

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT DES MINES

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Mines

Option : Valorisation et Gestion des Ressources Minérales

Caractérisation physico-chimique et enrichissement des
matières premières feldspathiques d'Ain-Barbar-Annaba :
applications aux secteurs céramiques et verreries

Candidat: CHAIB Abdeslam

Directeur de thèse : Pr BOUNOUALA Mohamed

Thèse soutenue le 02/07/2017

Devant le Jury :

Président :	IDRES Abdelaziz	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
Rapporteur :	BOUNOUALA Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
Examineurs:	CETTIBI Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
	OULD HAMOU Malek	M.C.A	ENP EL- Harrach, Alger
	DERAMCHI Karima	M.C.A	ENP EL- Harrach, Alger
	BORDJIBA Tarik	M.C.A	Université -8 mai 1945- Guelma

Année : 2017

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail de thèse de doctorat en mines - valorisation des ressources minérales à ma grande famille :

- A mes chers parents
 - A ma femme et ma chère fille Anfel
 - A mes frères et sœurs
 - Et à tous mes amis
-

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et la foi et de m'avoir permis d'arriver à ce stade de finalisation de ma thèse de doctorat en mines option valorisation des ressources minérales.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement le professeur BOUNOUALA Mohamed de l'Université Badji Mokhtar-Annaba qui a assuré ma direction scientifique durant six (06) années; Je le remercie vivement pour ses 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'exprime tous mes remerciements et ma reconnaissance à l'ensemble des membres de jury de soutenance qui m'ont honoré par leur présence dans cette soutenance et d'avoir accepté l'examen de ce travail.

- Pr IDRES Abdelaziz de l'Université Badji Mokhtar-Annaba;
- Pr CHETTIBI Mohamed de l'Université Badji Mokhtar-Annaba;
- Dr OULD HAMOU Malek de l'ENP EL- Harrach, Alger;
- Dr DERAMCHI Karima de l'ENP EL- Harrach, Alger;
- Dr BORDJIBA Tarik de l'Université -8 mai 1945- Guelma,

Je remercie tous les enseignants chercheurs que j'ai rencontrés pendant mon stage à l'Université des mines, Dnipropetrovsk, Ukraine en particulier Pr MOSTIKA Yuriy, Pr RUDAKOV Dimetry et KLIMKINA Iryna pour les nombreuses discussions fructueuses que j'ai pu avoir avec eux m'ont beaucoup impressionnés, ainsi que le candidat PhD BEN SELHOUB Aissa, Dnipropetrovsk Etat Université Agronomique et Economique, Ukraine.

Mes vifs remerciements à l'équipe du laboratoire de ressources Minérales et environnement de l'université d'El-Manar- Tunis en particulier Pr CHAABANI Fredj, Dr SEBEI Abdelaziz, et Dr ABDELMALEK Chiraz de m'avoir facilité la tâche pour réaliser des tests de caractérisation physico-chimique d'un échantillon de feldspath.

Je tiens à remercier mes collègues enseignants Dr NEFIS Mouloud et Mr AYADEN Brahim, Dr YAHIAOUI Sami, Dr BOUTRID Aziz et Dr BOUABDALLAH Soufiane.

II

RESUME

Les feldspaths sont répandus dans l'écorce terrestre mais seuls les feldspaths potassiques et sodiques sont très recherchés dans l'industrie céramique et verrière. Pour qu'ils soient utilisables, ces matériaux doivent contenir très peu d'impuretés nocives d'oxyde de fer et surtout de silice.

La carrière d'Ain Barbar exploite la matière feldspathique (feldspath potassique) de teneurs moyennes respectives 76.21 SiO₂; 13.39% Al₂O₃; 8.40% K₂O; 0.79 % Fe₂O₃ et 0.29% Na₂O. Toutefois, on constate un taux très élevé en quartz ce qui diminue la valeur du produit marchand et une teneur élevée en oxyde de fer ce qui donne au produit fabriqué des aspects de coloration le rendant impropre à la commercialisation.

A cet effet, une caractérisation minéralogique et chimique a été réalisée sur des échantillons prélevés du site d'extraction de la substance utile.

Des échantillons soumis à des tests de pré-concentration granulométrique (PCG), une séparation magnétique à haute intensité (SMHI) suivie d'un enrichissement par flottation (FLOTT) avec un nouveau modificateur révèlent des résultats significatifs en teneur et en récupération de l'orthose.

Les concentrés obtenus par flottation offrent des teneurs moyennes de 15.16 % Al₂O₃, 70.40 % SiO₂, 0.03% Fe₂O₃; 13.51% K₂O et 0.14% Na₂O soit une récupération de 90% d'orthose contre 8% de rejet de quartz.

Les résultats obtenus sont très notables en qualité du produit enrichi pour son utilisation industrielle en verres et en céramiques.

Mots clés: Annaba, Ain Barbar, feldspath, séparation magnétique, flottation, verre, céramiques

ملخص

إن الفلسبار من المواد المعدنية التي توجد بكثرة في القشرة الأرضية، ولكن البوتاسيوم فلسبار والصوديوم فلسبار هما الأكثر استعمالاً وخاصة في صناعة الخزف والزجاج، ولكي تكون صالحة للاستعمال، يجب أن تكون تلك المواد تحتوي على عدد قليل جداً من الشوائب الضارة من الحديد وخاصة السيليكات.

محجرة عين بربر تستغل المادة الأولية (الفلسبار الغني البوتاسيوم) والتي تحتوي بنسب متوسطة على SiO_2 76.21%، Al_2O_3 13.39%، K_2O 8.40%، Fe_2O_3 0.79% و 0.29% Na_2O ومع ذلك، هناك نسبة الكوارتز عالية جداً مما يقلل من قيمة المنتج في التسويق كما أن نسبة الحديد عالية مما يعطي المنتج النهائي (الزجاج) عند تصنيعها جوانب التلويين مما يجعلها غير قابلة للتسويق.

لهذا الغرض تم إجراء دراسة الخصائص المعدنية والكيميائية والتي أجريت على عينات أخذت من موقع استخراج المادة الأولية إضافة إلى دراسة مرجعية عميقة بشأن القضية المشار إليها أعلاه.

الاختبارات التجريبية الأولية والفصل المغناطيسي تليها تجارب فيزيائية وكيميائية (تركيز أو إثراء بطريقة التعويم) هذه المعالجة أعطت نتائج مقبولة ومشجعة لصناعة الخزف والزجاج ومنتج ذا جودة عالية يحتوي على SiO_2 70.40%، Al_2O_3 15.16%، Fe_2O_3 0.03%، K_2O 13.51% و Na_2O 0.14%، والتي تتطابق مع 90% أورثوكلاز وما يقارب 8% من الكوارتز.

كلمات المفتاح: عنابة، عين بربر، feldspath بوتاسيك، الفصل المغناطيسي و التعويم، الزجاج، الخزف

ABSTRACT

Feldspars are common within the earth's crust, but only the potassium and sodium feldspars are highly sought in the ceramic and glass industries. To be utilized, these materials must contain very little harmful impurities especially iron and silica.

The Ain Barbar quarry exploits the feldspar material (potassium feldspar) with respective average grades of 76.21% SiO₂; 13.39% Al₂O₃; 8.40% K₂O; 0.79 % Fe₂O₃ and 0.29% Na₂O. However, there is a very high rate of quartz which decreases the value merchant product and a high iron content which gives to the product coloring aspects making it unmarketable.

For this purpose a mineralogical and chemical characterization were performed on samples obtained from site extraction of the useful substances with a deep bibliographic study about this research.

Pre-concentration grain size test and magnetic separation were followed by a physico-chemical concentration (flotation) to provide a valuable quality product including 15.16 % Al₂O₃, 70.40 % SiO₂, 0.03% Fe₂O₃; 13.51% K₂O and 0.14% Na₂O corresponding almost a 90% of the orthoclase and 8% of the quartz, which is acceptable for ceramists.

Keywords: Annaba, Ain Barbar, feldspar, magnetic separation, flotation, glass, ceramics

TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	I
Remerciements	II
Résumé.....	III
ملخص	IV
Abstract.....	V
Table des matières	VI
Abréviations et symboles	X
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I. APPRECIATION ET ANALYSE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES ET MINIERES DU GISEMENT DE FELDSPATH D'AIN- BARBAR	
1.2. Aperçu géologique régional.....	3
1.2.1. Formations métamorphiques	3
1.2.1.1. Massif de l'Edough.....	3
1.2.1.2. Domaine des Flyschs	4
1.2.1.2.1. Flyschs Mauritanien	4
1.2.1.2.2. Flyschs Massyliens	5
1.2.2. Nappe Numidienne.....	5
1.2.3. Quaternaire.....	5
1.2.3.1. Pléistocène inférieur	5
1.2.3.1. Pléistocène moyenne	6
1.2.3.2. Pléistocène supérieur.....	6
1.3. Cadre géologique local.....	7
1.3.1. Description stratigraphique et lithologique.....	7
1.3.2. Esquisse structurale et tectonique.....	8
1.3.3. Roches Magmatique.....	8
1.3.4. Localisation géologique du site d'étude.....	10
1.3.5. Situation géographique d'Ain Barbar	11
1.4. Géologie de gisement d'Ain Barbar.....	11
1.4.1. Flysch sénoniens.....	12
1.4.2. Cornéennes albitiques.....	12
1.4.3. Intrusions subvolcaniques.....	12
1.5. Calcul des réserves de gisement d'Ain Barbar.....	14
1.5.1. Réserves géologique.....	14
1.5.2. Réserves exploitable.....	16

VI

1.6. Généralités sur la production minière en Algérie.....	16
Chapitre II. INTERET DE LA MATIERE PREMIERE FELDSPATHIQUE COMME AJOUT DANS L'INDUSTRIE CERAMIQUE ET VERRIERE	
2.1. Domaines d'utilisation de feldspath.....	20
2.1.1. Utilisation de feldspath dans le secteur de céramique.....	21
2.1.2. Utilisation de feldspath dans le secteur de verre.....	21
2.1.3. Utilisation de feldspath comme charges.....	22
2.1.4. Utilisation de feldspath dans les émaux et Frittes.....	22
2.2. Procédé de fabrication de verre et céramique.....	22
2.2.1. Fabrication des verres.....	22
2.2.1.1. Composition du verre.....	22
2.2.1.2. Propriétés physiques	24
2.2.1.3. Propriétés thermiques	25
2.2.1.4. Propriétés chimiques	25
2.2.1.5. État physique du verre	25
2.2.1.6. Opérations de l'élaboration du verre	26
2.2.2. Fabrication des céramiques.....	29
2.2.2.1. Céramiques feldspathiques : le « modèle » des céramiques dentaires.....	30
2.2.2.2. Nouvelles céramiques feldspathiques.....	31
2.2.2.3. Céramique dentaire	33
2.2.2.4. Céramiques techniques	35
Chapitre III. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU MINERAI DE FELDSPATH D'AIN- BARBAR-ANNABA	
3.1. Introduction.....	37
3.2. Echantillonnage.....	37
3.3. Observation macroscopique	39
3.4. Préparation des échantillons pour analyses minéralogiques et chimiques.....	40
3.5. Analyse granulochimiques.....	40
3.5.1. Analyse granulométrique du feldspath.....	41
3.5.2. Analyse chimiques	43
3.6. Analyse minéralogique.....	47
3.6.1. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX).....	47
3.6.2. Analyse microscopique	50
3.7. Calculs normatifs selon la méthode CIPW.....	51
3.7.1. Evaluation des proportions minéralogiques de minerai de feldspath.....	51
3.7.2. Principe d'un calcul normatif.....	51
Chapitre IV. ANALYSE DE LA LITTERATURE SCIENTIFIQUE SUR L'ENRICHISSEMENT DES MATIERES FELDSPATHIQUES	
4.1. Séparation magnétique.....	54

VII

4.1.1. Aspect théorique de la séparation magnétique	55
4.1.1.1. Notion du champ magnétique	55
4.1.1.2. Classification des substances minérales.....	55
4.1.1.3. Action des forces magnétiques et mécaniques	57
4.1.2. Aspect pratique de la séparation magnétique	59
4.1.2.1. Matrice d'extraction.....	59
4.1.2.1.1. Classification des séparateurs	60
4.1.2.1.2. Séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) en voie sèche.....	61
4.1.2.1.3. Séparateurs travaillant par extraction.....	61
4.1.2.1.4. Séparateurs travaillant par déviation.....	62
4.2. Séparation par la flottation	63
4.2.1. Définition et principe.....	63
4.2.2. Variables importantes de la flottation.....	65
4.2.3. Angle de contact.....	66
4.2.4. Potentiel de surface et charge superficielle.....	67
4.2.5. Réactifs de flottation.....	69
4.2.5.1. Collecteurs.....	69
4.2.5.2. Moussants	70
4.2.5.3. Déprimant.....	71
4.2.5.4. Activant.....	71
4.2.6. Paramètres affectant la flottation	72
4.2.6.1. Longueur de la chaîne des surfactants.....	72
4.2.6.2. Concentration des surfactants.....	72
4.2.6.3. pH.....	72
4.2.6.4. Temps de résidence de la pulpe.....	73
4.2.6.5. Vitesse du gaz (vitesse d'agitation).....	73
4.2.6.6. Taille des particules.....	73
4.2.6.7. Taille des bulles.....	73
4.3. Revue de la littérature spécifique a la flottation des silicates et tectosilicates.....	74
4.3.1. Equilibres des surfaces des silicates en milieu aqueux.....	74
4.3.2. Les silicates.....	74
4.3.3. Flottation cationique des silicates et tectosilicates.....	75
4.3.4. Présence d'ions Ca^{+2} dans la pulpe : cas de la surface des silicates.....	76
4.3.5. Effet de Fe^{+3} dans la pulpe sur la flottation des silicates et tectosilicates.....	76
4.3.6. Effet synergique d'un mélange de tensioactif (collecteurs) ionique et non ionique.....	77
4.3.7. Mode d'adsorption d'un collecteur cationique sur la surface minérale des silicates.....	78
4.4. Historique de la séparation du feldspath par flottation.....	79
4.5. Synthèse des études réalisées sur l'enrichissement de feldspath	81
4.4.1. Enrichissement des feldspaths a l'échelle mondiale	82

VIII

4.4.2. Enrichissement des feldspaths a l'échelle locale (Ain Barbar).....	83
Chapitre V. COMPORTEMENT DES MATIERES FELDSPATHIQUES D'AIN BARBAR A LA SEPARATION PHYSIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE	
5.1. Essais expérimentaux.....	85
5.2. Etude de la libération de feldspath d'Ain Barba.....	85
5.3. Déschlammage des particules fine.....	86
5.4. Essais de séparation magnétique a haute intensité(SMHI).....	86
5.5. Essais de séparation par flottation (FLOTT).....	88
5.5.1. Les raisons justifiants la flottation.....	88
5.5.2. Critères d'évaluation des résultats de flottation	88
5.5.2.1. Rendement pondéral du concentré	88
5.5.2.2. Rendement de récupération du métal	88
5.5.2.3. Taux de concentration	89
5.5.3. Description de la cellule de flottation.....	89
5.5.4. Protocole de séparation par flottation.....	90
5.6. Résultats et discussions.....	91
5.6.1. Effet de l'intensité du courant sur l'efficacité de séparation magnétique du feldspath d'Ain Barbar.....	91
5.6.2. Effet du pH pour la séparation du k-feldspath (orthose).....	91
5.6.3. Effet de la quantité d'acide fluorhydrique ou bromhydrique sur la séparation de l'orthoclaste avec pH = 1,8: 2 et 150 g/t de Diamine.....	93
5.6.4. Comparaison des résultats de flottation de l'orthose obtenus avec des acides fluorhydrique ou bromhydrique	95
5.6.5. Séparation d'orthose d'Ain Barbar par séparation magnétique suivi par flottation.....	95
5.7. Conclusion.....	97
Chapitre VI. ANALYSE DE L'IMPACT DES PROCEDES D'EXPLOITATION ET D'ENRICHISSEMENT DE FELDSPATH D'AIN BARBAR SUR L'ENVIRONNEMENT	
6.1. Introduction.....	98
6.2. Impacts des travaux d'exploitation de feldspath sur l'environnement	99
6.2.1. Impact sur le milieu physique.....	99
6.2.2. Impact sur l'environnement et le cadre de vie	102
6.3. Impacts des travaux d'enrichissement de feldspath d'Ain Barbar sur l'environnement.....	103
Conclusion générale et perspectives	106
Références bibliographiques.....	108
Annexe.....	114

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et de L'Environnement	LAVAMINE
Température de transition vitreuse du verre (°C)	T_g
Température (°C)	T
Energie libre	ΔG
Diffraction des rayons X	DRX
Fluorescence des rayons X	FX
Tension superficielle solide-gaz	γ_{SG}
Solide, Gaz et Liquide	S, G, L
Tension superficielle solide-liquide	γ_{SL}
Tension superficielle liquide-gaz	γ_{LG}
Point de charge zéro ou nulle	PCZ, PCN
Impuretés en oxydes de fer éliminées du feldspath (%)	E
Potentiel de Freundlich ou potentiel (Zêta)	V
séparation magnétique à haute intensité	MSHI
Angle de contact (°)	θ
Rendement pondéral du concentré	γ
Rendement de récupération	ζ
Number de Reynolds	R_e
diameter des bulles	d_b
diamètre des particules minérales	d_p
Rayon du tambour (ou cylindre) de séparation	R
Rayon de la particule	R_p
vitesse angulaire de la particule	V_p, V_t
Vitesse angulaire de la particule	W_p
Accélération due à la pesanteur	g
probabilité de collision	C
Masse volumiques de la particule et du fluide	ρ_p, ρ_f
Viscosité dynamique du fluide	H
Le champ magnétique	H
Force d'attraction magnétique	F_m
Force de gravité	F_g
La force d'entraînement par le fluide	F_f
Force de centrifuge	F_c
Taux de concentration	Tc
Teneur du métal dans le rejet	θ
Masse du concentré	Qc
Teneur du métal dans le concentré	β
Teneur du métal dans l'alimentation	α
hydroxyde de sodium	NaOH
Acide sulfurique	H₂SO₄
Acide bromhydrique	HBr
Acide fluorhydrique	HF

LISTES DES FIGURES

Figure 01. Situation géographique et esquisse géologique régionale de la wilaya d'Annaba.....	07
Figure 02. Colonne lithologique schématique du massif de l'Edough.....	09
Figure 03. Localisation géologique du gisement feldspathique d'Ain Barbar.....	10
Figure 04. Situation géographique d'Ain Barbar.....	11
Figure 05. Minéralisation polymétallique d'Ain Barbar.....	13
Figure 06. Carte géologique de gisement d'Ain Barbar.....	14
Figure 07. Carte des Potentialités Minières en Algérie (O.R.G.M).....	17
Figure 08. Système ternaire orthose ($KAlSi_3O_8$), albite ($NaAlSi_3O_8$) et anorthite ($CaAl_2Si_2O_8$)	20
Figure 09. Microphotographie en microscopie électronique à balayage d'un échantillon de céramique feldspathique à haute teneur en leucite.....	33
Figure 10. Microphotographie en microscopie électronique à balayage d'un échantillon de céramique alumineuse à haute teneur en particules cristallines et verre infiltré.....	33
Figure 11. Schéma synoptique d'élaboration des dents céramiques.....	34
Figure 12. Microstructure de la céramique dentaire montrant de fins cristaux de leucite sans micro-craquelures à l'interface cristaux verre.....	35
Figure 13. Une rotule de prothèse de hanche en céramique.....	36
Figure 14. Protocole de caractérisation du minerai de feldspath d'Ain Barbar.....	37
Figure 15. Tas représente le lieu de prélèvement des échantillons.....	38
Figure 16. Taille des échantillons	39
Figure 17. Sélection visuelle d'après la couleur après concassage grossier	39
Figure 18. Opération de concassage.....	40
Figure 19. Opération de quartage et homogénéisation.....	40
Figure 20. Courbe granulométrique d'un échantillon de feldspath.....	43
Figure 21. Histogramme de la distribution de la taille des particules.....	44
Figure 22. Evolution de SiO_2 dans les tranches granulométriques.....	45
Figure 23. Evolution de K_2O dans les tranches granulométriques.....	45
Figure 24. Evolution d' Al_2O_3 dans les tranches granulométriques.....	46
Figure 25. Evolution de Fe_2O_3 dans les tranches granulométriques.....	46
Figure 26. État des matériaux.....	47
Figure 27. Diffractomètre des rayons X.....	48
Figure 28. Spectre d'analysé par DRX d'un échantillon du feldspath brut	49
Figure 29. Observations des lames minces de feldspath au microscope métallographique.	50

XI

Figure 30. Schéma de principe de séparation magnétique.....	59
Figure 31. Séparateur magnétique à aimant céramique à haut champ.....	62
Figure 32. Approche holistique de la flottation	66
Figure 33. Angle de contact pour un système solide – liquide – gaz.....	67
Figure 34. Modèle de la double couche pour une particule électronégative.....	68
Figure 35. Structure du collecteur anionique hétéropolaire.....	69
Figure 36. Montre comment se présente le collecteur à la surface du minéral.....	70
Figure 37. Représente le mode d'action du moussant.....	71
Figure 38. Création des nouveaux sites après opération de broyage, (Alkan et al, 2005).....	75
Figure 39. Séparateur magnétique à haute intensité (électroaimant).....	87
Figure 40. Cellule mécanique de flottation « Denver ».....	89
Figure 41. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HF et (150 g/t Diamine).....	92
Figure 42. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HBr et (150 g/t Diamine).....	92
Figure 43. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HF et (150 g/t sulfonâtes de pétrole).....	92
Figure 44. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HBr et (150 g/t sulfonâtes de pétrole).....	92
Figure 45. Effet de la quantité d'HF sur la séparation de l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et 150 g/t de Diamine.....	94
Figure 46. Effet de la quantité d'HBr sur la séparation de l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et 150 g/t de Diamine.....	94
Figure 47. Effet de la quantité d'HF sur la séparation l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et (150 g/t sulfonâtes de pétrole).....	94
Figure 48. Effet de la quantité d'HBr sur la séparation l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et (150 g/t sulfonâtes de pétrole).....	94
Figure 49. Flow sheet proposé pour l'enrichissement de feldspath pottassique (orthoclase) d'Ain Barbar.....	96
Figure 50. Oxydation des sulfures et production du DMA.....	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01. Coordonnées UTM Nord Sahara Zone 32.....	10
Tableau 02. Calculs de réserves géologiques de gisement d'Ain Barbar.....	15
Tableau 03. Calculs des réserves exploitables.....	16
Tableau 04. Production totale des principaux minerais en Algérie	17
Tableau 05. Production mondiale par pays durant l'année 1998-2002 en tonne.....	18
Tableau 06. Processus de formation des silicates.....	27
Tableau 07. Résultats d'analyse granulométrique.....	42
Tableau 08. Composition chimique de différentes tranches granulométriques.....	43
Tableau 09. Analyse quantitative des fractions granulométriques du feldspath.....	49
Tableau 10. Composition minéralogique du minerai de feldspath.....	51
Tableau 11. Propriétés Physiques du minerai de feldspath.....	51
Tableau 12. Calcul normalisé du feldspath d'Ain Barbar.....	53
Tableau 13. Historique de travaux de séparation des feldspaths.....	79
Tableau 14. Composition chimique de l'échantillon utilisé.....	86
Tableau 15. Protocole de flottation.....	90
Tableau 16. Réduction de la teneur en fer dans les fractions de taille du matériau 250/45 μm , à différentes intensités de champ magnétique.....	91

INTRODUCTION GENERALE

Les matières premières peuvent varier considérablement en ce qui concerne leurs caractéristiques naturelles (composition chimique, composition minéralogique, leur pureté, propriétés physiques et chimiques, taille des particules et prix). Les différentes catégories de matières premières comprennent : Des matières premières d'origine naturelle de composition souvent hétérogène ; des matières premières purifiées, dont la composition chimique et les propriétés physiques sont régularisées et des matières premières industrielles, synthétiques, qui on subit un processus physico-chimique de préparation de façon à atteindre un haut niveau de qualité. Leur prix varie en fonction du processus de préparation.

La caractérisation d'une matière première se fait à partir des techniques d'analyses utilisées pour identifier la composition chimique, la composition minéralogique ainsi que les propriétés physiques des minéraux.

Les feldspaths sont des roches utilisées pour leurs propriétés fondantes. Elles forment spontanément un verre à haute température. Les plus utilisés sont ceux contenant les minéraux d'albite, orthose ou microcline, néphéline, pétalite, spodumène.

Généralement, on constate la présence d'un mélange de ces minéraux ce qui crée une grande dispersion dans les propriétés physiques et chimiques. Donc, l'objectif de cette recherche est de mettre en valeur la matière première feldspathique d'Ain Barbar par des méthodes minéralurgiques ou utilisation des procédés de séparation des minéraux (séparation magnétique, séparation par flottation).

Les feldspaths constituent un important groupe de silicates entrant dans la constitution de nombreuses roches d'origine volcanique, ignée ou métamorphique. Formant environ la moitié de l'écorce terrestre, ils sont les plus abondants de tous les minéraux.

Depuis l'apparition du terme « Feldspath » en 1740, ils ont fait l'objet de nombreux travaux, de point de vue cristallographie, cristalochimie et mise en valeur ainsi que son utilisation.

Les feldspaths sont des minéraux appartenant aux tectosilicates, possèdent une structure reposant sur un assemblage de tétraèdres $[\text{SiO}_4]$ et $[\text{AlO}_4]$ formant une charpente tridimensionnelle dans laquelle viennent se loger des ions monovalents (Na^+ , K^+) ou bivalents (Ca^{+2}), plus rarement (Ba^+ , Sr^{+2}), de formule générale $\text{R}^+[\text{AlSiO}_x]$ à $\text{R}^{+2} [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_x]$, les plus communs d'entre eux, les feldspaths alcalins et les plagioclases, pouvant être représentés dans un diagramme triangulaire dont les pôles sont l'orthose, l'albite et l'anorthite.

Selon l'Association minéralogique internationale (IMA). Les feldspaths regroupent une vingtaine d'espèces cristallisant principalement dans les systèmes monoclinique, triclinique ou orthorhombique. Bien que les feldspaths soient majoritairement xénomorphes, de beaux cristaux peuvent être récoltés, notamment dans les roches d'origine magmatique. Ils arborent une grande diversité d'habitats automorphes.

Toutes aussi collectionnées sont les épitaxies apparaissant dans certains gisements, comme celles de quartz sur feldspath alcalin des pegmatites graphiques ou celles d'albite sur orthose composant notamment les perthites, susceptibles de se former dans de très larges domaines de pression et de température (parfois supérieure à 1 100 °C).

Les feldspaths alcalins sont les constituants essentiels des roches ignées acides et alcalines notamment les granites, les granodiorites, les syénites, les rhyolites, les rhyodacites et les trachytes, alors que les plagioclases sont particulièrement abondants dans les basaltes.

