98,9	0,15	0,15	0,10		
verre blanc	99,5	0,10	0,03	0,02		
verre plat	99,5	0,20	0,07	0,02		

Les gisements de quartz brut comprennent les sables siliceux, les orthoquartzites, les quartzites et les gisements de quartz massifs (filoniens et pegmatites). Certains types de gîtes conviennent mieux que d'autres à des applications spécifiques.

– Les sables siliceux

Les plus recherchés possèdent une très haute teneur en silice, un bon classement, et des grains arrondis ou subarrondis, ces sables peuvent être lavés, tamisés et purifiés à peu de frais pour répondre aux exigences des consommateurs.

– Les grès quartzitiques, ou orthoquartzites

Constituent le produit de périodes d'érosion prolongées et d'un long transport sédimentaire, qui éliminent progressivement tous les minéraux sauf le quartz.

Les roches sources consistent probablement en d'autres grès. On trouve des orthoquartzites dans toutes les périodes géologiques, partout dans le monde, mais les endroits où la pureté chimique justifie leur exploitation demeurent relativement rares. Les orthoquartzites peuvent être cimentées à divers degrés, une faible cimentation est préférable pour la production de sable de silice, alors que la silice en morceaux exige une forte cimentation.

Les quartzites représentent le plus souvent des grès purs métamorphisés, et sont constitués de particules de quartz recristallisées, indurées et bien cimentées. L'altération hydrothermale peut ajouter à la teneur en silice du grès original, mais aussi favoriser le dépôt de kaolin. La recristallisation du quartz élimine la forme originellement arrondie des grains. Ainsi, le broyage d'un quartzite produit des grains anguleux, ce qui exclut leur usage comme sable de fonderie. En revanche, certains quartzites représentent une source de silice en morceaux valable pour la fabrication de ferrosilicium et de silicium métal [1].

– Les gisements de quartz massif

Comprennent des filons ou lentilles de quartz plus ou moins stériles, d'origine hydrothermale, et des ségrégations dans les pegmatites granitiques. On peut, avec une pureté et un tonnage suffisants, tirer de ces gisements de la silice en morceaux convenant à la production de silicium métal. Les veines de quartz contenant de nombreuses inclusions fluides ne sont pas adaptées à la production de verre, sauf si ces inclusions ont été décrépitées lors du métamorphisme. Le quartz hydrothermal extrêmement pur, une fois broyé grossièrement et trié à la main, peut être vendu comme lascas [2].

3.2. FLOW-SCHEET DE TRAITEMENT DU GRES

3.2.1. Traitement

La silice peut être utilisée sous forme de gros morceaux, de sable, de poudre finement moulue et de farine. Le concassage primaire du grès en gros morceaux est rapidement effectué par des concasseurs à mâchoires et à cône, tandis que son concassage secondaire est exécuté dans des usines dotées de concasseurs à marteaux ou à impact. On peut la réduire davantage au moyen de concasseurs à cylindres ou de broyeurs à barres pour en faire du sable, ainsi qu'au moyen de broyeurs à boulets, à vibrations ou à jet ou à l'aide de broyeurs par attrition, dans une usine de broyage à petites billes céramiques, pour en faire de la farine ou un matériau plus fin. Après leur concassage primaire et secondaire, le quartzite, le grès et le quartz en gros morceaux qui servent de fondant pour produire, entre autres, du silicium et du ferrosilicium doivent être tamisés afin qu'ils présentent des propriétés granulométriques particulières. Ces matériaux sont essentiellement utilisés tels qu'ils sont extraits dans les carrières. Bien que leur tamisage puisse éliminer des impuretés fines et améliorer leur qualité, ce procédé de valorisation demeure le seul auquel ils sont soumis [3].

En général, la silice utilisée sous forme de sable ou de farine pour produire du verre, du carbure de silicium, des matériaux de fonderie et de l'amiant-ciment doit être très pure et précisément tamisée. Par conséquent, la silice brute d'alimentation doit habituellement être traitée et valorisée davantage. Pour que les grains de silice mesurent, par exemple, plus de 150 μm mais moins de 850 μm , la réduction secondaire de ce minéral doit être effectuée soigneusement afin d'empêcher l'introduction d'impuretés comme des particules de fer et de ne pas dépasser le concassage optimum. Il est préférable d'utiliser des grains entiers non fracturés pour effectuer du moulage de fonderie, les fines nuisant aux activités de fonderie et de verrerie. On dépasse moins fréquemment le concassage optimum d'une matière première composée de grès friable faiblement consolidé que celui d'une matière d'origine constituée de quartz ou de quartzite, dont la structure granulaire n'est pas bien définie. Le matériel de concassage a également beaucoup d'importance. Par exemple, les concasseurs à impact produisent plus de grains fracturés et de fines que les concasseurs à mâchoires, à cône ou à cylindres. Après que les grains de silice ont été réduits à la taille voulue, ils peuvent être soumis à divers procédés de valorisation visant à éliminer des impuretés qui sont généralement composées d'argile, de feldspath, de carbonates et de minéraux contenant du ferromanganèse.

La valorisation peut comprendre l'un ou plusieurs des procédés suivants :

1. Un tamisage visant à éliminer des fractions grossières et fines qui contiennent habituellement une grande partie des impuretés ;
2. Une séparation magnétique visant à éliminer des minéraux qui renferment du fer ;
3. Un pistonnage ou un tablage visant à éliminer des minéraux lourds ;
4. Un lavage et un nettoyage par attrition visant à éliminer de l'argile et des boues ;
5. Une flottation visant à éliminer des minéraux qui résistent aux techniques magnétiques ou gravimétriques (par exemple, feldspath et pyrite);
6. Une lixiviation acide visant à réduire davantage les minéraux qui contiennent du fer et des carbonates [3].

3.2.2. Quelque exemple de l'enrichissement du sable du grès (silice)

Généralement la silice ne se trouve pas pur dans la nature, il a toujours des impuretés tel que les argiles les ferrifères et par fois les métaux lourds. Tout ça provoqué les chercheurs dans ce domaine de trouver un processus de traitement ou de valorisation de ce minerai selon les exigences qualitatif et quantitatif pour des fins de l'industrie. Pour cette raison en va citer quelque exemple des méthodes de purification et traitement du sable du grès pour objet d'éliminé ces impuretés [4, 5].

3.2.2.1. Exemple de traitement du grès ; Jeddah (Arabie saoudite)

Il y a une demande considérable pour le sable de la silice pour la confection des verres dans la ville de Jeddah, cette demande est rencontrée par la provision de sable de la silice de haute qualité qui transporté par des camions a partir de dépôts en Arabie saoudite, pour l'instant, a localisé approximativement 1000 kilomètres de Jeddah [6].

Évidemment le coût de transport est très couteux, il n'y a aucun sable de haute qualité approximative de la région de Jeddah. Cependant, les dépôts du grès friables existent dans un rayon de 50 kms de Jeddah, ces dépôts contiennent une proportion considérable d'alumine et de silice, qui contient des impuretés de fer, titane et minéraux du chrome.

Les spécifications de la qualité de la matière première « la silice » pour l'industrie du verre comme suite:

- SiO₂ au minimum 97.5% pour la fabrication du verre de bouteille coloré et de 99.75% pour cristal et verre optique.
- Fe₂O₃ au maximum 0.008% pour verre optique et de 0.3% pour verre vert. Avec une maille de coupure (granulométrie) de 0.63 à 0.1 mm [7].

Pour ces exigences ils ont fait une étude de traitement pour valoriser le dépôt de minerai de silice (grès) dans les deux dépôts de grès de Jabal Abu Siba et de Wadi Si'al.

Les principales méthodes du traitement minérales adoptées dans cette étude pour améliorer la qualité des échantillons rassemblés de dépôts Wadi Si'al et Jabal Abu Siba sont:

- Séparation gravimétrique par table à secousse ou bien par flottation avec une séparation magnétique [8].

Dans les deux cas les échantillons sont préparés suivant l'exigence de chaque méthode, préparation mécanique de la matière première (concassage, broyage, tamisage, lavage).

Le schéma de traitement sont interprétés dans la figure (15. a et b).

- Cas de dépôt de Jabal Abu Siba

Tableau 6. Résultats de séparation par flottation de sable du grès de Jabal Abu Siba.

(Collecteur 1.2g/Kg)

Description	W _t %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Sous vers	95	94.5	< 1	0.1	0.1	< 0.05	0.05	<0.001	<0.034
survers	5	80.9	7	0.4	0.5	< 0.05	0.83	0.027	0.122

Tableau 7. Résultats de séparation magnétique du concentré de flottation de sable de grès de Jabal Abu Siba.

Description	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Concentré	98.5	< 1	0.1	0.1	<0.05	0.04	<0.001	<0.034

Tableau 8. Résultats de séparation par table à secousse suivait par une séparation magnétique_échantillon de sable de grès de Jabal Abu Siba.

Description	Debit d'eau en l/min	Inclinaison de table à secousse en degré	Teneur de SiO ₂ en%	Teneur de Fe ₂ O ₃ en%
01	0.5	1.2	98.50	0.70
02	1.0	1.2	95.45	0.25
03	1.5	1.2	98.90	0.05
04	0.2	1.2	96.25	0.30

Les meilleurs résultats sont obtenus avec un débit d'eau de 1.5 l/min et une inclinaison de 1.2°. La teneur de silice « SiO₂ » est égale à 98.9 % et la teneur de fer « Fe₂O₃ » est de 0.05%.

- Cas de dépôt de Wadi Si'al

Tableau 9. Résultats de séparation par flottation de sable de grès de Wadi Si'al.

description			SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Echantillon	W%	Alimentation	81.4	5.2	0.6	< 1	< 1	0.75	0.005	<0.054
Collecteur	92	Concentré C1	93.7	1	0.2	< 1	< 1	0.19	0.002	<0.034
	3 g/kg	8	Rejet R1	80.2	3.6	2.8	< 1	< 1	5.19	0.056
0.8 g/kg	94	C2	93.9	1.2	0.2	< 1	< 1	0.25	0.002	<0.034
	6	R2	82.4	3	2.8	< 1	< 1	5.19	0.039	0.518
1.6 g/kg	95	C3	93.6	< 1	0.1	< 1	< 1	0.07	<0.001	<0.034
	5	R3	86.9	2.1	0.8	< 1	< 1	1.27	0.015	0.054
3.2 g/kg	-	C4	94.4	1	0.1	< 1	< 1	0.07	<0.001	<0.034
	-	R4	-	-	-	-	-	-	-	-
5 g/kg	-	C5	93.3	1.2	0.3	< 1	< 1	0.35	0.003	<0.034
	-	R5	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 10. Résultats de séparation magnétique du concentré de flottation de sable du grès Wadi Si'al.

description	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Alimentation	92.7	3.6	0.4	<1	<1	0.31	0.002	<0.034
C1	98.2	< 1	0.1	< 1	< 1	0.14	<0.001	<0.034
C2	98.4	< 1	0.1	< 1	< 1	0.07	<0.001	<0.034
C3	98.3	< 1	0.1	< 1	< 1	0.08	<0.001	<0.034
C4	98.0	< 1	0.1	< 1	< 1	0.05	<0.001	<0.034
C5	98.6	< 1	0.1	< 1	< 1	0.05	<0.001	<0.034

Tableau 11. Résultats de séparation par table à secousse de sable du grès de Wadi Si'al.

Description	W _t %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Concentré	85	91.2	1.8	0.3	0.3	<0.05	0.35	0.002	<0.034
Rejet	15	78.2	4.5	2.5	0.5	0.08	8.11	0.005	1.076

Tableau 12. Résultats de séparation magnétique du concentré de table à secousse de sable du grès de Wadi Si'al

Description	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Ca O %	Mg O %	TiO ₂ %	Cr ₂ O ₃ %	ZrO ₂ %
Concentré	95.8	1.7	0.2	0.3	<0.05	0.16	0.001	<0.034

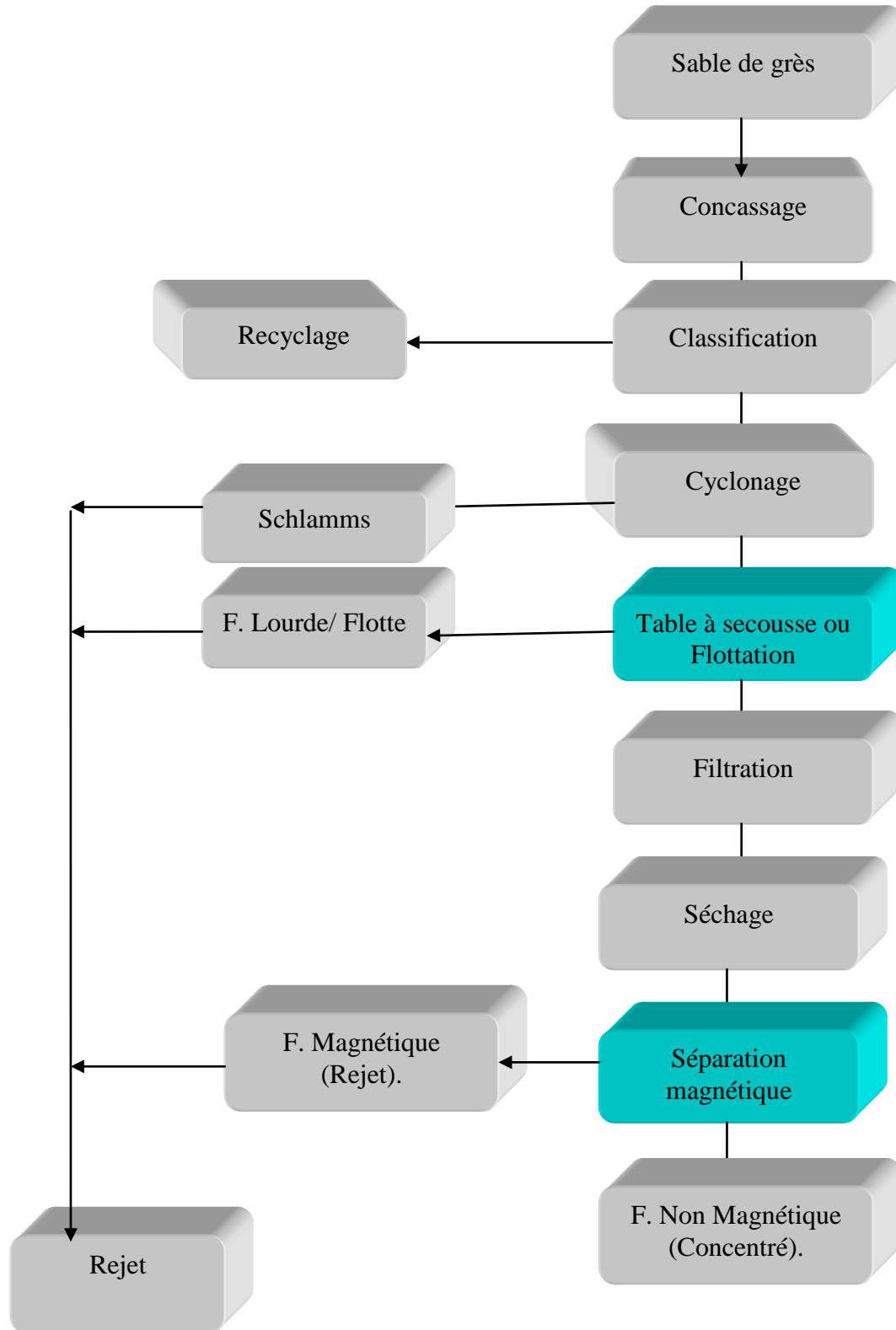


Figure15.a: Schéma de traitement du sable de grès Wadi Si'al.

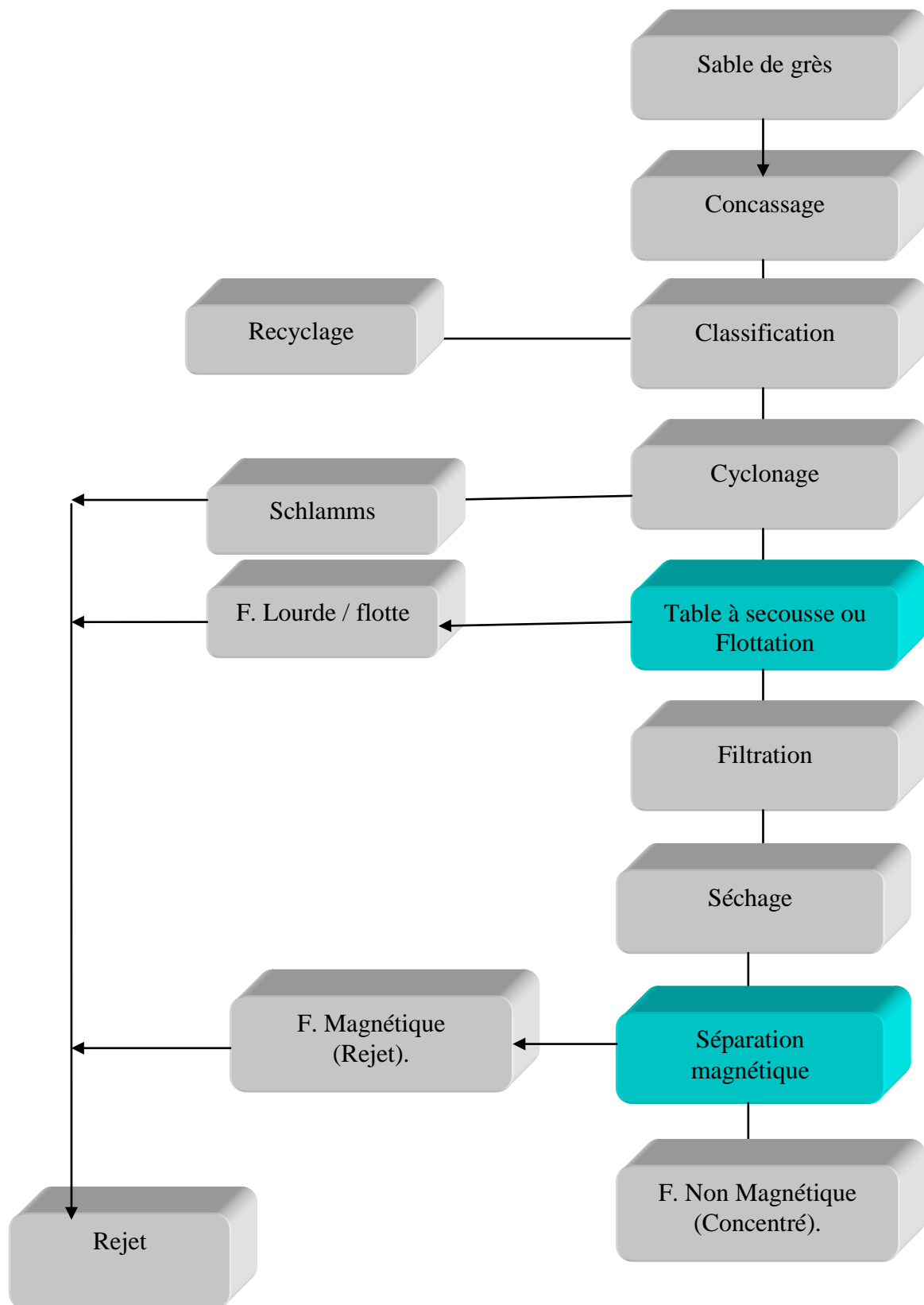


Figure15.b: Schéma de traitement du sable de grès Jabal Abu Siba.

3.3. CONCLUSION

Les résultats de traitement de dépôt de Jabal Abu Siba sont meilleurs que les résultats correspondants pour les échantillons de dépôt de Wadi Si'al.

Le lavage de minerai et la séparation gravimétrique seule ne donne pas des résultats suffisants pour la fabrication du verre, même la séparation par flottation seule.

Il faut faire une combinaison avec l'une des deux séparations citées, suivi par une séparation magnétique à haute intensité [9].

Les mêmes méthodes de traitement pour l'enrichissement de silice à partir du gisement du grès utilisé en Suède (combinaison entre la flottation et séparation magnétique)[10].

BIBLIOGRAPHIE ET WEBGRAPHIE DE TROISIEME CHAPITRE.

- [1]: Source : Jacob; Explorer pour la silice au Québec, 2000.
- [2]: Source: Harben et Kužvart, La silice ; 1997.
- [3]: Annuaire des minéraux du Canada, édition 2003 p 8, 47.
- [4]: Minéral Traitement Technologie, par B. A. Pergamon Presse, 4^{ème} édition, (1988).
- [5]: Science du Flottage et Construire, par Matis, .K. A, Marcel Dekker, Inc. (1995).
- [6]: Général du conseil d'administration de Ressources Minérales, Atlas de Minéraux Industriels, Jeddah, p 80-87, (1998).
- [7]: Ressources Minérales d'Arabie saoudite, Collente, P. et Grainger, D. J, Conseil d'administration, Général de Ressources Minérales, Jeddah, Royaume d'Arabie saoudite, p 232 à 239, édition 1994.
- [8]: Mineral Processing Technology, par Wills, Pergamon Press, par B. A. 4^{ème} édition, (1988).
- [9]: Amélioration de dépôts du Sable de la Silice Bas-de-gamme dans la Région Jeddah par Mohammed-Noor.
- [10]: Magnetic beneficiation of a southeastern quartz sand; by Jan Jirestig and Jams. T.

CHAPITRE IV

***ECHANTILLONNAGE ET CARACTERISATION
MINERALOGIQUE, GRANULOMETRIQUE ET
CHIMIQUE DU GRES***

VI. CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE

4.1. INTRODUCTION

Les technologies minéralurgiques offrent un potentiel remarquable pour extraire le minerai utile. Malheureusement, les méthodes actuelles de caractérisation et d'analyses granulométriques et chimiques nous renseignent très peu sur le potentiel et les limites de ces technologies quant au traitement ou à la valorisation possible des matrices minérales.

La caractérisation minéralurgique repose principalement sur la connaissance de la granulométrie, de la distribution du minerai de valeur dans les différentes fractions granulométriques, de l'identification de leur composition minéralogique et du degré de libération (minerai utile-gangue).

4.2. ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage constitue une étape cruciale dans le processus de caractérisation d'un minerai. Le but visé est d'obtenir un éventail d'échantillons représentatifs qui reflète toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du minerai étudié.

Parallèlement, le nombre et le volume des échantillons doivent être restreints au minimum pour des raisons économiques.

Les principales étapes qui caractérisent une démarche d'échantillonnage sont :

- l'élaboration d'une stratégie de prélèvement,
- le prélèvement des échantillons sur le site,
- la conservation des échantillons et leur préparation pour les fins d'analyses.

La valeur des résultats de la caractérisation dépend de la réalisation adéquate de toutes ces étapes. L'élaboration de la stratégie de prélèvement doit débuter par la définition des objectifs de l'exercice.

La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des stations d'échantillonnage (nombre, emplacement et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués. Le choix de l'équipement utilisé pour prélever les échantillons est principalement effectué en fonction du type d'échantillon, du volume requis et de la localisation du minerai lors du prélèvement [1].