Les feldspaths sont les minéraux les plus abondants dans la croûte terrestre et forment environ 60% des roches de la planète. La plupart des gisements fournissent du feldspath potassique ou sodique, ainsi que des feldspaths mixtes. Les feldspaths sont principalement utilisés dans l'industrie pour leur teneur en alumine et en alcalis. La majorité des produits que nous utilisons quotidiennement sont fabriqués avec du feldspath par exemple le verre pour les boissons, le verre de protection, la laine de verre pour l'isolation, le carrelage de notre salle de bains, la vaisselle dans laquelle nous mangeons... Le feldspath fait partie de notre vie quotidienne.

L'Algérie est parmi les pays qui donnent une importance à cette matière première il s'agit en particulier le gisement de felsites (feldspath) d'Ain Barbar, dont le but de mise en valeur de cette dernière afin de l'utiliser principalement aux secteurs céramiques et verreries.

La qualité de produit fini (fabriquer) est liée étroitement à la qualité (pureté, calibration...) de la matière première (feldspath), Les chapitres développés dans cette thèse traitent les objectifs visés par cette recherche :

Le premier chapitre consiste à une appréciation et analyse des conditions géologiques et minières du gisement de minerai feldspathique d'Ain Barbar, le deuxième volet porte sur l'intérêt de la matière première feldspathique dans les différents secteurs industrielles, la caractérisation physico chimique et minéralogique consacré au troisième chapitre, analyse de la littérature scientifique sur l'enrichissement des matières feldspathiques ont été réservé au quatrième chapitre, comportement de la matière première feldspathique d'Ain Barbar a la séparation physique et physico chimique est abordé au cinquième chapitre et en fin l'analyse de l'impact des procédées d'exploitations et d'enrichissements de la matière feldspathique d'Ain Barbar sur l'environnement.

**Chapitre I: APPRECIATION ET ANALYSE DES
CONDITIONS GEOLOGIQUES ET MINIERES DU
GISEMENT DE FELDSPATH D'AIN-BARBAR**

1. APPRECIATION ET ANALYSE DES CONDITIONS GEOLOGIQUES ET MINIERES DU GISEMENT DE FELDSPATH D'AIN-BARBAR

1.2. APERCU GEOLOGIQUE REGIONAL

Le cadre géologique de la plaine conditionne les écoulements des eaux souterraines et des eaux superficielles. Nous voulons montrer ici la complexité géologique des diverses formations qui présentent les unités suivantes :

- Les formations métamorphiques.
- La nappe numidienne.
- Le Quaternaire.

1.2.1. FORMATIONS METAMORPHIQUES

1.2.1.1. Le massif de l'Edough

Il s'élève brutalement au-dessus de la mer et des plaines environnantes jusqu'à plus de mille mètres (1000m). Il est constitué par un empilement de plusieurs unités qui forment un dôme de foliation allongé selon la direction NE—SW. Les formations métamorphiques se subdivisent en deux unités principales.

- Une unité inférieure constituée de gneiss ocellés et de migmatites et de quelques horizons subordonnés de micaschistes et marbre. Au sein de gneiss ocellés un petit corps de péridotites contient des metabasites à reliques d'une association éclogitique à clinopyroxenemphacitique, grenat, zoirite et rutile.
- Une unité supérieure représentée par un ensemble de micaschistes alumineux, gneiss leuco-granitiques et marbre. Des intercalations de quartzite et lydienne dans les micaschistes ont livré une faune d'accritarches d'âge Ordovicien supérieur à Dévonien démontrant que la tectonique tangentielle à vergence NW de l'Edough ne pouvait être qu'hercynienne ou alpine.

Au Nord du massif les micaschistes encaissent un complexe d'amphibolites-metagabbros comprenant à la base une association de péridotite-kinzigites comparable à celle rencontrée en petite kabyle et dans bético-rifain.

Ces unités profondes de l'Edough ont été affectées par un métamorphisme de haut degré qui montre une évolution depuis des conditions de hautes températures, haute pression ($P > 7-8$ Kbar) vers des conditions de basses pressions ($P = 3-4$ Kbar) bien traduites par des relations chronologiques entre les trois polymorphes Al_2SiO_5 .

On observe dans les micaschistes que les cisaillements ductiles extensifs à vergence NW sont matérialisés par des associations syncinématiques à biotite-sillimanite qui oblitèrent une paragenèse primaire à disthène-grenat-staurotide-rutile-muscovite, alors que l'andalousite apparaît dans les stades les plus tardifs de la déformation, en se superposant par fois directement au disthène.

À l'Ouest et au Sud du massif, l'unité supérieure des micaschistes comprend localement à son sommet des formations de type épizonal dont Paléozoïque ou Mésozoïque est discuté. La

présence d'assemblages minéraux microscopiques à mica blanc, disthène, staurotide, rutile, grenat dans les schistes de Boumaiza montre cependant que l'évolution métamorphique de ces formations est indissociable de celles des unités sous-jacentes. En plusieurs points du massif, le socle cristallophyllien de l'Edough est surmonté par des formations attribuées au Mésozoïque et qui sont affectées par un métamorphisme épi. Les déformations ductiles y ont une vergence NW identique à celle des gneiss et micaschistes sous-jacents et sont particulièrement bien développées au contact socle-couverture ou les associations minérales indiquent des températures proches de 400°C.

Le contraste métamorphique entre socle et couverture peut être considéré comme une conséquence des déplacements tangentiels soustractifs qui contribueraient au rapprochement d'unités de degrés métamorphiques différents. La déformation ductile de l'Edough et la mise en place de la nappe des flyschs scellées par des rhyolites et microgranites d'âge Langhien à 15-16 Ma. Ces roches magmatiques sont affectées par une altération hydrothermale à l'origine de minéralisation filonienne polymétallique.

1.2.1.2. Domaine des Flyschs

Il est caractérisé par des sédiments de type flyschs, allant du Crétacé inférieur à l'Oligo-Miocène. Ce sont des pôles de mer profonde, mis en place, généralement, sous la lysocline, par des courants de turbidité. Il semble s'agir surtout de formations de plaine abyssales.

On distingue du Nord au Sud du bassin des flyschs, les flyschs mauritaniens et les flyschs massyliens, différents les uns des autres par leur position primitive et par leur alimentation. L'ensemble est surmonté par le Numidien d'âge Oligo-Miocène ce dernier a rempli une dépression qui était l'héritière du bassin des flyschs Crétacé Paléogène.

1.2.1.2.1. Flyschs Mauritanien

Ce terme a été proposé par Gelard pour une série située au sud de la dorsale de Chellala. La stratigraphie est la suivante de bas en haut : des radiolarites rouges du Malm surmontés par un flysch calcaire d'âge Bériasien à Hauterivien; ensuite un ensemble argilo-gréseux puissant caractérisé par des grés fins homométriques jusqu'à l'Albien.

Le Cénomaniens est représenté par des calcaires micros conglomératiques et bandes siliceuses et le Turonien-Sénonien inférieur par des calcaires finement sableux.

Du Sénonien supérieur jusqu'à l'Yprésien la série se poursuit par des conglomérats et des microconglomérats. Ces séries correspondent du Bériasien à l'Albien, au « flysch de Guerrouche » de petite Kabylie et, au Crétacé supérieur et à l'Eocène au « flysch de Penthièvre » (Ain-Berda).

Les flyschs mauritaniens occupent une position relativement interne dans le domaine des flyschs. La comparaison de ces flyschs avec les séries de la dorsale magrébienne a permis de placer les dépôts des flyschs mauritaniens aux pieds de cette dernière.

1.2.1.2.2. Flyschs massyliens

Ce terme a été proposé par Raoult (1974) au bord du Kef Sidi-Driss pour une série allant du Néocomien au Lutétien. Cette série comporte, de bas en haut : un crétacé inférieur argilo - quartzique puis un Cénomaniens pelito-micro-bréchiqne a niveau de phtanite.

Le Crétacé supérieur est caractérisé par des micro-brèches c'est le classique flysch a micro-brèche. Le matériel remanié, est différent de celui des flyschs mauritaniens. A partir du crétacé moyen et probablement avant les flyschs massyliens sont alimentés par les zones externes de la chaîne alpine, ils occupent une position externe dans le domaine des flyschs.

1.2.2. NAPPE NUMIDIENNE

La nappe numidienne de Chihani et Drean est formée de roches sédimentaires d'âge Oligo-Miocène inférieur; il s'agit de puissantes formations gréseuses constituées de bas en haut par :

- Des argiles à tubotumaculum d'âge Oligocène inférieur dites sous~ numidienne. Ce sont en fait des marnes argileuses rouges, vertes ou violacées (butte de Bouzenzel) d'une épaisseur de 200m.
- Des bancs gréseux à grains hétérométriques qui forment les reliefs de cette région. Ces formations qui présentent des intercalations d'argiles vertes sont d'âge Miocène inférieur et ont une épaisseur de 100 à 150m.
- Des argiles à silixites, dites supra-numidiennes formant la partie sommitale de la série numidienne, ces argiles sont d'âge Burdigalien inférieur.

1.2.3. QUATERNAIRE

Il est constitué par les faciès suivants :

- faciès alluvionnaires ou fluviaux ;
- faciès éoliens (sable dunaires) ;
- faciès colluviaux ;
- faciès marins.

La chronologie mise au point par Joleaud (1936) pour le quaternaire de la région d'Annaba, fait apparaître les traits essentiels suivants :

1.2.3.1. Pléistocène inférieur

Le point de départ est le villafranchien supérieur. La plaine est une vaste zone d'épandage de l'ouest Seybouse et de l'oued Bounamoussa, les apports provenant de la chaîne numidique sont très grossiers (blocs de grés anguleux).

Quelques lambeaux de gros galets gréseux peu émoussés et d'arènes gréseuses forment des terrasses subsistent à des altitudes de plus de 150 m (terrasses d'abrasions) au débouché de l'oued Seybouse. D'après Joleaud (1936). Durant cette période d'alluvionnement, un cordon dunaire littoral s'est formé, jouant ainsi le rôle de barrière à la transgression marine à l'origine les massifs argilo-gréseux numidiens et gneissiques furent intensément érodés.

Une grande quantité de matériel détritique fut charriés vers la mer puis dégradée en sable, les éléments furent ensuite déplacés essentiellement par les vents à l'intérieur et se répartissent uniformément dans les dépressions formant ainsi un matelas dunaire. Les niveaux d'argiles

pulvérulentes provenant directement du massif numidien, s'intercalent dans les niveaux sableux. Le numidien confirmé par un certain nombre d'auteurs (D. Delga, F. Raoult, JM. Vila), s'est déposé dans un grand sillon de plus de 2000 km de long.

La fin du Pléistocène inférieur est marquée par des dépôts argileux et des dépôts sableux.

1.2.3.2. Pléistocène moyenne

Il est marqué par une nouvelle régression (régression post-sicilienne). La plaine subit un remblaiement intense. Les alluvions sont formés de galets, de cailloutis aux arrêtes peu émoussées d'arènes gréseuses. A l'aval de la plaine un second cordon dunaire littoral est mis en place prenant appui dans sa partie occidentale sur le cap de garde, la kasbah d'Annaba et le massif de Bouhamra, la Joleaud (1986) se réfère aux terrasses d'abrasion marine situées aux altitudes comprises entre 81 et 117 m.

Au Tensiftien (régression post-sicilienne), après une nouvelle période de soulèvement, les lits des oueds se créent à la suite de mouvements tectoniques : la phase post-villafranchienne.

Les cailloutis roulés, les sables, les galets et les grés constituant les terrasses sont portés à plus de 50 m. En profondeur, on observe les argiles. Grises sur près de 16 m d'épaisseur. Ainsi les formations tensiftiennes recouvrent unilatéralement l'ensemble de la plaine.

Dans le cordon dunaire littoral actuel, la dune de base se serait formée à cette période. La fin du quaternaire moyen est marquée par une nouvelle régression (régression post-tyrrhénienne).

Le Soltanien est marqué par un alluvionnement intense (cailloux roulés, galets, et des argiles riches en éléments ferrugineux). Les terrasses sont portées à des altitudes de 20 à 30 m.

1.2.3.3. Pléistocène supérieur

D'après Cherrad (1979) le pléistocène supérieur est caractérisé par un dépôt d'alluvions limoneux très fin à une nette dominance d'argile à la suite de la phase rhabien, les oueds construisent d'importants bourrelets alluvionnaires. Ces derniers canalisent les oueds, mais ils ont aussi pour effet de contribuer à la formation de vastes zones dépressionnaires. .

Celles-ci, situées de part et d'autre de ces levées alluvionnaires, se transforment par la suite en lagune Fig.01.



Figure 01. Situation géographique et esquisse géologique régionale de la wilaya d'Annaba (LAMROUS, 2001).

1.3. CADRE GEOLOGIQUE LOCALE

Le massif d'Edough est comme depuis un certain temps pour les indices des poly-métaux qui ont suscité l'intérêt des géologues depuis 1840. L'étude la plus intéressante d'après la carte géologique est en amont de l'oued Ouideret aux alentours de la carrière d'Ain-Barbar qui se développent des dépôts du crétacé et du paléocène recoupé par des roches magmatiques acides.

1.3.1. DESCRIPTION STRATIGRAPHIQUE ET LITHOLOGIQUE

Les macrofaunes signalées font classer l'assise du Sénonien parmi les plus anciennes de la région.

1.3.1.1. Sénonien : est développé dans la partie centrale de cette région représentée par une assise puissante de 18m et composée de 2 séries.

a) Série inférieure : est composée surtout par des argilites schisteuses, d'aleurolites et par des grès multicolores transformés en coréennes (dem. Chaiba).

b) Série moyenne : est constituée par des argilites schisteuses et des aleurolites, tandis que la série inférieure comporte des intercalations de calcaires gréseux des marnes des micro-brèches dans une assise où dominent toujours les aleurolites.

1.3.1.2. Oligocène ou la série Numidienne : pour être plus précis, est observé partout, suivant les zones de fissurations et de charriage en contact avec les schistes sénoniens.

Le Numidien est nettement divisé en deux séries :

a) La série inférieure : est représentée par des argilites bien datées par la macrofaune. On observe des lentilles de grés quartzeux.

b) La série supérieure : est constituée surtout des grés quartzeux dominant sur les intercalations d'argilites. Les deux séries font 1000 m d'épaisseur.

1.3.2. ESQUISSE STRUCTURALE ET TECTONIQUE

D'après la carte centrale de région apparaît comme le flanc d'un grand anticlinal, dont l'axe est allongé N-S. Le sénonien a un net pendage au N-W, tandis que les schistes du m. Chaiba forment le cœur de ce grand pli qui est recoupé par une série d'accidents accompagnées des dépôts du Paléogène en contact avec le Crétacé. D'après leur orientation, on peut distinguer 2 types d'accidents : ceux du N-E et ceux à l'orientation subméridienne (NNW, pour être plus exacte). Par endroit, on peut signaler des chevauchements. On y a signalé plus de 20 accidents dont la plupart sont accompagnés par une minéralisation de Pb- Zn ou en Cu.

De telles zones sont orientées suivant à peu près les méridiennes et c'est à celles que l'on doit rapporter le système spécifique des accidents recoupant d'Ain Barbar. Certains caractères morphologiques du bloc sénonien font supposer l'existence d'une puissante cassure en profondeur qui devrait suivre l'axe du pli. La disposition des dykes de granites porphyriques et de rhyolites marque la position de cette cassure en profondeur et fait supposer son caractère ante- intrusif.

1.3.3. ROCHES MAGMATIQUE

La zone ne possède que de petites intrusions, ce qui détermine son caractère spécifique, parmi ces intrusions, on peut classer les rhyolites et les granites porphyriques sous forme de dykes, et les granites porphyriques en stock. Leurs structures et morphologie ainsi que leurs relations avec les roches sédimentaires témoignent en faveur de leur nature sub-extrusive post- oligocène.

L'étude d'un dyke suivant les différents plans d'érosion (de + 600m jusqu'au niveau de la mer) nous a permis de constater que les niveaux inférieurs sont dominés plutôt par les porphyrites quartzeux soumises ultérieurement aux processus d'épidotisation et d'albitisation. Les niveaux supérieurs sont marqués par domination des felsites et par les phénomènes de séricitisation, de métasomatose potassique et même de kaolinisation.

Cela nous permet de tirer une conclusion que les petites intrusions sont synchrones à l'activité effusive néogène et qu'elles ne sont que les racines des appareils volcaniques ou les corps hypocrustaux.

Elles se sont formées probablement à une profondeur ne dépassent pas 1,0 à 1.5 km. On est en mesure de constater que les felsites des dykes rhyolithiques, surtout celles du flanc SW forment une excellente matière feldspathique.

En conclusion, il faut noter que les felsites et les poly-métaux d'Ain Barbar sont les seules substances connues constituant un gisement important.

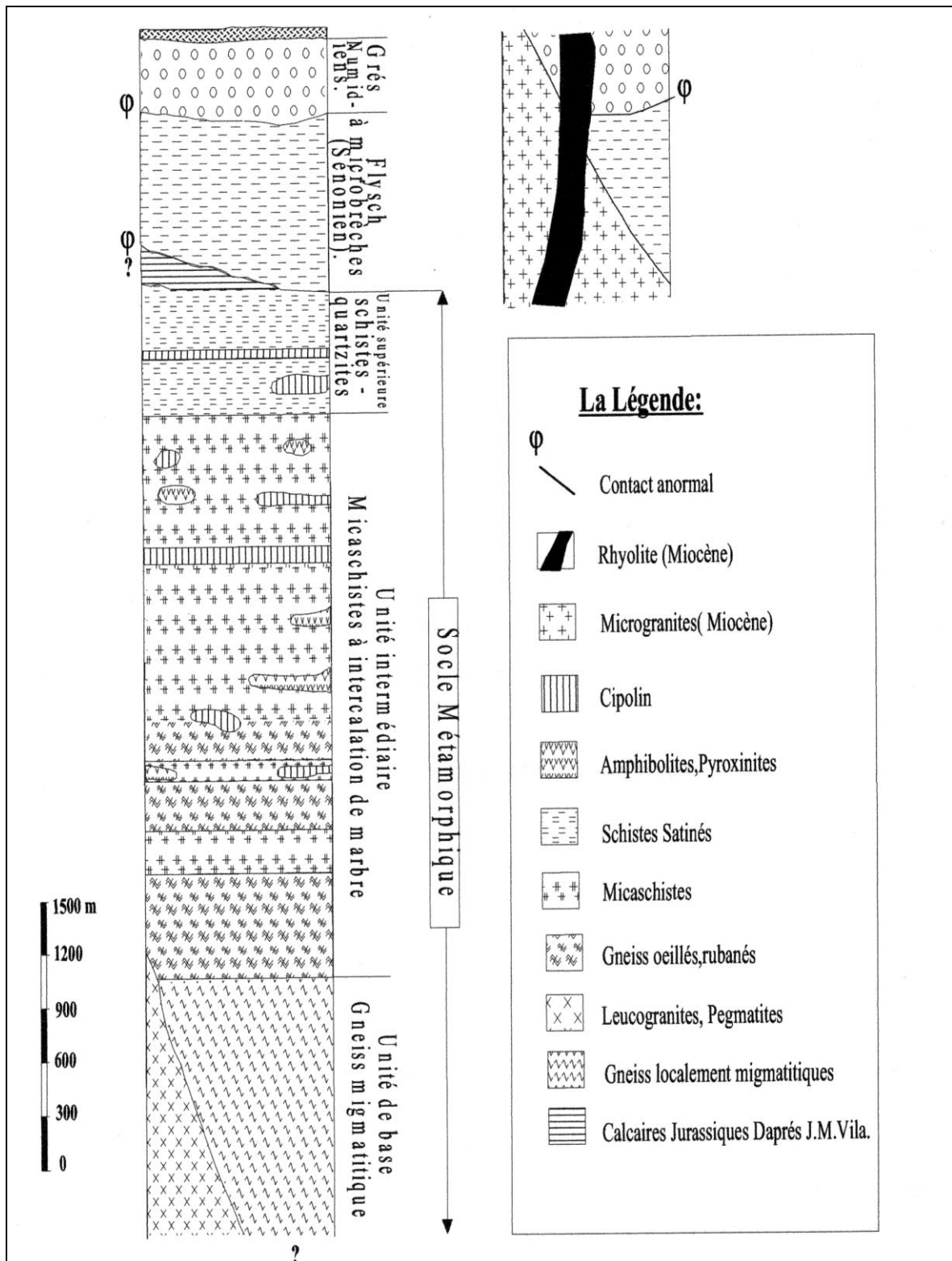


Figure 02. Colonne lithologique schématisée du massif de l'Edough d'après les travaux et sondage de l'EREM (1973-1976) : Hilly, 1962 ; Vila, 1970.

1.3.4. LOCALISATION GEOLOGIQUE DU SITE D'ETUDE

La carrière de feldspath de Ain Barbar est situé à: 03 km au Sud de la ville d'Ain Barbar, 14 km au Nord-Ouest de Seraidi, 28 km au Nord-Ouest de Annaba et 500 m au Sud du CW 16.

- **Coordonnées UTM du site**

Le site d'étude d'une superficie de trente-trois (33) hectares est délimitées par un polygone de vingt-quatre (24) cotés, il est lié à la carte topographique d'Annaba NJ-32-II-2 Ouest à l'échelle 1/50000.

Les coordonnées du site sont projetées dans le système Algérie Nord Sahara (Clarke 1880) fuseau 32 et sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 01. Coordonnées UTM Nord Sahera Zone 32

N° Borne	X	Y	N° Borne	X	Y
1	368 400	4092 500	13	369 800	4092 800
2	368 400	4092 300	14	369 800	4093 000
3	368 600	4092 300	15	369 100	4093 000
4	368 600	4092 400	16	369 100	4092 900
5	368 700	4092 400	17	368 900	4092 900
6	368 700	4092 500	18	368 900	4092 800
7	368 900	4092 500	19	368 800	4092 800
8	369 000	4092 600	20	368 800	4092 700
9	369 000	4092 600	21	368 600	4092 700
10	369 000	4092 700	22	368 600	4092 600
11	369 200	4092 700	23	368 500	4092 600
12	369 200	4092 800	24	368 500	4092 500
Surface	33 Hectares				



Figure 03. Localisation géologique du gisement feldspathique d'Ain Barbar selon les coordonnées UTM.

1.3.5. SITUATION GEOGRAPHIQUE D'AIN BARBAR

La région d'Ain Barbar est située dans la partie septentrionale du massif de l'Edough, à une quarantaine de 28Km au Nord-Ouest de la ville d'Annaba. Elle est limitée au Nord par la méditerranée et au Sud par une série de dépressions, au Sud-Est par Djebel Boukantas et au Nord-Ouest par les reliefs massif de Djebel Chétaibi (fig.04).

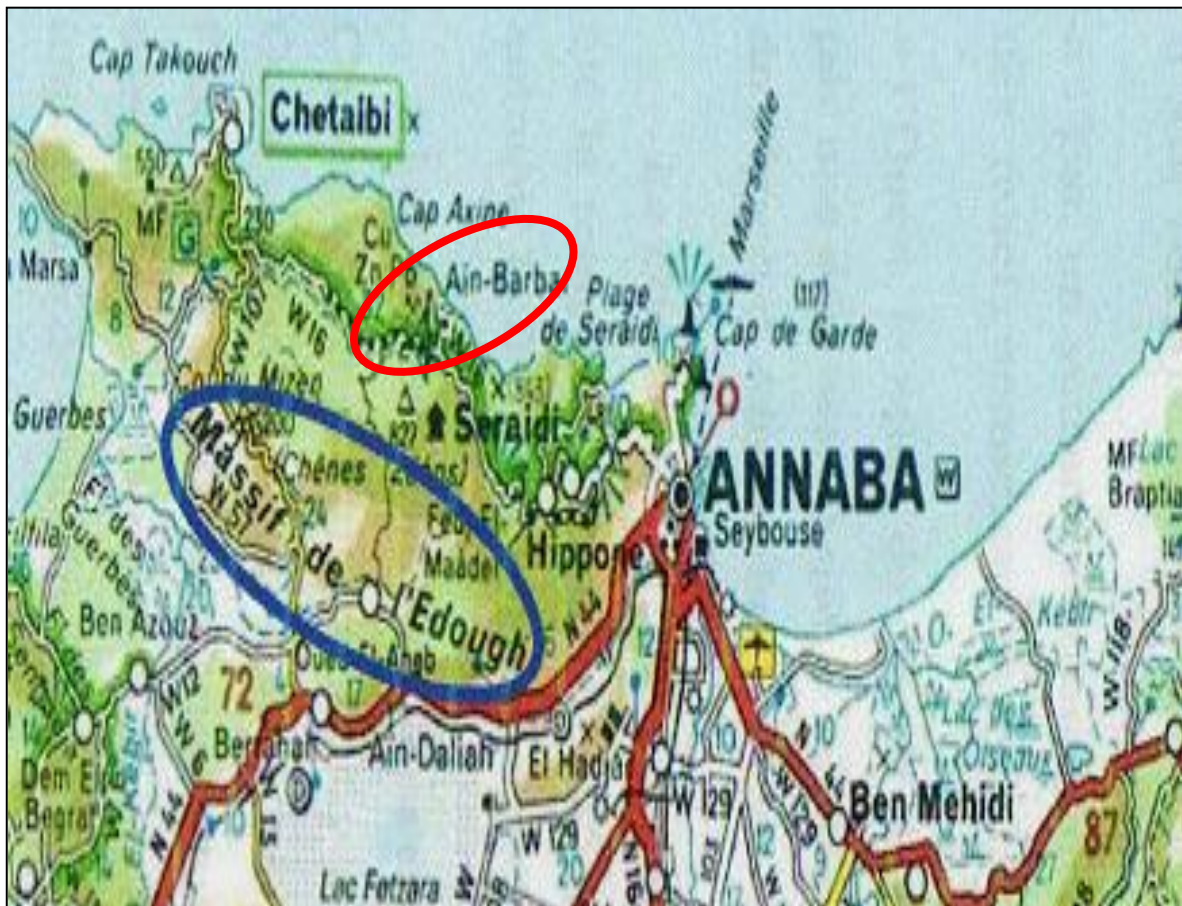


Figure 04. Situation géographique d'Ain Barbar.

1.4. GEOLOGIE DE GISEMENT D'AIN BARBAR

La région d'Ain Barbar appartient aux domaines internes des chaînes plissées tertiaires d'Afrique du nord (marignac, 1976).

Dans cette région, des bombements tardifs d'axe WSW-ENE Numidiens charriés, compliqué d'ondulations postérieures d'axe N 0°-20° E, permettent l'observation des formations suivantes :

Des flyschs d'âge crétacé supérieur (sénonien), affectés de déformations complexes et montrant des indices d'un hydrothermal. Les parties les plus profondes de ce flysch sont profondément transformées par un métamorphisme hydrothermal d'âge Miocène et se présentent actuellement comme des cornéennes plagioclasiques, (Fig.05) (Marignac, 1982). Des intrusions micro granitiques et rhyolitiques d'âge Langhien, affectés eux aussi par des

altérations hydrothermales, les premières en essaims de petits corps subaffleurants, qui représentent probablement des apophyses de dykes aveugles d'après les observations effectuées dans les travaux miniers, et les secondes en dykes, eux mêmes peut être aveugles au moment de leur mise en place, il existe aussi des filons polymétalliques.