Dans notre cas, nous avons fait le prélèvement de l'échantillon par une pelle (louche) à partir d'un tas de minerai du grès après concassage primaire (Figure16).



Figure 16. Mode de prélèvement de l'échantillon (cas du gisement de grès d'El Aouana)

Des échantillons sont évacués dans des sacs et transportés vers le laboratoire où ils subissent une préparation à différentes étapes. Et ce, pour la caractérisation du minerai.

Les différentes analyses impliquées dans la caractérisation nécessitent fréquemment une préparation des échantillons. La procédure de préparation peut impliquer plusieurs opérations. Comme l'homogénéisation, le tamisage, le séchage, le broyage, la calcination, la dissolution ou l'extraction. Il est essentiel de souligner que le caractère significatif de la caractérisation dépend entièrement de la procédure d'échantillonnage qui précède.

Les résultats de la caractérisation sont inutiles quand la représentativité des échantillons analysés est déficiente.

4.3. PREPARATION DE L'ECHANTILLON POUR L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

– Concassage

Cette opération se fait à l'aide d'un concasseur à mâchoire, le produit obtenu subit un quartage et une homogénéisation.

– Opération de quartage et homogénéisation

Cette opération consiste à mélanger le minerai concassé sous forme d'un tas, puis tasser ou bien Platter ce dernier est divisé en quatre parties. Après, mélanger la 1^{ère} portion avec la 3^{ème} portion (les deux parties opposées), on répète la même opération. Comme le montre le schéma (Figure 17).

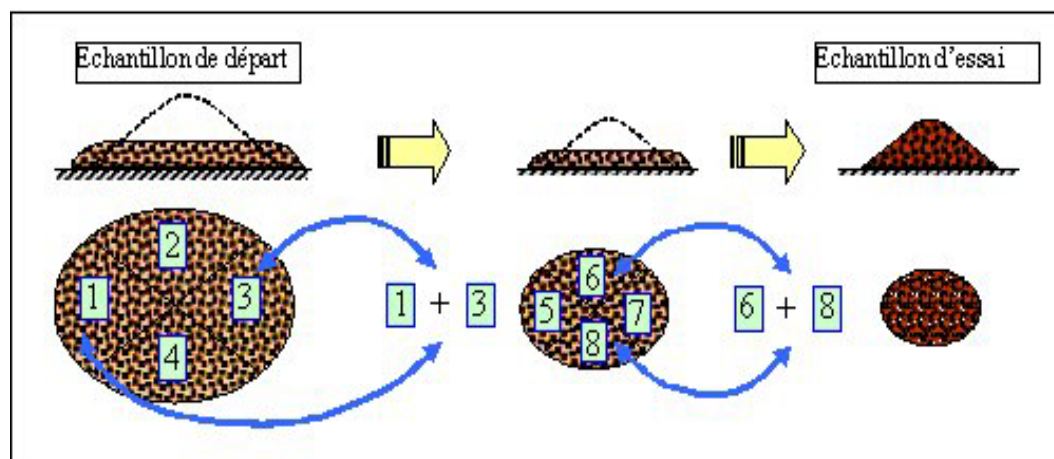


Figure 17. Opération de quartage.

4.4. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La première question qui se pose est de choisir une masse d'échantillon à tamiser. Ce choix de masse doit vérifier plusieurs contraintes telles que la capacité de tamiseuses (chaque tamis), etc. En effet, il faut que l'échantillon analysé soit en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop important pour éviter de saturer les tamis ou de les faire déborder. En caricaturant, il est impensable d'analyser un échantillon d'un micro gramme, comme un échantillon d'une tonne.

L'analyse granulométrique doit permettre de séparer les grains, d'un minerai et de les classer par diamètre. Le diamètre des mailles des tamis définit ces classes.

La vibration fait descendre les grains au travers des tamis jusqu'à ce qu'ils soient bloqués par le tamis de la maille correspondante au diamètre du grain. Mais la vibration n'est pas suffisante pour faire descendre les fines, c'est à dire les grains d'un très petit diamètre. En effet ces grains sont si fins qu'ils se collent aux grains d'un diamètre plus gros. Ces fines restent ainsi bloquées dans des tamis ne correspondant pas à leur diamètre. Sous le seul effet de la vibration, l'analyse est donc faussée. En effet, Chaque tamis contient les grains de

diamètres correspondants plus une part de fines. La pesée du refus indiquera et représentera la masse des grains du diamètre correspondant au tamis plus la masse des fines collées aux autres grains, la masse mesurée sera donc supérieure à la masse recherchée. La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires ;

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants [2].

4.4.1. Analyse granulométrique par voie sèche du grès

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la population. Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres, cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes. L'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc.) [3].

4.4.2. 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. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un échantillon [2].

4.4.3. 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 (Figure18).



Figure 18. Tamiseuse électrique

4.4.4. Dimension de tamis utilisés

Le produit obtenu Après cancanage et broyage de la roche du grès on considéré comme un sable donc, on utilisera en général les tamis qui correspond respectivement les mailles suivantes : 2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,250 mm ; 0,125 mm ; 0,063 mm ; 0,045 mm.

4.4.5. Description de l'essai

Le matériau 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 soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose 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.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture dans notre cas le temps de tamisage est égale à 30 min avec une amplitude de vibration = 60 et le Poids total de l'échantillon = 500 g.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés aux différents niveaux de la colonne de tamis.

Le tamisât présent sur le fond de la colonne du tamis est également pesé. La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage n'excéder pas plus de 2 % du poids total de l'échantillon de départ. L'analyse granulométrique s'effectuée au niveau de laboratoire minéralurgique du Département des Mines de l'Université Badji mokhtar Annaba.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Résultats d'analyse granulométrique (cas du gisement de grès d'El Aouana)

N°	Tranche granulométriques (mm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)	Rendement des refus cumulés $\Sigma\gamma$ (%)	Rendement des tamisât $\Sigma\gamma$ (%)
01	+2	106.48	21.30	21.30	100.0
02	-2 : +1	039.33	07.87	29.17	78.70
03	-1 : +0.500	066.35	13.27	42.44	70.83
04	-0.500 :+0.250	123.29	24.66	67.10	57.56
05	-0.250 :+0.125	098.26	19.65	86.75	32.90
06	-0.125 : +0.063	042.35	08.47	95.22	13.25
07	-0.063 : +0.045	009.53	01.90	97.12	04.78
08	-0.045	014.41	02.88	100.0	02.88
Total	-	500	100	-	-

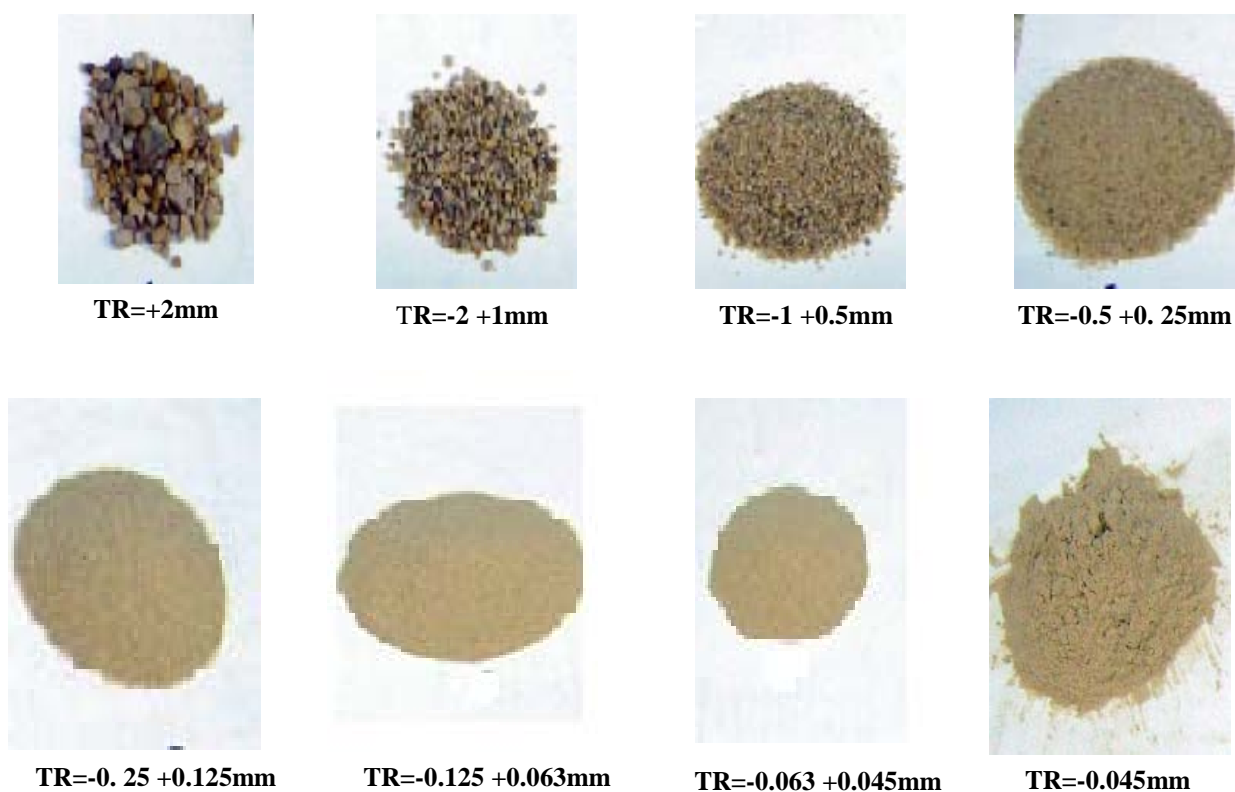


Figure 19. État des fractions granulométriques

4.4.6. Traçage de la courbe granulométrique

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

La courbe est tracée de manière continue et ne peut pas passer rigoureusement par tous les points.

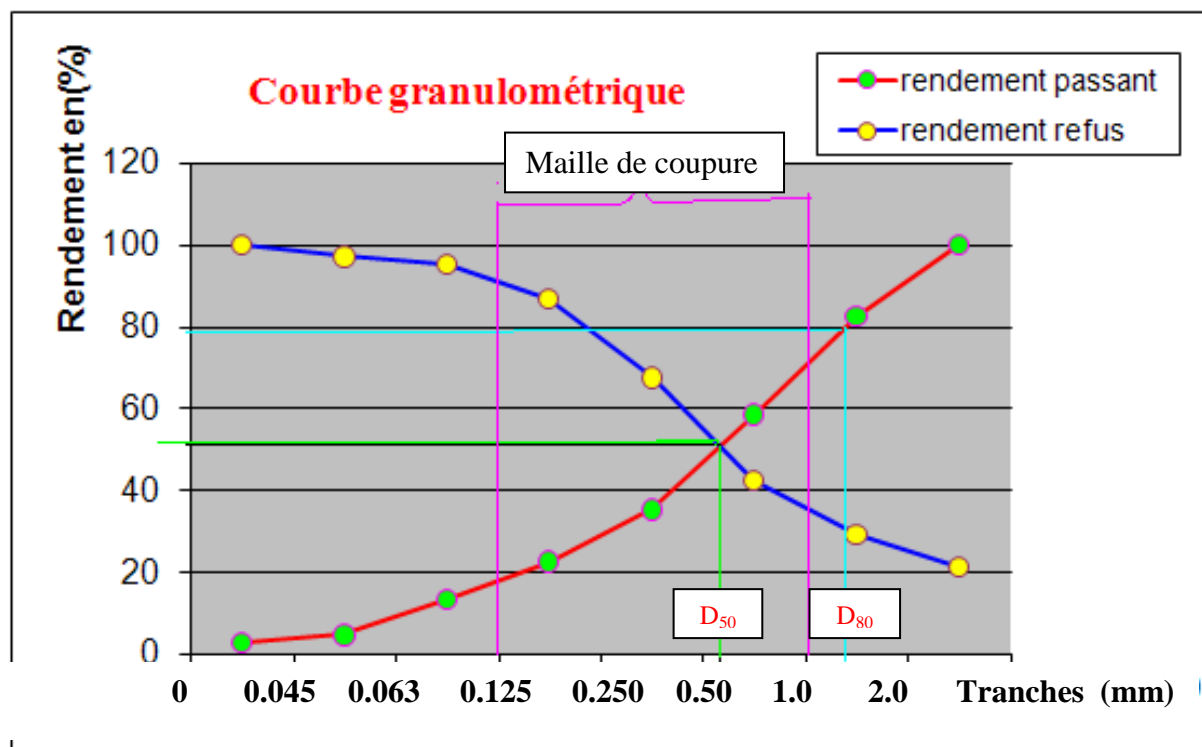


Figure 20. Courbe granulométrique.

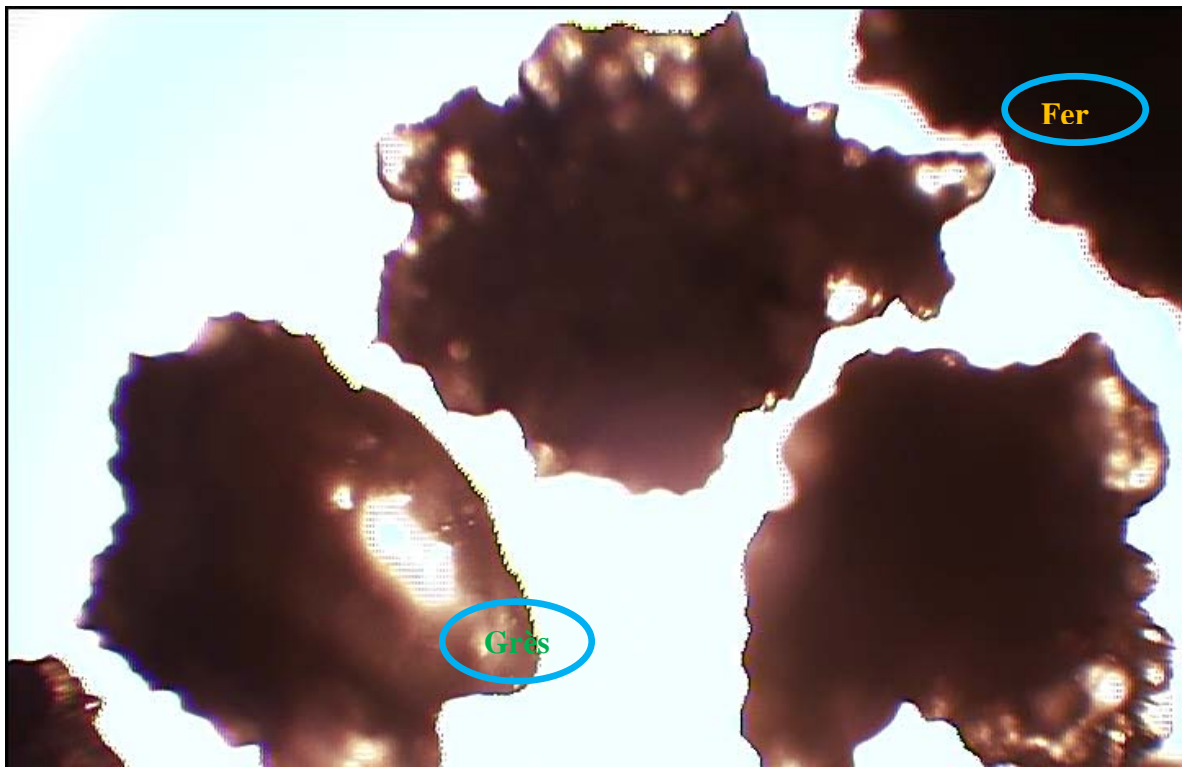
(Pour un échantillon prélevé au niveau du gisement de grès d'El Aouana).

D'après la courbe granulométrique on a constaté que 80 % des grains possèdent une dimension inférieure à 1.3 mm, et 20 % est supérieure à cette dernière. D'après la courbe on calculé les paramètres suivants :

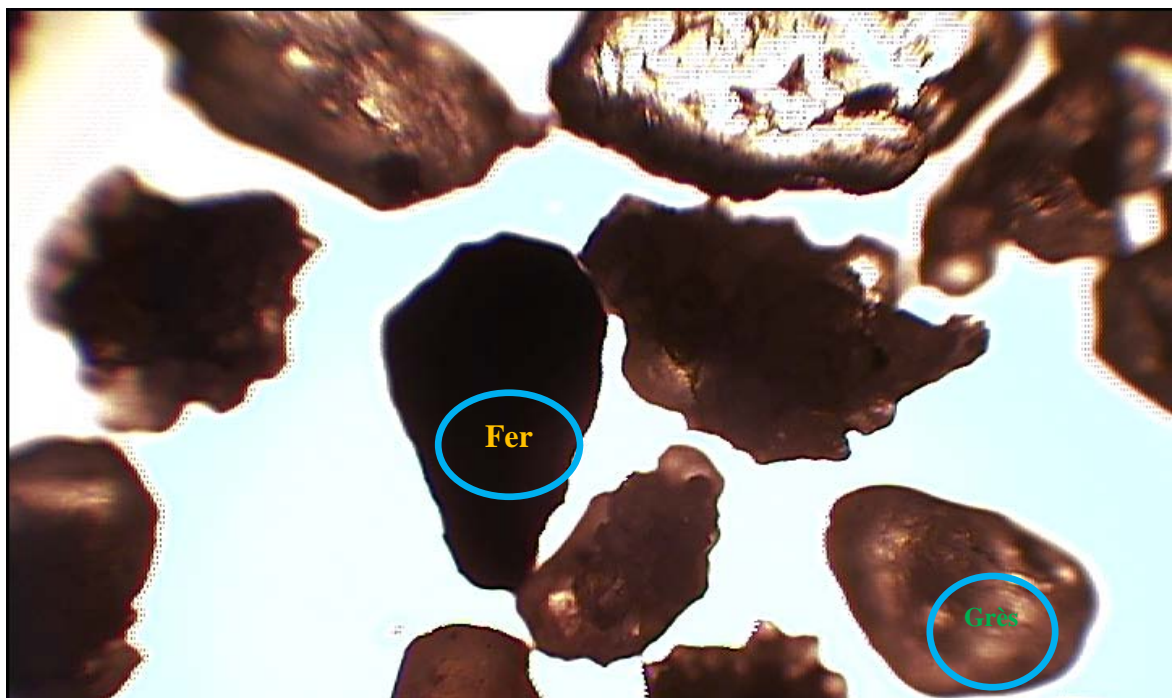
- la maille $D_{50} = 0.63$ mm.
- la maille $D_{80} = 1.3$ mm.
- la maille de coupure $D_c = -1 + 0.125$ mm.

○ Maille de libération

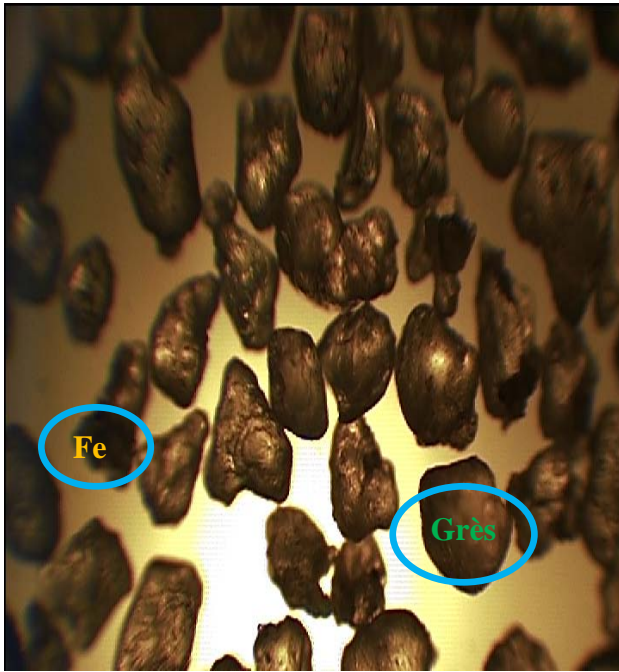
D'après les observations des différentes tranches granulométriques, sous le microscope optique à un degré de grossissement de 60x100, On peut constater que le degré de libération des particules est meilleur dans les tranches (-1 +0.5), (-0.5 +0.25), (-0.25 +0.125) et (-0.125 +0.063) mm par contre une libération incomplète dans les tranches (-2 +1) mm ce qui oblige de faire un broyage conditionné par la maille de libération (-1 +0.125) mm.



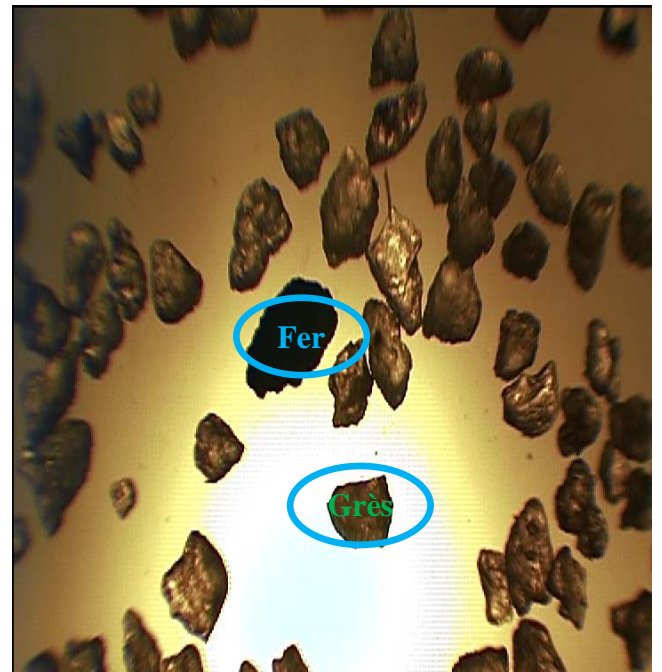
Tranche (-2 +1) mm



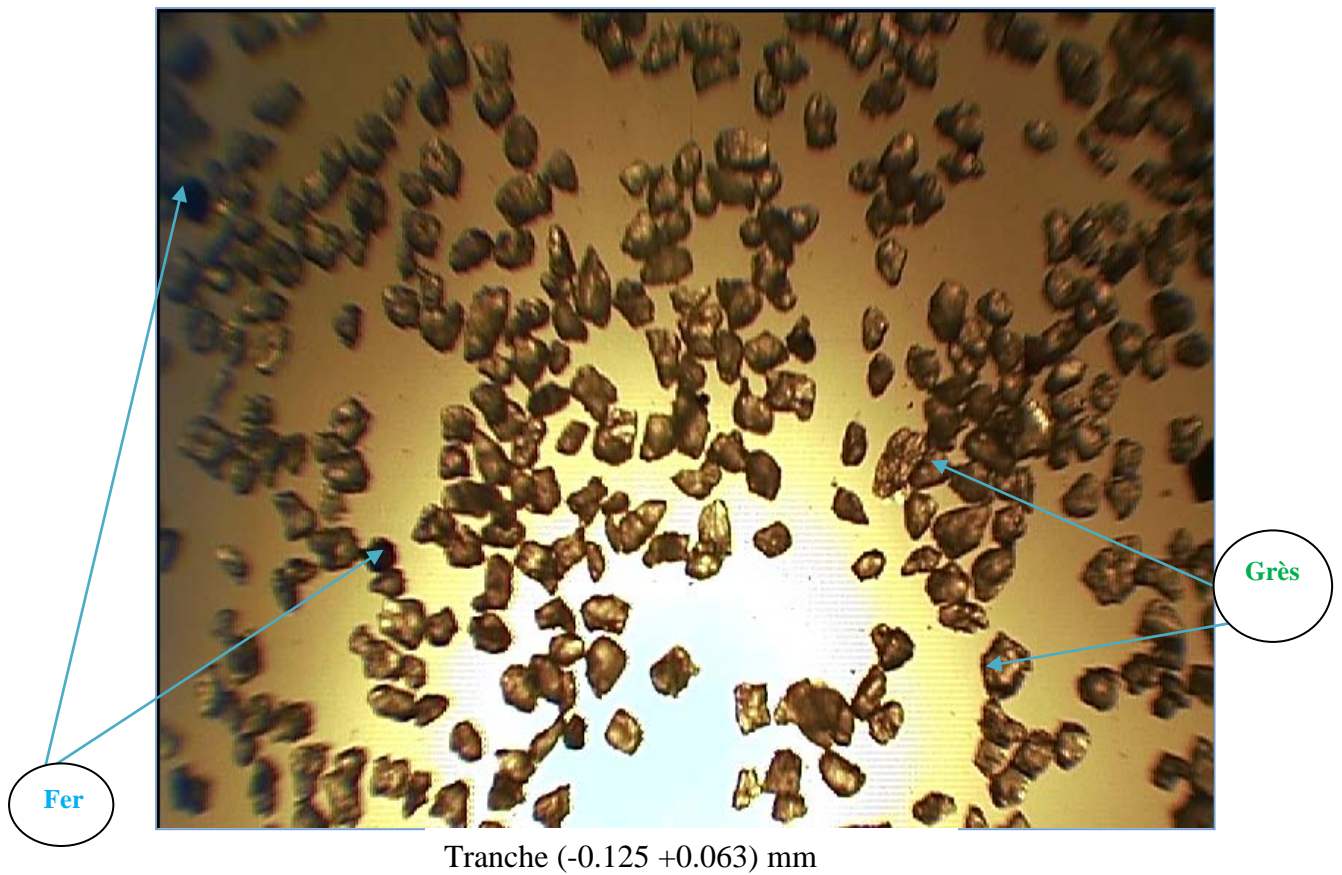
Tranche (-1 +0.5) mm



Tranche (-0.5 +0.250) mm



Tranche (-0.250 +0.125) mm



Tranche (-0.125 +0.063) mm

Figure 21. Photos illustrant l'état de libération des particules de grès.