Les filons polymétalliques d'Ain Barbar sont tous encaissés dans les flyschs sénoniens et dans les cornéennes du chaiba. L'ensemble est recoupé par des manifestations intrusives microgranites et rhyolites (Hilly, 1957 ; Marignac, 1982).

1.4.1. Flysch sénoniens (dits à micro-brèches)

Ces flyschs sont d'âge campanien d'après les faunes de foraminifères, il est représenté par une succession de couches dans l'ensemble très mince, les micro-brèches en font partie, le plus souvent la matrice des termes détritiques est quartzeux Chloriteuse très fine, l'une des caractéristiques les plus intéressantes de ce flysch, de la pyrite plus ou moins concentrée dans certaines lamines.

1.4.2. Cornéennes albitiques

Elles sont constituées par des alternances de niveaux quartzo-albitiques, de niveaux albitiques à silicates calciques et de niveaux pélitiques riches en chlorites, l'appellation de coréennes est justifiée par la forte induration de ces roches due à des phénomènes de métamorphisme de contact.

1.4.3. Intrusions subvolcaniques

un dyke rhyolitiques est un ensemble de pipes micro granitique, alignées selon une direction parallèle et probablement enracinés dans un dyke ; soulignant grossièrement l'allongement du bombement de la fenêtre d'Ain Barbar, dont ils jalonnent aussi certaines failles limites ces intrusions qui correspondent à l'épisode du magmatisme miocène, sont récentes, des datations par la méthode K/Ar ont été effectuées sur ces roches qui ont donné un âge de 16 Million d'années pour les microgranites et 15 Million d'années pour les rhyolites qui sont donc plus récentes (marignac-C, Zimmerman J.L,1983). Ces intrusions sont, elles mêmes affectées par des phénomènes hydrothermaux si l'on excepte celles de la faille de l'Ouider, elles sont surtout transformées au passage des filons minéralisés ou des fractures qui les plongent et subissent alors une évolution avec apparition de chlorite, épidote, qui évoquent les transformations.

La minéralisation polymétallique d'Ain Barbar est essentiellement sulfurée elle est à sphalérite noire dominante et chalcopryrite, pyrite et galène. Les gisements de la région d'Ain Barbar peuvent être répartis en deux catégories, les uns sont feldspath, les autres sont des gisements polymétalliques. Les filons les plus importants sont ceux de Saint Jean, Play Fair, Saint Victor, Abaid et Gray, (Fig.05).

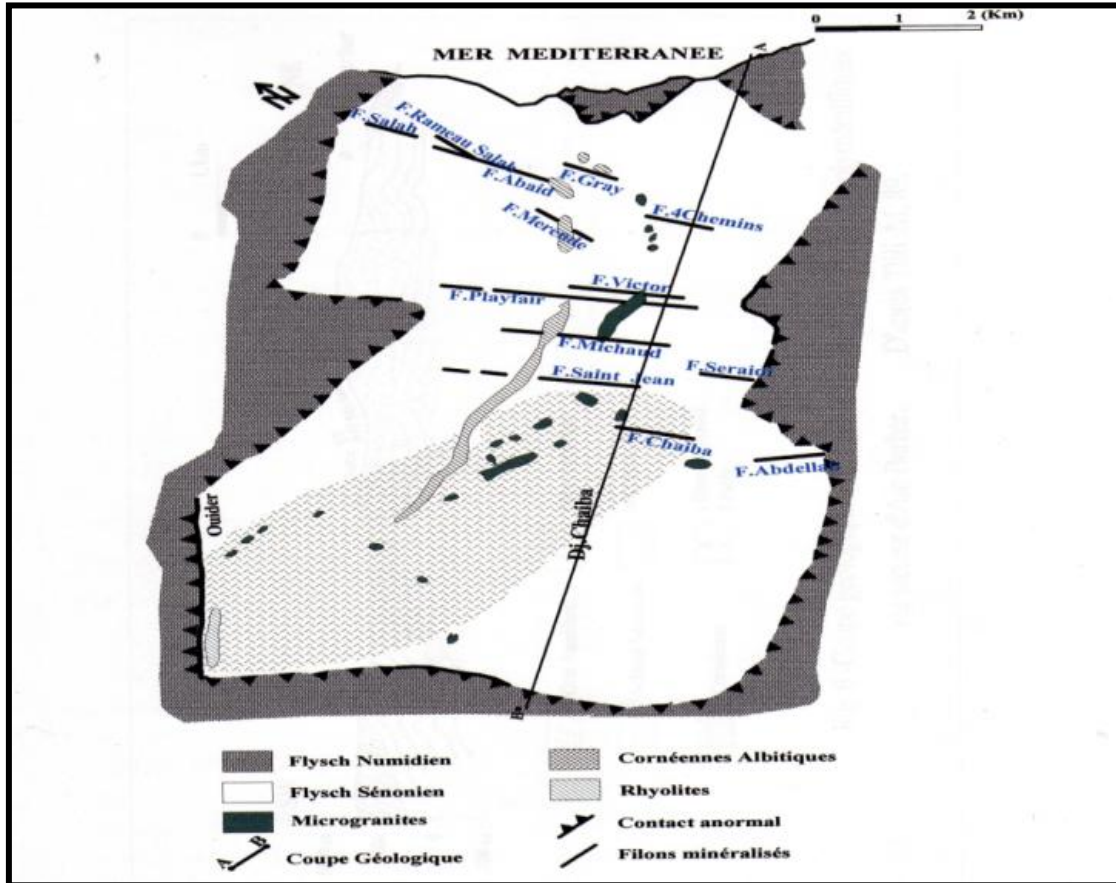


Figure 05. Minéralisation polymétallique d’Ain Barbar (magnac-C, Zimmerman J.L,1983).

Les dimensions sont de 1400*250 m, le relief assez irrégulier, ce gisement fut découvert en 1974 pendant un cheminement de reconnaissance pour estimer les potentialités de la zone en feldspaths.

Les études successives géologiques et pétrochimiques ont démontré que les felsites (les rhyolites feldspathiques) découvertes peuvent être utilisées en céramique et pour la production des pâtes de porcelaine et des émaux.

Le gisement est composé par une série sénonienne de schiste. La substance utile est liée avec les corps de dykes des felsites, coupant les argilites schisteuses de l’assise moyenne du sénonienne. Du point de vue de la morphologie, c’est un simple corps du dyke stratiforme débrayé par des accidents tectoniques transversaux post-dyke en bloc échelonnés, déplacés avec un déplacement relatif de 10 à 60 m. La longueur des blocs varie de 62 à 240 m, et les puissances du dyke est de 10 à 20 m, dont la longueur prospectée du dyke est de 1.4 km. Sur la carte géologique il est facile d’individualiser six corps isolés de felsite. Ces corps sont simples et apparaissent sous forme d’une dalle, découpée par des mouvements tectoniques ultérieurs (Post-Nappes).

Les felsites sont de la couleur gris claire, de la composition chimique et minéralogique constante, ayant la couleur blanche après la cuisson. Les minéraux dominants sont les feldspaths potassiques avec un pourcentage de 53% et le quartz avec 40%.

Du point de vue génétique le gisement de feldspath est un dyke de nature subvolcanique mis en place par des venues des substances magmatiques acides dans des zones fracturée. La mise en place de ces roches avait accompagné par des venues hydrothermales responsables de la modification chimique de la roche (séricitisation et kaolinisation).

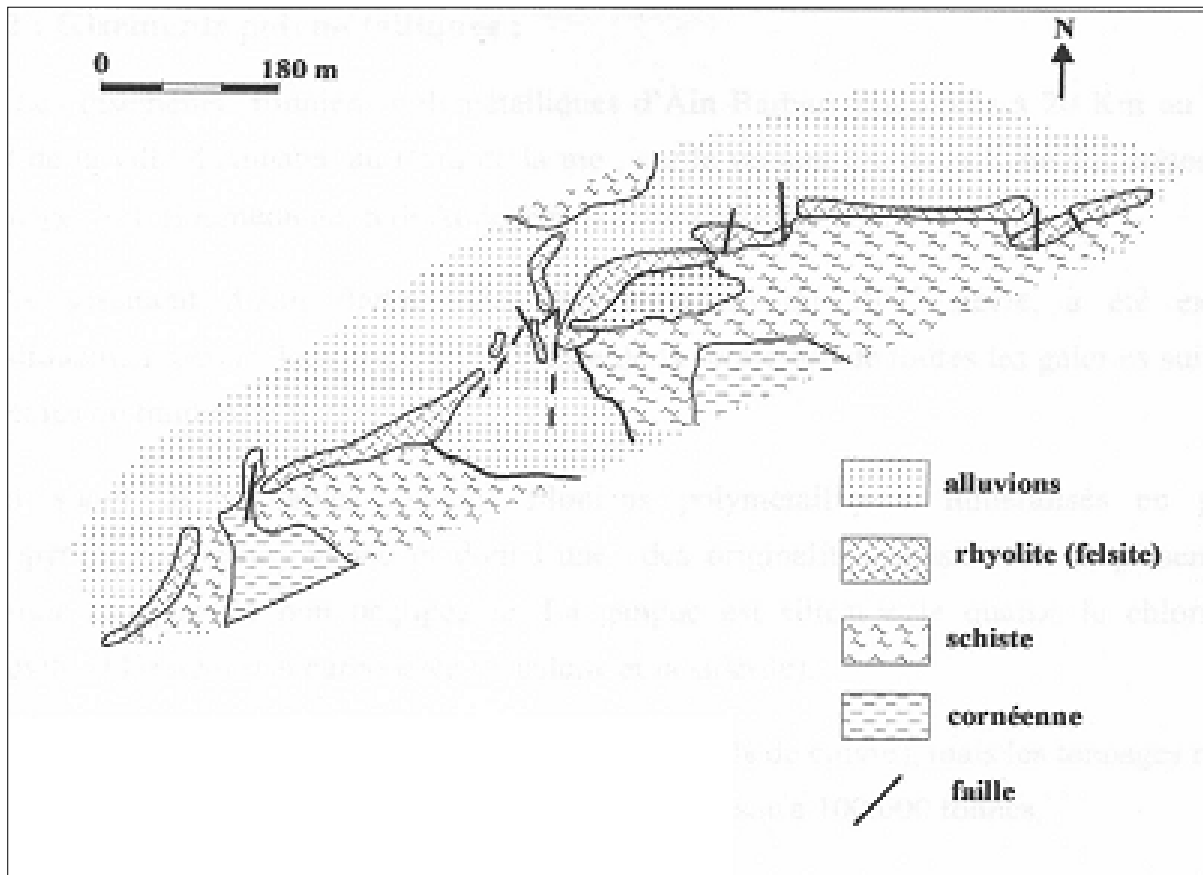


Figure 06. Carte géologique de gisement d'Ain Barbar (marignac-C, Zimmerman J.L, 1983).

1.5. CALCUL DES RESERVES DE GISEMENT D'AIN BARBAR

1.5.1. RESERVE GEOLOGIQUE

Les facteurs suivants ont été pris en considération lors des calculs des réserves d'Ain-Barbar:

- Le gisement d'envergures moyenne se présente sous d'un dyke affecté par des accidents tectoniques de sorte que 6 corps isolés (blocs) ont été individualisés ;
- Les blocs prospectés sont puissants et compacts, caractérisés par un pendage assez raide. Sa morphologie et ses conditions géologiques sont identiques et ne changent pas beaucoup;
- Les conditions minières sont favorables pour une exploitation à ciel ouvert ;
- La substance utile est représentée par des felsites à haute teneur en potassium et à composition chimique et minéralogique assez constant. `

La situation géologique en profondeur a été vérifiée par sondages sur le bloc N°5. Les réserves plus profondes, ainsi que celles des autres blocs ont été calculées par extrapolation. Les filons sont délimités en tenant de l'inclinaison du dyke et du pendage des zones tectonique.

Les aires ont été mesurées par une palette mise en trois positions différentes, la puissance d'un corps est prise comme moyenne arithmétique des mesures sur tous les profils étudiés.

La campagne d'évaluation (SONAREM en 1976) a été menée et à l'aide de (03) tranchées et cinq (05) sondages sur le bloc 5. Les sondages ont une longueur moyenne de 41.5 m et sont inclinés de 70°, afin d'intercepter la minéralisation au niveau de - 40m en moyenne à partir de la surface topographique. La maille des sondages est de 50-60m, tandis que les tranchées T-1 et T-2 séparées de 60m et la distance entre T-2 et T3 est de 120m.

Compte tenu des particularités de la structure géologique et du mode de prospection, le calcul des réserves ont été fait par les volumes dits « DES BLOCS »

Le calcul est :

Volume de chaque bloc = la puissance moyenne × la surface du bloc.

La surface du bloc est calculée par projection longitudinale (plan vertical) du dyke à l'aide de logiciel du COVADIS.

Le poids volumique a été calculé et égal 2.31 t/m³

Réserves du bloc = volume de chaque bloc × le poids volumique.

Les réserves du gisement est l'ensemble des réserves des blocs.

Tableau 02. Calculs des réserves géologiques de gisement d'Ain Barbar.

Catégorie du bloc	N° du bloc	Puissance (m)	Aire (m ²)	Volume (m ³)	Masse volumique (t/m ³)	Réserves (t)
B	I	16	11218	179488	2.31	414617
C₁	I	15.2	10845	164798	2.31	380684
	II	13.2	6077	80216	2.31	185300
	III	17.5	10745	188038	2.31	434367
	IV	23.8	7019	167052	2.31	385891
	V	16.6	2866	47576	2.31	109900
	VI	16.7	6286	104976	2.31	242495
C₂	I	15	16893	256774	2.31	593147
	II	13.2	10202	134666	2.31	311079
	III	17.5	11957	209248	2.31	483362
	IV	16.6	2199	36503	2.31	84323
	V	16.7	22202	370773	2.31	856487
Total de B						414617
Total de C₁						1738636
Total de C₂						2328398
Total de B+C₁						2153253
Total de gisement (B+C₁+C₂)						4481651

1.5.2. RESERVES EXPLOITABLES

La puissance minimale d'extraction sera de 10 m avec une profondeur moyenne est 40m dont les réserves exploitables sont seulement de catégorie (B + C₁) et pour le bloc I seulement la catégorie B ; celles de catégorie B font 25%. Ensuite, on a tracé les contours des ouvrages à entreprendre de sorte que les volumes extraits soient au moins égaux à ceux de déblaiement. . Pour le taux de recouvrement de bloc C_{1-I} et pour les blocs de catégorie C₂ n'a pas été calculé puisqu'il est grand et l'extraction est envisagée par galerie.

Les épaisseurs à déblayer sont précisées en tenant compte d'un angle moyen front de taille à envisager (sur les roches stériles: 50°, sur les felsites: 60 à 70°, c'est-à-dire presque l'angle naturel du mur de dyke). Les corps ont été délimités d'après les données tranchées par des affleurements. Un levé détaillé a permis de nous renseigner sur les particularités de la surface et de la structure du gisement.

Tableau03. Calculs des réserves exploitables

Catégorie du bloc	N° du N° du bloc	Puissance (m)	Aire (m ²)	Volume de substance utile (m ³)	Coefficient de recouvrement	Volume a déblayé (m ³)	Réserves exploitables (t)
B	I	16	11218	179488	1.09	195642	451933
C1	II	13.2	6077	080216	0.95	76206	176035
	III	17.5	10745	188038	0.80	150430	347493
	IV	23.8	7019	167052	1.07	178746	412903
	V	16.6	2866	047576	1.10	52333	120890
	VI	16.7	6286	104976	1.08	113374	261895
Total (t)				767346	1.01	766731	1771148

- Les ressources géologiques sont 4 481 651 tonnes
- Les réserves exploitables sont 1 771 148 tonnes

1.6. GENERALITES SUR LA PRODUCTION MINIERE EN ALGERIE

Avant l'indépendance (1962), l'activité minière en Algérie était orientée principalement vers l'exploitation des gisements de fer et de plomb - zinc.

Entre les deux guerres mondiales, l'Algérie était un producteur important de minerai de fer dans le monde, sa production a contribué à la prospérité des industries de transformation de plusieurs pays européens, en particulier la France, la Grande-Bretagne et l'Allemagne. Durant les années 1950, notamment pendant la guerre de libération nationale, les sociétés minières étrangères ont accéléré le processus d'écrémage des gisements et limité, voire stoppé tout investissement dans ce secteur. Au lendemain de l'indépendance, les exploitants étrangers ont abandonné plusieurs mines après en avoir tiré le meilleur profit; ne sont restées en activité que

les mines encore " viables ", telles celles de phosphate, de zinc, de fer, de baryte, de charbon et les salins.

Un effort de prospection durant ces 30 dernières années a permis de développer l'infrastructure géologique de base et d'inventorier un grand nombre de gîtes et indices dont certains offrent de réelles perspectives d'investissement pour leur exploitation et que l'État Algérien a décidé de promouvoir et de mettre en valeur (Documents du ministère de l'énergie et des mines, 2010).

Depuis la création la société minière d'État et de la prospection, (SONAREM), en 1967. Certains minerais ayant une haute teneur en minéraux de fer, de phosphate, de mercure, et de zinc, ont été exportés depuis le début des années 1970. En conséquence de la politique de décentralisation du gouvernement, l'entreprise a été restructurée en 1983 avec une entité de production séparée et une entités de distribution dont plus importante d'entre eux était le minerai de fer et la compagnie de phosphate connu comme Ferphos, qui avait trois unités de production et un complexe portuaire à Annaba, et une autre société appelée EREM qui se spécialise dans la recherche minérale à Boumerdes, sur la mer Méditerranée, et Tamanrasset sud Algérien.

En 2000, le gouvernement a proposé de permettre aux investisseurs étrangers pour développer les gisements minéraux détenus par les sociétés minières nationales.

Le bureau géologiques national et le bureau de recherche minérale a identifié de nombreux gisements minéraux .Avec la proximité de l'Algérie à l'Europe, son principal client minéraux a la base du pays et les métaux précieux sont d'intérêt pour les investisseurs étrangers. (Documents du ministère de l'énergie et des mines, 2010).

Tableau 04. Production totale des principaux minerais en Algérie

Minéraux	Lieu	Production totale
Le fer	Les gisements de Mecheri Abdelaziz et de Gara Djébillet, Tindouf	3,5 milliards de tonnes à 57% Fe
Le diamant	Région de Reggane	1500 grains de diamant
L'or	Gisement de l'Amessmessa Région du Hoggar	3,38 *10 ⁶ tonnes Teneur 18g/T
Plomb, zinc	Nord de l'Algérie	150 *10 ⁶ de tonnes/an
Le sel (gemme et lagunaire)	Sud est Algérien	1,5 *10 ⁹ de tonnes
Le phosphate	Djebel Onk Tébessa	2 *10 ⁹ de tonnes
Le feldspath	Ain Barbar Annaba	7 *10 ⁶ de tonnes
Fluorine	Gisement Ait Oklan Tamanrasset	1,22 *10 ⁶ de tonnes de minerais à 30%
Le talc	Est de l'Algérie	De 200,000 à 600,000 tonnes

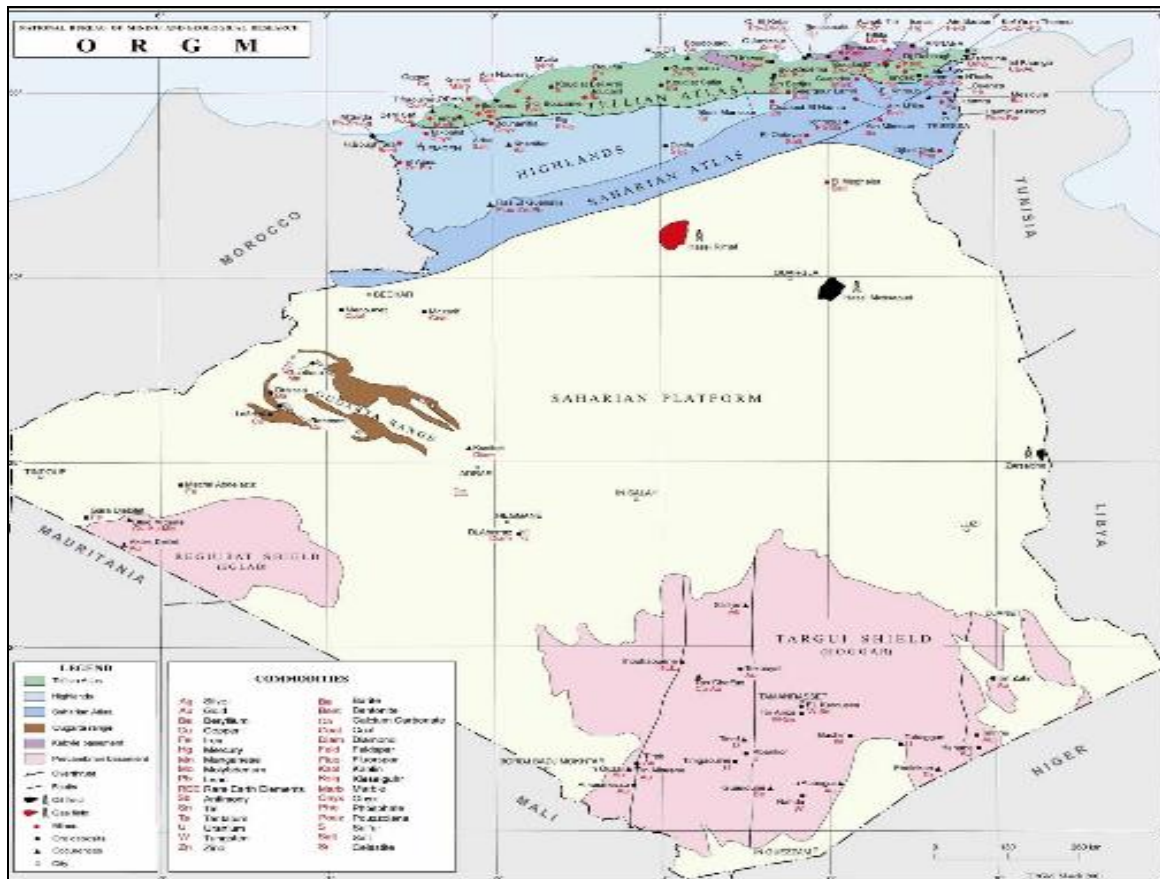


Figure 07. Carte des Potentialités Minières en Algérie (O.R.G.M).

Le tableau ci-dessous représente la production mondiale du feldspath par pays durant les années 1998 à 2002.

Tableau 05. Production mondiale par pays durant l'année 1998-2002 en tonne.

Pays	1998	1999	2000	2001	2002
Algérie	7,000 e	2,820 e	707	233 r	200
Argentine	42,468	62,926	61,000e	60,000e	60,000
Australie	65.500	49.600	50.000	50,000	50,000
Brésil	59,200	97,661r	4117,715p, r	4105,000p,r	4100,000
Bulgarie	36,000	28,000	22,000	23,000 r	25,000
Birmanie	512,000	12,000	12,000	12,000	12,000
chili	1,460	1,346	2,311	2,867r	2,900
Colombie	55,000	55,000	55,000	55,000	55,000
cuba	14,400	4,800	6,700	7,000 e	7,000
République tchèque	266,000	244,000	337,000	300,000 e	300,000
Equateur	60,000 e	33,142	47,041	37,633 r	38,000
Egypte	325,654 6	330,000	330,000	300,000	350,000
Éthiopie	5,000 e	391	285	310 e	310
Finlande	40,000 e	40,000 e	33,200 r	34,289 r	35,000
France	706,000	638,000	642,000	650,000	650,000

Allemagne	460,000	450,000	450,000	450,000	450,000
Grèce	65,000	78,500	96,000	95,000	95,000
Guatemala	17,248 e	17,072	17,804	17,000	17,000
Indien	104,509	105,000	110,000	110,000	110,000
Iran	185,709	239,779	200,000 r, e	250,000 e	250,000
Italie	2,748,000	2,700,000	2,500,000	2,600,000	2,500,000
japon	7 50,000	52,000	52,000	50,000	50,000
Jordon	4,008 e	1,000	11,112	11,500	11,500
Kenya	115 e	115 e	82	73 r	75
République de Corée	248,493	409,334	330,417	389,361 r	390,000
macédonien	8,137	11,000	10,000	10,000	10,000
Madagascar	--	63r	7 r	6 3 p,r	3
Malaysia	31,369 e	26,940	27,000	27,000 e	27,000
Mexico	197,866 l	262,24	334,439	329,591 r	325,000
Maroc	18,332	1,112	6,052 r	8,979 r	9,000
Nigeria	500	500	600	600	600
Norvège	75,000 6	72,777	75,000	73,000	75,000
Pakistan	31,191 e	29,235	43,186	44,000	45,000
Pérou	3,983	1,594	5,642	4,253 r	4,500
Philippine	2,938	16,909	3,440	33,122 r	30,000
Pologne	116,700 r	120,100 r	165,200 r	220,600 r	200,000
Portugal	120,000 e	114,688	119,837	120,000 e	120,000
Romania	37,010	36,635	37,157 r	43,047 r	40,000
Russie	40,000	45,000	45,000	45,000	45,000
Serbie et Monténégro	4,280	3,453	4,254 r	4,000 r, e	4,000
Slowacki	--	6,000	6,000	6,000 e	6,000
Sud africain	56,761	58,986	66,774	66,736	57,197 6
Espagne	430,000	450,000	460,000	450,000	450,000
Sri-Lanka	25,274	26,012	28,638	27,438 r	27,000
Seward	45,000 e	45,000	35,000 r	40,450 r	40,000
Thaïlande	440,288	626,415	542,991	550,000 e	540,000
Turquie	1,089,483	1,369,655	1,147,716	1,200,000 e	1,200,000
Royaume-Unis chine	3,278	6 3,000	2,000	2,000	2,000
United state	820,000	875,000	790,000	800,000	790,000
Uruguay	2,240	1,500 r	1,556	2,493 r	1,600
Ouzbékistan	i	300	4,300	4,300 e	4,300
Venezuela	148,000	125,000	130,000 r	142,000 r	140,000
Zimbabwe	41 2,2	250 e	2, 2,059 r	1,055 r	800
Total	9, 330,000	9, 980,000 r	9, 580,000 r	9,870, 000 r	9, 750,000

e: Estimé ; p: préliminaire; r: réserve ; -- : Zéro; i: Indisponible.

**Chapitre II : INTERET DE LA MATIERE
PREMIERE FELDSPATHIQUE COMME AJOUT
DANS L'INDUSTRIE CERAMIQUE ET VERRIERE**

2. INTERET DE LA MATIERE PREMIERE FELDSPATHIQUE COMME AJOUT DANS L'INDUSTRIE CERAMIQUE ET VERRIERE

2.1. DOMAINE D'UTILISATION DU MINERAI DE FELDSPATH

Les feldspaths sont les composants essentiels des roches ignées, métamorphiques et sédimentaires, et de ce fait, bon nombre de roches sont classées suivant leur teneur en feldspath. La composition minéralogique de la plupart des feldspaths dépend de leur position dans le système ternaire Orthose (KAlSi_3O_8), Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Chimiquement, les feldspaths sont des aluminosilicates contenant du sodium, du potassium, du fer, du calcium ou du baryum, ou une combinaison de ces éléments.

Les minéraux dont la composition est comprise entre l'Albite et l'Anorthite sont connus sous le nom de plagioclases, tandis que ceux compris entre l'Albite et l'Orthose s'appellent feldspaths alcalins. Cette dernière catégorie présente un intérêt particulier pour l'industrie.

Parmi les nombreuses roches dans lesquelles ils sont présents, les feldspaths sont particulièrement abondants dans les roches ignées telles que le granite, qui contient jusqu'à 50 ou 70% de feldspaths alcalins. Le granite est toutefois rarement exploité pour sa teneur en feldspath.

Les roches liées au granite sont plutôt utilisées comme source de feldspath. Le feldspath commercial est principalement exploité à partir de gisements de pegmatites ou de sables feldspathiques. L'aplite, une roche ignée à grains fins ayant la même composition minéralogique que le granite, est également souvent utilisée pour sa teneur en feldspath (WWW.ima-eu.org/eurofel.html).

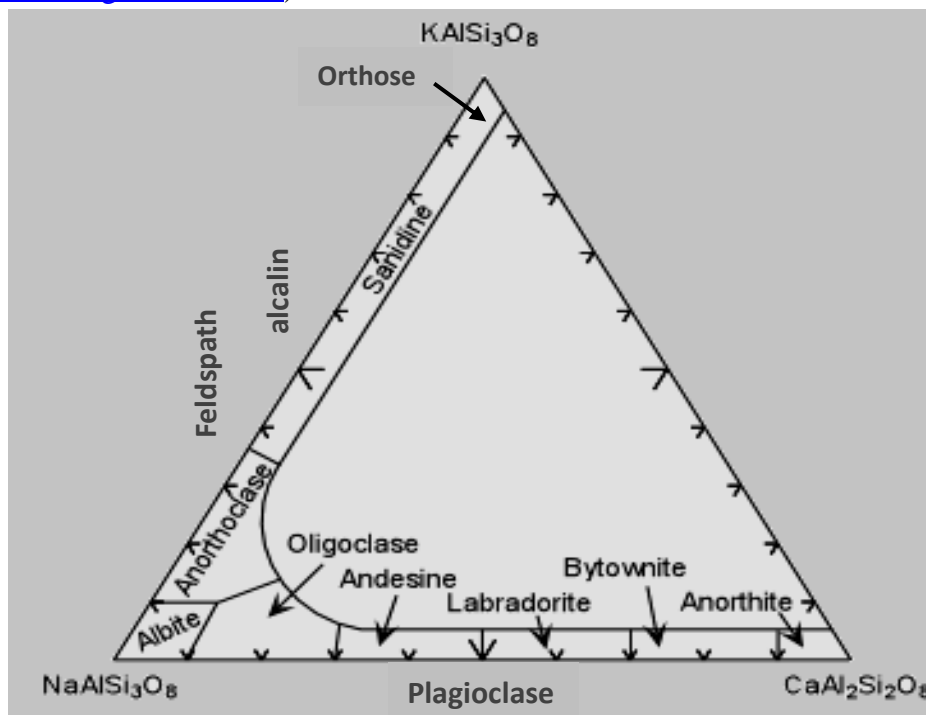


Figure 08. Système ternaire orthose (KAlSi_3O_8), albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Les feldspaths jouent un rôle de fondants dans la céramique et le verre, et sont également utilisés comme charges fonctionnelles dans les industries de la peinture, du plastique, du caoutchouc et des colles. L'industrie du verre et la céramique sont les principaux consommateurs de feldspath et représentent 95% de la consommation totale (Kamar Shah Ariffin 2003).

2.1.1. UTILISATION DE FELDSPATH DANS LE SECTEUR DE CERAMIQUE

Le feldspath est l'ingrédient le plus important dans la fabrication des céramiques, après l'argile. Comme le feldspath ne possède pas de point de fusion précis, il fond progressivement selon les variations de températures. Cette propriété facilite la fusion du quartz et des argiles et permet, grâce à un mélange approprié, de moduler cette importante phase dans la fabrication de la céramique.

Les feldspaths sont utilisés comme fondants pour constituer une phase vitreuse à basse température, et en tant qu'apport d'alcalis et d'aluminium dans les verres. Ils augmentent la résistance, la ténacité et la solidité du noyau céramique et cimentent la phase cristalline des autres ingrédients, en amollissant, fondant et fluidifiant les autres constituants.

Dans le secteur du carrelage, le feldspath est le principal constituant entrant dans la composition du noyau. Il est utilisé comme fondant pour abaisser la température de vitrification d'un noyau céramique pendant la cuisson et faciliter la formation d'une phase vitreuse. Les tensions superficielles rassemblent les particules solides restantes en entraînant une densification du noyau céramique. Au fur et à mesure que la température augmente, les alcalis deviennent davantage actifs, dissolvant d'abord les particules d'argiles et ensuite la silice.

Le feldspath améliore la fusibilité de la vaisselle afin d'obtenir un produit sans défaut. L'utilisation de feldspath au sein des noyaux céramiques vitreux des appareils sanitaires illustre bien ce processus d'optimisation (WWW.ima-eu.org/eurofel.html).

2.1.2. UTILISATION DE FELDSPATH DANS LE SECTEUR DE VERRE

Le feldspath est un ingrédient très important dans la fabrication du verre en raison de son action de fondant qui réduit la température de fusion du quartz et contrôle la viscosité du verre. La teneur en alcalis dans le feldspath agit comme fondant en diminuant la température de fusion du verre ce qui réduit par conséquent les frais de production. Les feldspaths sont en fait ajoutés au verre pour leur teneur en alumine qui accroît sa dureté, sa stabilité et sa résistance à la corrosion chimique. Les matières premières pour la fabrication du verre sont le sable de silice, la soude (carbonate de sodium) et le calcaire (carbonate de calcium).

Le feldspath améliore le processus de fabrication. L'alumine apporte dureté, souplesse et résistance mécanique, elle rend le verre plus résistant aux agents chimiques et mieux adapté à la compression. Les fondants réduisent la température de fusion afin de diminuer l'apport d'énergie et la quantité de soude nécessaires.

Les feldspaths sont utilisés dans la production de verre plat (fenêtres, pare-brise...) mais aussi dans le verre d'emballage. Ils entrent dans la composition des écrans de télévisions et

d'ordinateurs, des phares de voitures, des tubes fluorescents, des bouteilles de parfum, des bouteilles de limonade, du verre pharmaceutique ou de laboratoire,...

2.1.3. UTILISATION DE FELDSPATH COMME CHARGES

Les feldspaths sont également utilisés comme charges et agents d'allongement dans plusieurs applications telles que les papiers, peintures, les plastiques et le caoutchouc. Les propriétés avantageuses des feldspaths sont: une bonne dispersion, une inertie chimique, une stabilité du pH, une bonne résistance à l'abrasion, une faible viscosité malgré d'importants apports de charges, un indice de réfraction intéressant et une résistance au gel. Les produits utilisés dans ces cas-là sont généralement finement broyés.

2.1.4. UTILISATION DE FELDSPATH DANS LES EMAUX ET FRITTES

Le feldspath entre dans la composition de l'émail pour éviter les défauts et assurer la netteté du produit fini: frites, émaux céramiques ou pour carreaux céramiques, sanitaires, vaisselle, porcelaine pour circuits électriques et articles cadeaux, pour n'en citer que quelques-uns.

D'autres utilisations de feldspath, dans les peintures, les abrasifs doux, l'uréthane, les électrodes de soudage (production de l'acier) et leur enrobage, la mousse de latex, les agrégats pour revêtement routier...

2.2. PROCÉDE DE FABRICATION DE VERRE ET CERAMIQUE

2.2.1. FABRICATION DES VERRES

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 (www.infovitrail.com).

2.2.1.1. 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.

2.2.1.1.1. Oxydes formateurs (Les vitrifiants)

- 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°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.

2.2.1.1.2. Oxydes modificateurs ou les fondants (oxydes alcalins)

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°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.

2.2.1.1.3. 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.

2.2.1.1.4. 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 (Martin benjamin et SAJE Stéphane, 2001-2004).

2.2.1.2. 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 Bohême 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 ».

2.2.1.3. 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.

2.2.1.4. 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.

2.2.1.5. État physique du verre

2.2.1.5.1. 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.

2.2.1.5.2. 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.

2.2.1.5.3. 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 (Martin benjamin et SAJE Stéphane, 2001-2004).

2.2.1.6. 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 sot 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.

2.2.1.6.1. 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 (β quartz----> α 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 des 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 06. 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
$MgCO_3(CO_3)_2 + 2SiO = MgSiO_3 + NaSiO_3 + CO_2$.	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 se figurants dans ce tableau 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.

2.2.1.6.2. 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 880C°, 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 décarnisation ne se commence qu'au dessus de 400C°.

2.2.1.6.3. Affinage et l'homogénéisation du verre

Lors de l'affinage et de l'homogénéisation les bulles de gaz pressentes 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 différentiels.

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 : CO₂, N₂, SO₂, mais aussi de vapeur d'eau, et des autres gazes 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 :

$$v = \frac{2(\rho_1 - \rho_2)}{9\eta} g r^2 \dots\dots\dots (1)$$

Où

ρ_1 : densité du liquide en g/cm³

ρ_2 : densité du gaz en g/cm³,

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 favorisantes 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. (Gérard Pajean, 2007). Les courants intensifs de la fonte favorisent l'homogénéisation ainsi que l'affinage. 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.

2.2.1.6.4. 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 compliquée, 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 (Gérard Pajean, 2007).

2.2.2. FABRICATION DES CERAMIQUES

Les différents secteurs de l'industrie céramique recouvrent un vaste éventail de matières premières et de techniques de fabrication, mais tous ces secteurs comportent une sélection d'argiles ou d'autres matières principalement inorganiques qui sont traitées, puis séchées et cuites. Les principaux secteurs reposant sur des produits céramiques (la céramique) manufacturés sont les suivants :

- les carreaux pour sols et murs, • les briques et les tuiles, • les céramiques ornementales (céramiques domestiques), • les produits réfractaires, • les appareils sanitaires, • les céramiques techniques, • les tuyaux en grès, • les granulats d'argile expansée et les abrasifs inorganiques.

Les méthodes et les étapes fondamentales des procédés de fabrication ne diffèrent que très légèrement dans la fabrication des différents produits céramiques en dehors du fait que pour la fabrication, par exemple, des carreaux pour sol et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs (céramiques domestiques), des appareils sanitaires, ainsi que des céramiques techniques, on emploie souvent un procédé de cuisson en plusieurs étapes. C'est l'une des raisons pour lesquelles les différents secteurs de la céramique se classent traditionnellement en deux

groupes : le groupe de la céramique « grossière » ou « de construction » qui comprend les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée et le groupe de la « céramique fine » ou de la « céramique traditionnelle et industrielle », qui regroupe les secteurs des carreaux pour sols et murs, des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques. Le mode de réalisation technique peut être toutefois extrêmement différent, selon les critères spécifiques des produits et les caractéristiques des matières premières utilisées. Par exemple, il existe différents fours à fonctionnement continu (les fours tunnels) et à fonctionnement périodique (les fours intermittents) qui servent à la cuisson d'un même produit céramique ou de produits différents.

Les produits de l'industrie céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » diffèrent de ceux de l'industrie céramique « grossière » ou « de construction » principalement dans leur texture.

La frontière entre l'industrie céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » et l'industrie céramique « grossière » ou « de construction » varie entre des diamètres particuliers équivalents à 0,1 et à 0,2 mm. Les produits de céramique « grossière » ou « de construction » présentent une inhomogénéité de plus de 0,2 mm, mais la frontière entre la céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » et la céramique « grossière » ou « de construction » n'est pas réellement fixée à l'heure actuelle. Ainsi, c'est la technologie de transformation de la céramique « fine » ou « traditionnelle et industrielle » qui est utilisée pour fabriquer les produits super-réfractaires (32, TWG Ceramics, 2006). Dans cette recherche nous intéressons uniquement par les céramiques à base de feldspath.

2.2.2.1. Céramiques feldspathiques : le « modèle » des céramiques dentaires

a- Composition physique

La poudre est composée de grains de diamètre compris entre 4 et 100µm. Elle contient de plus des plastifiants hydrosolubles facilitant la mise en forme (alginate, sucres), et des colorants.

b- Composition minéralogique

Feldspath et feldspathoïdes composent la matrice vitreuse des céramiques,

Température de fusion = 1100 à 1300°C

Feldspath : Feldspath potassique (Orthose) : $K_2 Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$

Feldspath sodique (Albite) : $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$

Feldspathoïdes : Néphéline : $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot (K \text{ ou } Na) O$

Leucite : $4 SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot K_2O$

Quartz : Compose la charpente cristalline. Température de fusion : 1700°C.

c- Composition chimique

Les principaux oxydes qui entrent dans la confection des céramiques dentaires sont ;

- **Oxyde de Silicium (silice)**, SiO_2 : 55 à 78% ; Composant à la fois de la phase vitreuse et de la phase cristalline dispersée.
- **Oxyde d'aluminium (alumine)**, Al_2O_3 : < 10% ;

C'est la composant de la phase vitreuse essentiellement, mais aussi parfois donne une phase cristalline, qui diminue alors la translucidité.

L'augmentation de la concentration en oxydes principaux s'accompagne d'une augmentation de la température de cuisson (frittage), de la tension superficielle, de la résistance mécanique et de la rétraction après frittage.

➤ **Oxydes alcalins modificateurs ;**

Ce sont des oxydes de cations alcalins monovalents Na_2O , K_2O , Li_2O leurs rôles essentiels est la modification de la phase vitreuse, abaissent la température de ramollissement, augmentent le coefficient de dilatation thermique en dessous de la température de transition vitreuse et diminuent la tension superficielle et la viscosité.

Les céramiques feldspathiques sont surtout utilisées pour l'émaillage des armatures métalliques des restaurations céramo-métalliques.

La résistance de ces restaurations est étroitement liée à la formation d'une liaison céramique métal forte. Plusieurs paramètres participent à l'établissement de cette liaison parmi lesquels l'étalement de la pâte de céramique sur l'armature métallique (dépendant du mouillage par la céramique de l'armature) et un coefficient de dilatation thermique des 2 matériaux très proche.

Le coefficient de dilatation thermique des métaux est la plupart du temps très supérieur à celui des céramiques. Cela conduit, lors du refroidissement de la restauration après le frittage de la céramique, et dès que la céramique est devenue "solide" (en deçà de la température de transition vitreuse) à une forte rétraction du métal et une faible rétraction de la céramique. Si le différentiel n'est pas trop important, la mise en compression de la céramique en résultant peut permettre le blocage de la propagation de fissures et donc le renforcement de la restauration. Par contre, si le différentiel est important, une fracture de la céramique peut apparaître. C'est pourquoi, il est important de modifier, on augmentant le coefficient de dilatation thermique des céramiques, grâce aux oxydes modificateurs. (Sadoun. M, 2000).

De plus lorsque la concentration en K_2O est élevée on obtient des céramiques dites de nouvelle génération (riches en leucite) qui possèdent des propriétés mécaniques plus élevées.

2.2.2.2. Nouvelles céramiques feldspathiques

Les céramiques à fortes teneurs en K_2O (11%) sont le siège de cristallisation à des températures comprise entre 700° et 1200° , en particulier de leucite (K_2O , Al_2O_3 , 4SiO_2)

La dispersion importante de ces cristaux de petite taille dans la matrice vitreuse permet une augmentation significative de leur résistance. Cependant elle entraîne une rétraction plus importante de ces matériaux lors du refroidissement. Ceci est dû à son important coefficient de dilatation thermique et au changement de structure cristalline lors du refroidissement. La

formation de fissures peut alors compromettre le renforcement de ces matériaux (Chevalier J, 2006). De plus ce coefficient de dilatation thermique ne permet pas la “cuisson” de ces matériaux sur des armatures métalliques. Les oxydes mineurs ce sont les opacifiants, les fondants et les colorants.

- Opacifiants : 6 à 15% : ZrO_2 , SnO_2 , TiO_2

- Fondants : 0 à 5% : B_2O_3 , $Na_2B_4O_7$. Ils abaissent la température de cuisson (frittage).

- Colorants : Oxydes métalliques et terres rares (agents fluorescents) comme TiO_2 pour le jaune ; Fe_2O_3 pour le marron ; CoO pour le bleu ; NiO pour le gris et V_2O_5 pour le jaune.

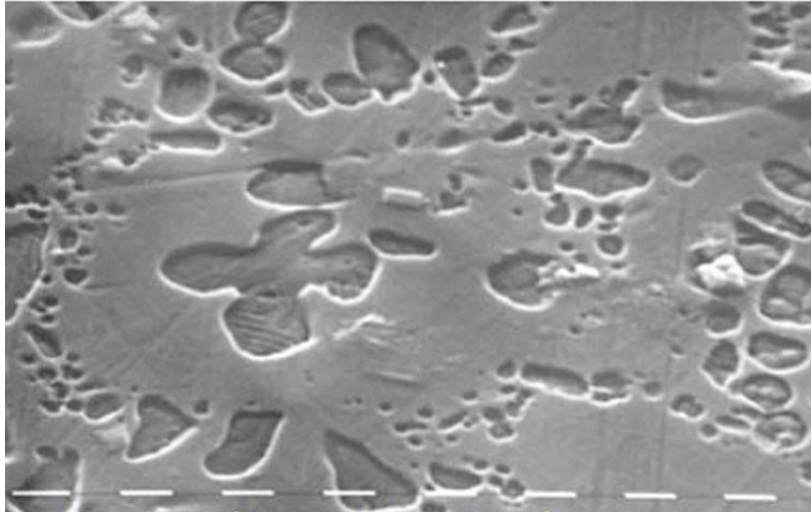


Figure 09. Microphotographie en microscopie électronique à balayage d'un échantillon de céramique feldspathique à haute teneur en leucite (Optec hsp), (Quemard Le Meins. C. 2007).

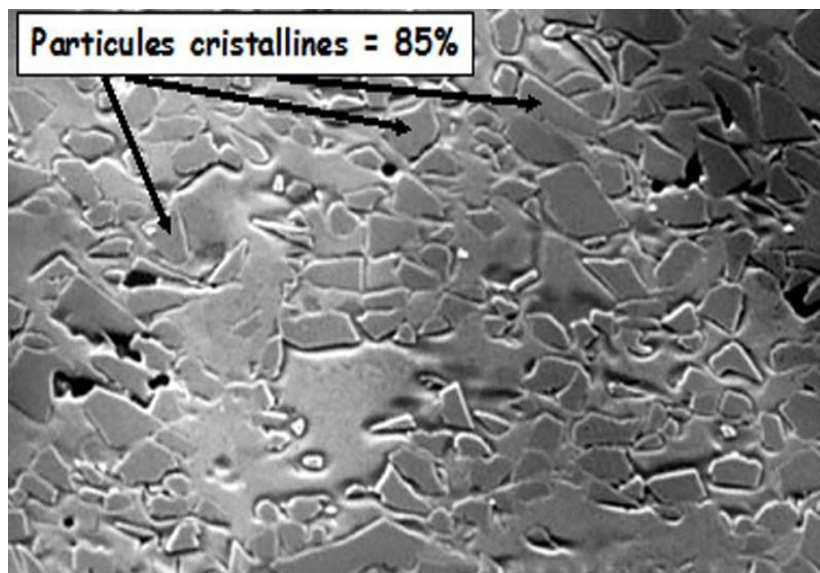


Figure 10. Microphotographie en microscopie électronique à balayage d'un échantillon de céramique alumineuse à haute teneur en particules cristallines et verre infiltré (Quemard Le Meins. C. 2007).

2.2.2.3. Céramique dentaire

➤ Fabrication

Deux principes de fabrication sont possibles pour créer une céramique dentaire.

- Le premier, qui est le plus ancien et qui a toujours cours, vise à utiliser du feldspath, minéral naturel, permettant d'obtenir une porcelaine feldspathique traditionnelle.
- Le second utilise des matières premières de synthèse donnant naissance à une céramique dite synthétique. C'est cette seconde technique qui a été retenue par Sofraced depuis de nombreuses années pour fabriquer ses gammes de céramiques.

A cela plusieurs raisons tout d'abord il est ainsi possible de travailler avec des matières premières pures permettant d'optimiser le verre de base, sa composition, sa pureté et sa microstructure. Cela permet également d'assurer la reproductibilité des lots de verres et de vitrocéramiques en production et éviter toute dépendance de la composition des gisements de minerais naturels.

Les vitrocéramiques comme dentCeram LF sont constituées d'une base vitreuse dans laquelle ont été développés des cristaux dont la nature, le nombre et la taille apportent les propriétés finales.

Le verre de base est la silice, SiO_2 ; il a une température de fusion de l'ordre de 1700°C et un faible coefficient de dilatation ($0.5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) en raison de très fortes liaisons silice-oxygène. Ses propriétés ne permettent pas de recouvrir les alliages dentaires. Pour abaisser sa température de cuisson et augmenter son coefficient de dilatation, il est nécessaire de modifier le réseau de la silice, de casser ces fortes des liaisons, en intégrant des modificateurs de réseaux, des fondants, que sont typiquement les oxydes alcalins, tels que l'oxyde de sodium ou de potassium. Ceci présente toutefois des limites, car au-delà d'un certain seuil ces alcalins augmentent drastiquement le phénomène de lixiviation (extraction des principes solubles d'une substance par le lavage). Le travail de l'ingénieur consiste à bien maîtriser la chimie des verres au niveau du choix des constituants et de leur proportion, afin d'obtenir les propriétés requises en terme de température, de dilatation, de solubilité chimique, de transparence, de qualité optique (Poujade. J.M, Zerbib. C, Serre. D. 2003).

➤ Schéma synoptique d'élaboration de dentceramque

La première étape de fabrication consiste à mélanger les matières premières suivant une composition calculée pour obtenir une céramique dentaire ayant une température de cuisson de 765°C et un coefficient de dilatation de $14.2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (mesuré entre 25 et 500°C). Ce mélange de poudres d'oxydes, de carbonates, va être transformé en verre fondu au cours du processus de fusion.

La température s'élève alors jusqu'à 1400°C - 1500°C . Une montée progressive en température va permettre au mélange de subir diverses transformations déshydratation, décomposition des carbonates avec dégagement gazeux de CO_2 , formation locale de composés par frittage, fusion de certains éléments qui permettront la dissolution anticipée des éléments les plus réfractaires (Quemard Le Meins. C. 2007).

Le verre ainsi formé va être homogénéisé pendant plusieurs heures à haute température et affiné de façon à éliminer les bulles de gaz issues notamment de la dissociation des matières premières. (Figure 10).

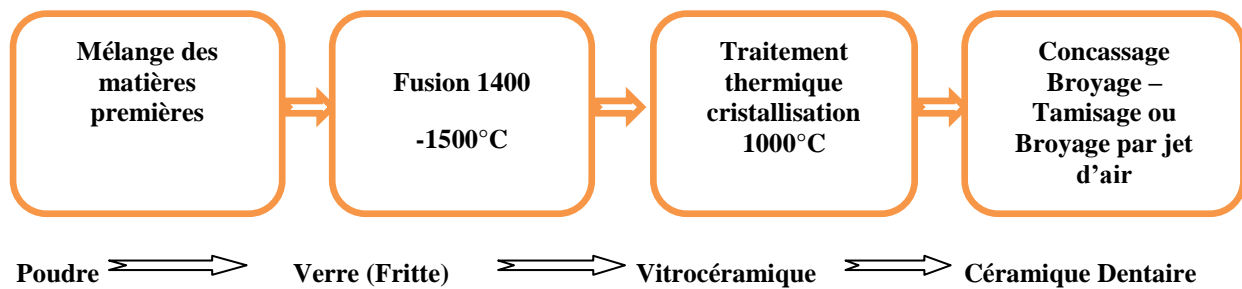


Figure 11. Schéma synoptique d'élaboration des dents céramiques.

Le verre fondu est ensuite trempé dans de l'eau pour empêcher sa cristallisation. Le choc thermique ainsi créé permet d'obtenir de petits blocs inférieurs à 1cm et facilite le broyage ultérieur du verre

La dilatation maximale d'un verre répondant aux exigences d'une application dentaire, notamment en matière de solubilité chimique, se situe aux alentours de $11 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$. Cette dilatation ne permet pas de recouvrir les alliages dentaires dits conventionnels et à fortiori pas les alliages haute dilatation. L'utilisation de cristaux de leucite (KAlSi_3O_8), dont le coefficient de dilatation est d'environ $30 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$, va permettre de contrôler à façon la dilatation de la céramique dentaire. Un traitement thermique de cristallisation permet ainsi de générer de fins cristaux de leucite dans le verre de base. Le réseau du verre est non ordonné contrairement à un réseau de cristaux. Le traitement thermique de cristallisation va donc permettre d'organiser une partie des atomes du verre sous forme de cristaux ; c'est ce que l'on appelle une vitrocéramique.

Ce processus est dépendant de la composition du verre de base, calculée de manière à prédéfinir la proportion de leucite à cristalliser en adaptant les quantités de SiO_2 , Al_2O_3 et K_2O . La viscosité du verre joue également un rôle dans la vitro-céramisation puisqu'elle contrôle la facilité de déplacement des atomes. Pour fabriquer dent Céram, dont l'atout principal est la stabilité au fil des cuissons notamment en dilatation et en teinte, il est nécessaire de contrôler à la fois la composition vitreuse initiale (ce qui est possible en travaillant avec des matières premières de synthèse), la température et le temps du traitement thermique.

Cette vitrocéramique est ensuite concassée. Le broyage-tamisage est alors effectué suivant deux techniques. Le broyage en jarre de porcelaine suivi d'un tamisage est encore utilisé pour des masses de la gamme bien précises (poudres colorées par exemple) mais l'utilisation d'une technologie de pointe telle que le broyage par jet d'air tend à remplacer cette double étape. Cette technique consiste à amener la vitrocéramique concassée dans une enceinte dans laquelle arrive également de l'air comprimé qui va faire s'entrechoquer les grains. Un sélecteur sépare les grains broyés en fonction de leur taille et permet alors d'obtenir la poudre de granulométrie voulue (Quemard Le Meins. C. 2007).