4.5. ANALYSE CHIMIQUE

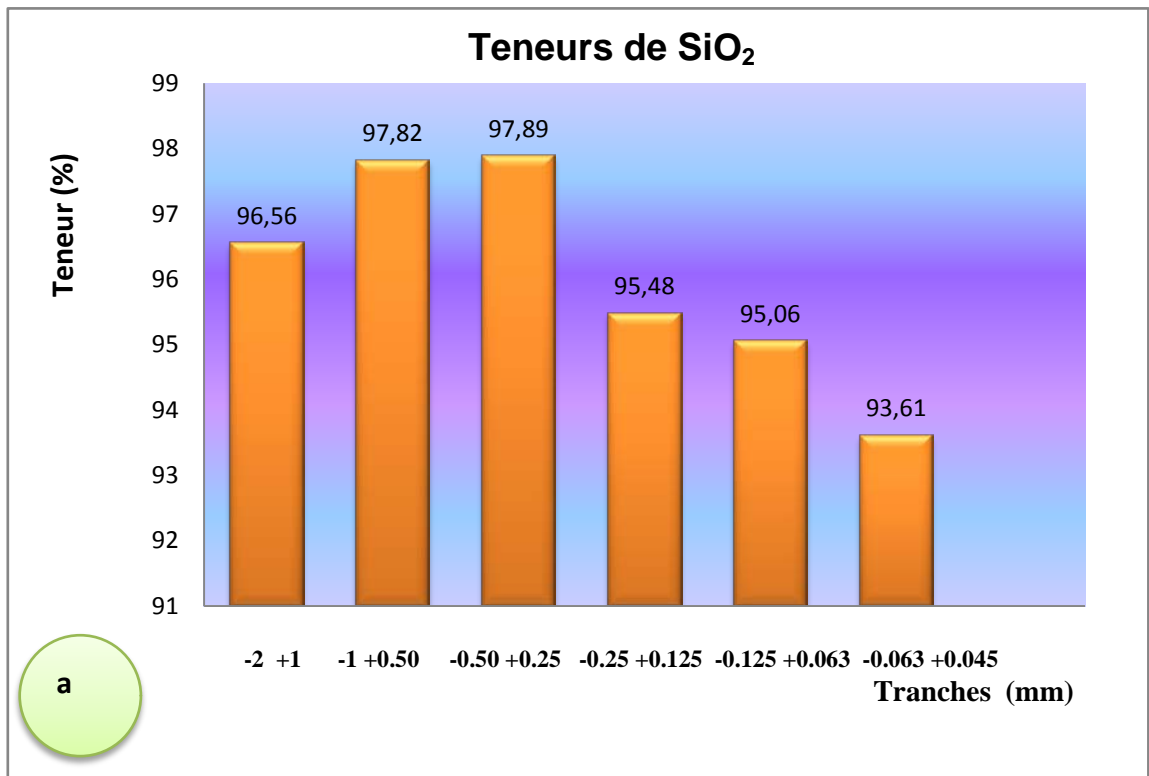
Pour déterminer la composition chimique des tranches granulométriques, nous avons envoyé des échantillons au laboratoire d'Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM), (cf.4). Les résultats obtenus sont récapitulés dans les Tableaux 14.

Tableau 14. Analyse chimique des fractions granulométriques

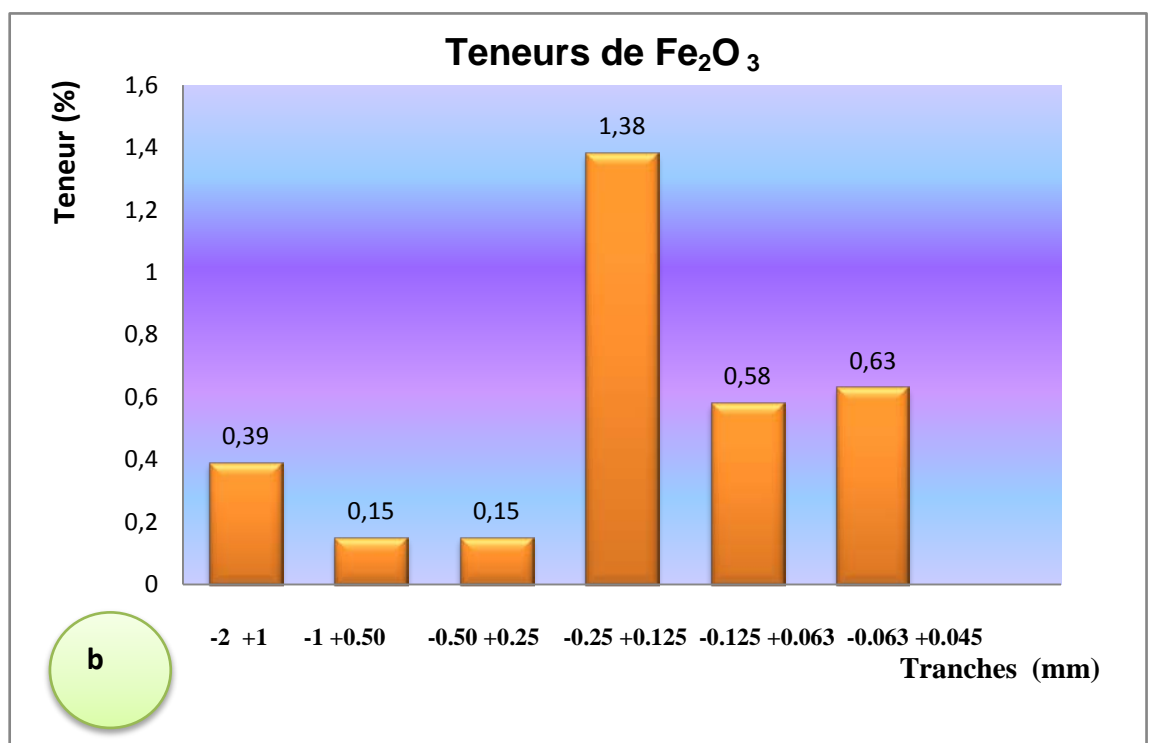
Compo/Tran gra	Si₂O	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	Ti₂O	MnO	P₂O	PAF
-2 : +1	96.56	1.30	0.39	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.16	<0.05	<0.05	0.96
-1 :+0.5	97.82	0.95	0.15	0.09	<0.05	<0.05	<0.05	0.11	<0.05	<0.05	0.61
-0.5 :+0.25	97.89	0.87	0.15	0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.07	<0.05	<0.05	0.51
-0.25 :+0.125	95.48	1.06	1.38	<0.05	<0.05	<0.05	0.10	0.12	<0.05	<0.05	1.83
-0.125:+0.063	95.06	2.04	0.58	0.05	<0.05	<0.05	0.15	0.29	<0.05	<0.05	1.69
-0.063 :+0.045	93.61	3.46	0.63	0.07	<0.05	<0.05	0.16	0.68	<0.05	<0.05	0.90
Echan de minerai brut	96.54	1.46	0.36	0.07	0.08	0.03	0.27	0.20	/	/	0.81

Selon l'analyse chimique de chaque fraction granulométrique, on constate que :

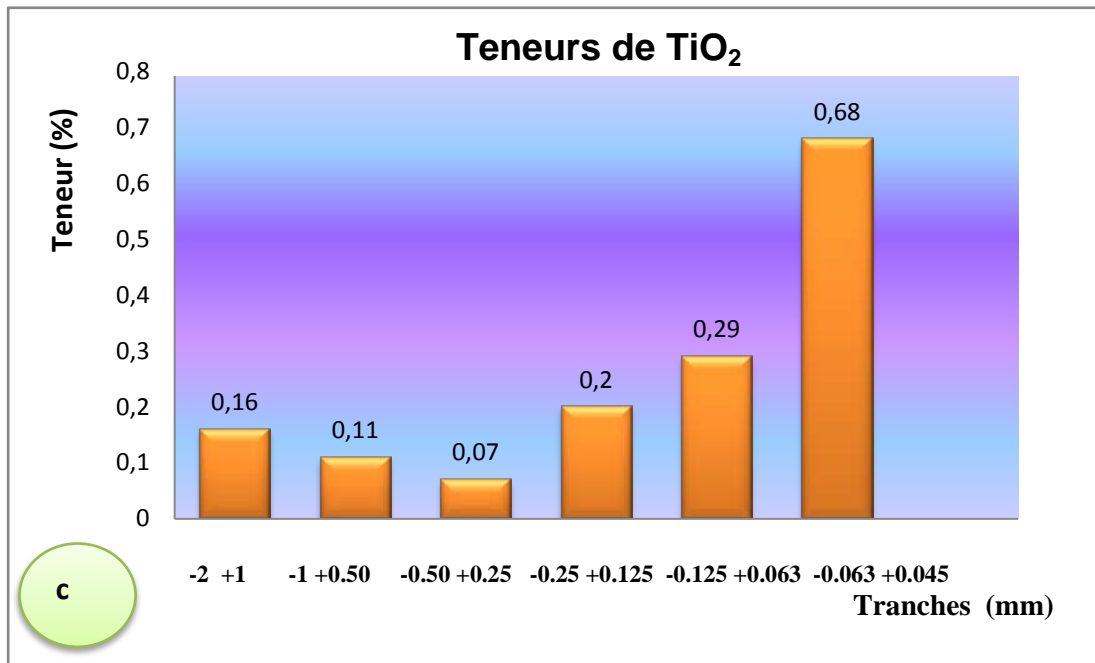
- il y a une différence entre les teneurs dans le minerai brut et les fractions granulométrique ce qui montre qu'il y a une libération du minerai utile.
- la teneur de la silice est importante surtout dans les deux tranches (-1 +0.5) mm et (- 0.5 +0.25) mm.



- La teneur en fer dans les tranches granulométriques est excessive surtout dans la tranche (-0.25 +0.125) mm =1.38 %. A cet effet il est souhaitable de réduire cette quantité car elle influe intempestivement sur la qualité du verre de point vue résistance mécanique, au choc et son colleur.



- On observe que la teneur du titane est très faible dans la tranche (0.5 +0.25) mm= 0.07 % par rapport aux autres tranches granulométriques. Cet élément influe sur la qualité du verre de point de vue réflexion des rayons, c'est pour cette raison que l'on prend en considération après l'enrichissement.



- La teneur en argile est importante presque dans toutes les tranches granulométriques.

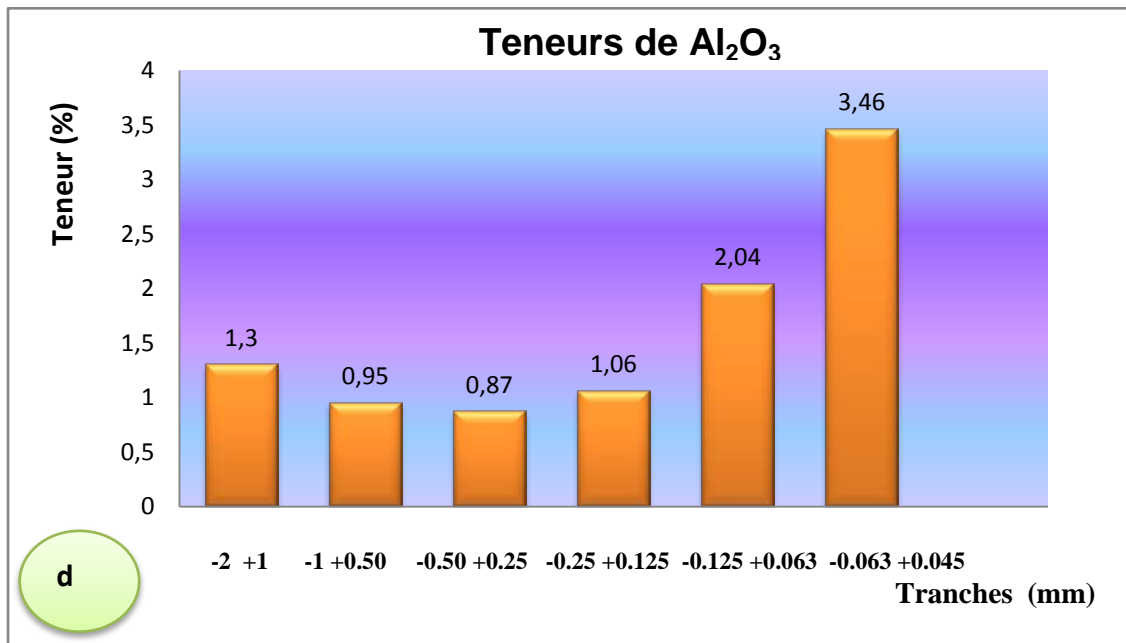


Figure 22 (b, a, c, et d). Histogramme des teneurs des principaux éléments dans les fractions granulométriques.

4.6. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DU GRES:

GISEMENT EL AOUANA

L'étude du minerai a été menée sur la caractérisation minéralo-chimique du minerai de silice extrait à partir de la roche mère des grès. Des échantillons sont soumis à des observations, par microscopie binoculaire, par DRX et par FX. Les minéraux identifiés sont résumés comme suit:

– Grès

Grès à grains fins, moyens et grossiers par endroit plus ou moins graveleux, généralement mal classifié, l'intensité d'usure des grains varie, les grains fins sont faiblement arrondis et les gros sont fortement arrondis.

Le composant principal de la roche est le quartz (d'origine magmatique et métamorphique) de grandeur variable. La quantité totale des minéraux accessoires ne forme que quelques pourcents, ces minéraux sont : muscovite, biotite, tourmaline, rutile, zircon, titanite, pyrite, leucoxènes, quartzite, silex, verre volcanique dévitrifié, fluorite.

La quantité du liant est aussi petite, les grains sont cimentés par une matière siliceuse ou argileuse (illite, kaolinite), par fois limoniteuse. Le quartz liant forme souvent des accroissements autour des grains.

Les minéraux argileux sont en partie remplissent les pores et en d'autre partie forment des pellicules fines autour des grains de quartz.

La pyrite porteuse du principal élément souillant le fer (Fe) est généralement sous forme saupoudrée répandue dans les pores entre les grains de quartz.

– Roches stériles (gangue)

Grès à texture variable, à structure et composition argileuse, grès micacés, grès graveleux, argilite sableuse, argilite aleurolitique, aleurolite calcaire. Chez les grès argileux, les grains graveleux allant de l'aleurolite au sable grossier se répandent dans une matrice argileuse, apporté des matières organiques de couleur foncée.

Dans la fraction lourde du lavage, selon les analyses micro minéralogiques, la majeure partie de la fraction $-0.1+0.06\text{mm}$ est composée par le Zircon.

Le zircon est en partie idiomorphe, mais souvent arrondi, en prismes hypidiomorphes par fois fissurés dans un ou deux cas il présente aussi des accumulations.

Les cristaux sont transparents et jaunâtres-brunâtres et y sont en quantité égale. A coté de zircon, on trouve en petite quantité du rutile, de la tourmaline, de la pyrite, de la magnétite et du dihtène. Parmi les tourmalines il y a de la tourmaline alcaline.

La majeure partie de la fraction (-0.2 + 0.1) mm est aussi composée de zircon à coté duquel on trouve en petite quantité de la tourmaline alcaline, de la pyrite, du rutile, disthène, de la titanite et de l'épidote.

L'analyse de phase par diffraction montre aussi que le zircon forme la pyrite dominante et parmi les composants accessoires en plus de ceux sus-cités on trouve aussi en très petite quantité la présence d'anathase.

Les échantillons représentent les différents types de grès et l'analyse de phase par diffraction montre en plus du quartz en quantité dominante, des minéraux argileux formant la matière remplissant les grès (illite, kaolinite) et dans quelques échantillons de petite quantités de fer souillant sous forme de pyrite et d'hématite [3].

4.7. CONCLUSION

Selon toutes les constatations, les résultats précédents (analyse granulométrique, caractérisation minéralogique et analyse chimique) montrent que la qualité du minerai reste au-delà de sa teneur admissible pour la confection des différents types de verres par rapport à d'autres types de grès à l'échelle mondiale. On jugera de l'importance de la teneur en Fe_2O_3 entrant dans la composition du lit de fusion des verres élaborés par les teneurs admises.

- verre extra blanc : <0,015 %
- verre blanc : <0,04 %
- verre mi-blanc : <0,10 %
- verre coloré : de 0,1 à 1 % selon la couleur.
- d'autre verre exige une teneur de fer =0.03 +/- 0.02 %

L'obtention de silice possédant les qualités physico-chimiques nécessite toute un schéma technologique de traitement pour valoriser, et enrichir cette matière. A cet effet, le dernier chapitre traitera la partie expérimentale et les objectifs visés pour améliorer la qualité du verre. Selon les caractéristiques naturelles du minerai, les essais porteront sur des tests de séparation gravimétrique et magnétique.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBGRAPHIE DE QUATRIEMME CHAPITRE

[1] : stratégie d'échantillonnage (néant).

[2] : [www. La. Refer.org/materiaux/](http://www.La.Refer.org/materiaux/) chapitre 3. (Analyse granulométrique).

[3] : Rapport géologique du gisement de grès d'El Aouana.

- Janos LINGAUER (géologue).

- Imre OROSZ (géologue et cartographe). Edition 1990, 74 p.

CHAPITRE V

***ESSAIS DE SEPARATION PAR GRAVIMETRIE ET
PAR SEPARATION MAGNETIQUE, ET ETUDE
D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL.***

V. ESSAIS DE SEPARATION PAR GRAVIMETRIE ET PAR SEPARATION MAGNETIQUE

5.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre de notre recherche, nous allons utiliser les techniques d'enrichissement des grès et ce, pour améliorer la qualité du grès d'El Aouana du point de vue teneur en silice et éliminer le plus possible les impuretés comme le fer (Fe_2O_3), le titane (TiO_2) et les argiles (Al_2O_3). Lesquelles impuretés influent négativement sur la qualité du verre.

Avant de parler de ces techniques, on va présenter une étude bibliographique relative aux méthodes de séparation utilisées dans le domaine de l'enrichissement des grès.

5.2. CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE

La concentration par gravité ou gravimétrie est une voie importante de la minéralurgie. En effet, certains minerais pondéreux, peuvent faire leurs concentrations par une technique gravimétrie. Les équipements de concentration gravimétrie exploitent la différence de masse volumique entre les matériaux pour accomplir la séparation grâce à l'action combinée de la gravité et de différentes forces. En réalité, la séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules comme dans le cas de la classification. Les effets de ces deux facteurs sont contrés en limitant la gamme de tailles de particules qui composent l'alimentation de ces équipements par tamisage ou classification.

Comme la classification, la concentration gravimétrie est effectuée dans l'eau de préférence, l'air est utilisé dans certains cas (tables à air) mais grâce à sa masse volumique plus élevée, l'eau est un meilleur fluide pour effectuer la séparation.

Les phénomènes qui gouvernent la séparation par concentration gravimétrie sont les mêmes que ceux qui gouvernent la classification (sédimentation, élutriation et fluidisation). D'ailleurs, il est important de souligner le fait que sous certaines conditions des équipements de classification peuvent être utilisés comme concentrateurs gravimétriques et vice versa (Spottishwood et Kelly, 1982), Sous l'action de la gravité et/ou d'une autre force, les particules baignant dans le fluide (l'eau) entrent en mouvement les unes par rapport aux autres afin de créer deux couches distinctes : celle rassemblant les particules de faible masse volumique et celle rassemblant les particules de masse volumique élevée. Les équipements de concentration gravimétrie sont divisés en quatre groupes selon les mécanismes de séparation impliqués [1]. On y reviendra plus tard.

La concentration gravimétrique est possible en raison des différences de mouvement des particules dans un fluide en fonction de l'action simultanée de la gravité et d'une ou plusieurs autres forces.

Les courbes de lavabilité et de partage permettent d'orienter le choix de la technique séparative à adopter pour traiter un minerai.

La réussite d'une séparation gravimétrique repose sur la connaissance poussée des paramètres minéralogiques du minerai à traiter (maille de libération, masse volumique des divers constituants, présence de mixtes minéralogiques, répartition granulométrique des espèces minérales, etc.)[2].

5.2.1. Objectifs de la concentration gravimétrique

D'une part l'obtention de concentrés définitifs, par exemple la silice, le fer, les minéraux lourds..., d'autre part la production de préconcentrés dans un grand nombre de cas (fluorine, barytine, minerais métalliques, traitement des déchets... etc.), permettant aussi de réduire l'emploi de méthodes de valorisation plus onéreuses ou de s'affranchir de paramètres sensibles intervenant dans des procédés autres que gravimétriques. Cette voie est ainsi moins perturbée par des variations de composition minéralogique-chimique que la flottation, où les sels solubles, les changements dans la stœchiométrie des minéraux, la qualité de l'eau et la nature des impuretés sont des facteurs perturbants.

5.2.2. Mécanismes de séparation

5.2.2.1. Mécanisme par milieu dense

Le mécanisme par milieu dense impliquant la densité faite intervenir la masse volumique (densité) du fluide ou de la pulpe ainsi que la force gravitationnelle pour séparer les particules en deux produits, ceux qui flottent et ceux qui coulent. Le point de coupure (en termes de masse volumique) entre les deux produits peut être modifié en ajustant la densité de la pulpe par la quantité de solides présents (milieu dense).

La séparation est alors effectuée par sédimentation entravée (figure 23).

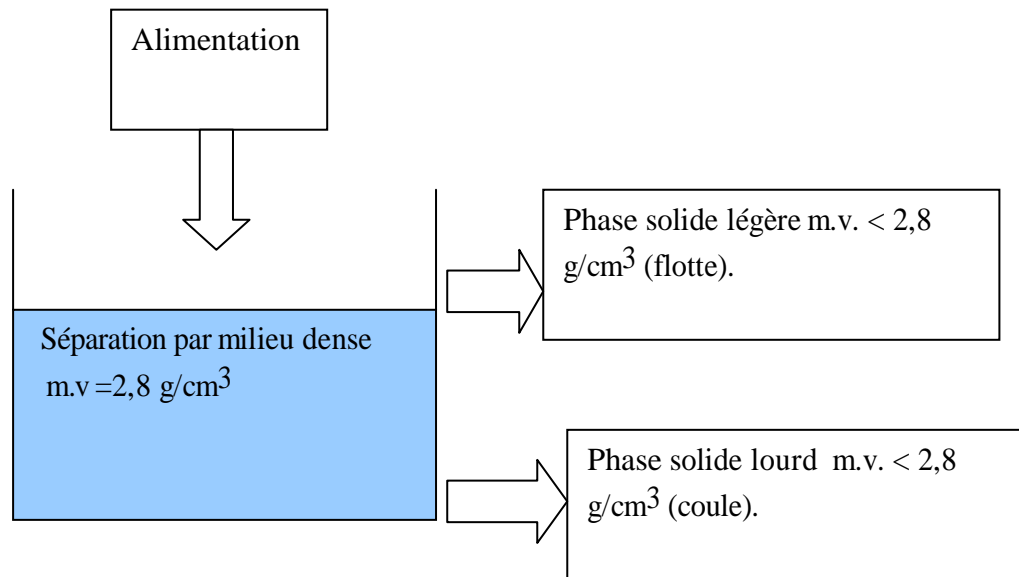


Figure 23. Mécanisme de séparation par milieu dense

5.2.2.2. Mécanisme par pulsation et stratification

Ce mécanisme repose sur l'action de pulsations oscillatoires verticales d'un courant d'eau. Ce mécanisme engendre l'expansion du lit qui facilite le mouvement des particules les unes par rapport aux autres. Ce mouvement provoque la stratification des particules en fonction de leur masse volumique. Les jigs et le bac à piston constituent les principaux équipements de ce groupe [3]. (Figure : 24 ,a et b). L'extraction du concentré qui s'accumule au dessus de la grille doit être réglée selon l'apport de particules denses.

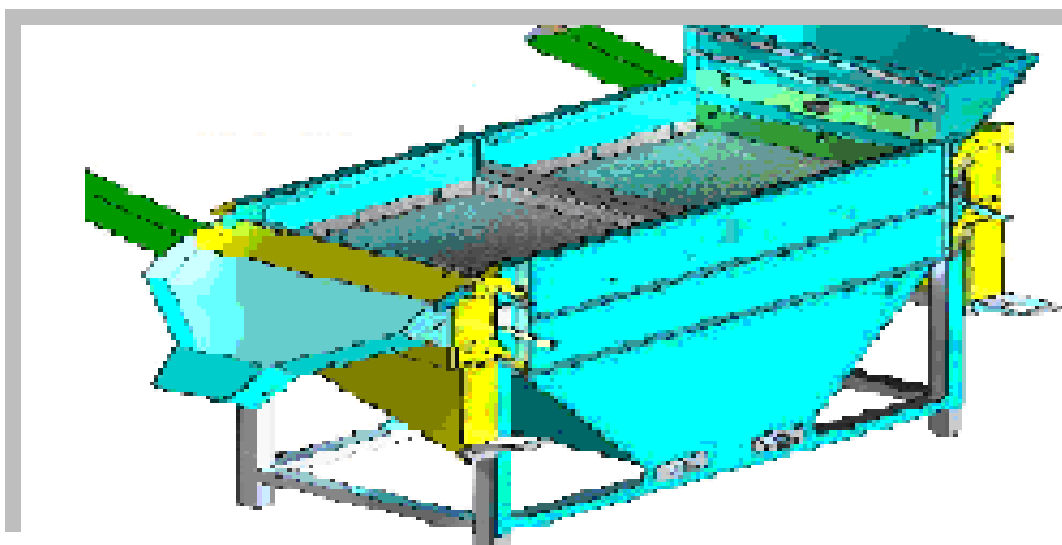


Figure 24.a. Schéma d'un jig

Cette régulation permettra au jig de travailler en régime continu en gardant les meilleurs paramètres qui ont été sélectionnés. L'extraction par siphon et déversoir est réglée selon l'arrivée de particules denses.

Les particules denses dans le compartiment et provoque une ségrégation continue de la densité de la pulpe, de densité moyenne d_2 , sur une hauteur h_2 . Une couche de particules denses de densité d_1 , constituant le lit filtrant, repose sur la grille. Un compartiment fermé adjacent est formé par une plaque verticale formant un siphon. Seules les particules denses y ont accès. Un déversoir à une hauteur h_1 libère les particules denses. La pression à l'entrée du siphon (durant la fluidisation) est égale à $h_2 \cdot d_2$ (à l'extérieur) et aussi $h_1 \cdot d_1$ (à l'intérieur du siphon). La densité d_2 est alors conditionnée par la hauteur du déversoir h_1 .

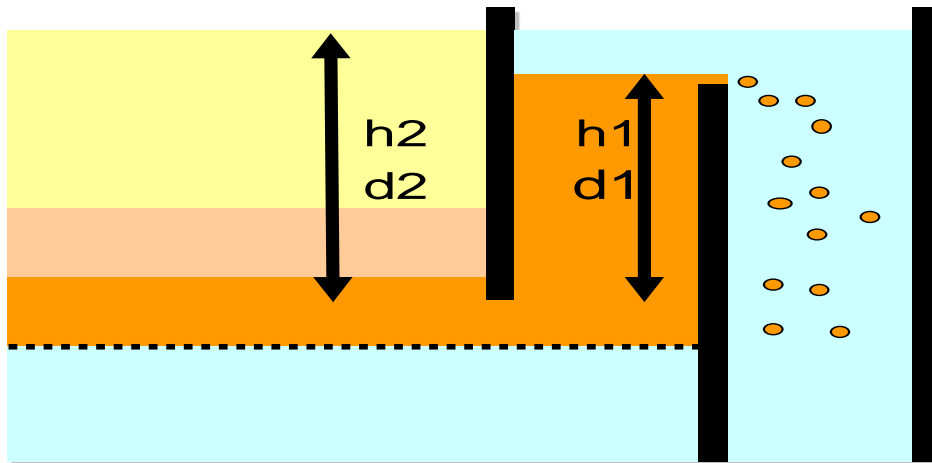


Figure 24 b. Pulsations et la stratification

5.2.2.3. Mécanisme par nappe pelliculaire fluente

Sont basés sur l'action de percolation interstitielle à travers un lit de particules en écoulement sur un plan incliné. Les particules de masse volumique élevée ont tendance à traverser le lit pour former une couche de particules inférieure qui s'écoule lentement le long du plan incliné. La couche supérieure qui est composée des particules de faible masse volumique s'écoule plus rapidement puisque ces particules sont facilement entraînées par le courant liquide et ne subissent pas la friction occasionnée par la surface inclinée. Parmi les équipements de ce groupe, les spirales se distinguent grâce à un effet additionnel de force centrifuge engendré par leur configuration spécifique [4].

L'action de secousses horizontales combinée à l'action de la nappe pelliculaire fluente contribue aussi à obtenir la stratification désirée. Grâce à la force de cisaillement qu'elles engendrent, les secousses contribuent principalement à produire le vide inter-granulaire nécessaire au mouvement des particules. Les tables à secousses sont au nombre des équipements dont le fonctionnement repose sur ce mécanisme.

5.2.2.4. Mécanisme combiné (mixte)

Il existe des équipements dont le principe de fonctionnement est basé sur l'action combinée de plusieurs phénomènes. C'est le cas du concentrateur Knelson et du séparateur MGS Mozley [5].

D'une façon générale, les équipements de concentration gravimétrique séparent efficacement les particules dont la taille se situe à l'intérieur d'une gamme restreinte.

Pour cette raison, il est nécessaire de procéder à une classification du matériel avant d'effectuer la séparation par concentration gravimétrique. La concentration gravimétrique sépare alors les particules en fonction de la masse volumique et s'applique en fonction de la différence des masses volumiques des matériaux. En effet, il est possible d'estimer l'applicabilité d'une telle approche à l'aide de la formule suivante:

$$C_T = \frac{(\rho_L - \rho_f)}{(\rho_l - \rho_f)} \quad (2).$$

Où

C_c : Critère de Taggar.

ρ_L ; représente la masse volumique de la phase solide lourde,

ρ_l ; la masse volumique de la phase solide légère et,

ρ_f ; la masse volumique du fluide.

La valeur du critère de concentration indique l'applicabilité de la concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules (Tableau 16) [6].

Dans notre cas le critère de Taggar est :

$$C_c = (\rho_{Fe_2O_3} - \rho_{H_2O}) / (\rho_{SiO_2} - \rho_{H_2O}) = (5.2-1)/(2.43-1)=2.9 > 2.$$

Donc la séparation gravimétrique selon le critère de Taggar est applicable et facile.

Tableau 15. Critère de concentration gravimétrique en fonction de la taille des particules.

Critère	Applicabilité
> 2,5	Séparation facile pour les particules de 200 μm
2,5-1,75	Séparation efficace jusqu'à 100 μm
1,75-1,50	Séparation possible mais difficile jusqu'à 10 μm
1,50 à 1,25	Séparation possible mais difficile jusqu'à ¼ de pouce
< 1,25	Séparation presque impossible

Les différentes phases décrivant la progression de la stratification sont illustrées à la (Figure 25).

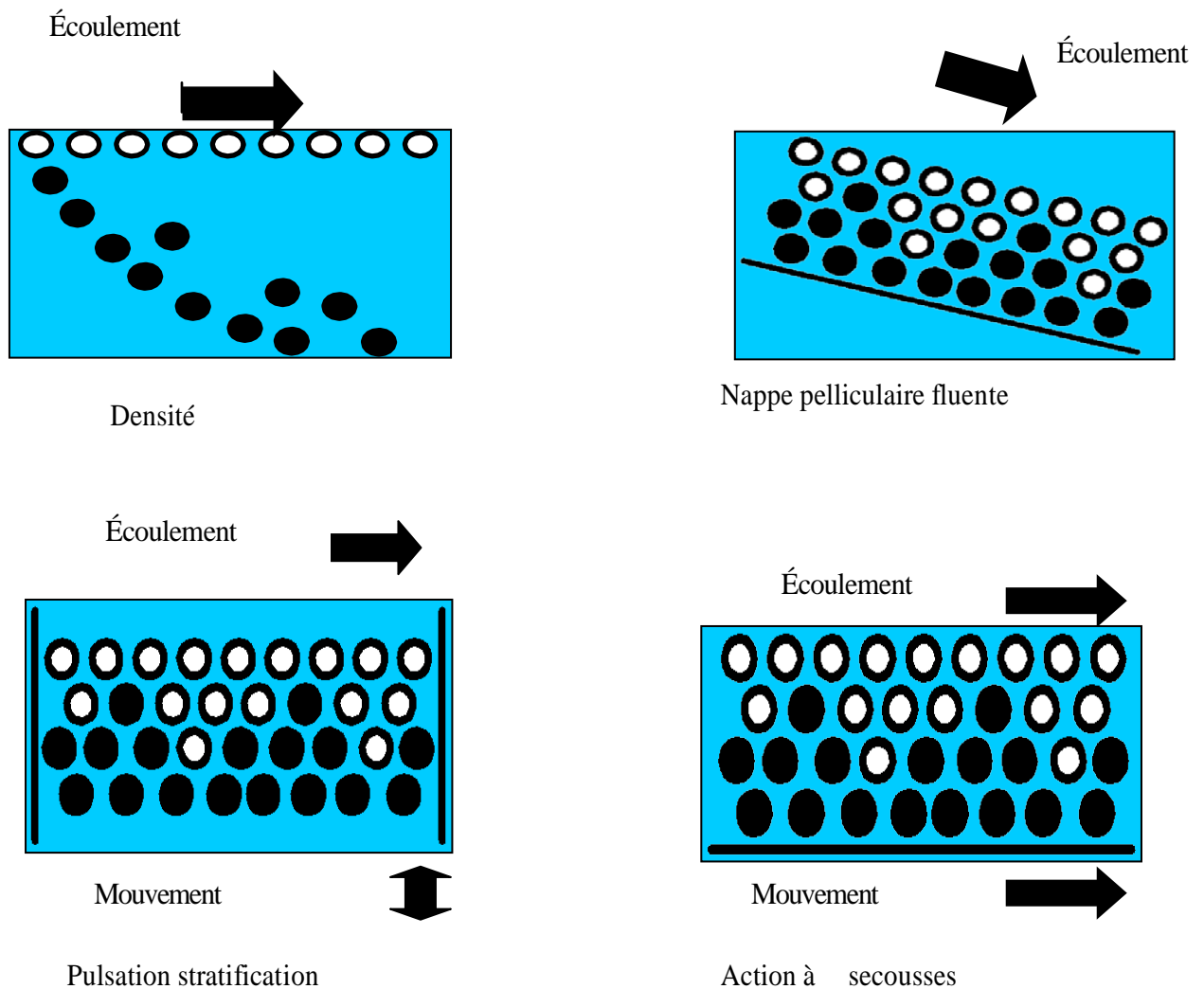


Figure 25. Les différents mécanismes de séparation gravimétrique.

5.3. SEPARATION MAGNETIQUE

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique. À partir de cette propriété, les matériaux peuvent être divisés en trois classes. La première classe est composée des matériaux ferromagnétiques dont la susceptibilité magnétique est très forte. La deuxième classe comporte des matériaux paramagnétiques qui présentent une susceptibilité magnétique faible. La troisième classe est constituée des matériaux diamagnétiques possédant une susceptibilité nulle (Gill, 1991).

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique (figure 24). Ce dernier peut être produit à l'aide d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. L'utilisation des électroaimants comporte plusieurs avantages dont la possibilité d'ajuster l'intensité du champ magnétique en variant l'intensité du courant électrique. De plus, le champ magnétique produit par les électroaimants peut atteindre une intensité plus élevée que l'intensité d'un champ engendré par des aimants permanents.

La grosseur et la masse volumique des particules ou morceaux devant être séparés influencent le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères. Il est essentiel de souligner que l'efficacité du procédé dépend du degré de libération ou de la pureté des matériaux à séparer [7].

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique: les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à faible intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec. Les séparateurs à faible intensité sont utilisés pour séparer les matériaux ferromagnétiques et certains matériaux paramagnétiques hautement susceptibles [4].

Les séparateurs à haute intensité présentent des coûts d'achat et d'opération très élevés. En effet, la production d'un champ magnétique intense entraîne une consommation élevée d'électricité. La valeur des minerais traités par cette méthode justifie de tels coûts [8].

5.3.1. Aspect théorique de la séparation magnétique

5.3.1.1. Notion du champ magnétique

Le magnétisme des atomes résulte du mouvement des électrons qui induisent un moment magnétique dit orbital, associé à leur révolution autour du noyau ainsi qu'un moment magnétique dit de spin, associé à leur rotation sur eux-mêmes.

Le moment magnétique total est la combinaison vectorielle des moments orbitaux et de spin.

La susceptibilité magnétique est caractéristique importante de la matrice, elle fait l'objet d'une séparation ou non, elle est présentée dans plusieurs relations avec l'intensité (I) du champ ($\vec{I} = \chi \vec{H}$), ou l'aimantation, M ; ($\vec{M} = \chi \vec{H}$), etc. Plusieurs paramètres interviennent dans la caractérisation et la définition du champ magnétique dans une séparation magnétique tel que, l'intensité d'aimantation I , ($\vec{I} = \chi \vec{H}$), l'induction \vec{B} ; ($\vec{B} = \mu \vec{H}$), la perméabilité ($\mu = 1 + 4\pi\chi_0$), ainsi que la susceptibilité magnétique.

En outre, d'autres paramètres physiques peuvent régir la variation du champ magnétique et par suite la qualité de séparation, il s'agit de l'agitation thermique ($k_B T$) qui a une tendance de désordonner l'agencement des moments magnétiques, donc les caractéristiques magnétiques de la matière [9].

5.3.1.2. Classification des substances minérales

Selon les propriétés magnétiques de la matière il convient de distinguer le diamagnétisme, attribuable au moment induit dans les atomes par le champ magnétique du paramagnétisme qui du à l'action du champ sur les moments magnétiques permanents des atomes et qui tend à les aligner dans sa propre direction malgré l'agitation thermique.

Quand les actions naturelles entre les moments atomiques sont suffisamment intenses pour participer à cet alignement, on est en présence du ferromagnétisme, caractérisé par l'existence d'une aimantation spontanée en l'absence de champ extérieur et par le phénomène d'hystérésis. L'existence de champs moléculaires locaux caractéristiques de chacun des différents sites cristallins permet d'interpréter l'antiferromagnétisme et le ferromagnétisme.

Les substances diamagnétiques et paramagnétiques présentent une aimantation proportionnelle à la valeur du champ magnétique. Ces corps sont donc appelés magnétiques parfaits et ont une valeur de susceptibilité magnétique spécifique.

- χ négative pour les éléments diamagnétiques (-2×10^{-9} à $-7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) et $\mu < 1$

- K positives pour les éléments paramagnétiques (0.1×10^{-6} à $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$) et $u > 1$.

Cette valeur peut varier en fonction des impuretés ou des modifications du réseau cristallin. Les substances antiferromagnétiques comme la sidérose FeCO_3 , ou comme divers oxydes MnO , NiO , Cr_2CO_3 par exemple se comportent macroscopiquement, à température ambiante, comme des corps paramagnétiques.

Pour les corps ferromagnétiques et les corps ferrimagnétiques, l'aimantation est une fonction très complexe de la température, les éléments, comme le fer, le nickel et le cobalt sont caractérisés par une courbe d'aimantation et de désaimantation (cycle d'hystérésis) dont les points principaux sont l'aimantation à saturation M_s et l'aimantation rémanente M_p qui subsistent en l'absence du champ magnétique, et le champ magnétique coercitif H_0 qui annule l'aimantation.

- Les diamagnétiques

Il a été mentionné que les substances magnétiques étaient caractérisées par une susceptibilité k négative et ne dépend pas du champ H et de la température.

Dans un champ non uniforme la force \vec{F} qui s'exerce sur une particule est dirigée en sens inverse du sens positif du gradient de champ $\partial \vec{H} / \partial \vec{x}$, la particule s'éloigne des zones du champ fort pour gagner les zones du champ faible.

- Les paramagnétiques

Les substances sont caractérisées par une susceptibilité k positive, elle est indépendante du champ \vec{H} et placée dans un champ magnétique non uniforme, une substance magnétique est soumise, à une force F positive, dirigée dans le sens positif du gradient de champ, elle est attirée vers les zones de champ fort.

Les paramagnétismes ont un comportement variable avec la température.

- Les ferromagnétiques

Ont les propriétés suivantes :

- Elles sont fortement attirables dans les zones de champ fort.
- Leurs susceptibilités dépendent du champ, des traitements thermiques et mécaniques
- Elles possèdent un cycle d'hystérésis.
- Elles deviennent à certaines températures paramagnétiques variables.
- Elles ont une saturation absolue qui est la somme des moments des porteurs.

- Le fer, le Cobalt, le Nickel appartiennent à cette catégorie ainsi que les phases à liaisons métalliques, des dérivées semi métalliques.

Tandis que les substances minérales en fonction de leur susceptibilité en distinguent quatre groupes suivant leur comportement dans un champ magnétique.

- Minéraux fortement magnétiques

Ces minéraux peuvent être extraits par des séparateurs offrant un champ magnétique d'intensité un plus égale 1500CE, et pour $k = \mu_0 (>> 1)$, la force d'attraction magnétique

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p \text{grad} (H^2) / D \text{ pour } H \leq D M_{sat}$$

$$\vec{F}_m = \mu_0 V_p M_{sat} \text{grad} (H) \text{ pour } H > D M_{sat}.$$

Sachant que

$$\vec{I} = \vec{J} = \mu_0 M \text{ et } M = \vec{H} / D.$$

Où

D : est le coefficient de démagnétisation des particules

M_{sat} : est l'aimantation à la saturation.

Le groupe de ces minéraux comprend la magnétite, la maghémite la franklinite.

- Minéraux faiblement magnétiques

C'est le groupe le plus étendu, leur aimantation nécessite ma mise en œuvre des champs dont l'intensité est comprise entre 6000 et 30000 CE, et leurs susceptibilité de l'ordre de 15 à $600 \cdot 10^{-6}$ CGS.

La force d'attraction magnétique est :

$$\vec{F}_m = 1/2 \mu_0 k_p V_p \text{grad} (H) \text{ pour } k_p \leq 1 \quad (3).$$

- Minéraux médiocrement magnétiques

Ce groupe a une susceptibilité magnétique qui s'étale entre 6000 et $3000 \cdot 10^{-6}$ CGS et l'intensité du champ appliqué doit atteindre 3000 à 6000 CE.

La force d'attraction magnétique ne peut être exprimée que par une aimantation spécifique $M'/M \rho_p$.

$$F_m = \mu_0 m M'_{sat} \text{grad} (H) \quad (4).$$

- Minéraux non magnétiques

Ces minéraux non récupérables, même avec un séparateur d'intensité de 30 000 CE comprennent les paramagnétiques de susceptibilité magnétique inférieure à $15 \cdot 10^{-6}$ CGS et la totalité des diamagnétiques : la scheelite, la molybdénite, parce que toujours la cassitérite et les minéraux non métalliques.

5.3.1.3. Action des forces magnétiques et mécaniques

Le phénomène de séparation magnétique s'effectue dans espace de champ m de volume délimité dans un séparateur, ce dernier fait modifier les caractéristiques d'un champ magnétique dont il engendre un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentant la plus grande aptitude à l'aimantation.