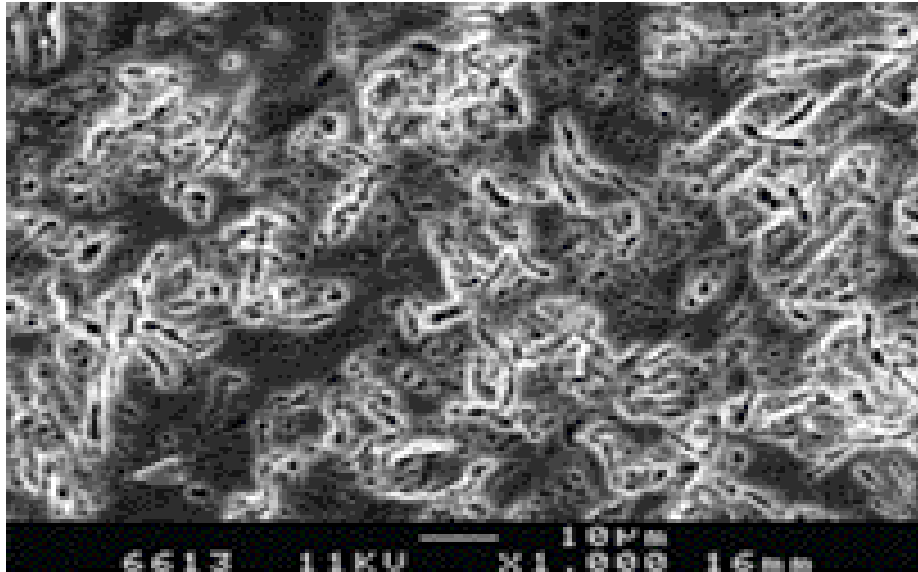


Figure 12. Microstructure de la céramique dentaire montrant de fins cristaux de leucite sans micro-craquelures à l'interface cristaux verre (Quemard Le Meins. C. 2007).

2.2.2.4. Céramiques techniques

Peuvent être classées en familles :

Les oxydes métalliques représentent la plus importante, les carbures ont une très bonne conductivité thermique et électrique, mais ils sont très fragiles ; les nitrures ont pour la plupart un haut point de fusion. Ils sont assez peu utilisés ; les borures ont un point de fusion compris entre 1900 et 3000 °C, une basse résistivité électrique, une haute stabilité et une dureté élevée, mais ils sont très peu résistants à l'oxydation à plus de 1200 °C ; les siliciures ont des densités modérées, des points de fusion assez peu élevés, une grande dureté et une bonne résistance à l'oxydation ; les sulfures sont stables à haute température et possèdent un point de fusion élevé ; les composites sont des matériaux renforcés en fibres, ils doivent avoir de bonnes propriétés mécaniques, mais aussi résister aux hautes températures. On utilise pour cela des fibres continues de carbonitrure de silicium, notamment dans l'aéronautique. Les outils de coupe en céramique renforcée, par exemple, servent à l'usinage des alliages les plus durs.

Dans le cas de certains produits industriels, les céramiques sont réalisées à partir de matières premières préalablement synthétisées. Cela permet la production de produits dont les propriétés physiques et chimiques sont particulièrement contraintes (Stéphane Gaston, 2010).

Exemples d'application dans le médical

Dans le médical leur neutralité chimique et leur composition, voisines de celles des tissus osseux, permettent aux céramiques de conserver leurs propriétés une fois implantées dans l'organisme (qui est un milieu très agressif), et ainsi éviter les rejets. Leur résistance à la torsion et au frottement permet d'obtenir des prothèses quasi inusables.

Deux générations ont été développées :

- **Les céramiques inertes** : d'une grande innocuité vis-à-vis de l'organisme grâce à leur stabilité chimique, elles étaient au départ à base d'alumine, mais la zircone, grâce à sa tolérance biologique similaire et à de meilleures propriétés mécaniques, permet la mise au point d'éléments beaucoup plus petits demandant une grande fiabilité (prothèses du doigt, de l'épaule, du genou).
- **Les céramiques bioactives** : Ce sont des céramiques dont la composition chimique est encore mieux adaptée, capables d'interagir positivement avec les tissus environnants, puisqu'à base de la principale composante minérale de l'os, l'hydroxapatite. Elles s'intègrent donc parfaitement dans un environnement osseux. Mais leur relative fragilité limite leur utilisation, essentiellement au revêtement des parties métalliques des prothèses (hanches, genoux), réalisé par projection plasma sur la surface métallique. La surface obtenue est microporeuse, et favorise la repousse osseuse, avec des taux de réussite de plus de 90 % après dix années de mise en place. Quant aux prothèses dentaires, là aussi, la zircone, combinée à des traitements de surface, a de plus en plus la préférence des praticiens, car elle permet d'améliorer l'aspect des prothèses.



Figure 13. Une rotule de prothèse de hanche en céramique

**Chapitre III : CARACTERISATION PHYSICO-
CHIMIQUE DE LA MATIERE FELDSPATHIQUE
D'AIN-BARBAR**

3. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU MINERAI DE FELDSPATH D'AIN- BARBAR-ANNABA

3.1. 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). La figure ci-dessous représente les différentes étapes pour la caractérisation du minerai.

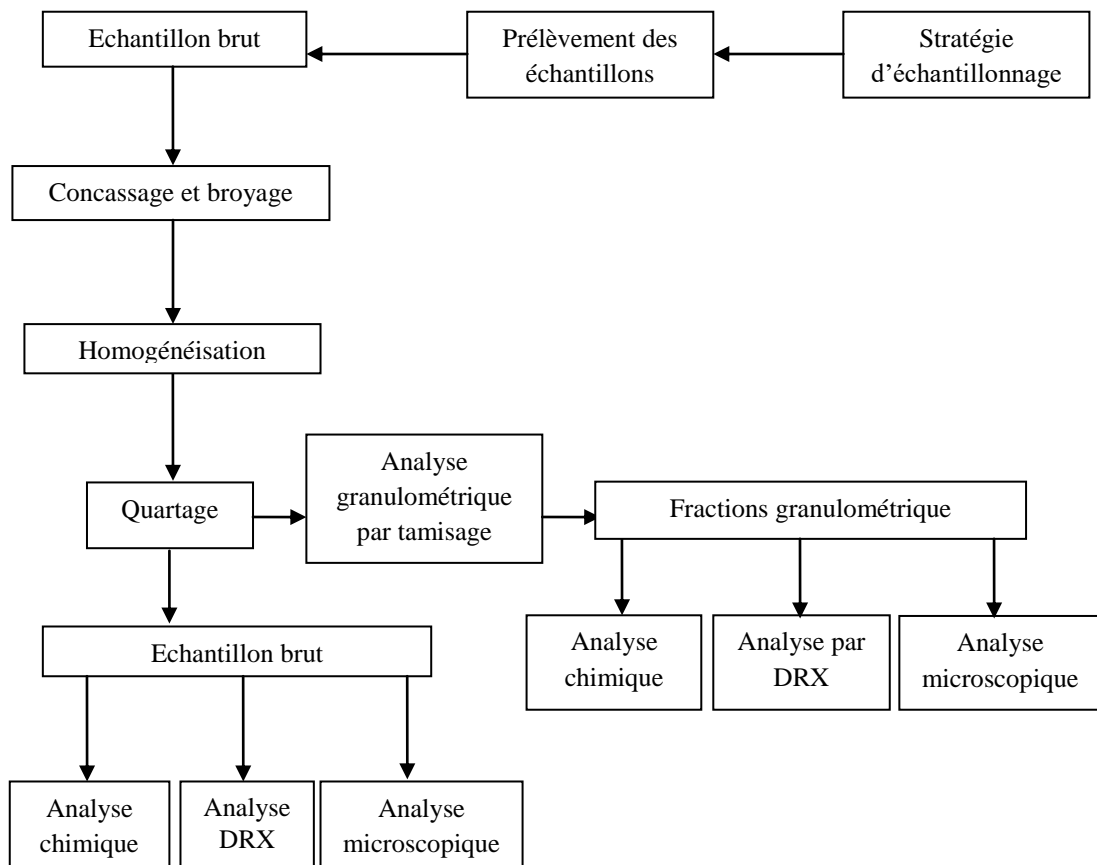


Figure 14. Protocole de caractérisation du minerai de feldspath d'Ain Barbar.

3.2. 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 leurs préparations 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 sec, liquide ou gaz, du volume requis et de la localisation du minerai.

Dans notre cas nous avons fait le prélèvement de l'échantillon à partir de la carrière (tas abattus et de deux gradins) le système de l'échantillonnage est aléatoire. (figure15).



Figure 15. Tas représente le lieu de prélèvement des échantillons.

La figure 16 représente la taille ou dimension des échantillons prélevés au cours de l'échantillonnage.



Figure 16. Taille des échantillons prélevés.

Les échantillons prélevés sont conditionnés dans des sacs et transportés vers le laboratoire où subit les différentes étapes de préparation afin de 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 le précède.

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

3.3. OBSERVATION MACROSCOPIQUE

L'observation macroscopique des échantillons selon la couleur et les traces permet de déterminer plusieurs variétés de feldspath de couleur grise, rose foncé ou rosâtre et de couleur blanc qui indique l'absence des dépôts de fer, par contre on observe aussi qu'il y a une oxydation superficielle de minerai de feldspath comme le montre la figure 17.

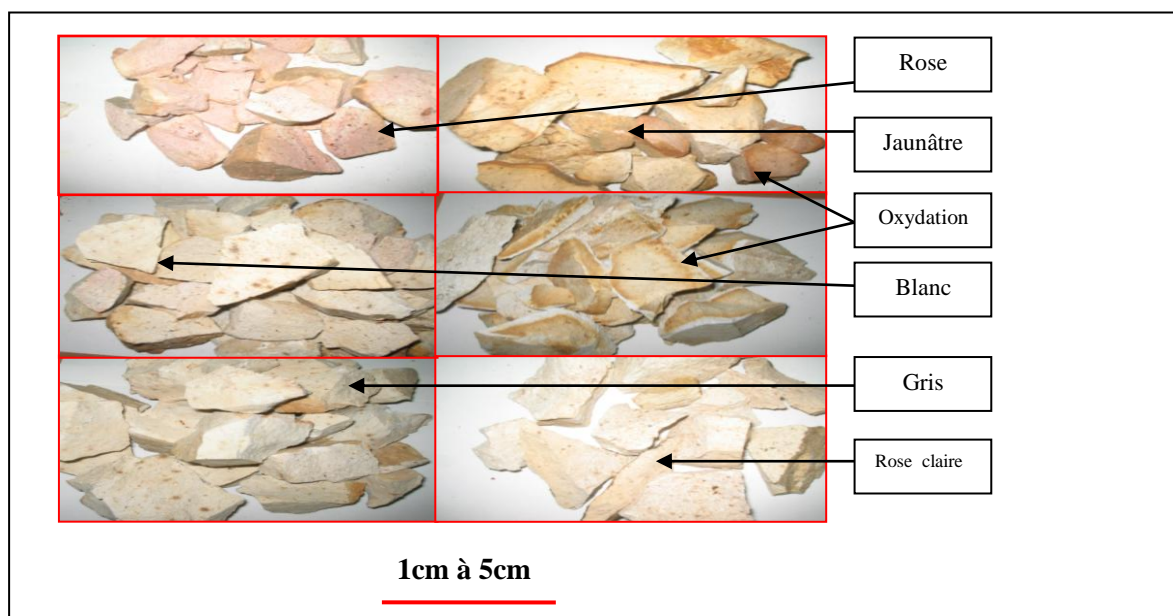


Figure 17. Sélection visuelle d'après la couleur après concassage grossier (03/12/2012).

3.4. PREPARATION DE L'ECHANTILLON POUR ANALYSES MINERALOGIQUES ET CHIMIQUES

3.4.1. CONCASSAGE

Cette opération se fait à l'aide d'un concasseur à mâchoire à double effet (doit) de laboratoire, la granulométrie des particules est de 5mm, le produit obtenu subir une quartage et homogénéisation.



Figure 18. Opération de concassage.

3.4.2. OPERATION DE QUARTAGE ET HOMOGENEISATION

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), en répète la même opération. Comme montre le schéma (Figure 19) jusqu'à l'obtention d'un échantillon pour l'essai ou pour analyse.

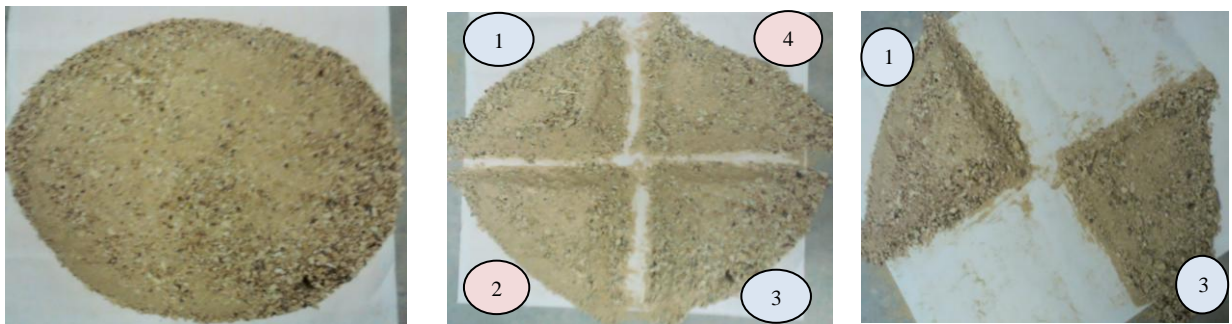


Figure 19. Opération de quartage et homogénéisation.

3.5. ANALYSE GRANULOCHIMIQUE

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 les 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 correspondant 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 (www.La.Refer.Org).

3.5.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU FELDSPATH

La granulométrie d'un échantillon de particules est une caractéristique relativement simple à concevoir mais en pratique difficile à déterminer surtout lorsque la forme des particules est irrégulière. Tout en affirmant la diversité des méthodes et techniques envisageables pour estimer la granulométrie d'une population des grains, les techniques comme la microscopie, le tamisage, la sédimentation et l'élutriation sont souvent recensées (Wills., 2001).

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.) (M. Ghomari F. & Mme Bendi-Ouis. A.2008). Outre, 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 (www.La.Refer.Org).

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.

Le produit obtenu après concassage et broyage de la roche du feldspath subi une opération de tamisage, on utilisera en général les tamis qui correspond respectivement les mailles suivantes : 4mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,250 mm ; 0,125 mm ; 0,063 mm ; 0,045 mm. Le matériau est 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 20 min avec une amplitude de vibration = 60 et le poids total de l'échantillon = 1000 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 de valorisation des ressources minières et environnement (LAVAMINES) de département des mines de l'université de Badji Mokhtar Annaba. Les résultats de l'analyse sont représentés dans le (Tableau 7).

Tableau 07. Résultats d'analyse granulométrique

Tranche granulométriques	Masse	Pourcentage massique	Rendement des refus cumulés	Rendement des tamisâts
mm	(g)	%	%	%
> 4	260.2	26.02	26.02	100
-4 +2	305.4	30.54	56.56	73.98
-2 +1	130.0	13.00	69.56	43.44
-1 +0.500	71.1	07.11	76.67	30.44
-0.500 +0.250	40.4	04.04	80.71	23.33
-0.250 +0.125	35.2	03.52	84.23	19.29
-0.125 +0.063	40.3	04.03	88.26	15.77
-0.063 +0.045	18.2	01.82	90.08	11.74
< 0.045	99.2	09.92	100	09.92

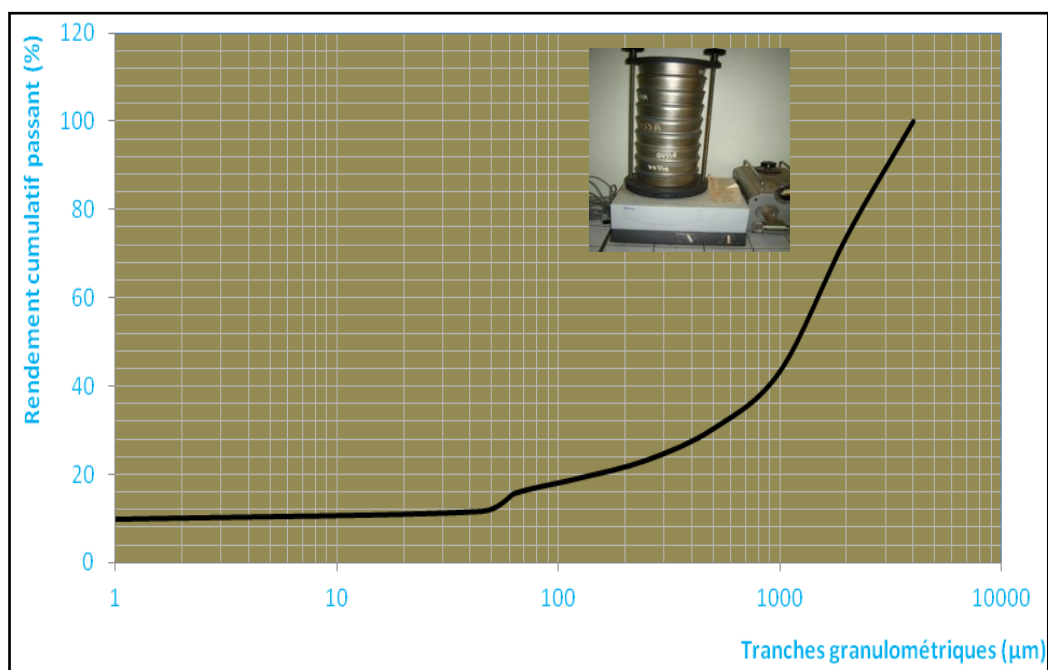


Figure 20. Courbe granulométrique d'un échantillon de feldspath

La courbe granulométrique d'un échantillon du feldspath concassé à 5 mm a été réalisée par tamisage à sec. Elle montre un produit présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de +4 à 1mm, et de -1 mm à -0.045 mm, donc la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière irrégulière.

3.5.2. ANALYSE CHIMIQUES

Les résultats d'analyse chimique pour chaque tranche granulométrique sont combinés à ceux de l'analyse granulométrique dans le but de déterminer leur répartition granulométrique telle que développée au figure 19 et 20 et tableau 8.

La masse pondérée représente la masse de feldspath présente dans chaque fraction sur une base de 1000 grammes d'échantillon qui est calculée à partir de la teneur (concentration de K_2O mesurée pour chaque fraction granulométrique) et du pourcentage massique.

Tableau 08. Composition chimique de différentes tranches granulométriques.

Fraction, mm	Pourcentage massique (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	PAF (%)
brut	100	76.21	13.39	8,40	0.29	0,32	0,10	0,02	0,29	0,01	0,01	0,76
+4	26.02	73.25	15.39	8.45	0.30	0.18	0.52	0.01	0.31	0.01	0.02	0.82
-4 +2	30.54	75.61	13.18	8.81	0.33	0.20	0.30	0.02	0.29	0.00	0.02	0.61
-2 +1	13.00	75.60	12.31	8.48	0.30	0.55	0.60	0.02	0.31	0.02	0.01	1.27
-1 +0.5	07.11	70.89	16.76	8.56	0.34	0.65	0.21	0.03	0.30	0.02	0.01	0.89
-0.5 +0.25	04.04	73.46	13.46	7.98	0.28	1.06	0.87	0.01	0.32	0.00	0.01	0.98
-0.25 + 0.125	03.52	73.56	13.62	8.20	0.36	0.96	0.89	0.02	0.28	0.00	0.02	1.24
-0.125 +0.063	04.03	72.40	15.75	7.60	0.35	0.76	0.59	0.01	0.34	0.07	0.01	1.04
-0.063 +0.045	01.82	74.61	14.52	7.37	0.27	0.57	0.05	0.01	0.35	0.05	0.01	1.04
-0.045	09.92	74.12	14.46	8.50	0.32	0.70	0.20	0.01	0.33	0.03	0.01	1.14

La répartition du feldspath pour une fraction donnée est obtenue à partir de la masse pondérée correspondante et de la somme des masses pondérées.

Pour une fraction donnée, une teneur en feldspath élevée ne signifie pas nécessairement un pourcentage de répartition élevé. La valeur de la répartition dépend aussi du pourcentage massique de la fraction en question.

Les fractions comprenant les particules de diamètre oscillant entre $(-1 + 0.5)$ mm et $(-0.25 + 0.125)$ mm celles de diamètre couvrant l'intervalle entre (-0.045) mm et $(-0.125 + 0.063)$ mm en sont un bon exemple. La teneur en feldspath de la première fraction est légèrement plus élevée que celle de la deuxième mais la valeur de son pourcentage massique est nettement plus petite.

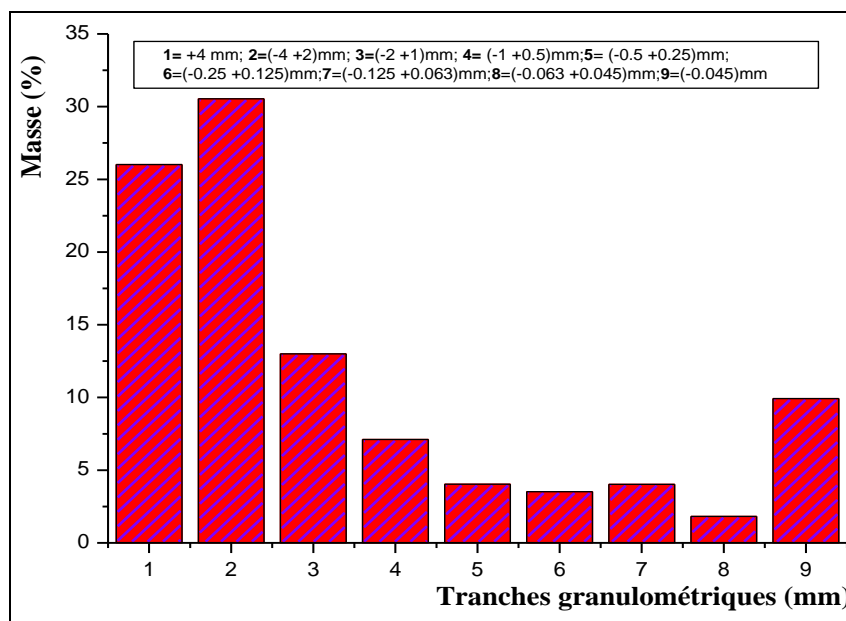


Figure 21. Histogramme de la distribution de la taille des particules

3.5.2.1. Evolution de la silice

La quantité de la silice peut offrir certaines variations, et les céramistes préfèrent partir d'un produit régularisé en alumine ou en alcalins et rajouté une quantité contrôlée de silice (Robert D, 1984).

Dans notre étude, on a enregistré une légère diminution de la silice dans toutes les classes granulométriques $(+4 - 0.045)$ mm (Fig. 22). En effet, sa teneur varie entre 75.61% et 70.89% par comparaison à l'échantillon brut qui titre un pourcentage de 76.21% en SiO_2 . Alors que la fraction $(-1 + 0.5)$ mm a connu une baisse de l'ordre de 5.32% par rapport à l'échantillon brut.

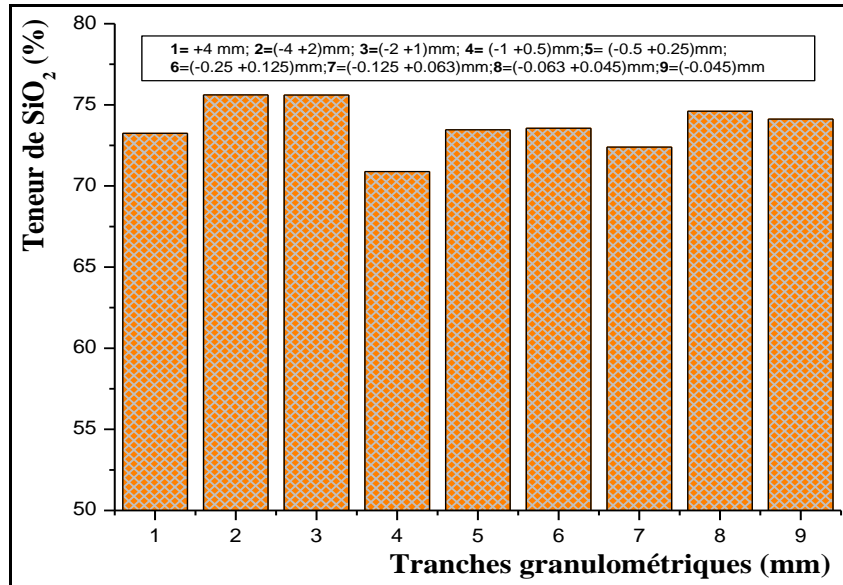


Figure 22. Evolution de SiO₂ dans les tranches granulométriques.

3.5.2.2. Evolution des teneurs en alcalins

Une baisse de la silice dans la coupure granulométrique (-1 +0.5) mm, qui représente 7 % de la masse totale de l'échantillon, est récompensée par un enrichissement en K₂O et Al₂O₃; qui varient respectivement de 8,40 à 8,56 % et de 13,39 à 16,76% (Fig. 23 et 24).

Notons que le pourcentage massique plus élevé est enregistré pour les fractions supérieures à 1 mm (de l'ordre de 69,56% en poids).

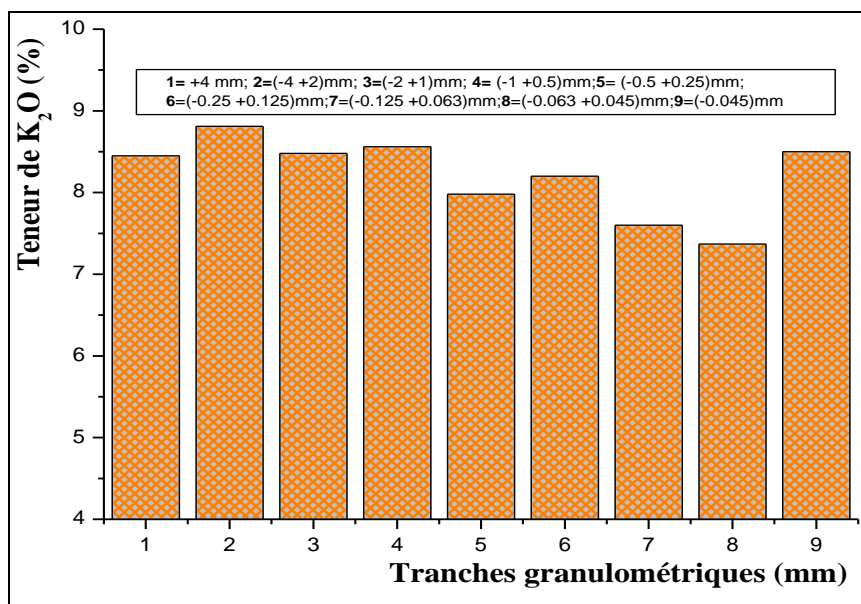


Figure 23. Evolution de K₂O dans les tranches granulométriques.