- La force magnétique

Dans les opérations de tri magnétique (concentration ou épuration). La séparation est obtenue en appliquant à toutes les particules contenues dans un mélange une force magnétique d'expression générale.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \nu_p \left(\frac{K_p}{1 + DK_p} \right) Grad(\mathbf{H}^2) \quad (5).$$

D : Coefficient de démagnétisation des particules

ν_p, K_p : Volume, et susceptibilité magnétique du corps considéré

μ_0 : Perméabilité de vide. ($4\pi \cdot 10^2 H/m$)

$Grad$: Gradient du champ magnétique suivant les directions ($0_x, 0_y, 0_z$)

\vec{H} : Le champ magnétique.

Soit une particule diamagnétique de volume V de susceptible magnétique K est supposée dans le vide, sa force d'attraction s'écrit :

$$\vec{F}_m = \vec{\nabla} \int_v \vec{J} \vec{H} d_v$$

$$\vec{J} = \frac{K}{1 + DK} \mu_0 \vec{H}$$

L'intensité d'aimantation ou la polarisation magnétique.

$\vec{\nabla}$: Le gradient du champ magnétique suivant les directions $0_x, 0_y, 0_z$

$$\vec{\nabla} = Grad = \frac{dH}{dx} \vec{a} + \frac{dH}{dy} \vec{j} + \frac{dH}{dz} \vec{k} \quad (6).$$

$$\vec{F}_M = \frac{\mu_0 K V}{1 + (K/3)} (\vec{H} \nabla) \vec{H}$$

Après l'intégration est assimilation de la particule a dipôle, le moment : $\vec{m} = V\vec{M}$ et la particule (dipôle) assimilé à une sphère ($D=V_3$) et comme la particule est paramagnétique $k \leq 1$

$$\vec{F}_m = 1/2 \mu_0 k \nabla (\vec{H}^2) = 1/2 \mu_0 V \text{ grad}(\vec{H}^2)$$

$$V = \frac{k_p}{1 + D_p K_p}$$

Cette expression peut être simplifiée comme suit :

$$F_m = 1/2 \mu_0 K V \nabla (\vec{H}^2) \quad (7).$$

- Forces antagonistes (mécaniques)

En plus de cette force d'attraction qui agit sur les particules magnétiques, s'applique, à toutes les particules magnétiques on, non, une combinaison de forces agissant dans différentes directions et dont les plus fréquemment rencontrées sont :

- La force de graviter : $\vec{F}_g = 4/3 \pi (\rho_p - \rho_f) R_p^3 - \vec{g}$
- La force centrifuge : $\vec{F}_c = \rho_p P_p W^2 R$
- La force d'entraînement par le fluide : $\vec{F} = 6 \pi \eta R_p (\vec{V}_f - \vec{V}_p)$

Avec :

R : Rayon du tambour (ou cylindre) de séparation.

R_p : Rayon de la particule,

\vec{g} : Accélération due à la pesanteur.

\vec{V}_p et \vec{V}_f : vitesse angulaire de la particule,

W : Vitesse angulaire de la particule,

ρ_p et ρ_f : Masse volumiques de la particule et du fluide.

n : Viscosité dynamique du fluide.

Pour que la séparation ait lieu, il est nécessaire que la valeur de la force magnétique (interaction) soit supérieure à la somme des forces antagonistes (mécanique) développées par le système, et des forces inter particules qui peuvent s'apparaîtraient, comme le phénomène électrostatique. L'action des toutes ces forces est reportée par la (Figure 26) [9].

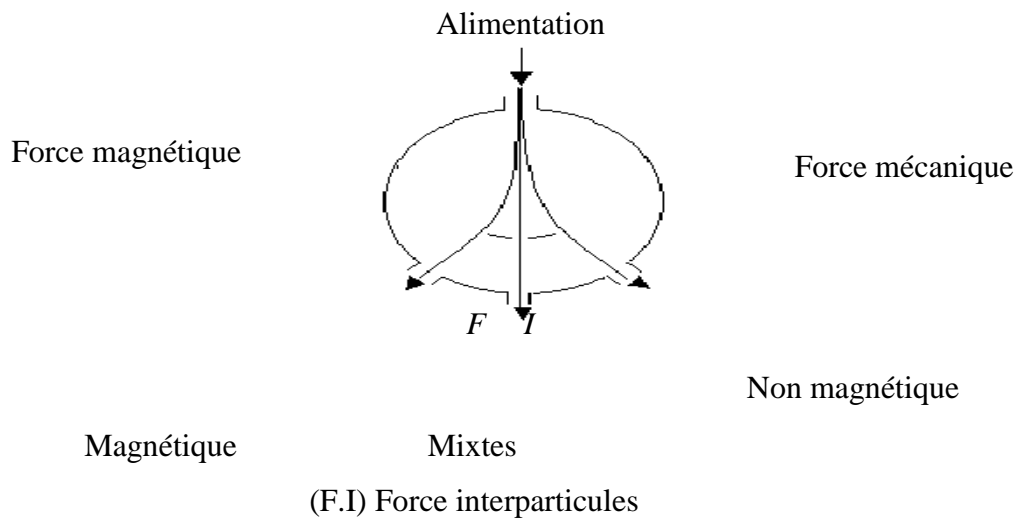


Figure 26. Schéma de principe de séparation magnétique

5.3.2. Aspect pratique de la séparation magnétique

5.3.2.1. Matrice d'extraction

La matrice d'extraction est l'organe d'un appareil de séparation magnétique. Elle est la source de champ magnétique d'où l'origine de la force utilisée pour la séparation.

Elle se présente en deux catégories essentielles Aimants permanentes, et des circuits conventionnels (électroaimants), dont chacune a des différences suivant les propriétés magnétiques présentées par le minerai à traiter.

5.3.2.2. Aimants permanents

L'utilisation d'aimants permanentes ont des dispositions transversales, longitudinales ou radiales, fixées ou en mouvement dans un tambour, rotor ou polie inoxydable, ils sont des matériaux caractérisés par une induction rémanente (B_r) les rendant aptes à créer un champ magnétique sans dépenses d'énergie, les matériaux sont nombreux (Remulloy, Vicalloy, Ferrites), mais les aimants les plus couramment utilisés actuellement sont constitués d'alliage céramique d'énergie spécifique de type Co_5RE où RE est un élément de terres rares : (Sm, Sr, Ce, Nd, etc.). Où Fer-Neodyme-Bore (Fr-Nd-B), dont les intensités de champ magnétique peuvent atteindre, 1200 KA/m et la valeur de $Grad(H^2) = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ A}^2/\text{m}^3$.

Les aimants permanents classiques sont utilisés dans les séparateurs magnétiques à basse intensité destinée à la séparation des substances ferromagnétiques.

Les aimants d'énergie spécifique, à base terre rare Co₅RE, peuvent être utilisés dans les séparateurs à haute intensité en voie sèche ou humide.

5.3.2.3. Circuits conventionnels (électroaimants)

Forment une matrice ferromagnétique sous forme d'un bobinage en cuivre ou un supraconducteur, assurant un gradient d'énergie magnétique suffisante à effectuer une séparation, ce type de matrice présente un avantage par rapport aux aimants permanents dont le fait que le gradient soit réglable ce qui permet de les utiliser dans la séparation des substances de différente susceptibilité magnétique. Une telle matrice trouve une large application dans les séparateurs magnétiques en voie humide que sèche.

La matrice d'extraction est le matériel qui est placé dans un champ magnétique, s'aimante, concentre les lignes de champ magnétique et de ce fait génère un gradient de champ et une force. Les configurations de matrice les plus couramment utilisées sont représentées sous forme de (plaques dentées, billes, mousse de fer expansé, grilles trapézoïdales, assemblage de barreaux cylindriques ou biseautés, bobines de différentes formes...) [10].

5.3.3. Classification des séparateurs

En séparation magnétique, de nombreux appareils sont disponibles chez le constructeur et leur description ne peut se faire sans une classification. Plusieurs critères de classement peuvent être utilisés, l'intensité du champ magnétique, le milieu de séparation (eau ou air), le mode de fonctionnement (extraction ou déviation), le générateur de champ magnétique, etc. Les relations de force magnétique montrent que cette dernière dépend de deux facteurs principaux :

La matière (la particule) est caractérisée par sa susceptibilité magnétique et son volume.

Le séparateur magnétique, par le produit : $\mu_0 \text{grad}(H^2)$ c'est à dire par la forme de son champ magnétique. Les séparateurs magnétiques peuvent donc se classer en trois grandes familles :

- Les séparateurs à basse intensité (aimant permanent) avec :

$$\mu_0 \text{grad}(H^2) = 2 \times 10^4 \text{ à } 10^6 \text{ N/m}^3$$

- Les séparateurs à haute intensité (électroaimant ou aimant permanent) en céramique

$$\text{avec : } \mu_0 \text{ grad}(\mathbf{H}^2) = 2 \times 10^7 \text{ à } 4 \times 10^9 \text{ N/m}^3$$

- Les séparateurs à haut gradient et/ou ont haut champ (solénoïde) avec :

$$\mu_0 \text{ grad}(\mathbf{H}^2) = 6 \times 10^{10} \text{ à } 10^{12} \text{ N/m}^3$$

Pratiquement les séparateurs magnétiques à basse intensité ne peuvent convenir que pour les traitements (concentration ou épuration) de produits fortement magnétiques (ferromagnétiques ou ferrimagnétiques) alors que les particules faiblement magnétiques (paramagnétiques) ne peuvent être traitées (en fonction de leur taille) que par des séparateurs à haute intensité ou à haut gradient.

Les séparateurs à haut gradient (bobines, en cuivre ou supra conductrices) Sont mieux adaptés aux traitements d'épuration de particules ultra fines contenues dans une dispersion solide ou un fluide.

Chacune de ces familles est subdivisée en séparateur travaillant en voie sèche ou en voie humide (en pulpe minérale), les premiers étant réservés en générale aux traitements des produits grossiers (granulométrie de l'ordre du centimètre à quelques millimètres), les seconds à ceux de produits plus fins (granulométrie inférieure à 1mm).

- **Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) en voie sèche**

La technologie de la séparation à haute intensité en voie sèche (rotor induit) existe depuis le début du XX^{ème} siècle et les perfectionnements ont essentiellement porté sur la forme des pièces polaires, la conception du rotor (denture et rigidité) afin de diminuer la flèche du rotor due aux forces magnétiques importantes mises en jeu.

Ce n'est que dans les années 1960 à 1970 que la séparation en voie humide s'est véritablement développée pour aboutir à la technologie efficace que les minéralogistes attendaient pour le traitement des produits fins, ces séparateurs à circuits conventionnels sont à champ magnétique fermé d'une intensité allant de 400 KA/m à 1600 KA/m pour une consommation d'énergie comprise entre 0,5 et 2,5 KWh par tonne traitée, les débits solides varient quant à eux suivant le mode de séparation et l'opération de traitement (concentration, épuration) 180 t/h.

L'alimentation des particules ne doit pas comporter un trop forte pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (<0,5 %) En effet la rémanence de ces circuits ne permet pas de les éliminer complètement et leur présence risque de colmater les appareils.

Il est souvent conseillé de faire passer préalablement, l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité.

Récemment, l'apparition d'aimants permanents sur le marché, à base de terres rares (Sm-Co, ou Fe-Nd-B) a permis la réalisation de nouveaux séparateurs à haute intensité. Ces derniers substituent dans beaucoup de cas aux appareils traditionnels du fait de leurs coûts d'investissement et de fonctionnement nettement inférieur.

Dans le cas des séparateurs magnétiques à haute intensité, les dispositifs générateurs du champ magnétique (matrice d'extraction) sont soit :

Un électroaimant où circuit conventionnel, qui est composé d'un ou de bobines en cuivre résistif entourant d'un noyau de fer doux ($\mu_r = \beta / \mu_0$ très élevé). Ces systèmes magnétiques conventionnels sont capables de créer un champ magnétique d'environ 1600KA/m.

- Séparateurs travaillant par extraction

Ce sont principalement les séparateurs à bandes transversales et à disques ces séparateurs sont équipés d'une bande convoyeuse passant entre les deux pôles d'un Électroaimant (entrefer) et soit une bande se déplaçant sur la pièce polaire supérieure et transversalement à la bande principale, soit d'un disque denté tournant au-dessus. L'alimentation du minerai se fait en couche mince (1 à 1,5 mm) sur la bande convoyeuse.

Les éléments magnétiques sont attirés par la pièce polaire supérieure et évacuée sur le côté par la bande transversale ou le disque. Ces séparateurs développent des champs variant de 800 à 1600 KA/m et traitent des débits compris entre 0,3 t/h/m à 4 t/h/m (la largeur utile variant entre 100 et 800 mm.)

La granulométrie idéale de l'alimentation est comprise entre 150 μ m et 10 mm, mais une bonne efficacité est possible jusqu'à 75 μ m (paramagnétique fort) Ces appareils sont utilisés pour traiter des substances telle que : (l'ilménite, la chromite, la manizite, le wolfromite, les produits pharmaceutiques ou chimiques, les céramiques, etc.) [11].

- Séparateurs travaillant par déviation

Les appareils utilisés industriellement sont des séparateurs dits à rotor, qui suivant la conception du circuit magnétique peuvent également travailler par extraction (collage)

Ils comportent (figure 27), un rotor denté tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique, celui-ci comprend dans sa conception de base une culasse magnétique avec un

noyau magnétique et une ou deux bobines d'électroaimant entourant ce dernier. Les pôles magnétiques ou pièces polaires entre lesquelles tourne le rotor soumis à une induction magnétique peuvent avoir diverses formes (plan incliné ou vertical)

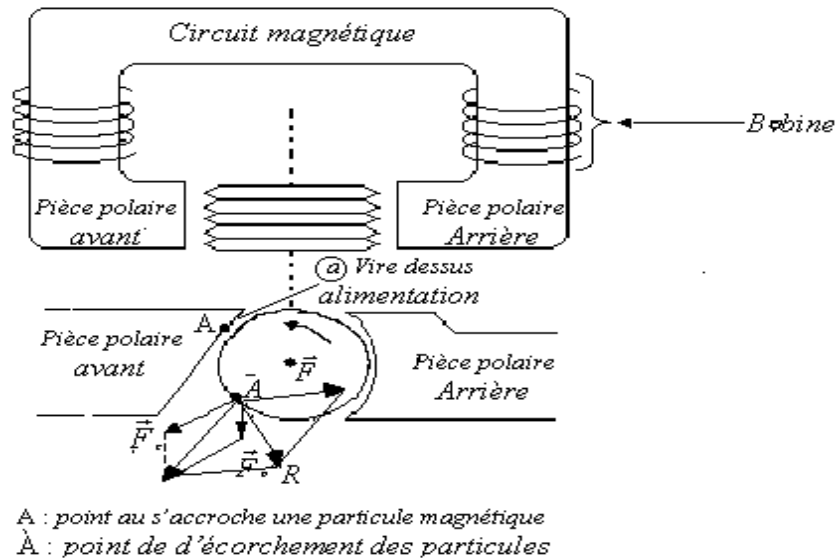


Figure 27. Séparateur magnétique à aimant céramique à haut champ.

La séparation a lieu dans intervalle (entrefer) réglable, situé entre la pièce polaire avant le rotor formant un contre Pôle le rotor est constitué d'un assemblage de minces tôles en métal allié, isolées les unes des autres de manière à former des arêtes rectangulaires, triangulaires ou trapézoïdales, donc des nervures, des dents ou des filets. L'alimentation est faite sur le rotor entre ce dernier et la pièce polaire avant, les particules magnétiques adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées par la rotation du rotor dans une zone de champ magnétique faible ou elles sont décollées par une brosse, les particules non magnétiques quittent le système sous l'action combinée de la force centrifuge et la force de gravité, l'entrefer (ℓ) et le pas (s) de denture sont adaptés à la granulométrie (d) du produit à traiter ($S= 2 \ell \geq 4 d$).

Suivant les applications, la granulométrie et la composition minéralogique, les débits admissibles sur des séparateurs à rotor induit sont de l'ordre de 1,5 à 6 t/h/m, ils peuvent atteindre dans certains cas 8 t/h/m ce qui correspond pour des rotors de longueur industrielle de 750 mm à des capacités de 1 à 6 t/h par rotor. Ces appareils sont légers de 2,5 à 12 t, peuvent développer des champs allant de 1 à 2,5 KWh par tonne, exemple de ces séparateurs dont la partie génératrice du champ magnétique est un rotor composé d'un assemblage d'aimants permanents est représenté dans la c'est le séparateur à bande

Il est obtenu par empilage alterné de rondelles en aimants permanents Nd-Fe-B et de rondelle en acier doux la somme des épaisseurs des rondelles d'aciers et d'aimants définit le pas polaire de l'assemblage. Les appareils de séparation magnétique à haute intensité en voie sèche sont utilisés dans de nombreuses industries et principalement pour :

- La concentration de minéraux paramagnétiques : minerais de fer, chrome, wolframite, ilménite, oxydes de manganèse, etc.
- L'épuration de minéraux industriels : feldspaths, sables andalousites,...etc.
- La séparation entre eux de minéraux paramagnétiques (minéraux des sables) à condition qu'ils possèdent une différence de susceptibilité magnétique suffisante (ilménite et monazite, xénotime et tourmaline, hématite, etc.)

Les séparateurs à haute intensité en voie sèche présentent quelques inconvénients par rapport à eux travaillant en voie humide. La plupart des sociétés minière sont amenées à traiter des minerais dont la teneur et la maille de libération deviennent de plus en plus faible, ce qui nécessite de les broyer de plus en plus finement pour obtenir la concentration des différents constituants, or si la séparation en voie sèche peut donner de bons résultats pour des granulométries fines (et même être la seule solution, compte tenu des conditions d'exploitation locales), il n'en demeure pas moins qu'elle reste limitée à 40 m et que le choix de cette méthode conduit à des installations plus complexes et plus onéreuses (insalubrité des installations séchage indispensable des produits avant traitement, faible capacité des séparateurs) [10].

5.4. ESSAIS DE LABORATOIRE

Selon les propriétés physico-chimiques des principaux minéraux de composition du grès qui sont présentés dans le (Tableau 16), et d'après les résultats de l'analyse chimique et l'observation au microscope optique des tranches granulométriques en a choisi trois tranches granulométriques (3, 4 et 5) qui correspondent respectivement les fractions (-1 +0.5), (-0.5 +0.25), (0.25 +0.125) mm, ces tranches représente une meilleur libration de minerai de valeur, pour objet d'enrichir la silice et éliminer les impuretés de fer, d'argile...etc. afin des exigences industrielles d'utilisation de silice dans tous les domaines, on a fait des essais de séparation telle que la séparation gravimétrique suivait par une séparation magnétique à haute intensité en voie sèche. Ces essais effectués au niveau de laboratoire de minéralurgie de département des mines, le produit obtenu après chaque opération subie une analyse

chimique au niveau de laboratoire de L'ORGM de Boumerdes. (Voire cf. analyse par fluorescence X).

Tableau 16. Propriétés des principaux composants du minerai.

<i>Minéraux</i>	<i>composition</i>	<i>densité</i>	<i>Paramagnétique</i>	<i>diamagnétique</i>
Limonite	$\text{HFeO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$	2,2 à 2,4		X
Pyrite	FeS_2	5,0	X	
Rutile :	TiO_2	4,2 à 4,3		X
Tourmaline	$6 [\text{B}_3 \text{Al}_5 \text{Si}_6 (\text{O}, \text{OH})]_{30}$	2,9 à 3,2	X	
Zircon :	ZrSiO_4	4,7		X
Hématite :	Fe_2O_3	5,2	X	
Anatase :	TiO_2	3,9		X
Disthène :	$\text{Al}_2\text{O}[\text{SiO}_4]$	3,6 à 3,7		X
Muscovite :	$\text{KAl}_2 [\text{AlSi}_3 \text{O}_{10}] [\text{F}, \text{OH}]_2$	2,8 à 3,0		X
Biotite	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3 [\text{Si}_3 \text{AlO}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$	3,0 à 3,1		X
quartz (silice) :	SiO_2	2.6		X

5.4.1. Essai de séparation gravimétrique

Après la préparation des échantillons (concassage et broyage et tamisage), une quantité de masse de chaque tranche (Q_1 , Q_2 et Q_3) subi un processus de séparation gravimétrique par un bac à piston avec un débit d'eau de 1 l/mim. Le principe de fonctionnement est basé sur la pulsation et stratification des particules comme celle de jig. Les particules dense (lourdes) sont décollé au fond de séparateur et les fines (légères) sont flottent est récupéré dans un récipient la maille de grille de bac à piston égale à 0.5 mm. Après chaque essai on lavés le bac est mettre les fractions obtenu à une décantation en fin rejeté les eaux et récupère les fractions du concentré bien sur subi un séchage et pesage, on fait la même chose pour les autres tranches granulométriques.

Les quantités et les teneurs sont interprétés dans le Tableau 17. Les fractions du concentré subissent une opération de quartage et homogénéisation et on enlève un échantillon pour l'analyse chimique est l'autre partie est réservé pour faire la séparation magnétique.



Figure 28. Séparateur à bac piston.

Tableau 17. Résultats de la séparation gravimétrique.

<i>Tranche</i>	<i>(-1 +0.5) mm</i>		<i>(-0.5 +0.25) mm</i>		<i>(-0.25 +0.125) mm</i>	
paramètres	SiO₂	Fe₂O₃	SiO₂	Fe₂O₃	SiO₂	Fe₂O₃
Q_a (gr)	326		350		500	
Q_c (gr)	226		270		410	
Q_r (gr)	100		80		90	
δ_a %	100		100		100	
α %	97.82	00.15	97.89	00.15	95.48	01.38
β_i %	98.87	00.10	98.65	00.14	98.60	00.27
δ_{ci}, δ_{ri} %	69.32	30.68	77.14	22.86	82.00	18.00
ζ_{ci}, ζ_{ri} %	70.06	29.94	77.73	22.27	84.67	21.52

5.4.1.1. Interprétation des résultats de séparation gravimétrique

Les indices technologiques sont calculés suivant les relations suivantes :

$$\delta_a = \delta_{ri} + \delta_{ci} = 100\% \quad (8)$$

$$\delta_i = (Q_i / Q_a) * 100 \quad (9)$$

$$\zeta_i = \delta_i \beta_i / \alpha_i \quad (10)$$

Où:

α_i : teneur en composants utiles dans l'alimentation (produit à séparer en %).

δ_i : rendements de la fraction en (%).

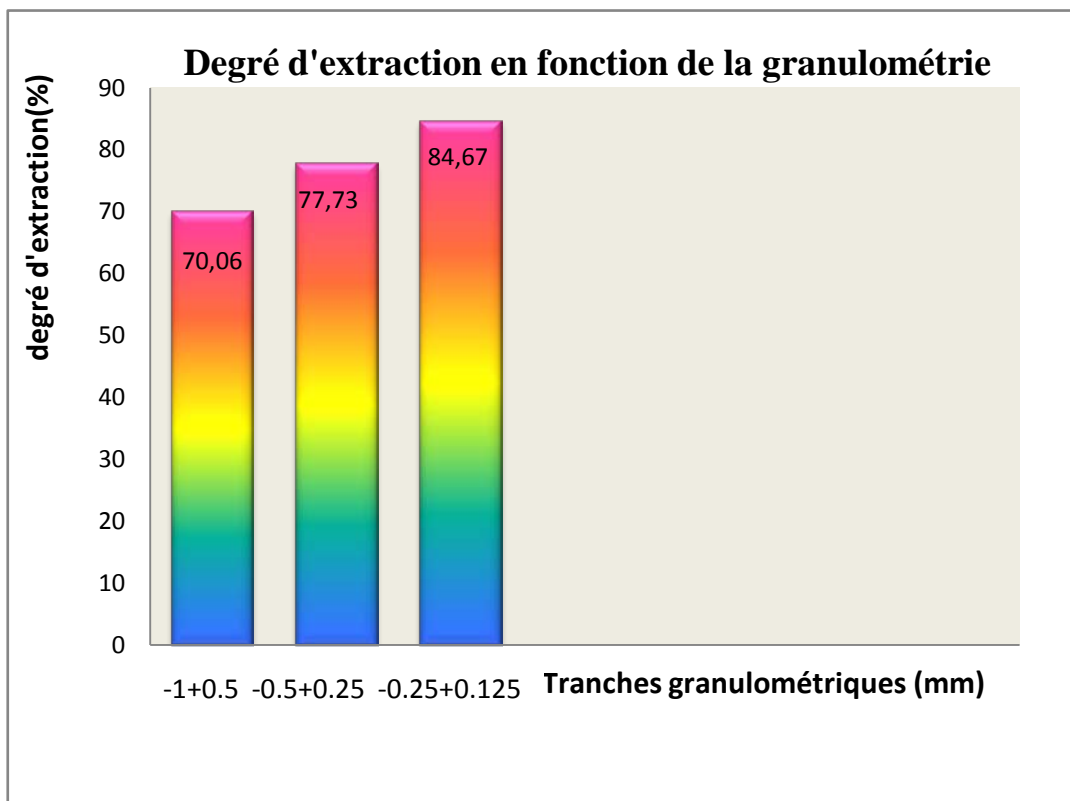
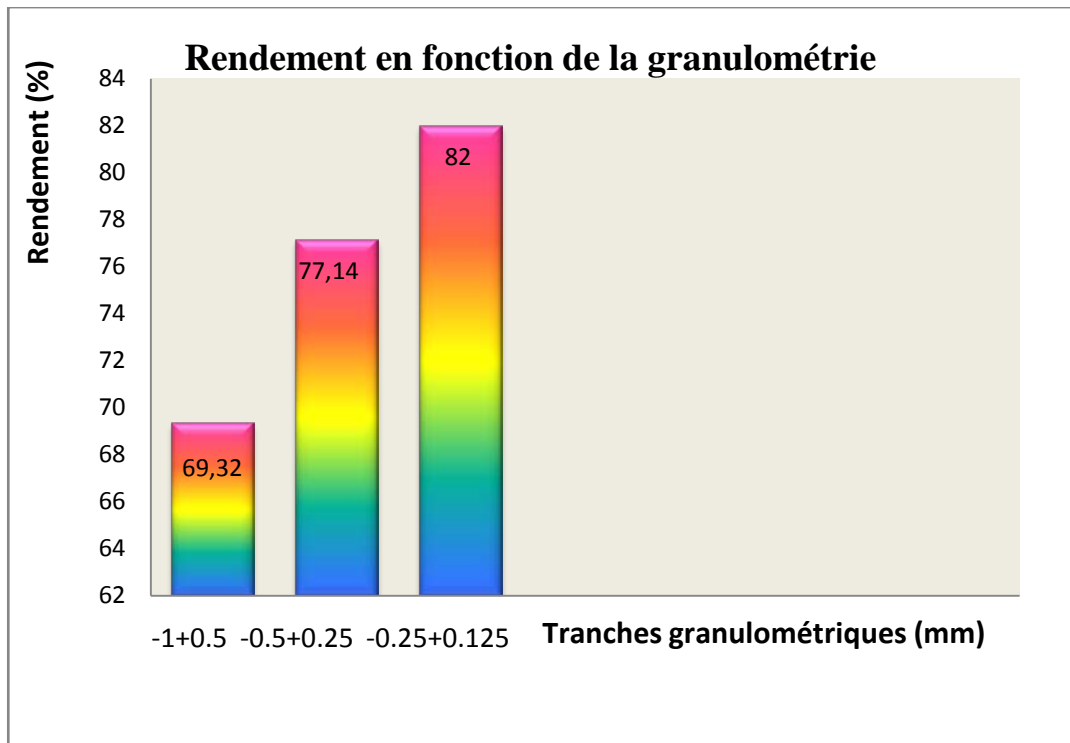
Q_a , Q_{ci} , Q_{ri} respectivement la masse à l'alimentation, du concentré et du rejet en (gr).

ζ_i : degré d'extraction en (%)

Selon les résultats obtenus par la séparation gravimétrique il y a une amélioration de la teneur de la silice et élimination d'un grand part des argiles de (0.95, 0.87 et 1.06) % à (0.44, 0.52 et 0.25) % respectivement dans les tranches (3, 4 et 5), une diminution des impuretés de fer mais reste élevée vis-à-vis les normes de confection du verre à qualité. , en remarque aussi un abaissement des impuretés de TiO_2 .

Généralement la qualité de silice obtenue après cet essai reste insuffisante, donc nous avons proposé de continuer la valorisation du minerai par la méthode de séparation magnétique.

D'après les calculs des indices de performance de la séparation gravimétrique on remarque qu'il y a une relation étroite entre la granulométrie des particules souches et le degré d'extraction, la même chose pour le rendement de l'opération de séparation, Figure 29 et 30.



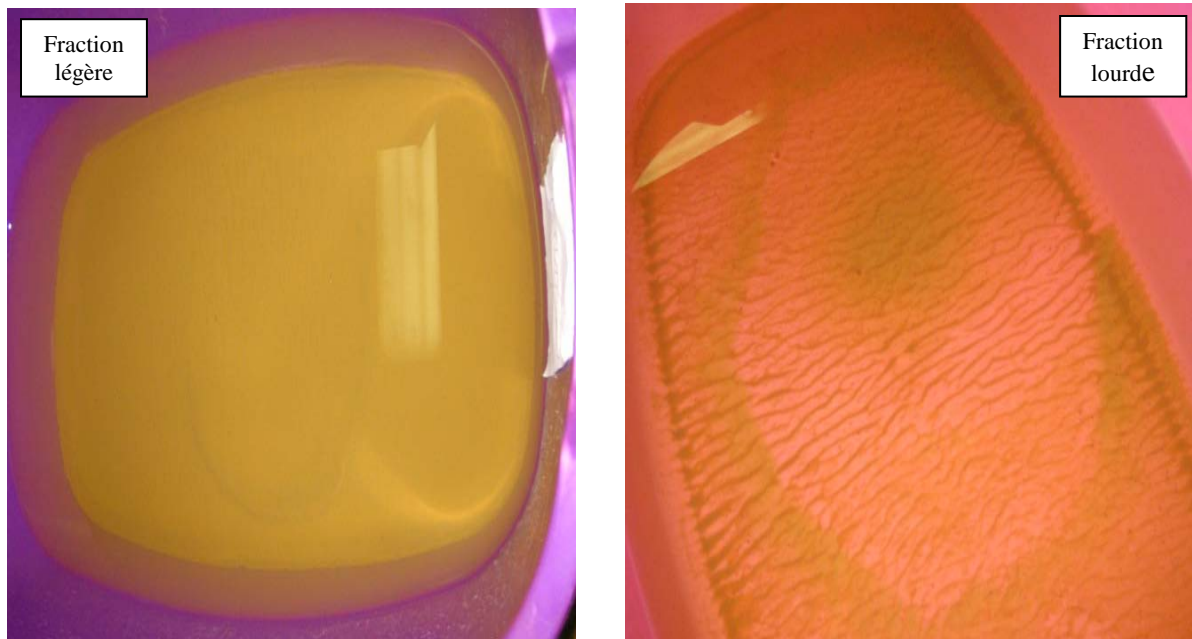


Figure 31. Produit obtenu après séparation gravimétrique.

5.4.2. Essai de Séparation magnétique

L'essai s'effectue par un séparateur à tambour canulé, sous un champ magnétique intense créé par les électroaimants, dont lequel un courant électrique avec une alimentation vibrant. Les particules qui ayant une susceptibilité magnétique et se l'effet du champ magnétique sont attirés et déversés dans la fraction magnétique (rejet), et les autres particules diamagnétiques sont déversés dans l'autre côté, c'est à dire la fraction non magnétique (concentré). Comme le montre la Figure 32.

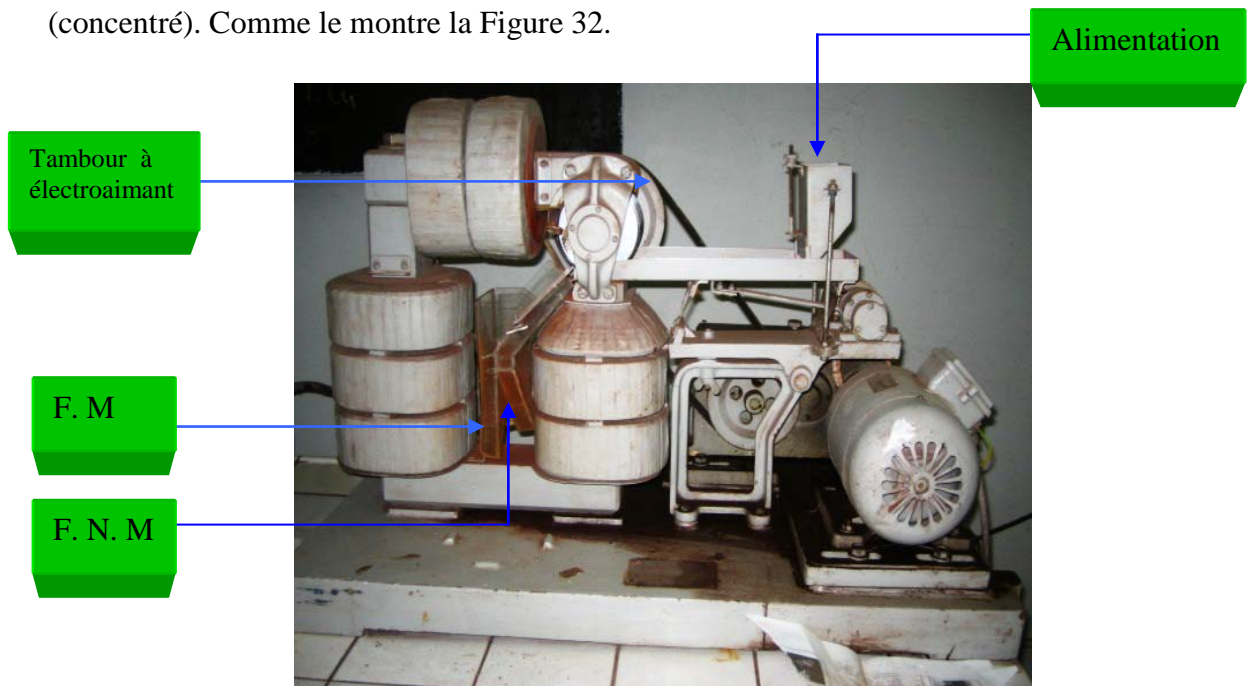


Figure 32. Séparation magnétique à H. I

Le produit de concentrer de chaque séparation gravimétrique subi un séchage dans un four à 110°C puis dirigé vers la séparation magnétique bien sur après un quartage et homogénéisation. Après séchage du produit concentré par gravimétrie nous avons au premier lieu fait des essais pour avoir la relation entre la granulométrie des particules et l'intensité du champ magnétique on a prendre une quantité déterminé pour chaque tranche et fait la séparation, à chaque opération en change l'intensité du champ magnétique, les résultats obtenu représentés dans le Tableau 18.

Tableau 18. Relation entre l'intensité du champ magnétique et la granulométrie

Paramètres	Tranches granulométriques (mm)											
	-1+0.5				-0,5+0,25				0,25+0,125			
Q_a (gr)	60	60	60	60	10	10	10	10	40	40	40	40
I en (A)	7	8	9	10	7	8	9	10	7	8	9	10
Q_m (gr)	0,05	0,058	0,068	0,072	0,018	0,025	0,018	0,010	0,10	0,11	0,16	0,07
Q_m (gr)	59,93	58,90	59,92	59,93	9,93	9,89	9,80	9,73	37,76	38,26	36,80	39,40

D'après ces résultats de séparation magnétique nous avons choisies une intensité de I=09 Ampère. Les résultats de la séparation magnétique à haute intensité sont récapitulés dans le Tableau 19.

Tableau 19. Résultats de séparation magnétique à haute intensité

Tranche	(-1 +0.5) mm		(-0.5 +0.25) mm		(-0.25 +0.125) mm	
paramètres	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Q_a (gr)	60.00		10.00		40.00	
Q_c (gr)	59.91		09.94		39.83	
Q_r (gr)	0.068		00.02		00.16	
δ_a %	100.0		100.0		100	
α %	98.87	00.10	98.65	00.14	98.60	00.27
β_i %	99.10	00.09	98.95	00.10	98.80	00.19
δ_{ci}, δ_{ri} %	99.86	00.11	99.60	00.20	99.57	00.43
ζ_{ci}, ζ_{ri} %	99.90	00.10	99.90	00.14	99.77	00.23

5.4.2.1. Interprétation des résultats de la séparation magnétique

D'après les deux tableaux 18 et 19, on constate que :

L'efficacité de séparation est liée par la granulométrie de la particule, et aussi à l'intensité du champ magnétique.

Si la granulométrie est grosse nécessite une intensité du champ magnétique élevé comme montre le cas de la fraction (-1 + 0.5) mm, alors que les autres fractions (-0.5 + 0.125) mm on remarque que l'augmentation de l'intensité influe sur l'efficacité de séparation (c'est à dire la séparation magnétique des fractions fines devient faible et l'inverse vraie).

Donc pour adapter la séparation magnétique il est nécessaire d'une étude bien précisée pour avoir une conception d'un appareil dont les caractéristiques soient faisables à cet objectif.

La séparation magnétique donne des résultats acceptables pour la fabrication des verres mais reste toujours des impuretés de fer.

- **Augmentation de la teneur de $\text{SiO}_2 = 99.10\%$.**
- **Abaissement de la teneur de Fe_2O_3 à $0.09\% < 0.1\%$.**
- **Abaissement de la teneur de TiO_2 jusqu'à $< 0.05\%$.**
- **Diminution de la teneur d'argile Al_2O_3 jusqu'à 0.25% .**
- **Réduction de la teneur de CaO jusqu'à $< 0.05\%$**

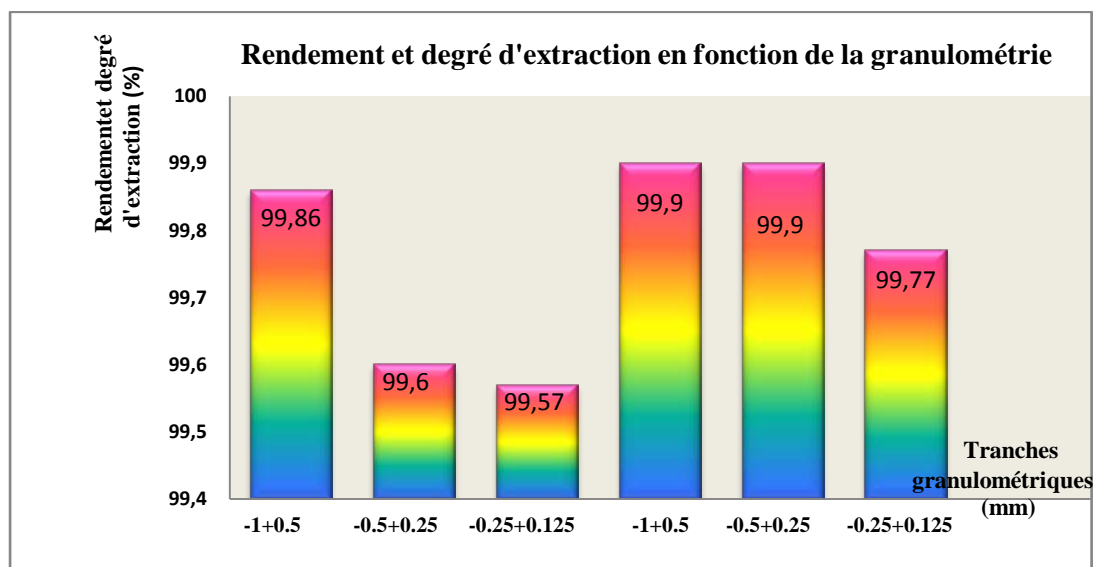
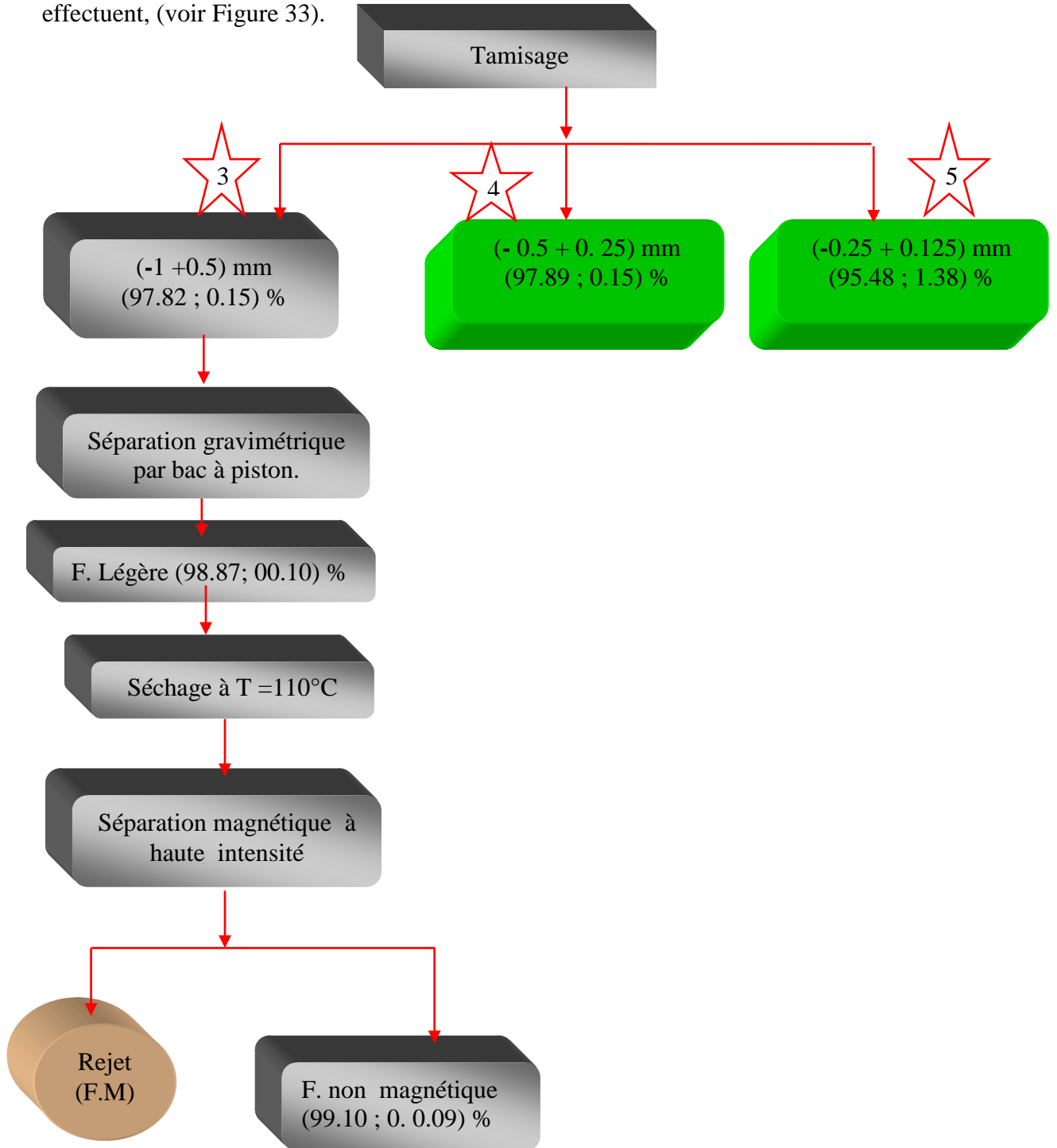


Figure 30.a : rendement et degré d'extraction de séparation magnétique

5.4.2.2. Essai supplémentaire

Un échantillon subi un traitement par lavage, attrition manuelle et séparation magnétique à haute intensité après séchage donne un résultat plus au moins acceptable pour la fabrication

de certaines type de verre comme les verres coloré. La teneur en $\text{SiO}_2 = 98.68 \%$ et une teneur en fer de $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.27 \%$ et un teneur en argile de 0.25% et de 0.09% en TiO_2 . Se qui montre que le lavage et l'attrition sont des opérations indispensable de l'opération de séparation (traitement) Le schéma sous dessous interprète les processus de séparation effectuent, (voir Figure 33).