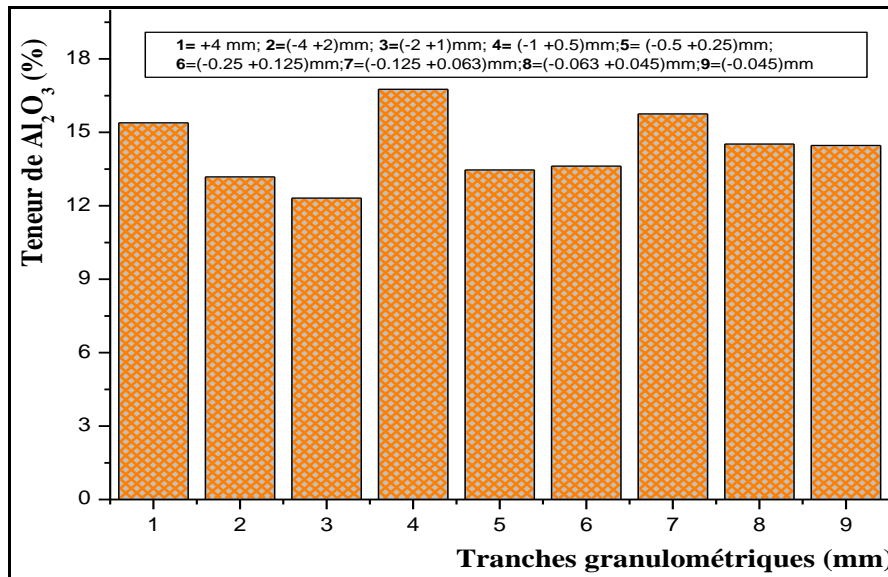


Figure 24. Evolution d' Al_2O_3 dans les tranches granulométriques.

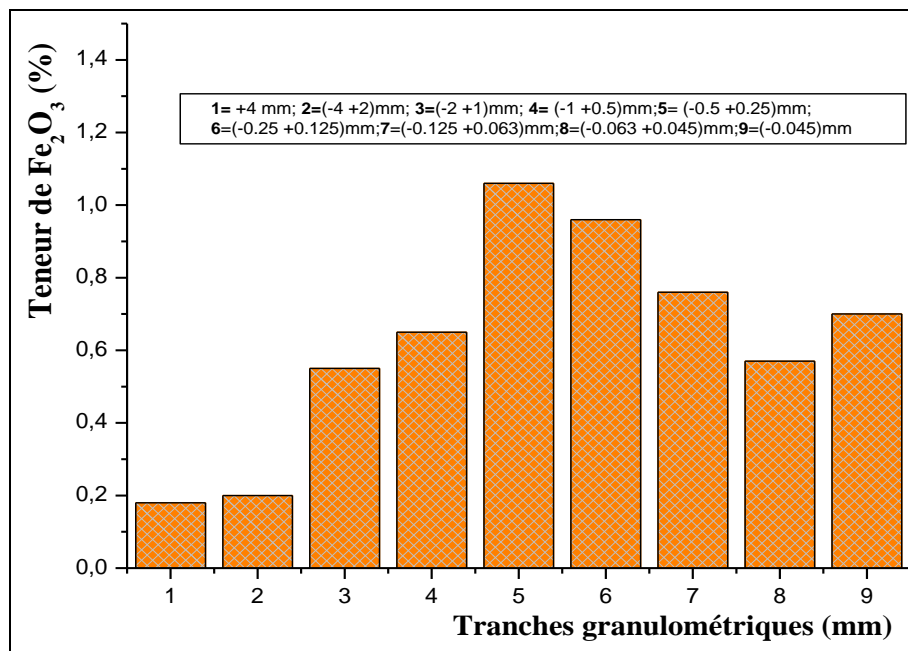


Figure 25. Evolution de Fe_2O_3 dans les tranches granulométriques.

3.5.2.3. Evolution de l'oxyde de fer

L'analyse granulochimiques a montré que toutes les fractions granulométriques ont des teneurs relativement importantes d'oxyde de fer par analogie aux exigences industrielle pour l'utilisés dans les domaines de la verrerie et de la céramique.

Les fractions granulométriques (-0.50 +0.250) mm et (-0.25 +0.125) mm représentent la teneur la plus élevée en oxyde de fer respectivement est de 1.06 et 0.96 %. En effet, ces tranches granulométriques contiennent des argiles et de la matière organique qui ont une forte capacité de fixation des oxydes (Teneur de PAF sont élevés).

Les tranches granulométrique (-0.063 +0.045) mm et (-0.045) mm montre des teneurs relativement basses % Fe_2O_3 compris entre 0.57 et 0.70, outre les fractions supérieurs a 0.5 mm montre des teneurs en Fe_2O_3 très basses (Fig. 25) même inférieures à celle du minerai brut (% Fe_2O_3 égal à 0.18).

Ces teneurs en oxyde de fer restent très élevées et ne répondent pas aux spécifications demandées dans les différentes applications industrielles. A titre d'exemple la céramique dentaire exige une teneur en SiO_2 : 55 à 78%, Al_2O_3 : < 10% et >11% K_2O , par contre pour la fabrication du verre exige une teneur en SiO_2 supérieur à 99% avec une teneur d'oxyde de fer inférieur à 0.03%.

3.6. ANALYSE MINÉRALOGIQUE

3.6.1. ANALYSE MINÉRALOGIQUE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)

3.6.1.1. Principe

Complément indispensable de l'analyse chimique élémentaire dans le cadre de l'identification de composés, la diffraction X permet la caractérisation fine des matériaux cristallisés massifs ou sous forme de poudre: métaux, minéraux, céramiques, composés pharmaceutiques, complexes organométalliques, matériaux métallo- organiques...

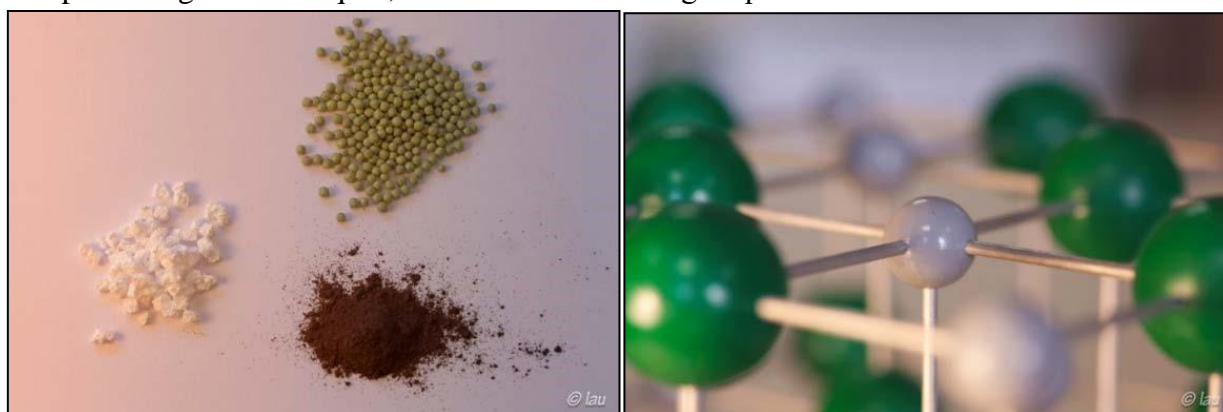


Figure 26. État des matériaux

Moins connue que les applications de rayonnement X en radiographie ou en analyse chimique (fluorescence), la diffraction X permet d'accéder à de nombreuses informations contenues dans l'arrangement même des atomes au sein d'un matériau cristallisé. Le type d'arrangement géométrique 3D (réseau) et les distances entre atomes (taille de la maille, typiquement de quelques Å) constituent schématiquement une carte d'identité "unique" pour chaque composé.

La diffraction aux rayons X est une technique conventionnelle pour l'identification des phases minéralogique des matériaux cristallins .L'appareil de diffraction des rayons X fonctionne selon le principe de la relation de Wulff-Bragg. En effet, des rayons X monochromatiques, habituellement ceux d'une raie $\text{CuK}\alpha$, sont diffractés par des plans atomiques suivant la loi de Bragg pour donner des pics de diffraction sur un diffractogramme. (Connolly. 2003).

Le diffractogramme obtenu est un spectre des intensités en fonction des angles de déviation 2θ DRX balayés. Chaque phase minérale cristallisée est caractérisée par un ensemble de pics

2θ DRX correspondant à la périodicité de la distance réticulaire. La méthode Rietveld (1993) permet une interprétation quantitative d'un diffractogramme. (Connolly. 2003).

L'étude minéralogique, par diffraction des rayons X sur poudre, des lames minces et des sections polies ont été réalisées sur des échantillons brut de minerai de feldspath, permet la caractérisation des phases minérales constitutives de la roche feldspathique et vise l'estimation semi-quantitative des pourcentages de quartz, de feldspath et les minéraux secondaires (cf.01).

3.6.1.2. Diffraction des rayons X

L'identification minéralogique est effectuée par diffractométrie des rayons X. L'appareillage utilisé est un diffractomètre PANalytical automatisé et le traitement des spectres est réalisé par un logiciel de dépouillement X'Pert Pro MPD. Un faisceau monochromatique (anticathode Cu $K\alpha$; $\gamma = 1.541838 \text{ \AA}$; filtre Ni) est envoyé sur les plaques avec un balayage de 3 à 65°, par pas de 0,02° d'une durée de 2s. Les raies diffractées correspondent aux distances inter-réticulaires caractéristiques des différents minéraux présents. Les analyses ont été faites au Laboratoire des Ressources Minérales et Environnement université d'Al-Manar, Tunis (cf.02).



Figure 27. Diffractomètre des rayons X.

Le spectre d'un échantillon de minerai de feldspath illustré par la figure 28, L'analyse de cette figure montre que les phases minéralogiques observée est majoritairement de l'orthoclase, de quartz et quelques traces observées comme l'argile.

Sur les diffractogrammes des rayons X (Fig. 28), les pics intenses représente le quartz avec un pourcentage de 39%, tandis que le feldspath se présente sous formes d'orthoclase de 63%. Les résultats de la diffraction des rayons X montrent que le quartz, l'orthose sont les minéraux les plus significatifs, lorsque le taux du quartz augmente le taux de orthoclase diminue et vice-versa. Tableau 9.

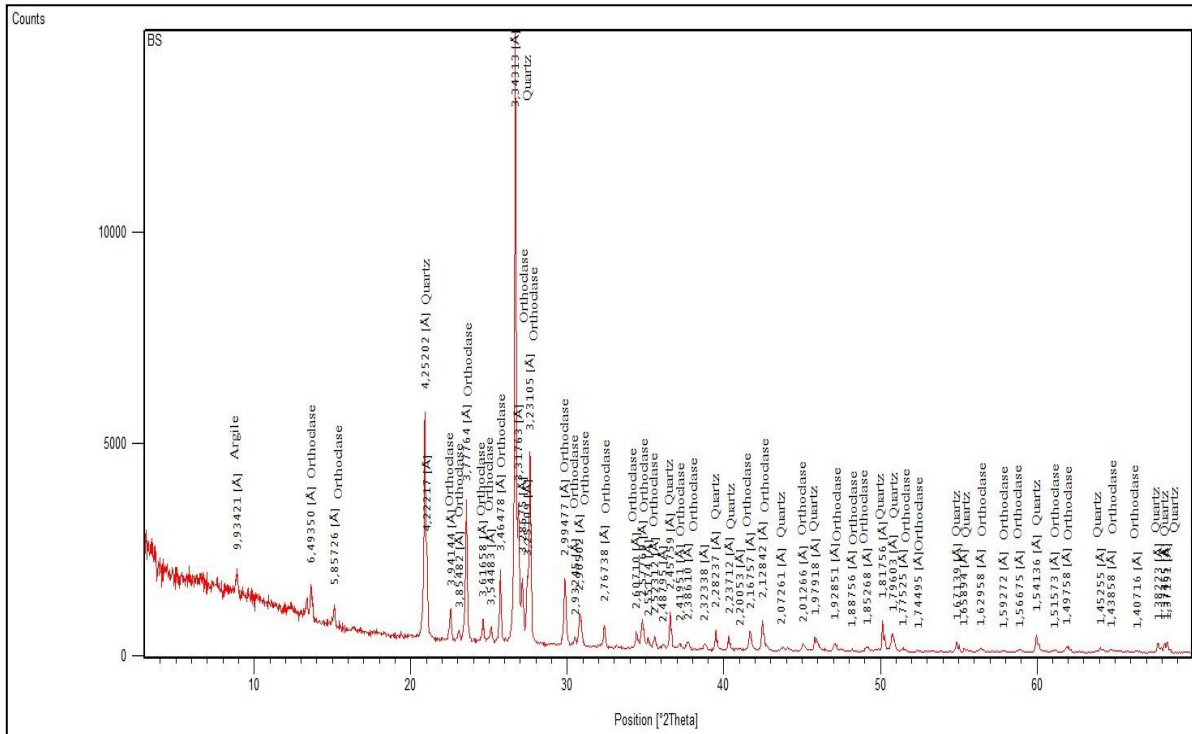


Figure 28. Spectre d'analyse par DRX d'un échantillon du feldspath brut.

Le tableau ci-dessous représente la quantification de différentes phases minéralogiques majoritaires dans notre minerai étudié.

Tableau 09. Analyse quantitatif des fractions granulométrique du feldspath.

Tranches granulométrie (mm)	Paramètres	Minerai brut	+4	-4 +2	-2 +1	-1 +0.5	-0.5 +0.25	-0.25 +0.125	-0.125 +0.063	-0.063 +0.045	-0.045
		BS	BS2	BS3	BS4	BS5	BS6	BS7	BS8	BS9	BS10
% massique	-	26.02	30.54	13.00	7.11	4.04	3.52	4.03	1.82	9.92	
% quartz	39	47	45	46	49	48	37	49	48	46	
% k- feldspath	61	53	55	54	51	52	63	51	52	54	

Ces valeurs nous indiquent un pourcentage en feldspath variant entre 63% et 51 %. Toutefois, ce pourcentage a diminué dans les fractions inférieure à 1 mm. En effet, il atteint 51 % pour la tranche granulométrique (-1 +0.5) mm et en remarque une augmentation considérable en pourcentage de l'orthose à la tranche granulométrique (-0.25 +0.125) mm (cf.03).

L'Analyse granulochimiques et minéralogique des fractions granulométriques du feldspath montre que notre matière est constituées principalement de quartz et de feldspath (orthose) avec une répartition de façon homogène et avec une libération importante a la fraction (-0.25 +0.125) mm. Le feldspath est très homogène en termes d'oxyde alcalin, de silice et de silice libre.

3.6.2. ANALYSE MICROSCOPIQUE

L'examen des échantillons des feldspaths d'Ain Barbar sous microscope métallographique en lumière transmise a permis d'identifié les minéraux : quartz libre ; orthoclase ; plagioclase ; biotite ; mica (Fig.29).

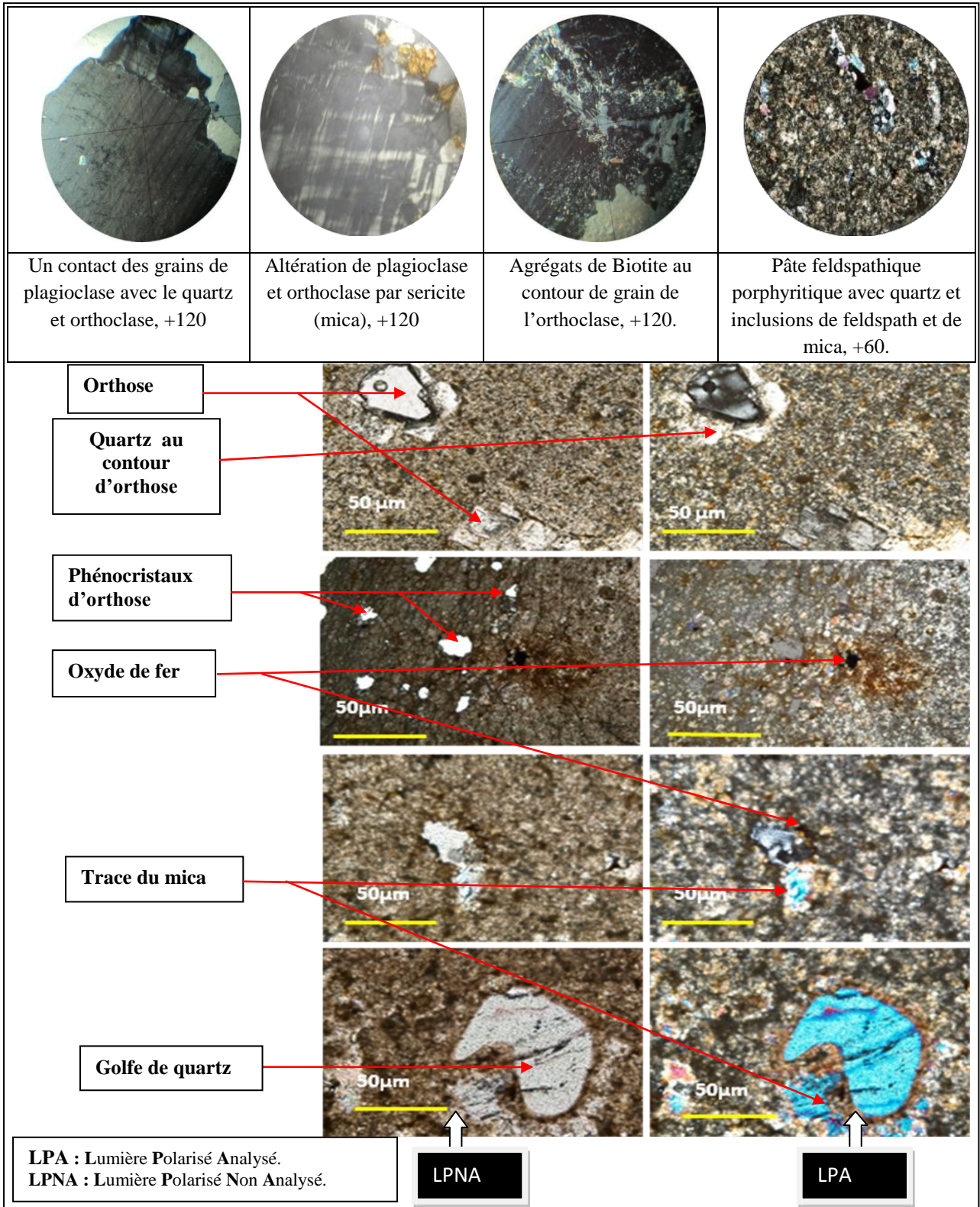


Figure 29. Observations des lames minces de feldspath au microscope métallographique (cf.3).

L'observation faite sur des lames minces des échantillons représentatifs de tous les lithofacies de felsites et de roche encaissante a permis de définir la composition minéralogique suivante :

Tableau 10. Composition minéralogique du minerai de feldspath.

Quartz	39.60%
Feldspath potassium (orthose)	53.20%
Feldspath calco-sodique	2.10%
Micas (biotite=2,2%, Sericite=2.9%)	5.10%
Oxyde de fer	1.0%

Tableau 11. Propriétés Physiques du minerai de feldspath.

Humidité	0.9 (%)
Poids spécifique	2.2 à 2.6 (g/cm ³)
Porosité	3.4 à 9.7(%)
Température de fusion	1170 (C°)
Absorption d'eau	3.1 à 8.9 (%)
Perte à la calcination	0.53 (%)

3.7. CALCULS NORMATIFS SELON LA METHODE CIPW

3.7.1. EVALUATION DES PROPORTIONS MINERALOGIQUES DU MINERAI DE FELDSPATH

Dans le cas des roches volcaniques, le comptage de points ne peut se faire puisqu'une partie de la roche n'est pas cristallisée. On établit alors une norme, c'est-à-dire qu'à partir de la composition chimique de la roche, on établit une minéralogie qui serait celle de la roche si celle-ci avait cristallisée entièrement.

Les minéraux dont la présence théoriquement n'est mise en évidence que dans le calcul de norme, s'appelle minéraux normatifs.

Les éléments majeurs permettent le calcul des minéraux normatifs selon la méthode CIPW. Ce calcul ne tient pas compte de tous les paramètres présents, comme la présence de volatils dans le magma lors de la cristallisation d'une roche granitique, mais donne une approximation raisonnable des quantités de feldspath et de quartz qui cristalliseront. Ce calcul ne donne pas une composition minéralogique réaliste pour les roches granitiques, mais produit un bon moyen de comparer différentes compositions.

3.7.2. PRINCIPE D'UN CALCUL NORMATIF

Le principe de base est de répartir les éléments chimiques dans les différents minéraux. Le problème majeur est que certains éléments se répartissent dans plusieurs minéraux à la fois.

On va donc commencer à construire les minéraux à partir des oxydes qui ne se répartissent que dans un minéral, puis deux, etc.

A chaque étape, on construit autant de moles de minéraux que de l'oxyde le moins abondant et on diminue de la quantité équivalente à la stœchiométrie les autres oxydes entrant dans la composition du minéral.

Imaginons une roche comprenant entre autres 20 mmol de CaO et 1 mmol de P₂O₅. P₂O₅ ne rentre que dans la composition de l'apatite (P₂O₅ 3CaO). Nous allons donc construire 1 mmol d'apatite (= nombre de moles de P₂O₅); après cette étape, la quantité de P₂O₅ est nulle. La construction d'apatite consomme 3 fois plus de CaO que de P₂O₅, soit 3 mmol; il restera donc 23-(3*1) = 20 mmol pour construire les autres minéraux calciques.

A la fin du calcul, toutes les quantités d'éléments doivent être à zéro. Le dernier minéral à être formé dans le calcul est le quartz, qui consommera le dernier oxyde qui n'aura pas été incorporé, c'est-à-dire SiO₂. Si la roche ne contient pas assez de SiO₂, alors il faut reprendre en partie le calcul et former des feldspathoïdes à la place des feldspaths. (cf. 4).

L'évaluation des proportions minéralogiques du minerai de feldspath par des calculs normatifs (Tableau 12), confirme les résultats obtenus par l'analyse microscopique et DRX.

Tableau 12. Evaluation des proportions minéralogiques de minerai de feldspath par des calculs normatifs

Élément chimique	Composition chimique et minéralogique BS Brut		Composition chimique et minéralogique BS2 +4 mm		Composition chimique et minéralogique BS3 -4 +2 mm		Composition chimique et minéralogique BS4 -2 +1 mm		Composition chimique et minéralogique BS5 -1 +0.5 mm		Composition chimique et minéralogique BS6 -0.5 +0.25mm		Composition chimique et minéralogique BS7 -250 +125µm		Composition chimique et minéralogique BS8 -125 +63 µm		Composition chimique et minéralogique BS9 -63 +45 µm		Composition chimique et minéralogique BS10 +45 µm		Minéraux
SiO ₂	76.21	40..41	73.25	36.95	75.61	38.13	75.6	38.95	70.89	34.57	73.46	38.8	73.56	37.14	72.40	39.24	74.61	43.37	74.12	37.83	Quartz
TiO ₂	0.01		0.01				0.02		0.02					0.07		0.05		0.03			K ₂ SiO ₃
Al ₂ O ₃	13.39		15.39	0.36	13.18		12.31	0.76	16.76		13.46	2.02	13.62	2.38	15.75	0.50	14.52		14.46		Anorthite
Fe ₂ O ₃	0.32		0.18		0.20		0.55		0.65		1.06		0.96		0.76		0.57		0.7		Na ₂ SiO ₃
FeO																					Acmite
MnO	0.01		0.02		0.02		0.01		0.01		0.01		0.02		0.01		0.01		0.01		Diopside
MgO	0.02		0.01		0.02		0.02		0.03		0.03		0.02		0.01		0.01		0.01		Sphène
CaO	0.1	0.04	0.52	0.025	0.30	0.05	0.60	0.05	0.21	0.07	0.21	0.02	0.89	0.05	0.59	0.02	0.05	0.02	0.20	0.02	Hypersthene
Na ₂ O	0.29	2.03	0.30	2.47	0.33	2.37	0.30	2.47	0.34	2.38	0.34	2.17	0.36	2.85	0.35	2.77	0.27	1.68	0.32	2.10	Albite
K ₂ O	8.40	53.39	8.50	53.96	8.81	56.02	8.48	53.98	8.56	54..90	8.56	51.57	8.20	52.48	7.60	49.05	7.37	47..69	8.50	53.92	Orthoclase
P ₂ O ₅	0.29		0.31		0.29		0.31		0.30		0.30		0.28		0.34		0.35		0.29		Nepheline
PbO	0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.04		0.04		0.04		0.03		Leucite
ZnO	0.01		0.01		0.01		0.01		0.01		0.02		0.03		0.03		0.02		0.01		Larnite
PF	0.76		0.82		0.61		1.27		0.86		0.89		1.24		1.04		1.04		1.14		Kalsilite
		0.67		0.72		0.72		0.72		0.69		0.74		0.65		0.79		0.81		0.76	Apatite
																					Halite
																					Anhydrite
		0.01		0.018		0.02		0.18		0.03		0.05		0.05		0.05		0.03		0.03	Thenardite
		1.61		1.76		1.29		2.71		1.9		2.1		2.65		2.22		2.23		2.41	Pyrite
																					ilménite
			0.07				0.07					0.09		0.09		0.09					Calcite
		0.07				0.07		0.0		0.07								0.10		0.09	Na ₂ CO ₃
		3.26		5.00		2.54		1.72		6.45		3.05		2.70		6.20		5.62		4.19	Corundum
			0.01				0.02		0.02						0.07		0.05		0.03		Rutile
																					Magnétite
		0.2		0.18		0.18		0.55		0.66		1.08		0.97		0.77		0.58		0.70	Hématite

**Chapitre IV : ANALYSE DE LA LITTERATURE
SCIENTIFIQUE SUR L'ENRICHISSEMENT DES
MATIERES FELDSPATHIQUES**

4. ANALYSE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE SUR L'ENRICHISSEMENT DES MATIÈRES FELDSPATHIQUES

Dans ce chapitre, nous mettrons les points sur les théories des différentes méthodes de séparation du minerai qui ont été appliqués dans cette recherche, ainsi que les différentes techniques de valorisation de la matière première feldspathique, à l'échelle mondiale et en particulier le minerai de feldspath d'Ain Barbar.

4.1. 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. C. B., 1991). La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique (fig.30). 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 (Gill. C. B., 1991).

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 (Wills B. A. 1988).

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 (Ramalho. R. S., 1983).

4.1.1. ASPECT THEORIQUE DE LA SEPARATION MAGNETIQUE

4.1.1.1. 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 une 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 ($\mathbf{I} = \chi \mathbf{H}$), ou l'aimantation, M ; ($\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$), etc. Plusieurs paramètres interviennent dans la caractérisation et la définition du champ magnétique dans une séparation magnétique tel que, l'intensité d'aimantation I , ($\mathbf{I} = \chi \mathbf{H}$), l'induction \mathbf{B} ; ($\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$), 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 à désordonner l'agencement des moments magnétiques, donc les caractéristiques magnétiques de la matière (GILLET. Gérard, 2004).

4.1.1.2. 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 est dû 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.

- K 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 $\mu > 1$.

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 champs magnétique, et le champs 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 F qui s'exerce sur une particule est dirigée en sens inverse du sens positif du gradient de champ $\partial H/\partial x$, 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 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 ;

$$F_m = \mu_0 V_p \text{grad}(H^2) / D \text{ pour } H \leq D Msat \dots \dots \dots (2)$$

$$F_m = \mu_0 V_p Msat \text{grad}(H) \text{ pour } H > D Msat \dots \dots \dots (3)$$

Sachant que

$$I = J = \mu_0 M \text{ et } M = H / D \dots \dots \dots (4)$$

Où

D : est le coefficient de démagnétisation des particules

$Msat$: est l'aimantation à la saturation.

Le groupe de ces minéraux comprend la magnétite, l'hématite et la franklinite.