Suite de schéma



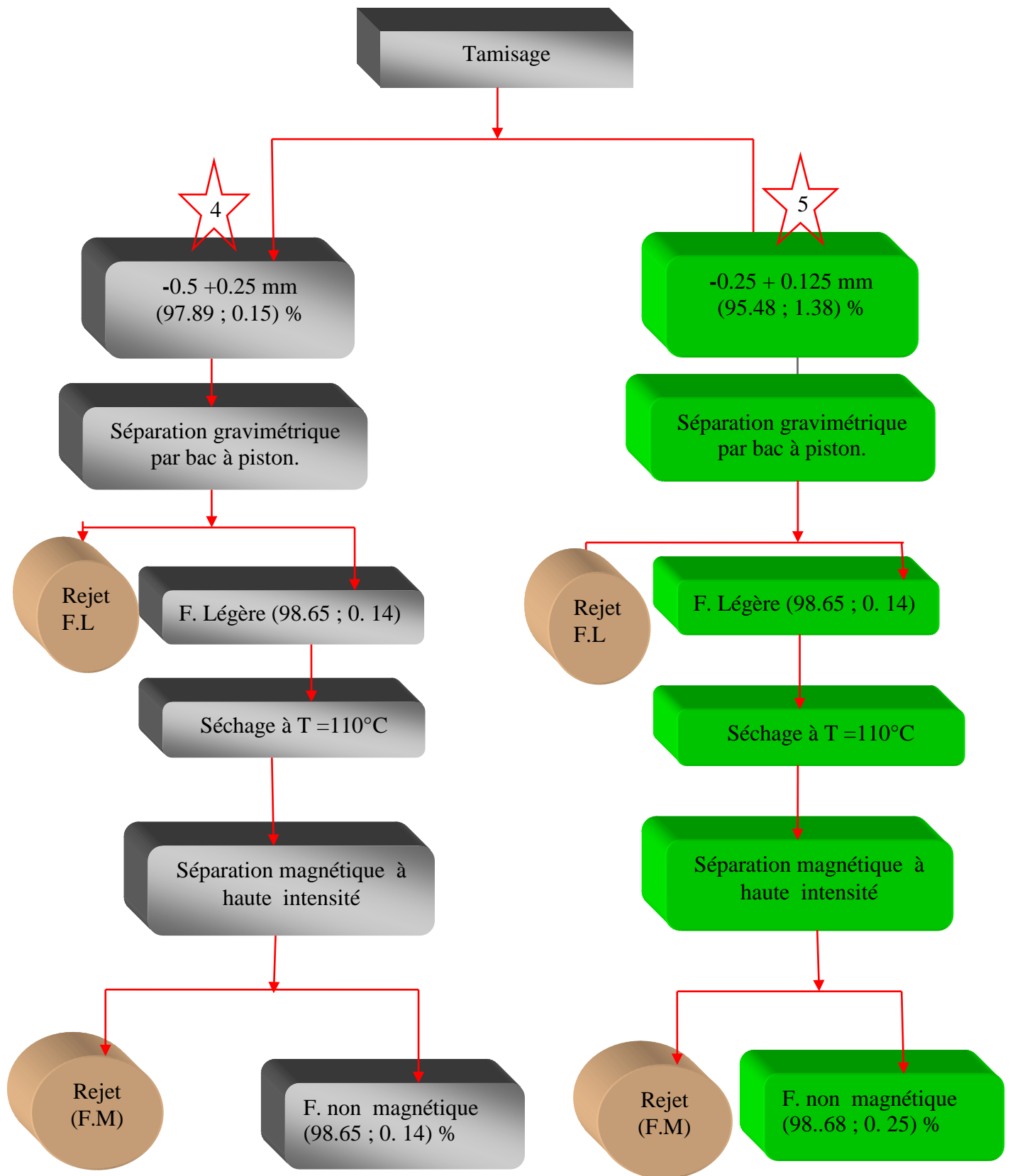
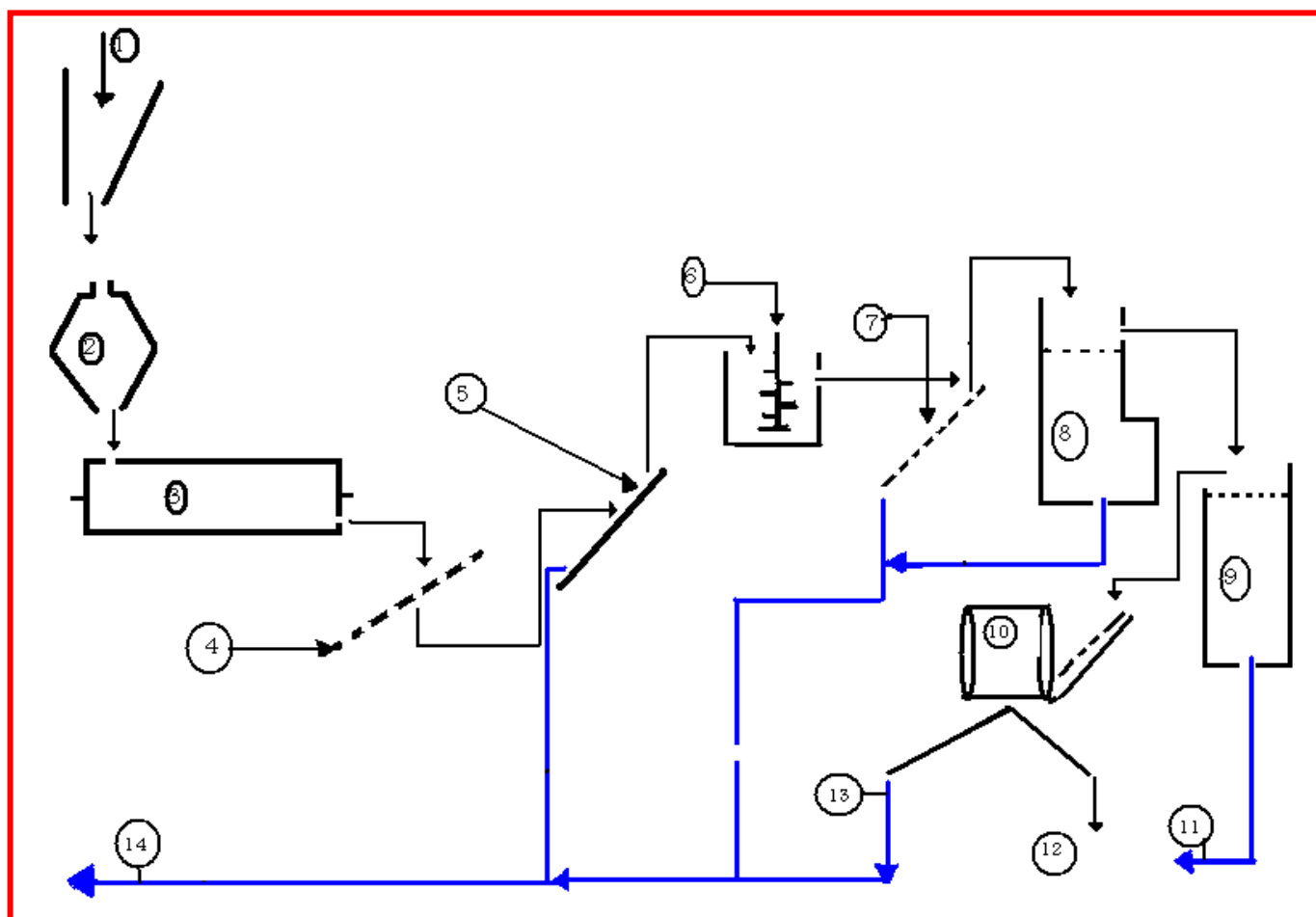


Figure 33. Schéma des essais de séparation.

5.5. ELABORATION D'UN SCHEMA DE TRAITEMENT DU GRES CAS DE GISEMENT D'EL AOUANA

D'après cette étude on peut proposer le schéma de traitement et de valorisation du grès « cas de gisement d'El Aouana-Jijel ». La proposition de ce schéma est basée sur les données obtenues par l'analyse chimique des échantillons traités (Figure 34).



1 : concassage primaire.

2: concassage secondaire

3: broyage.

4: criblage sec (-1mm).

5: classification (c. à vis).

6 : attrition.

7: criblage humide et coupure (-1+0.125 mm).

8: séparation gravimétrique (bac à piston).

9 : séchage.

10 : séparation magnétique à haute intensité.

11: épuration des eaux.

12: produit fini.

13: rejet solide (magnétique).

14: rejet (bous).

Figure 34. Schéma de traitement proposé.

5.6. IMPACT SUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT

La silice dans son état naturel n'est pas considérée comme élément nocif ou dégradant pour l'environnement, c'est un constituant naturel de l'environnement présent à de forte teneur. Lors du traitement minéralurgique, de grès peut polluer l'environnement par des rejets nocifs tels que les métaux lourds (séparation gravimétrique), la poussière qui a une grande influence sur la santé des travailleurs lors de l'exposition à cette poussière, cette dernière provoque des maladies graves. (Cf.5. les maladies professionnelles) [12].

L'origine de la poussière est :

- au niveau de la carrière lors de l'exploitation (forage, tir, transport, concassage).
- au niveau de l'usine de traitement (concassage, broyage, criblage sec et enfin stockage).

Trois fractions de poussière suscitent une attention particulière, les fractions inhalables, thoraciques et alvéolaires. Néanmoins, pour la silice cristalline, la fraction de poussière alvéolaire est la plus importante en raison de ses effets sur la santé humaine. Il est également important de souligner que les limites nationales d'exposition professionnelle à la silice cristalline s'appliquent à la fraction alvéolaire. Cette fraction de poussière correspond au contaminant dans l'air qui pénètre la région alvéolaire des poumons (échange de gaz). Elle représente normalement 10 à 20% de la fraction de poussière inhalable, mais cette proportion peut varier considérablement

L'illustration ci-après montre les différentes régions pulmonaires concernées.

Le larynx est situé entre le pharynx (partie supérieure des voies respiratoires) et la trachée (trachée artère). La région alvéolaire pulmonaire est constituée d'environ 300 millions d'alvéoles ou sacs d'air [13]. (cf. 5, Figure 35).

5.6.1. Lutte contre la poussière

Le travailleur doit :

- Utiliser l'équipement approprié fourni par l'employeur.
- Porter l'équipement de protection respiratoire (masque) pendant toute la durée de travail.
- Porter un équipement de protection oculaire (lunettes ou écran).
- Porter une combinaison de protection pour empêcher la contamination à l'extérieur du site.
- Se laver les mains et le visage avant de boire, de manger.
- utiliser des capteurs de la poussière ou des systèmes d'arrosage.

De notre côté, le traitement du grès, générant des impuretés solide et liquide, contient des métaux lourds qui provoquent la contamination de la sole et des eaux (Figure 37).

Les métaux lourds sont des polluants engendrés par l'activité humaine qui ont un fort impact toxicologique. Les métaux toxiques sont nombreux, mais on peut citer surtout l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure. Ils ont des impacts sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme.

5.6.2. Contamination de l'eau

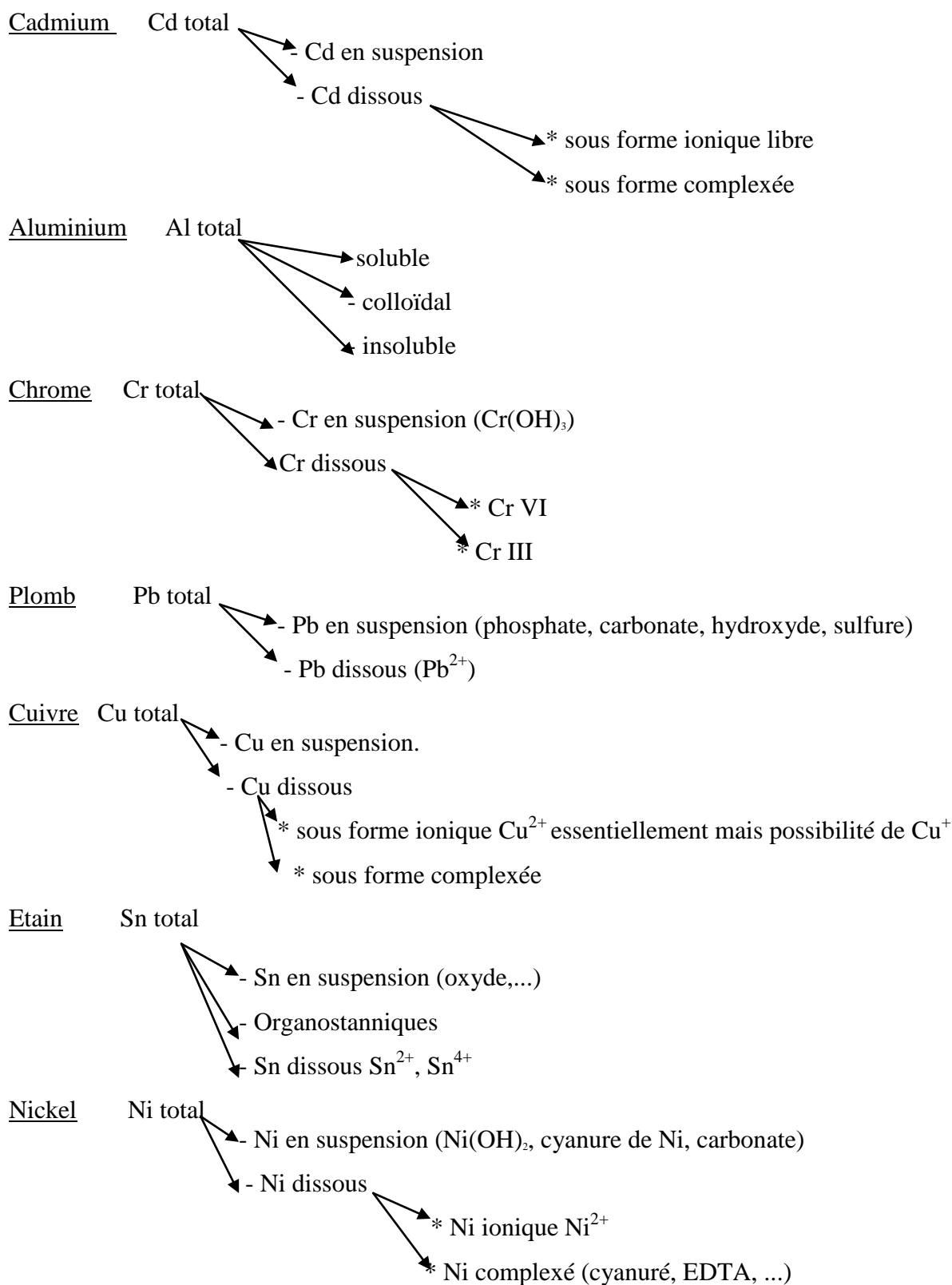
Il est assez difficile de prévoir l'évolution des métaux dans l'environnement, car ils peuvent subir un grand nombre de transformations (oxydation, réduction, complexation, etc.), et car cette évolution dépend fortement du milieu. En effet, la migration des métaux lourds vers la nappe phréatique est en fonction de nombreux paramètres:

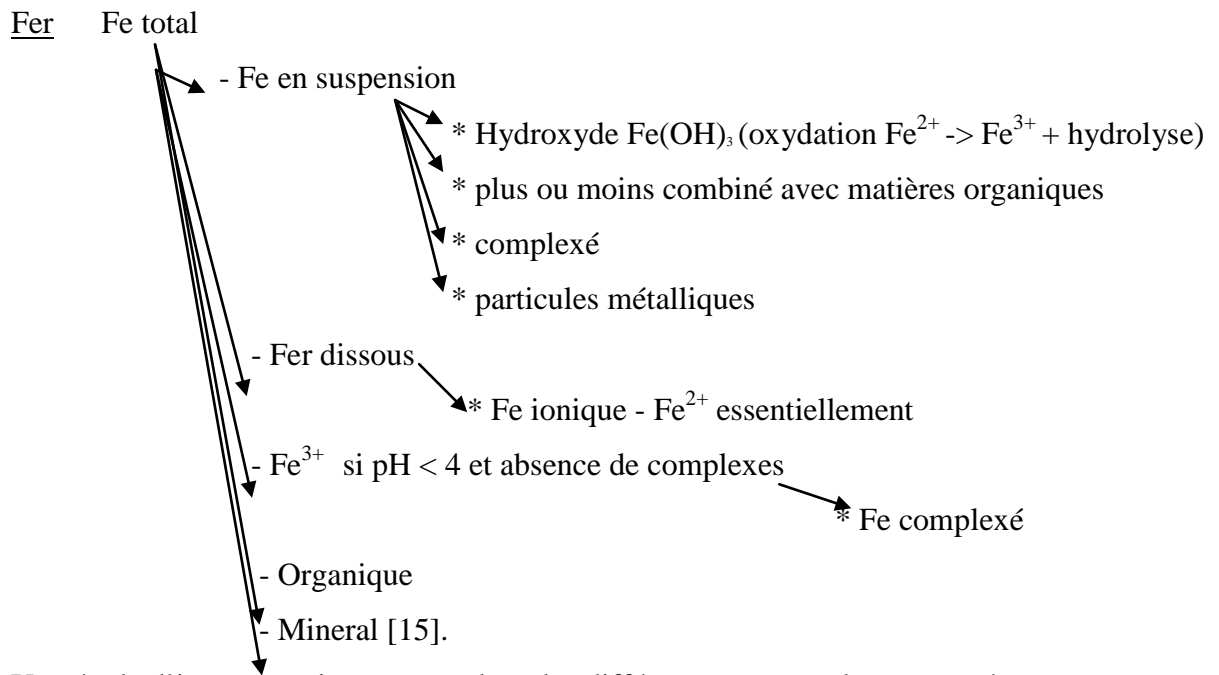
- la forme chimique initiale du métal,
- la perméabilité du sol et du sous-sol,
- la porosité du sol,
- le pH: dans un milieu acide, les métaux risquent de se solubiliser, alors que dans un milieu alcalin, ils peuvent former des hydroxydes métalliques,
- l'activité biologique: certains micro-organismes ont la capacité d'ingérer des métaux, alors que d'autres les solubilisent par acidogénèse,
- le potentiel redox du sol,
- la composition minéralogique du sol: il peut y avoir formation de composés,
- la teneur en matières organiques du sol:(complexation des métaux par les substances humiques) [14].

Parmi les principales sources de contamination de l'eau on signale les eaux industrielles, les polluants atmosphériques.

5.6.3. Présence des métaux dans les eaux.

L'organigramme qui suit indique des différentes formes sous lesquelles on retrouve les métaux dans les eaux.





Une étude d'impact environnemental sur les différentes sources des eaux usées permet d'amener l'information suivante :



Boue contaminée

Figure 36. Bassin de décantation.

L'analyse physico-chimique de l'échantillon d'eau rejeté et prélevé le 01 février 2006, au niveau de trois points de rejet à savoir :

- 1/ Eau rejetée par l'unité de compositions de matières premières.
- 2/ Eau de refroidissement de silicate de soude.
- 3/ Eau de l'atelier du verre sécurité. A donné les résultats suivants :

Tableau 20. Paramètres d'analyses.

Paramètres	Résultats	Valeur maximale admissible (décret 93 -160 du 10 / 07/ 93)
MES	103	30 mg/ L
DBO ₅	12,2	40 mg/L
DCO	60	120 mg/L

Les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques révèlent des dépassements des seuils prescrits par la réglementation en vigueur [16]. En effet :

LES MES : Les matières en suspension représentent l'ensemble des matières solides fines de diverses natures, insolubles, en suspension dans les eaux usées.

La valeur des MES au niveau du rejet de l'unité AFRICAVÉR (103 mg/l) soit quatre fois la valeur admise par la réglementation en vigueur qui est de 30 mg/ l.

La forte teneur en MES est expliquée par la quantité importante des débris de verres drainés par l'eau de refroidissement et les quantités du sable rejetées par la station de composition des matières premières (métaux lourds).

L'effet mécanique néfaste des MES se manifeste par la formation des sédiments et d'un écran limitant la pénétration de la lumière (réduction de la photosynthèse), ainsi le colmatage des branchies des poissons, leur effet est aussi chimique par mobilisation de l'oxygène de l'eau par les organismes vivants, pour leur métabolisation ainsi que par constitution d'une réserve de pollution potentielle dans les sédiments.

LA DBO₅: La pollution organique est classiquement exprimée par le paramètre DBO₅ : c'est la quantité d'oxygène consommée pendant un temps donné pour assurer par voie biologique, l'oxydation de certaines matières organiques dites biodégradables contenues dans l'eau.

La concentration en DBO₅ de l'eau rejetée est de 12,2 mg/ l, nettement inférieure à la valeur prescrite par la réglementation (40 mg/l). Ceci est dû notamment à l'utilisation des produits à base organique et le rejet des eaux usées domestiques sans aucun prétraitement.

La forte concentration en DBO₅ provoque l'appauvrissement du milieu en oxygène ce qui engendre le dégagement d'une odeur nauséabonde.

LA DCO: la demande chimique en oxygène traduit la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les matières organiques contenues dans l'effluent.

Ce paramètre renseigne sur l'existence d'une pollution chimique des eaux rejetées liées.

La forte teneur en DCO a une incidence sur le bilan d'oxygène d'eau et provoque des odeurs nauséabondes ainsi peut avoir une action nuisible sur la flore bactérienne.

Le résultat des analyse de DCO obtenu soit : 40 mg/l est acceptable, inférieur à la valeur réglementairement admissible [17].

Les déchets solides provenant de l'unité AFRICAVÉR sont divers. La gestion de ces résidus se fait de la façon suivante :

Tableau 21. Gestion des déchets par ces types

Type de déchets	Mode de Stockage	destination
Déchets ménagers et assimilés	Poubelles et demi fûts	Décharge municipale
Calcin	Stocké à l'aire libre	Réutilisation comme MP
Calcin verre plat	Stocké à l'aire libre	Vendu
Chuttes PVB	Bigbags	Stocké au niveau de l'unité
Boues	Stockées à l'aire libre	vendu

A l'exception de quelques inconvénients liés notamment à l'absence d'un local bien définis pour le stockage des déchets et l'absence des moyens de tri appropriés à savoir : bacs de différentes couleurs, bacs étiquetés. En général, on peut dire que la gestion actuelle des déchets solides est respectueuse de l'environnement.

Conclusion générale et recommandations

Les méthodes de valorisation et de traitement des minéraux par les procédés minéralogique reste tous jour a besoin d'une degré d'efficacité et de performance de point de vu équipements, caractérisation des propriétés du minerai (identification du mènèrai).

Donc suivant tous les procédés de préparation et de traitement du grès nous avons constaté que :

- La préparation mécanique du grès nécessite un concassage préalable à mâchoire pour atteindre des dimensions acceptable au broyage.
- Le réglage du broyeur se fait selon une dimension $< 1\text{mm}$ pour évité le sur broyage et donc perd d'énergie (le temps de séjour de broyage, l'ouverture de broyeur).
- Un criblage humide suivant la maille de libération (maille de coupure) du minerai utile (-1 +0.125) mm.
- Le traitement d'enrichissement du grès a besoin d'un lavage, mené par une cellule d'attrition pour éliminer les impuretés inter faciales (argiles, fer...) comme interprète les résultats obtenus.
- La classification du minerai selon leur dimension, maille de coupure (-1 +0.125) mm c'est une étape cruciale pour le traitement et la séparation gravimétrique et la séparation magnétique.
- La séparation gravimétrique indispensable pour la valorisation de grès (valorisation de la silice) comme montre notre résultats de cette recherche (présente une grande amélioration de la qualité du minerai (élimination une grand part des argiles, une part de fer, de Ti_2O et d'autres impuretés).
- La séparation magnétique à haut intensité aussi c'est très important pour l'enrichissement du grès et l'élimination des impuretés surtout le fer Fe_2O_3 a condition de respecté les règle de cette procédé (un champ magnétique bien réglé, granulométrie), etc.
- L'application d'une séparation magnétique (haute intensité à sec) sur le grès permet de diminuer la teneur en oxyde de fer à 0.09 % : (90 ppm). La teneur en oxyde de calcium CaO est également abaissée, à moins de 50 ppm et Ti_2O à moins de 0.05% ; (50 ppm).
- La séparation magnétique à basse intensité ne donne aucun résultat (pas de séparation du minerai ferrifères).

- Selon la recherche bibliographique sur ce thème, la séparation par flottation donne des résultats efficaces de point de vue d'élimination des impuretés tel que le zircon (Zr_2), le rutile (TiO_2), anatase (TiO_2), pyrite (FeS_2).
 - Bien que les méthodes de traitement rejeté des rejets ces dernier influe sur l'environnement (les métaux lourds), et sur la santé des hommes « travailleurs » comme la poussière de la silice cristallisé provoque une maladie très dangereux qui la cancérogène et la pneumoconiose.
 - Il faut respecte les lutttes contre la poussière est les autre agents néfaste.
 - Il faut respecter la réglementation de gestion et de traitement des déchets solides ou liquides.
-

BIBLIOGRAPHIE ET WEBGRAPHIE DU CINQUIEMME CHAPITRE

- [1] : **BLAZY. Pierre, JOUSSEMET. Robert** : Publication du 10 mars 2005
- [2] : (**AFEEAB**) : Association française pour l'étude des eaux et Analyse des boues ; Généralités et analyse physique. Tome N°1, Paris; édition 1985.
- [3] : **A. J. Plumpton** -Le CRM à l'avant-garde en matière de concentration gravimétrique, -Bulletin D'Information Du Centre De Recherche Minérale; 1-4 Juin 1996.
- [4]: **B. A. Wills**. Mineral Processing Technology, 4^{ième} édition ed. Oxford: Pergamon Presse. 1988; 855p.
- [5]: **Pierre Blazy**. La valorisation des minerais. Paris: Presses Universitaires de France; 1970; 416 p.
- [6] : **Jean-Ren Michaud**. Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés. Document rédigé, 1994; N° de catalogue: En 40 450/1993F
- [7]: **C. B. Gill**. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 1991; 245 p.
- [8]: **R. S. Ramalho**, Introduction to Wastewater Treatment Processes. 2^{ième} édition New York Academic Press; 1983; pp (80-132)
- [9]: **GILLET. Gérard**. Séparation magnétique : Théorie et modélisation (Techniques de l'Ingénieur - Mars 2003/J3 220), pp (2-5)
- [10]: **GILLET. Gérard**. Séparation magnétique haute gradient (SMHG) et champ. (Techniques de l'Ingénieur, Novembre 2004).
- [11]: **CASTEEL. K**. Magnetic separation, States of flux.
-Parties I, 01/02/2001, p. 22 et 24.
-Partie II, 03/2002, p. 46 et 48.
- [12]: Ressources naturelles Canada ; silice et quartz.
- [13]: l'exposition à la silice et ses effets sur la santé (Fubini 1998).
- [14]: Traitement et valorisation des effluents liquides industriels. Groupe français de génie des procédés et Technique et documentation Lavoisier. 1993.
- [15]: **R. Giordano et S. Costantini**. Some aspects related to the presence of aluminium in waters. 1993.
- [16]: Etude d'impact environnemental (expert, néant)
- [17] : Matières en suspension dans l'eau
- source AFNOR, NF T 90-105, Juin 78
- Cours de Chimie (tome II - métaux)
- H.Pariselle aux éditions Masson – 1956

Annexe 1.

- Historique de verrerie « AFRICAVER »

AFRICAVER SPA est une filiale du groupe verrier ENAVA. Elle a pris naissance en 1996 à la faveur de la restructuration opérée au sein de ce groupe industriel multidisciplinaire. Cependant, elle existe depuis 1986 en tant que verrerie sous le nom de la maison mère ENAVA. Le siège social ainsi que les unités de production sont basées à seulement 5 km du grand port international de Djen Djen et à 2.5km de l'aéroport régional FERHAT Abbas, tous deux situés à 15 mn de la ville côtière de Jijel. C'est une société par actions dotée d'une direction générale autonome et d'un conseil d'administration. La gestion interne est décentralisée et est confiée à six directions différents, Unité matières premières, Unité verre de sécurité, Unité verre coulé, Finance, Ressource humaines, Logistique et maintenance.

Annexe 2.

- Composition minéralo-pétrographique du grès

Muscovite : minéral de la famille des phyllosilicates, espèce principal de mica clair, riche en aluminium. Formule : $KAl_2Si_3AlO_{10}-(FOH)_2$. Constituant des roches plutoniques acides, granites et pegmatites, associé au quartz, feldspath et biotite. Couleur gris, argenté ou translucide. Variété : séricite, à l'aspect de stéatite, fuchsite (écailles de couleur verte), zinnwaldite (contient du lithium et du fer), lépidolite (contient du lithium), phlogopite (contient du fluor).

Tourmaline : minéraux renfermant de la silice, du fluor, du bore et d'autres éléments (magnésium, aluminium, fer, sodium, lithium). Couleur variée. Se trouve dans les granites et pegmatites, plus rarement dans les roches métamorphiques (calcaires, schistes, gneiss).

Volcanique : roches éruptives provenant de l'effusion ou de l'épanchement en surface, de roches magmatiques. Roches de structure microlithique, ou vitreuse.

Biotite : minéral de la famille des phyllosilicates, espèce principale du mica noir, contenant du potassium, du magnésium et du fer. Formule : $K(MgFeMn)_3Si_3AlO_{10}-(OH)_2$. Couleur brun à noir. Un des principaux composants des granites, du gneiss et des micaschistes. Se transforme par altération en chlorite.

Tableau 22. Composition minéralo-péetrographique

1= lame minces ; 2= analyse chimique ; 3= RX ; 4= poids volumique.

5= résistance à compression.

Echan/profon	Caractéristiques macroscopiques de la roche	1	2	3	4	5
8/71.0	Grès gris clair, à grains grossiers, compact	x	x	x		
9/26.8	Grès marron, à grain grossiers	x				
9/44	Grès de couleur jaunâtre, à grains fins, compacts, légèrement limonitisé	x	x			
9/62.3	Grès gris clair, à grains moyens, compacts	x	x			
9/68.6	Grès gris, fissuré, silicifié	x				
9/76.8	Grès gris, à grains grossiers compact				x	x
9/90.3	Grès gris foncé à perlites et à pyrite	x	x	x		
10/6.0	Grès blancs sale à grains fins compact frais.	x	x			
10/20.0	Grès blancs sale à grains fins compact frais.				x	x
10/27.0	Grès blancs sale à grains fins compact frais (légèrement taché de limonite)	x	x			
10/49.25	Grès grisâtres à grains fins compact frais.	x	x			
1/10.0	Grès de couleur jaunâtre à grains fins compact				x	x
1/16.4	Grès de couleur jaunâtre à grains fins compact.				x	x
2/7.0	Marne argileuse, schisteuse, noire	x				
2/23.8	Grès gris clair compacts à grains fins non souillé				x	
2/31.	Grès gris clair compacts légèrement graveleux frais.	x				
3/23.0	Grès gris clair compacts frais non souillé.	x	x	x		
3/27.0	Grès gris clair compacts frais non souillé.				x	
3/38.0	Grès argileux gris foncé.	x	x	x		
4/7.0	Grès blanc jaunâtre compact non souillé.	x				
4/16.2	Grès blanc jaunâtre compact non souillé.				x	x
4/34.0	Grès blanc sale compact non souillé	x	x	x		
4/67.6	Grès grisâtres compact à grains grossiers.	x	x	x		
5/3.5	Grès blancs jaunâtres compacts à grains fins.	x				
5/13.5	Grès blancs jaunâtres compacts à grains fins.	x	x			
5/28.0	Grès blancs jaunâtres compacts peu cimenté légèrement limonitisé	x	x			
6/35	Grès blancs sales compacte à grains fins frais.	x	x	x		
6/62.4	Grès gris clair compacts à grains grossiers limonitisé.	x	x	x		
6/69.5	Grès gris clair compacts homogènes				x	
6/80.3	Grès gris clair compacts à grains fins.	x	x	x		
7/43.6	Aleurolite calcaire à grains très fins.	x				
7/47.5	Grès gris compacts à grains fins.				x	x
8/12.9	Grès blancs sales à grains fins compact légèrement limonitisé.	x	x	x		

Annexe 4

1. Rapport d'essai

Tableau 23. Rapport d'essai

Commande	L.B :15/10
Nature et référence de l'échantillon	mineral
Date de réception	13/10/10
Date de première l'essai	27/01/10
Nature des essais	Analyse des éléments majeurs par Fluorescence X
Deuxième essai	24/04/10

- Modalités de l'essai :

Appareillage utilisé : spectromètre PW 1480 Philips.

Seuil de détection de l'ordre de 0.05%.

Méthode utilise par le laboratoire (certifié ISO 9000-2001 par l'organisme certificateur VINCOTTE - international vin

Fusion avec mélange (Tétra borate de lithium), puis passage au spectromètre.

Etalonnage par des standards internationaux.

2. Mode opératoire d'analyse chimique des matières premières

1. Le sable du grès (sable traité).

1.1. Mode opératoire

- Opérer sur un échantillon représentatif du lot de la matière à analyser.
- Homogénéiser, diviser de l'échantillon.
- Prélever par quartage 50 à 100 g de matière à analyser.
- Séchage de la matière à analyser par étuvage à 100 - 105°C.
- Broyage de la matière: prélever par quartage 20- 40 g de matière sèche et broyer dans un broyeur, conserver le produit broyé dans un flacon.
- Mettre le flacon et son contenu dans un dessiccateur.

2. Perte au feu à 1000°C

2.1. Mode opératoire

- Peser dans une capsule de platine tarée 10 g de matière sèche.
- Mettre la capsule et son contenu dans le four à moufle.

- Elever progressivement la température jusqu'à 1000 °C et laisser la capsule et son contenu à cette température pendant une heure.
- Peser après refroidissement dans un dessiccateur.

Expression des résultats

Soit :

P : La perte de masse en "g" du contenu de la capsule perte au feu, exprimée en % en masse est donnée par l'expression :

$$P.A.F = 10.P$$

3. Détermination de l'oxyde de silicium (SiO₂) (la pureté).

3.1. Mode opératoire

- Dans une capsule de platine tarée, peser exactement 1g d'échantillon.
- Humecter avec de l'eau distillée.
- Ajouter 25 ml de HF et 1 ml de H₂SO₄.
- Evaporer sur bain de sable jusqu'à sec.
- Chasser les vapeurs de H₂SO₄ sur flamme de bruleur bunsen.
- Porter au four à moufle à 1000 °C pendant une heure.
- Peser après refroidissement dans un dessiccateur.

Expression des résultats

Soit :

P : la perte de masse en "g".

La pureté de la silice, exprimée en % en masse est donnée par l'expression:

$$SiO_2 \% = 100 P - P.A.F.$$

4. Dosage de l'oxyde d'aluminium (AL₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃)

4.1. Mode opératoire

- Ajouter au résidu sec quelques grammes de KHSO₄ et chauffer sur brûleur bunsen jusqu'à fusion et obtention d'une masse limpide. Laisser refroidir.
- Transvaser le culot de fusion dans un bécher de 350 ml, laver la capsule avec de l'eau distillée bouillante.
- Ajouter 5 ml de HCl concentré et étendre à environ 50 ml avec eau distillée.
- Porter la solution à douce ébullition jusqu'à dissolution complète.

- Laisser refroidir et transvaser la solution dans une fiole jaugée de 500 ml, compléter au volume avec de l'eau distillée.
- La solution obtenue constitue la solution "I" (1g/500 ml) qui servira pour le dosage de l'oxyde d'aluminium et l'oxyde de Fer.

5. Dosage de l'oxyde d'aluminium

5.1. Mode opératoire

- Introduire la prise d'essai 5 ml (à partir de la solution "I") dans une fiole jaugée de 250 ml.
- Ajouter 1 ml de solution de Fer et 3 gouttes de rouge de méthyle.
- Neutraliser avec de la solution NaOH (10 g/l) jusqu'à virage au jaune réacidifier immédiatement par ajout de 5 ml de HCl au 1/50.
- Ajouter 10 ml d'acide ascorbique (préparer au moment de l'emploi) et laisser la réduction s'opérer pendant 20 minutes.
- Ajouter ensuite dans l'ordre 50 ml de solution tampon acétique (PH= 5,5 env) et exactement 10 ml de Chromazurol "S".
- Ajuster à 250 ml avec de l'eau distillée et homogénéiser par retournements alternés de la fiole bouchée.
- Laisser la coloration se développer pendant 10 minutes.

5.2. Essai à blanc (essai d'étalonnage)

- Mode opératoire

- Effectuer un essai à blanc en mettant en œuvre toutes les modalités opératoires du dosage.
- Mesurer la densité optique de la solution au spectrophotomètre réglé à la longueur d'onde de 552 nm et au coefficient 0.30 en utilisant la cuve de 4 cm et par rapport au zéro de l'essai à blanc.

Expression des résultats

Soit:

C : lecture de la concentration en mg de 5 ml.

P: La prise d'essai diluée dans 500ml (P= 1g).

La concentration est exprimée en % en masse d'alumine est donnée par l'expression:

$$\text{Al}_2\text{O}_3\% = \frac{C}{P} \cdot 100$$

6. Dosage de l'oxyde de fer

6.1. Mode opératoire

- Prélever 10 ml de solution "I" et les transvaser dans une fiole jaugée de 100 ml.
- Introduire un morceau de papier rouge de Congo qui vire du rouge au bleu.
- Ajouter ensuite: -2ml de Chlorhydrate d'hydroxylamine, 2 ml d'orthophenantroline.
- Ajouter goutte à goutte de la solution tampon d'Acétate d' Ammonium jusqu'au virage de la couleur du papier rouge de Congo du bleu au rouge.
- Compléter au volume avec de l'eau distillée, homogénéiser et laisser la coloration se développer pendant 20 minutes.

6.2. Essai à blanc (essai d'étalonnage)

Mode opératoire

- Effectuer un essai à blanc on mettant on œuvre toutes les modalités opératoires du dosage.
- Mesurer la densité optique de la solution au spectrophotomètre réglé à la longueur d'onde 510 nm et au coefficient 0.78.
- Faire la mesure par rapport au zéro de l'essai à blanc et en utilisant la cuve 4cm.

Expression des résultats Soit :

C : Lecture de la concentration en « mg » de 10ml.

P : La prise d'essai diluée dans 500ml (P= 1g).

La teneur en fer exprimée en % en masse de Fe_2O_3 , est donnée par l'expression :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \% = \frac{C}{P} \cdot 100$$

7. Détermination des minéraux lourds

7.1. Mode opératoire

- Opérer sur un échantillon copieux de la matière à contrôler (1 à 3 Kg).
- Homogénéiser cet échantillon.
- Diviser l'échantillon et prendre environ 200 g.
- Sécher ces 200 g dans l'étuve à 105 °C pendant une heure.
- Prélever par quartage la quantité nécessaire pour l'analyse en général 100 g.
- Séparer sur l'échantillon prélevé par quartage dans une ampoule à décantation pour cela

remplir l'ampoule au $\frac{3}{4}$ de son volume avec le bromoforme CBr_3H (liquide ($d=2.9$)) consiste à séparer les minéraux lourds ($d > 2.9$)).

- Verser l'échantillon prélevé dans l'ampoule par petite quantité à la fois.
- Agiter à l'aide d'une baquette en verre puis laisser décanter.
- Recueillir les minéraux lourds sur un papier filtre taré posé sur un entonnoir.
- Rincer les minéraux recueillis à l'alcool puis à l'éther.
- Sécher le papier filtre et son contenu dans une étuve.
- Peser après refroidissement.

Expression des resultants, Soit:

m: la masse de la fraction lourde.

M : la masse de l'échantillon avant séparation.

La masse des minéraux lourds, exprimée en % est donnée par l'expression :

$$\text{minéraux lourds \%} = \frac{m}{M} \cdot 100$$

3. Effets de la poussière de silice cristalline respirable sur la santé

L'exposition des travailleurs à de la silice cristalline pure est rare. La poussière respirée sur les lieux de travail est habituellement composée d'un mélange de silice cristalline et d'autres matériaux.

La réaction d'un individu dépend de :

- la nature (taille des particules et chimie de surface) et de la teneur en silice cristalline de la poussière,
- l'importance et la nature de l'exposition personnelle (durée, fréquence et intensité, pouvant être influencées par les méthodes de travail),
- caractéristiques physiologiques individuelles,
- tabagisme.

3.1. La silicose

La silicose est un risque pour la santé généralement reconnu qui a été historiquement associé à l'inhalation de poussières contenant de la silice (Fubini 1998).

La silicose est l'une des formes de pneumoconiose les plus courantes. Elle est une fibrose nodulaire progressive causée par le dépôt dans les poumons de fines particules de silice cristalline alvéolaire. Elle provoque une cicatrisation des parties internes des poumons

pouvant entraîner des difficultés respiratoires et, dans certains cas, la mort. Les particules les plus grosses (non inhalables) se fixent plus facilement dans les principales voies aériennes du système respiratoire et peuvent être éliminées par l'action des muqueuses (HSE 1998).

La silicose est une des plus anciennes maladies professionnelles connues au monde, et est causée par l'inhalation de silice cristalline alvéolaire (Stacey P. 2005). La gravité de la silicose peut varier de façon importante, allant de la « *silicose simple* » à la « *fibrose massive progressive* ». Généralement, trois types de silicose sont décrits dans la littérature spécialisée (INRS 1997):

- la silicose aiguë résulte de l'exposition massive à la silice cristalline alvéolaire sur une courte période (5 ans). L'insuffisance respiratoire puis le décès surviennent en général dès les premiers mois ;
 - la silicose accélérée peut se développer après 5 à 10 ans d'une exposition à des niveaux élevés de silice cristalline alvéolaire;
 - la silicose chronique est souvent décrite comme le résultat d'une exposition à des niveaux plus faibles à la silice cristalline alvéolaire sur des périodes plus longues (au-delà de dix ans).
- Le nombre de cas de silicose à venir peut être réduit en mettant en place des mesures appropriées de réduction de l'exposition aux poussières contenant de la silice. De telles mesures incluent l'amélioration des pratiques au travail, des mesures techniques, le port d'équipements individuels de protection respiratoire et des programmes de formation.

3.2. La silice et le risque de cancer

En 1997, un groupe de travail du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), qui n'a aucun pouvoir réglementaire au niveau de l'Union européenne mais fait autorité dans la recherche sur le cancer, a conclu sur la base d'études bibliographiques scientifiques, que la silice cristalline alvéolaire inhalée sur les lieux de travail est cancérigène pour l'homme.

En faisant cette évaluation, l'équipe du CIRC a également noté que la cancérigénicité n'était pas détectée dans toutes les circonstances étudiées en milieu industriel et qu'elle pouvait dépendre de caractéristiques inhérentes à la silice cristalline ou de facteurs externes affectant son activité biologique.

Professionnelle (SCOEL) a été adoptée en juin 2003. Les principales conclusions étaient les suivantes :

« Le principal effet sur l'homme de l'inhalation de poussière de silice alvéolaire est la silicose. Il y a suffisamment d'information pour conclure que le risque relatif de cancer du poumon est augmenté chez les personnes atteintes de silicose (et apparemment, pas chez les

travailleurs non silicosés exposés aux poussières de silice dans les carrières et l'industrie céramique). Par conséquent, prévenir l'apparition de la silicose réduira aussi le risque de cancer. Comme on ne peut identifier de seuil net de déclenchement de la silicose, toute réduction de l'exposition réduira le risque de silicose ».

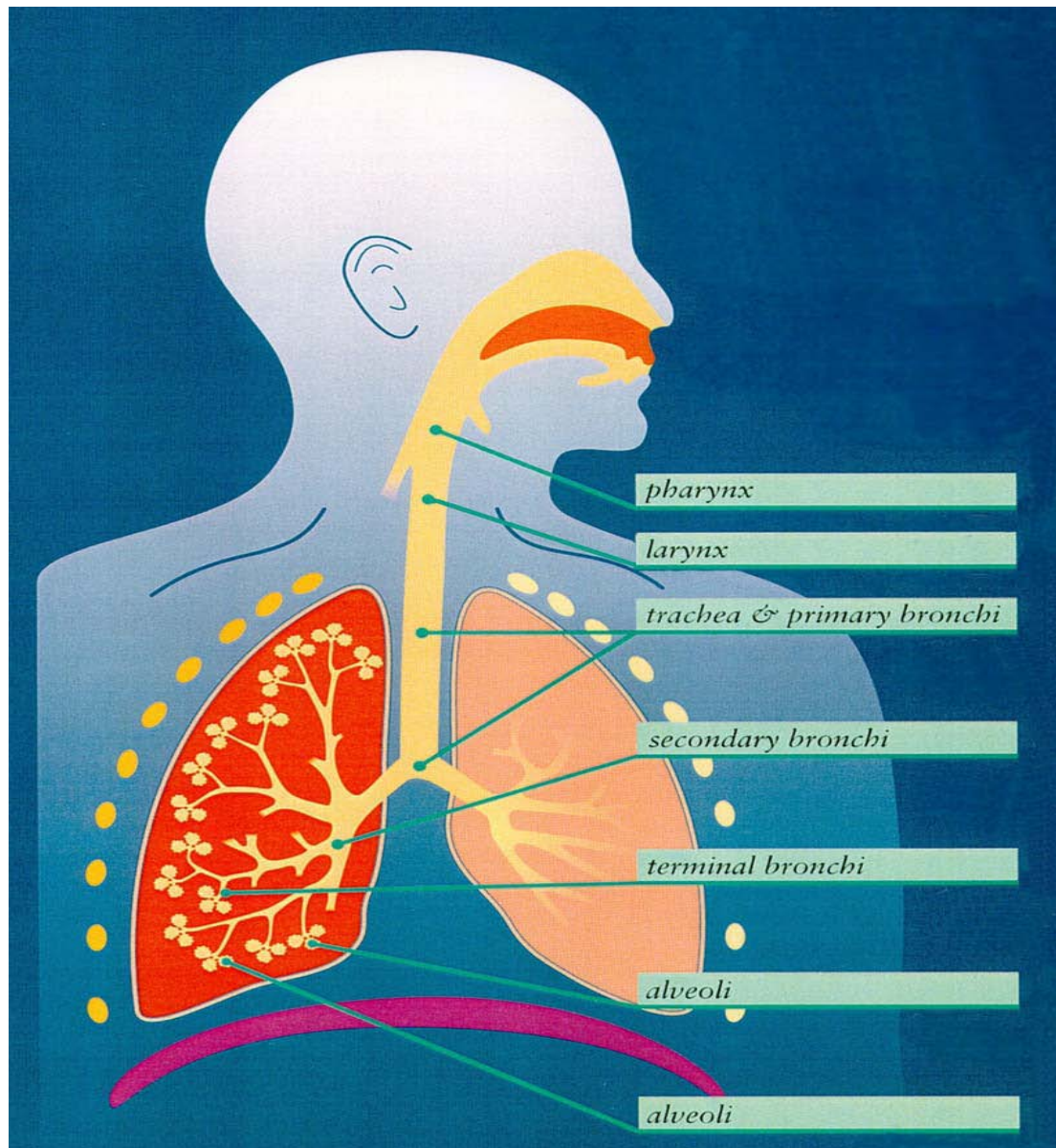


Figure 35. Différentes régions pulmonaires concernées

3.3. Autres effets sur la santé

Dans la littérature scientifique, certaines publications citent un rapport possible entre l'exposition à la silice et la sclérodermie (une maladie auto-immune), de même qu'un accroissement du risque de maladie rénale.

On peut trouver de plus amples informations à ce sujet dans la littérature spécialisée sur les relations entre l'exposition à la silice et ses effets sur la santé (Fubini 1998).