➤ Minéraux faiblement magnétiques

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

La force d'attraction magnétique est :

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_0 k_p V_p \text{ grad } (H) \text{ pour } k_p \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

❖ 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

$$M/M_p$$

$$F_m = \mu_0 m M \text{ grad } (H) \dots\dots\dots (6)$$

❖ 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.

4.1.1.3. Action des forces magnétiques et mécaniques

Le phénomène de séparation magnétique s'effectue dans l'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 présentent 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.

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_0 V_p \frac{K_p}{1+DK} \text{ Grad } (H) \dots\dots\dots (7)$$

D: Coefficient de démagnétisation des particules

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

μ_0 : Perméabilité de vide. ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

Grad: Gradient du champ magnétique suivant les directions (O_x, O_y, O_z)

H: Le champ magnétique.

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

$$F_m = \nabla \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{H} dV$$

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{K}}{1 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{K}} \mu_0 \mathbf{H}$$

L'intensité d'aimantation ou la polarisation magnétique.

∇ : Le gradient du champ magnétique suivant les directions

$$\nabla = \text{Grad} = \frac{dH_x}{dx} \mathbf{a} + \frac{dH_y}{dy} \mathbf{j} + \frac{dH_z}{dz} \mathbf{k} \dots \dots \dots (8)$$

$$F_M = \frac{m \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}}{1 + (\mathbf{K}/3)} (\mathbf{H} \cdot \nabla) \mathbf{H} \dots \dots \dots (9)$$

Après l'intégration est assimilation de la particule a dipôle, le moment : $\mathbf{m} = \mathbf{V} \mathbf{M}$ et la particule (dipôle) assimilé à une sphère ($D = V/3$) et comme la particule est paramagnétique $k \ll 1$.

$$F_m = 1/2 m k \cdot \nabla (\mathbf{H}) = 1/2 \mu_0 \mathbf{V} \text{grad}(\mathbf{H}) \dots \dots \dots (10)$$

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{k}_p}{1 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{K}} \dots \dots \dots (11)$$

Cette expression peut être simplifiée comme suit :

$$F_m = 1/2 \mu_0 \mathbf{K} \cdot \mathbf{V} \cdot \nabla (\mathbf{H}) \dots \dots \dots (12)$$

❖ **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 : $F_g = 4/3 \pi (\rho_p - \rho_f) R_p^3 \mathbf{g}$ (13)

- La force centrifuge : $F_c = \rho_p \cdot P_p \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{R}$ (14)

- La force d'entraînement par le fluide : $F_f = 6\pi \eta R_p (\nabla_f - \nabla_p)$ (15)

Avec :

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

R_p : Rayon de la particule,

g : Accélération due à la pesanteur.

∇_p et ∇_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 Fig.30. (GILLET. Gérard.2004).

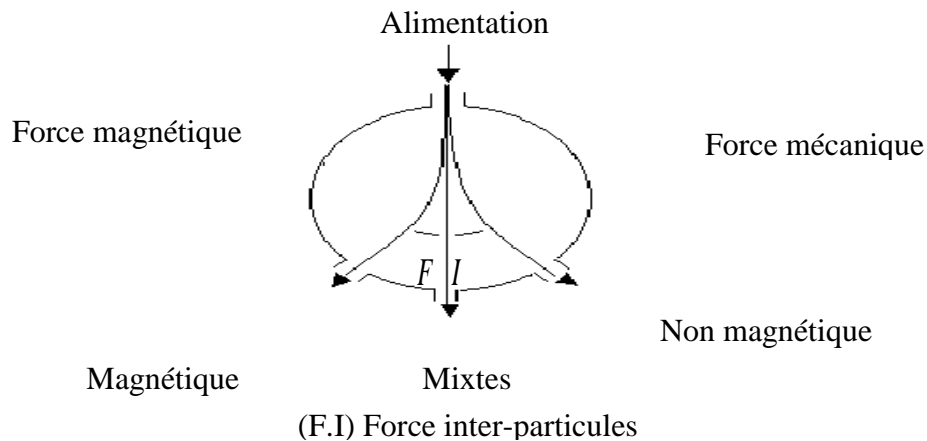


Figure 30. Schéma de principe de séparation magnétique

4.1.2. ASPECT PRATIQUE DE LA SEPARATION MAGNETIQUE

4.1.2.1. 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 permanents, et des circuits conventionnels (électroaimants), dont chacune a des différentes suivant les propriétés magnétiques présentées par le minerai à traiter.

4.1.2.1.1. Aimant permanents

L'utilisation d'aimants permanents 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) 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, 120KA/m et la valeur de $\text{Grad}(H^2)=1,3.10^{72}/\text{m}^3$.

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 CO_5RE , peuvent être utilisés dans les séparateurs à haute intensité en voie sèche ou humide.

4.1.2.1.2. Circuits conventionnels (électroaimants)

Forment une matrice ferromagnétique sous forme d'un bobinage en cuivre ou un supraconducteur, assurant un gradient d'énergie magnétique suffisante a effectué une séparation, ce type de matrice présente un avantage par rapport aux d'aimants permanents dont le fait que le gradient soit réglable ce qui permet de les utilisées 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...), (GILLET Gérard. 1983).

4.1.2.2. Classification des séparateurs

En séparation magnétique, de nombreux appareils sont disponibles chez le constructeur et leur description ne peut se faite sans une classification. Plusieurs critères de classement peuvent être utilisés, l'intensité du champ magnétique, le milieu de séparation (eau ou air), le monde 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 : $\mu_0 \text{grad}^2(H)$ c'est a 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 :

$$\mu_0 \text{grad}(H) = 2 \times 10^4 \text{ Oe} \cdot 10^6 \text{ ON} / \text{m}^3 \dots\dots\dots(16)$$

❖ Les séparateurs à haute intensité (électroaimant ou aimant permanent) en céramique avec :

$$\mu_0 \text{grad}(H) = 2 \times 10^7 \text{ Oe} \cdot 4 \times 10^9 \text{ ON} / \text{m}^3 \dots\dots\dots(17)$$

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

$$\mu_0 \text{grad}(H) = 6 \times 10^{10} \text{ Oe} \cdot 10^{12} \text{ ON} / \text{m}^3 \dots\dots\dots(18)$$

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).

4.1.2.2.1. 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.

4.1.2.2.2. 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 coté 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 $150 \mu\text{m}$ et 10 mm , mais une bonne efficacité est possible jusqu'à $75 \mu\text{m}$ (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. (CASTEEL. K.2001)

4.1.2.2.3. 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 (fig.31), 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).

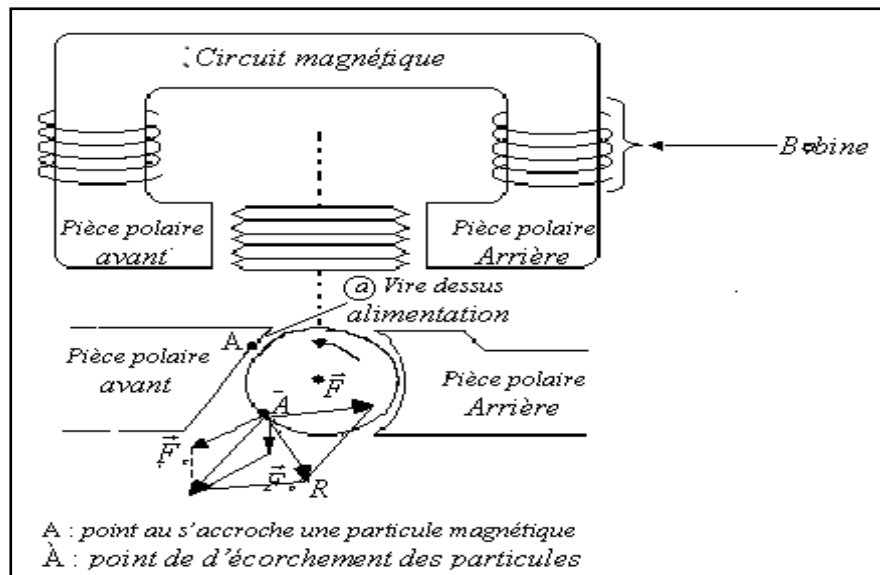


Figure 31. Séparateur magnétique à aimant céramique à haut champ.

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 ($S = 2\ell \geq 4d$).

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, wolfromite, 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). (GILLET. Gérard. 1983).

4.2. SEPARATION PAR LA FLOTTATION

4.2.1. DEFINITION ET PRINCIPE

La flottation est un procédé physico-chimique de concentration, qui date du début du XX^e siècle. Dans l'industrie minérale son objectif est de séparer des minéraux en suspension dans un liquide et se base sur les propriétés de surface des particules. Pour pouvoir employer cette technique, il faut réunir trois conditions essentielles :

- Obtention de bulles d'air stables pouvant former une mousse;
- Adhésion des minéraux à flotter aux bulles d'air ; non adhésion aux bulles d'air des particules que l'on ne veut pas flotter et mouillage de ces particules par l'eau,
- Lévitiation des minéraux valorisables accrochés aux bulles à la surface et leur récupération dans la mousse (P. Blazy et al. 2001). Si l'étude des paramètres qui régissent la flottation est complexe, le principe du procédé est simple : Il consiste à séparer, après broyage, des particules minérales de diverse nature, immergées dans une solution aqueuse.

La granulométrie, fonction de la maille de libération, étant généralement comprise entre 30 et 200 microns ; les particules à concentrer sont amenées à la surface du liquide par des bulles d'air et retenues un certain temps dans les écumes ainsi formées pour favoriser leur récupération (P. Blazy., 2001).

La flottation est donc une technique de la minéralurgie qui différencie les minéraux hydrophiles des minéraux hydrophobes. Les minéraux hydrophobes adhèrent aux bulles de gaz et remontent à la surface du réacteur (cellule), le plus souvent grâce à l'intervention des réactifs chimiques connus sous l'appellation des collecteurs. Ils sont capables de rendre sélectivement les minéraux hydrophobes. Ces réactifs comportent tous un groupement polaire permettant leur adsorption sélective à la surface des minéraux par création des liaisons physiques ou chimiques. Ils possèdent également une chaîne hydrocarbonée hydrophobe qui permet à l'ensemble adsorbat-adsorbant de s'accrocher à une bulle d'air.

L'étape de conditionnement des surfaces minérales est essentielle puisqu'elle permet l'éventuelle adsorption sélective du réactif hétéropolaire à la surface du minéral à valoriser. Cette étape est suivie par une étape de flottation dans laquelle l'air sous forme de fines bulles dont le diamètre n'excède pas 1mm est injecté dans la pulpe conditionnée (Nguyen, 2007). Sous la contrainte d'une probabilité de collision (Equation 19) et d'attachement entre particule et bulles d'air, les particules et les bulles vont former un couple bulle-particule lequel remonte à la surface de la pulpe pour former une mousse. Cette mousse est ensuite récupérée par écumage mécanique.

$$P_c = K \cdot \left(\frac{d_p}{d_b}\right)^2 \dots\dots\dots(19)$$

Avec ;

$$K = \left(\frac{3}{2} + \frac{4}{25} Re^{0.47}\right) \dots\dots\dots(20)$$

Avec

P_c : probabilité de collision

d_p : diamètre des particules minérales

d_b : diamètre des bulles

Re : Nombre de Reynolds

Dans certains cas, l'adsorption du collecteur sur le minéral utile nécessite l'addition préalable d'un « activant » dont le rôle est :

- Soit de pallier le manque ou l'insuffisance de sites d'adsorption à la surface du minéral;
- Soit de transformer les sites d'adsorption disponibles à la surface des minéraux en sites mieux adaptés au collecteur utilisé comme dans le cas de la sulfuration superficielle des minéraux oxydés de cuivre avant une flottation à l'aide des xanthates. (KANDA N.J.M., 2012).

Le renforcement de la nature hydrophile des minéraux est en général obtenu grâce à une modification du pH et à l'addition de réactifs « déprimants ». Ces derniers agissent suivant des processus divers (Crozier., 1992) :

- empêcher l'activation du minéral par des sels activant solubles présents dans la pulpe (dans la flottation de la blende ZnS, le CN⁻ complexe le Cu⁺² de préférence à Zn⁺²) ;
- bloquer la surface contre les réactions collectrices possibles (blocage mécanique avec le tannin, l'amidon etc.) ;
- détruire les couches de collecteur déjà formées (déplacement du collecteur par Na₂S sur les minerais sulfurés à pH élevé) ;
- modifier la surface par création de couches hydrophiles (bichromate sur galène, ferrocyanure sur chalcosine et la bornite).

La durée de vie des bulles dans de l'eau propre est de l'ordre d'un centième de seconde, cette constatation expérimentale rend indispensable l'utilisation de moussants en flottation. Ces réactifs sont à nouveau des molécules hétéro polaires dont le groupe hydrocarboné est orienté vers l'air, mais dont le groupe polaire, de préférence non-ionisable afin de pouvoir mieux moduler le phénomène de flottation, est attiré par le dipôle qu'est l'eau (Bouchard. S., 2001). L'action des moussants ne concerne pas uniquement la formation de la mousse, action provoquée par l'abaissement de la tension inter-faciale eau-air, mais les moussants agissent aussi largement sur la distribution dimensionnelle des bulles dans la pulpe et sur leur vitesse d'ascension (Wills., 2001).

Wills.B.A contrairement aux collecteurs, il n'est pas aisé d'associer la flottabilité d'une espèce minérale donnée avec un certain type de moussant. L'analyse détaillée des phénomènes ainsi brièvement décrits, montre que la flottation présente un caractère particulièrement complexe car il faut tenir compte : de la coexistence de trois phases (liquide, solide et gaz) ; des interfaces entre ces phases et des interactions qui en résultent. Les mécanismes d'action des différents réactifs : collecteur, moussant, déprimant ne sont pas non plus indépendants.

4.2.2. VARIABLES IMPORTANTES DE LA FLOTTATION.

Le nombre de variables intervenant dans le processus physico-chimique ainsi que dans la réalisation pratique de la flottation est grand et il existe de nombreuses interactions entre elles. On peut répartir les paramètres de la flottation en trois catégories :

- Les paramètres chimiques
- Les paramètres liés à l'appareillage
- Les paramètres liés à la préparation de la pulpe.

Les paramètres chimiques comprennent la nature et la dose des réactifs collecteurs, moussants et modifiants. Les paramètres liés à l'appareillage sont évidemment relatifs au type d'appareil utilisé, à la vitesse du rotor de l'appareil (pour les machines de flottation mécaniques) et le débit d'air. Quant aux paramètres liés à la préparation de la pulpe, ils comprennent la nature du minéral, la dimension des particules, la densité de la pulpe, la température, etc. (Fig.32)

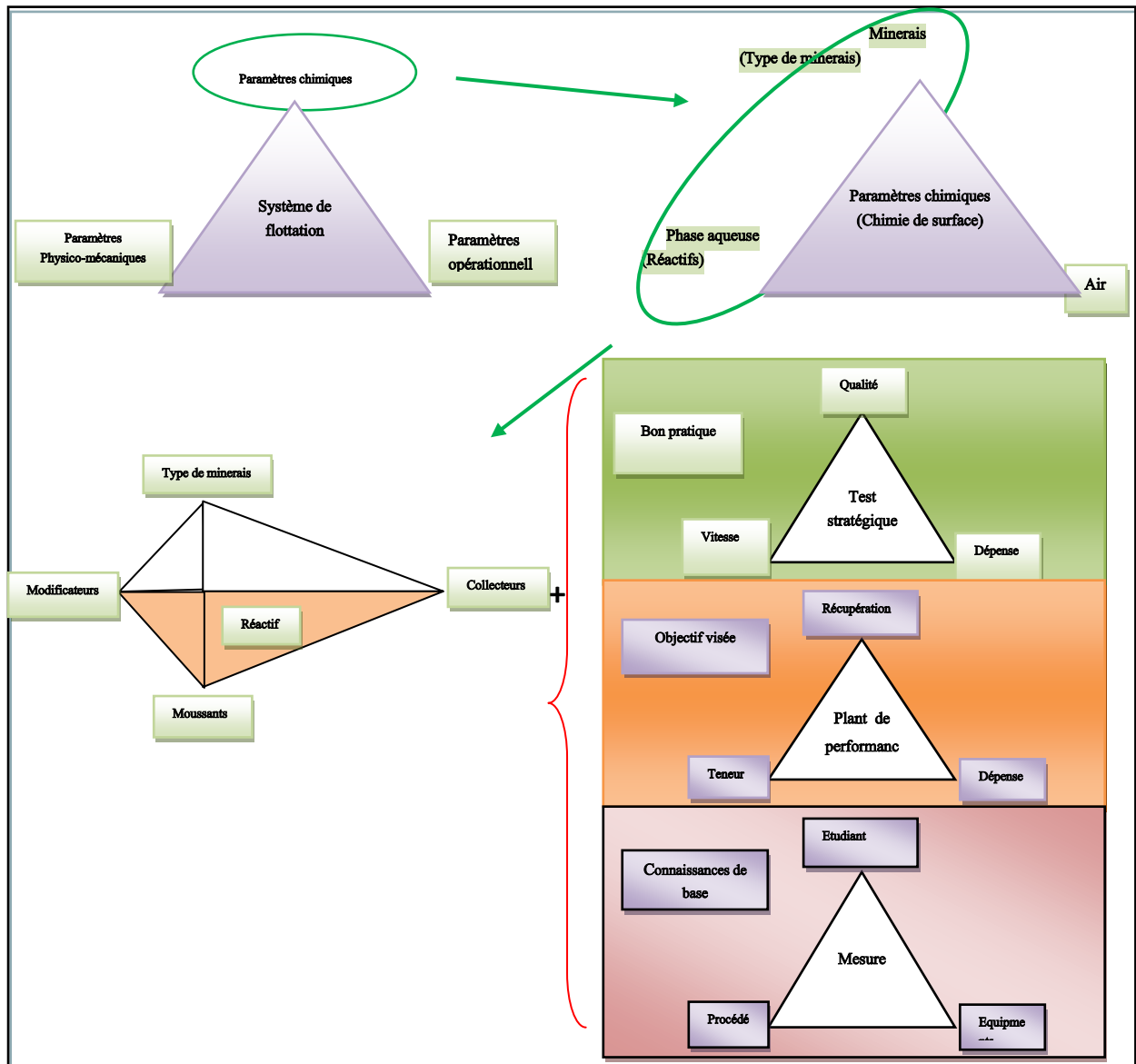


Figure 32. Approche holistique de la flottation.(Nagaraj, 2005).

4.2.3. ANGLE DE CONTACT

Le contact bulle-particule est le facteur clé contrôlant le procédé de flottation, puisque les particules hydrophobes sont les seules qui peuvent adsorber facilement sur les bulles d'air. Cette propriété d'hydrophobicité est caractérisée par l'angle entre l'interface solide-liquide et l'interface liquide-gaz appelé l'angle de contact. (fig.33).

La tension superficielle est définie comme le travail nécessaire pour accroître l'interface entre les deux fluides d'une unité de surface.

À l'équilibre :

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \dots\dots\dots \text{Equation de Young.} \dots\dots\dots (21)$$

La variation de l'énergie libre accompagnant le remplacement d'une unité de surface d'interface solide-liquide par unité de surface solide-gaz est donnée par l'équation de Dupré.

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \dots \dots \dots \text{Equation de Dupré} \dots \dots \dots (22)$$

Avec ;

S, G, L pour solide, gaz et liquide

La combinaison des deux équations précédentes donne ;

$$\Delta G = \gamma_{SG} (\cos \theta - 1) \dots \dots \dots (23)$$

La condition du contact entre bulle et particule est donnée par la relation :

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) < 0 \dots \dots \dots (24)$$

C'est pour cela, les valeurs de θ supérieures à 90° permet au solide de s'attacher fortement à la bulle de l'air, la surface du solide est alors hydrophobe. Dans le cas contraire ($\theta = 0$), la surface de solide est hydrophile.

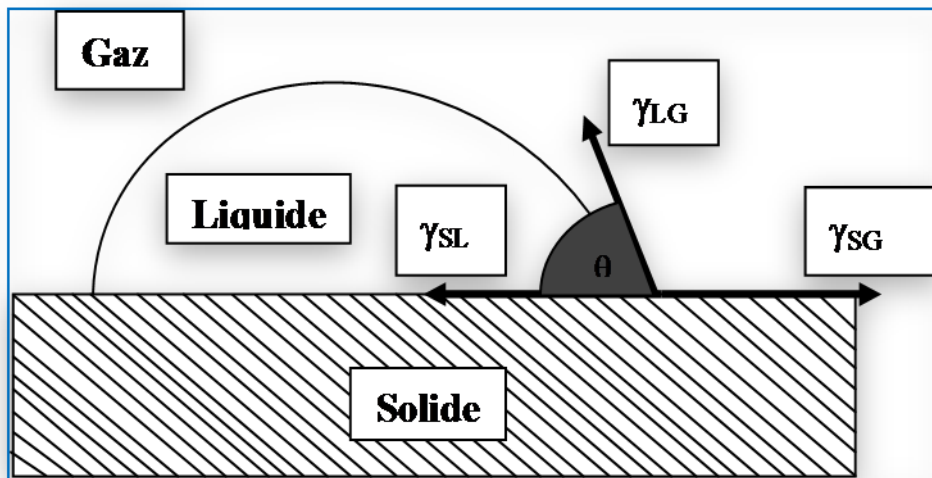


Figure 33. Angle de contact pour un système solide – liquide – gaz.

Avec :

γ_{SG} : Tension superficielle solide-gaz.

γ_{LG} : Tension superficielle liquide-gaz.

γ_{SL} : Tension superficielle solide-liquide. (BLAZY.P., et JDID.E.A., 2001)

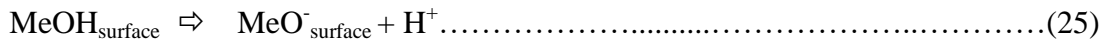
4.2.4. POTENTIEL DE SURFACE ET CHARGE SUPERFICIELLE

Lors du broyage, la particule solide subit un ensemble de rupture, sa surface n'est plus neutre électriquement et afin de maîtriser le procédé de flottation il s'avère nécessaire d'agir sur les facteurs susceptibles de conditionner les charges superficielles, surtout les contre-ions venant de la phase aqueuse, qui s'adsorbent sur la surface du solide pour rétablir l'électroneutralité.

La charge superficielle du solide peut avoir pour origine :

- L'adsorption ou désorption d'ions appartenant au cristal : c'est le cas des sulfures et des sels. La charge de surface résulte de l'affinité d'ions de réseau pour la phase aqueuse. L'équilibre est atteint lorsque le potentiel électrochimique de ces ions constant dans tout le système.
- La formation d'acides faibles superficiels due à l'hydratation de la surface. C'est le cas des oxydes et des silicates où le groupement métal-OH d'acide ou de base faible.

La dissociation des hydroxydes est fonction du pH :



D'après ces équilibres, la surface présenterait un surplus ou un déficit en sites négatifs ou positifs, mais il existe une valeur de pH pour laquelle la charge de surface est nulle. Cette valeur de pH est le point de charge nulle (pcn).

Les charges électriques se disposent suivant le modèle de double couche (Fig. 34), dit modèle de Gouy-Chapman modifié par Stern-Graham. Il existerait une couche rigide d'ions déshydratés liée au solide et une couche de contre-ions hydratés créant une couche diffuse.

Le plan de Stern situé à la distance δ de la surface est le plan d'approche maximale des contre ions. Son potentiel est Ψ_δ . Pour des distances d supérieures à δ , la décroissance du potentiel est exponentielle: $\Psi = \Psi_\delta e^{-kd}$ (27).

ou : k étant une constante

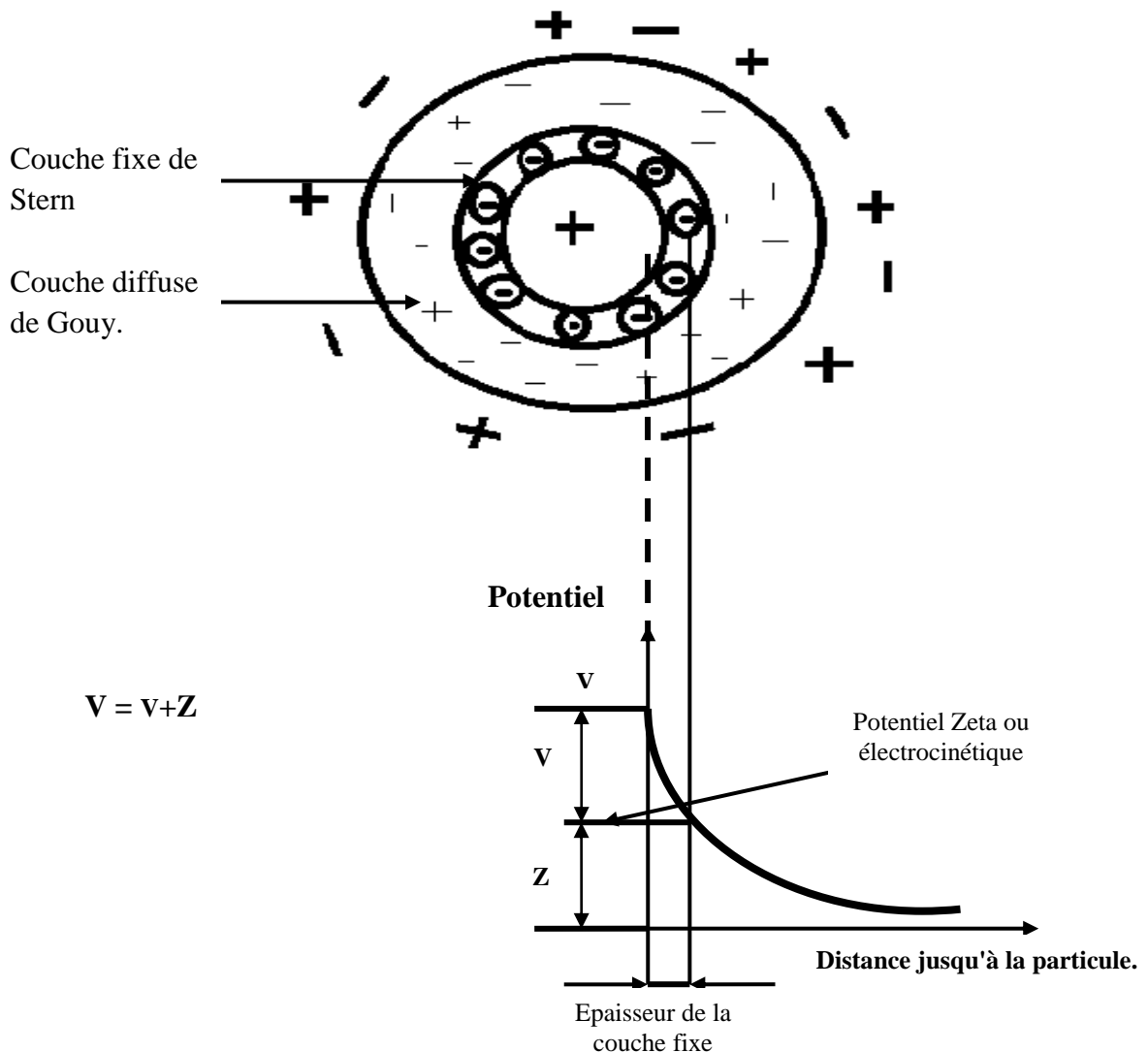


Figure 34. Modèle de la double couche pour une particule électronégative.

Le mouvement relatif de la surface de la particule et de la solution aqueuse donne naissance à un plan de glissement situé entre les couches d'eau en contact avec le solide et celles qui en sont éloignées, le potentiel de ce plan est appelé potentiel de Freundlich ou potentiel V (Zêta) qu'est voisin de Ψ_δ .

Afin de rendre la surface de la particule hydrophobe, il est nécessaire d'ajouter les collecteurs qui peuvent annuler ou au moins diminuer la charge électrique qui se développe à sa surface (BLAZY. P. ,2001).

4.2.5. REACTIFS DE FLOTTATION

Au départ, il convient de discuter des différents réactifs de flottation qu'il est possible d'ajouter dans les équipements de flottation afin de modifier les conditions d'opération. Il s'agit des agents activants, déprimants, moussants et des collecteurs.

Les deux premiers sont habituellement utilisés pour augmenter ou diminuer l'efficacité du collecteur et sont très sensibles aux variations de pH.

4.2.5.1. Collecteurs

Le collecteur est probablement le réactif de flottation le plus critique. Les collecteurs sont des molécules organiques ou des composés ioniques qui s'adsorbent sélectivement à la surface d'un minéral (Kelly et Spottiswood;1982).

Le collecteur a comme principal objectif de préparer la surface du minéral afin d'optimiser son attachement sur les bulles d'air. Le collecteur diminue la stabilité de la couche hydratée favorisant ainsi l'attachement des bulles à la surface des particules (Klassen, Mokrousov;1963). En agissant ainsi, il rend la surface minérale hydrophobe.

On classe les collecteurs en deux catégories: les collecteurs polaires et les collecteurs non polaires, puisque les collecteurs polaires sont très utilisés en flottation. Les collecteurs polaires peuvent également être classés selon leur caractère ionique ou non- ionique. Les collecteurs polaires non ioniques sont souvent très peu solubles dans l'eau et sont, par conséquent, très peu utilisés contrairement aux collecteurs ioniques qui possèdent un très grand domaine d'application en flottation (Wills ; 1992).

Les collecteurs polaires ioniques sont des molécules très complexes ayant une structure hétéropolaire (Fig.35), c'est-à-dire une structure qui inclut une portion polaire et une autre non-polaire. C'est en fait la partie polaire qui est adsorbée par réactions chimiques (adsorption chimique) avec les ions à la surface du minéral ou par attractions électrostatiques (adsorption physique) sur la surface du minéral. La partie organique non-polaire, quant à elle, est disponible et augmente ainsi le caractère hydrophobe du minéral (Kelly et Spottiswood;1982 ; Gefvert, 1986; Zachwieja, 1994).

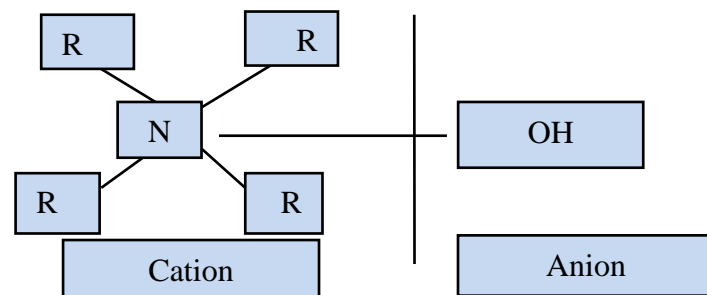


Figure 35. Structure du collecteur anionique hétéropolaire

Un collecteur ionique peut être de type cationique ou anionique, ce dernier étant le plus souvent utilisé en raison de sa sélectivité beaucoup plus intéressante. Comme les collecteurs cationiques sont plus sélectifs, ils ont été utilisés au cours de notre projet. Ainsi, travaillant avec une matrice de quartzo-feldspath, un collecteur de type diamine, très sélectif pour les feldspaths, a été utilisé (fig. 36). La concentration du collecteur et le pH influencent grandement l'efficacité d'un collecteur. Par exemple, une addition trop grande de collecteur provoque une diminution de la sélectivité de la flottation et de la stabilité de la mousse (Klassen et Mokrousov;1963). Ces deux facteurs seront discutés en détail au cinquième chapitre.

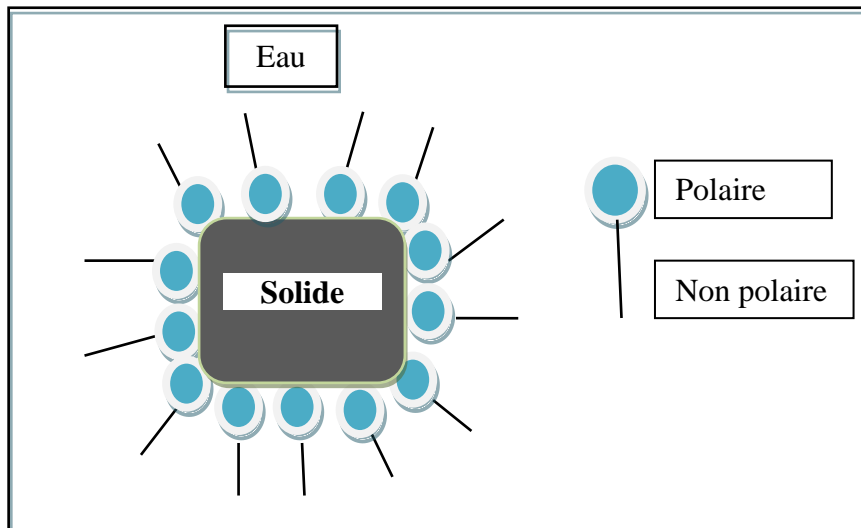


Figure 36. Montre comment se présente le collecteur à la surface du minéral. (Gosselin, Blackburn et Bergeron ; 1997).

4.2.5.2. Moussants

Les agents moussants sont des réactifs organiques solubles dans l'eau qui sont adsorbés à l'interface air-eau. Leur solubilité dans l'eau provient du fait qu'ils sont, tout comme les collecteurs, hétéropolaire; la partie polaire leur permettant d'être solubilisés.

Les moussants sont responsables de la stabilité de la mousse et par le fait même, de la stabilité de l'attachement des particules aux bulles d'air. Idéalement, les agents moussants agissent dans la phase liquide-gaz et non à la surface des particules (solide-liquide).

L'interaction du moussant avec le collecteur doit être évitée, le moussant diminuant la sélectivité de ce dernier. Malheureusement, la réalité est tout à fait différente. En fait, on observe régulièrement des interactions entre le moussant, le minéral et les autres réactifs. En plus de maintenir une certaine stabilité de la mousse, les moussants ont pour fonction d'améliorer la dispersion des bulles dans la pulpe (Gosselin et al, 1997 ; Klessen et Mokrousov, 1963 ; Kelly et Spottiswood, 1982). La fig.36 représente le mode d'action du moussant.

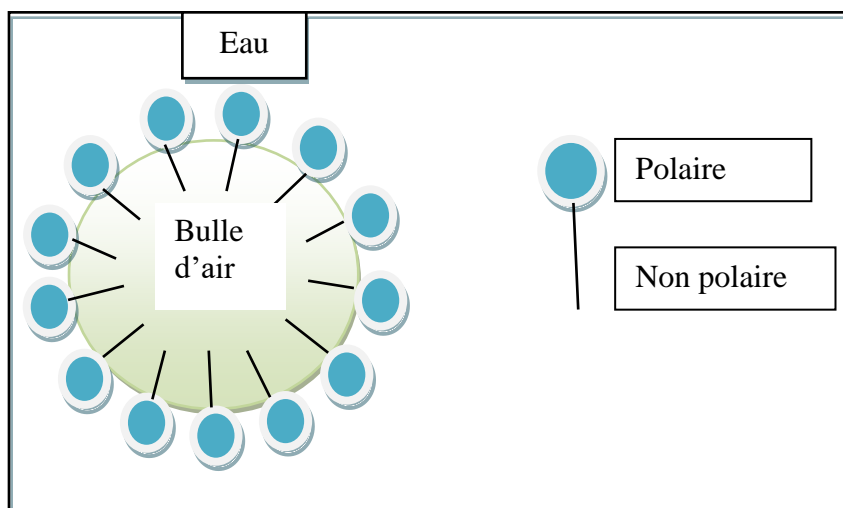


Figure 37. Représente le mode d'action du moussant. (Gosselin, Blackburn et Bergeron ; 1997).

Il existe une large gamme de moussants synthétiques. Principalement constitués d'alcools de poids moléculaires élevés. Ces produits synthétiques sont souvent privilégiés en raison de leur stabilité importante, contrairement aux produits commerciaux disponibles comme l'huile de pin. D'autres produits, comme les éthers polyglycols sont fréquemment utilisés. Le DOWFROTH 250, qui a été utilisé tout au long de la présente étude, fait partie de cette catégorie. Contrairement aux moussants avec un alcool, les éthers polyglycols sont moins sélectifs mais plus puissants et efficaces pour des pulpes concentrées et ce, à tous les pH [Wills;1992].

4.2.5.3. Déprimant

Les déprimants sont des réactifs empêchant l'adsorption des collecteurs spécifiques à la surface des minéraux que l'on souhaite flotter en occupant les sites d'adsorption des collecteurs. Ils doivent avoir la même fonctionnalité qu'un collecteur mais, de par leur structure, rendent la surface du minéral hydrophile (Sis et Chander, 2003).

La dépression est normalement utilisée pour augmenter la sélectivité de la flottation en rendant certains minéraux hydrophiles, c'est-à-dire en empêchant leur flottation. La méthode de dépression la plus simple et naturelle est l'adagulation ou recouvrement des surfaces par des schlamms (< 10 μm) qui retardent l'adsorption du collecteur. Évidemment, celle-ci constitue une dépression non-provoquée.

Les cyanures constituent les déprimants les plus utilisés dans la flottation sélective des sulfures complexes et dans cette études on été utilisé l'acide Fluorhydrique (HF) et l'acide Bromhydrique (HBr) comme des activant et déprimants.

4.2.5.4. Activant

Ils modifient la nature chimique de la surface minérale, la rendant propice à l'action du collecteur. Ils sont normalement des sels solubles ionisables dans l'eau. Un exemple typique est l'activation de la sphalérite par des ions Cu^{++} en solution. En effet, les régulateurs du pH

ont une grande importance pour la flottation, pour une concentration donnée de collecteur, la flottation d'un minéral donné sera possible seulement en-dessous d'une certaine valeur de pH, appelée pH critique. Cette valeur dépend de la nature du minéral, du collecteur utilisé et sa concentration et de la température (Wills;1992).

4.2.6. PARAMETRES AFFECTANT LA FLOTTATION

Bien que les deux réactifs abordés dans la section précédente soient importants au bon fonctionnement de la flottation, plusieurs autres paramètres ne sont pas à négliger. Huang (1992), regroupe habilement une série impressionnante de paramètres affectant la flottation en général. Parmi ceux qui nous intéressent plus particulièrement, on retrouve : la longueur de la chaîne des surfactants, leur concentration, le pH de la pulpe, le temps de résidence de la pulpe et la vitesse du (l'air) gaz. Finalement, nous pouvons ajouter à cette liste, la taille des particules et la taille des bulles.

4.2.6.1. Longueur de la chaîne des surfactants

Pour un agent moussant ou un collecteur plus la longueur de la chaîne non polaire est importante, meilleure sera l'adsorption à l'interface et ainsi la séparation. Des chaînes de 12 à 18 atomes de carbone sont habituellement utilisées. Celles-ci sont assez solubles pour être dissoutes dans la phase aqueuse mais ce, uniquement lorsqu'elles sont attachées à un groupement très polaire.

4.2.6.2. La concentration des surfactants

❖ Moussants

Les surfactants sont utilisés pour stabiliser les bulles d'air en diminuant la tension à l'interface air-eau. Une augmentation trop importante de la concentration de moussant entraîne une diminution de la taille des bulles d'air. En effet, initialement très instables, les petites bulles deviennent de plus en plus stables à mesure que l'on ajoute du moussant.

❖ Collecteurs

Du côté des collecteurs, plus on augmente la concentration, la flottation est moins efficace. En effet, une trop grande concentration provoque l'apparition d'une seconde couche sur le minéral. De cette façon, le minéral rendu hydrophobe redeviendra hydrophile et aura de la difficulté à flotter. Idéalement, il nous faut ajouter une quantité légèrement supérieure au minimum requis pour la formation d'une seule couche de collecteur autour des particules visées.

4.2.6.3. Le pH

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le pH influence grandement la flottation car il agit directement sur le collecteur en l'activant ou le déprimant. La sélectivité de la séparation des complexes est très dépendante de l'équilibre entre la concentration des réactifs et le pH [Wills;1997]. Les ions OH^- et H^+ sont adsorbés dans les portions interne et externe de la double couche électrique. Ils changent ainsi le potentiel électrochimique et électrocinétique de la double couche. Ces changements à la surface du minéral permettent l'adsorption du collecteur sur celle-ci. Un pH plutôt basique permettra une réduction du temps d'attachement

et souvent une plus grande stabilité du collecteur. Par contre, les ions hydroxyle entrent en compétition avec les collecteurs anioniques ce qu'il ne faut pas négliger. Il faut donc utiliser le collecteur dans des conditions favorisant au maximum son adhésion sur le minéral pour permettre une flottation optimale.

Le pH influence aussi la dissociation des groupements carboxyliques (-COOH) composant souvent les groupements polaires des collecteurs. Comme le collecteur utilisé est le KAX, le pH de notre mélange a toujours été maintenu entre 8 et 12 (Wills;1992. Kelly et Spottiswood, 1982, et Klassen et Mokrousov, 1963) discutent davantage de la théorie entourant ce facteur.

4.2.6.4. Le temps de résidence de la pulpe

Selon Huang (1992) et Jameson et al. (1977), la durée d'agitation avant la flottation et après l'ajout du surfactant agit directement sur la flottation. De plus, selon Jameson et al. (1977), outre le temps d'agitation, sa force influencera également la flottation. Une bonne agitation (une vitesse optimale) favorisera un plus grand nombre de collisions entraînant nécessairement une augmentation de l'adsorption entre bulles et particules. Par contre, un brassage trop agressif provoquera le détachement de ces mêmes particules. L'effet du mélange et de la turbulence de la pulpe ont également été examinés par plusieurs auteurs (Bogdanov;1964) et (Jowett;1961).

4.2.6.5. La vitesse du gaz (vitesse d'agitation)

L'efficacité de la flottation dépend de la stabilité de la mousse. Celle-ci se doit d'être stable et relativement sèche (bulles bien formées) pour espérer une bonne flottation. Théoriquement, la stabilité de la mousse dépend de la quantité de collecteur et de la vitesse du gaz (l'air) utilisé pour former les bulles. Une vitesse élevée réduit la quantité de collecteur nécessaire pour obtenir une mousse stable et augmente la qualité de la séparation. Plusieurs articles traitent plus en profondeur de l'influence de la vitesse du gaz sur la flottation (Ityokumbul.1993, Tortorelli et al.1997, Dobby et Finch. 1986).

4.2.6.6. La taille des particules

La taille des particules est un des paramètres qui affecte le plus la récupération. (Jameson et al. 1977), mentionnent, entre autres, que la flottation des particules de petites tailles se fait plus difficilement que celle des particules de tailles moyennes. En fait, ils affirment que lorsqu'est augmentée la taille des particules, leur récupération atteint un maximum entre 10 et 100 μm . Klassen et Mokrousov (1963) ont également fait mention des difficultés rencontrées avec les particules sous les 10 μm .

4.2.6.7. Taille des bulles

La taille des bulles est un facteur important pour la flottation des particules fines. En fait, plus les bulles sont petites, plus la flottation des fines est favorisée puisque les probabilités de collisions sont augmentées (Somasundaran;1979, Gochin;1990).

Effectivement, les particules fines ne possèdent pas une force d'inertie assez importante pour contrer l'écoulement de l'eau autour de chacune des bulles (Tortorelli ; 1997) Ainsi, elles ont

plutôt tendance à suivre l'écoulement et à ne pas entrer en collision avec les bulles de grandes tailles, ce qui a pour effet de diminuer l'efficacité de collection. Pour résoudre ce problème, le moyen le plus efficace est de diminuer la taille des bulles afin de faciliter les collisions pour les particules fines. Par contre, les petites bulles d'air ne sont pas assez fortes pour supporter et ainsi entraîner dans la mousse toutes les tailles de particules. Il faut donc optimiser la taille des bulles en fonction du type de matériel à traiter.

4.3. REVUE DE LA LITTERATURE SPECIFIQUE A LA FLOTTATION DES SILICATES ET TECTOSILICATES

4.3.1. EQUILIBRES DES SURFACES DES SILICATES EN MILIEU AQUEUX

En milieux aqueux, les espèces minérales en présence subissent à leur surface de nombreux phénomènes chimiques tels que des réactions de protonation ou déprotonation, des phénomènes de dissolution, de dissociation des espèces minérales en fonction du pH. Ces phénomènes modifient de façon significative les propriétés de surface des minéraux et également l'état chimique de la pulpe (dans le cas de flottation de minerai). Il en résulte des résultats différents de ceux obtenus en flottation des minéraux purs.

Dans le cas des silicates, ces derniers sont solubles en milieu acide. En milieu neutre ou basique, des réactions de protonation avec les espèces chimiques de surface se réalisent, toutes ces réactions de surfaces sont régies par des constantes de stabilités K_s .

De part ces phénomènes de dissolution des espèces minérales en surface des minéraux, de nombreux ions peuvent être présents en solution.

Des phénomènes d'adsorption de ces derniers sur les surfaces minérales non sélectifs sont engendrés. Ces derniers réagissent également avec les réactifs (collecteurs en solution) formant des sels de réactifs précipitant à la surface des minéraux de façon non sélective. De ce fait, il est important de connaître les différentes espèces susceptibles de se former en solution aqueuse afin d'orienter l'étude et d'interpréter les résultats de séparation par flottation.

4.3.1.1. Les silicates

Les silicates sont des minéraux de type oxydes hydratés. Lors des opérations de broyage les liaisons covalentes entre atomes constitutifs du réseau cristallin de ces minéraux sont cassées en l'occurrence les liaisons covalentes des groupements : Siloxane Si-O-Si ou Si-O-Al ou Si-O-Mg. Des charges superficielles apparaissent à la surface de ces minéraux suivant la Figure 38 (Alkan et al., 2005).

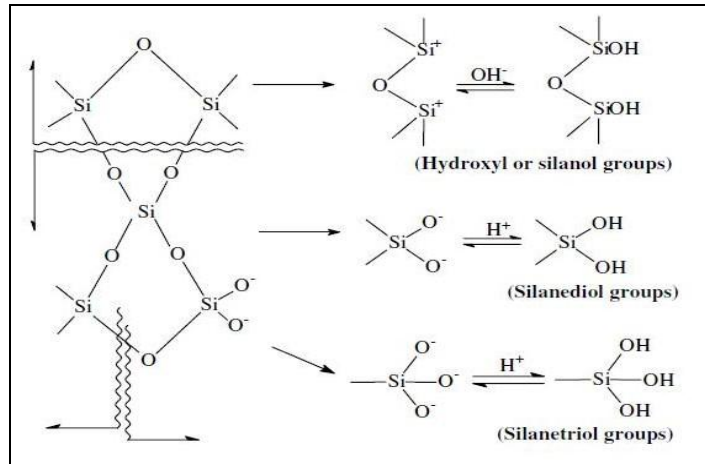


Figure 38. Création des nouveaux sites après opération de broyage, (Alkan et al, 2005).

Après le broyage, suivant l'endroit de cassure sur un quartz par exemple, trois types de groupements sont présents à la surface : $\equiv\text{Si}^+$, $\equiv\text{SiO}_2^-$, $\equiv\text{SiO}_3^-$.

Dans le milieu aqueux, ces groupements chargés réagissent avec les ions constitutifs de l'eau OH^- et H^+ pour former des groupements silanols $\equiv\text{SiOH}$, ou des groupements silanédiol $\equiv\text{Si}(\text{OH})_2$ et des groupements silanetriol $\equiv\text{Si}(\text{OH})_3$.

Des phénomènes d'hydratation (réaction acido-basique) ont lieu au niveau de ces cassures. D'après Huang, (1981) et Duval et al. (2002) plusieurs types de groupements peuvent se former en fonction du pH du milieu sur la surface du quartz (Equation 28).



Les possibles réactions de surfaces sur les silicates sont reportées suivant les Equations 29 et 30, avec M représentant les ions métalliques Si, Al ou Mg. Duval et al. 2002, reportent deux pKa de déprotonation des espèces en surface du quartz.



4.3.1.2. Flottation cationique des silicates et tectosilicates

Les mécanismes d'adsorption des amines sur les silicates ont été élucidées par de nombreux chercheurs (Buckenham et Rogers, 1954 ; Sandvik et Solbakken, 1968 ; Smith et Akhtar, 1976 ; Smith et Scott, 1990 ; Andersen et al. 1991). Deux types d'adsorption des amines est possible en fonction du pH :

- Pour des pH inférieurs au pK_a de dissociation des amines, l'adsorption est de type électrostatique entre la tête polaire du surfactant chargée positivement et les sites de la surface du minéral chargé négativement (dans le cas où le pH de la suspension est supérieur au point isoélectrique ou point de charge nulle du minéral).

- Pour des pH supérieurs au pK_a de dissociation des amines en solution aqueuse, l'adsorption du réactif cationique est de type moléculaire, le réactif étant sous la forme de $R-NH_2$.

Selon Filippov et al. 2010b, l'adsorption des éthers diamines ou éthers amines augmentent l'hydrophobicité de surface des silicates comparée à des amines. La force d'adhésion entre les particules minérales et les bulles augmente avec l'augmentation du dosage du surfactant cationique. Cependant, la performance de ces deux types de réactifs sur la flottation du quartz dépend de la taille des particules de ce minéral. En effet, Viera et Peres, 2007, ont démontré que les éthers monoamines sont des surfactants efficaces pour des particules ayant une taille comprise entre $-74 +38 \mu m$. En revanche, les éthers diamines sont des réactifs plus efficaces pour des particules de quartz pour grossières tels que $-297 +150 \mu m$ et $-150 +74 \mu m$.

4.3.1.3. Présence d'ions Ca^{+2} dans la pulpe : cas de la surface des silicates

Dans le cas de valorisation d'un minerai comme celui de feldspath, les minéraux de gangue sont constitués de silicates (quartz). La dissolution partielle des minéraux lors de la mise en suspension provoque un taux non négligeable d'ion bivalent de calcium se trouvent en solution dans la pulpe.

Le rôle déprimant des cations Ca^{+2} sur les propriétés de surface des silicates (flottation opérée à l'aide de collecteurs cationiques) et par là même, sur le comportement de flottation de ces derniers a été étudié par Scott et Smith, (1993) et Hopstock et Agar, (1968).

Scott et Smith, 1993, ont réalisé des essais de flottation sur quartz pur ($-212 +45 \mu m$) à l'aide de N-alkyl 1,3 diaminopropanes C8, C12 et C16, à divers pH, en présence et en absence de $CaCl_2$ (0,1 M). Il a été mis en évidence que la présence de Ca^{2+} dans la pulpe lors de la flottation du quartz diminue de façon considérable le taux de récupération de ce minéral pour des concentrations d'amine C8, C12 et C16 de 10^{-5} M.

La présence d'ion bivalent de calcium augmente de dix la consommation d'amine pour obtenir un taux de récupération élevé du quartz. Cet ion agit comme déprimant des surfaces du quartz dans toutes les gammes de pH mais préférentiellement dans les gammes acides et fortement basiques.

Scott et Smith, (1993), ont démontré que la dépression du quartz se réalise à des pH un peu plus acide. Cet effet pourrait être expliqué d'une part par l'augmentation de la force ionique ce qui provoque un effondrement de la couche électrique et d'autre part par la présence de $CaOH^+$ avec Ca^{+2} en plus grande concentration. De plus, ce phénomène pourrait être expliqué par la spéciation de la surface du quartz. En effet, d'après Duval et al. (2002), à un pH de 6, la proportion de sites de la forme SiO^- est la plus importante.

4.3.1.4. Effet de Fe^{+3} dans la pulpe sur la flottation des silicates et tectosilicates

Le minerai de feldspath contient une petite quantité de minéraux de fer : la biotite, et des oxydes de fer tels que l'hématite.

Il est connu que Fe^{+3} provenant de la dissolution partielle des minéraux du fer contenu dans le minerai peut jouer le rôle d'activateur sur les surfaces minérales soit des silicates, soit des

carbonates dans le cas de l'utilisation de collecteur anioniques pour flotter ces minéraux. (Ananthapadmanabhan et Somasundaran, 1985). D'après Wang et Yu, 2007, Fe^{+3} est un activateur des surfaces minérales des silicates (Spodumène et Béryl).

La présence de cette espèce ionique dans la pulpe minérale permet la flottation de ces deux minéraux à l'aide d'un mélange de 75 % d'acide oléique et 25 % de dodécylamine alors qu'au naturel, ces minéraux flottent difficilement. L'effet de cet ion sur la surface de ces minéraux est la plus forte pour des pH compris entre 6 et 9 avec une faible concentration en ion Fe^{+3} dans la pulpe, d'environ 35 mg/L (Spodumène et Béryl).

4.3.2. EFFET SYNERGIQUE D'UN MELANGE DE TENSIOACTIF (COLLECTEURS) IONIQUE ET NON IONIQUE

De nombreuses études ont été effectuées sur les effets synergiques (rôle de l'adsorption physique) d'un mélange des tensioactifs type ionique/ionique et ionique/non ionique (Karjalahti, 1972 ; Pinto et al. 1991 ; Somasundaran, 1991 ; Filippov et al, 2010a, 2010b ; Filippov et Filippova, 2006 ; Filippov, 2011).

Les mélanges de tensioactifs ont un nombre important d'avantage synergique par rapport à l'utilisation d'un seul surfactant (Sis et Chander, 2003).

Au point de vue des interfaces air/liquide et liquide/huile, le mélange de tensioactifs améliore les propriétés de la mousse. En effet, la présence d'un deuxième tensioactif (non ionique en l'occurrence) diminue la distribution de la taille des bulles. La coalescence des bulles est évitée. Ceci conduit à un effet secondaire qui consiste en la diminution du taux de retour des particules de la mousse vers la pulpe, permet de stabiliser le liquide autour des bulles, inhibe la coalescence des bulles, aide l'attachement des particules aux bulles dans la phase liquide et retarde le drainage du liquide de la surface des bulles dans la mousse. De plus, il est connu que les mélanges de tensioactifs type ionique/non ionique améliore l'activité de surface qui résulte de l'interaction particulière entre tensioactifs dans la solution (Rosen et Hua, 1982 ; Suri et Randhawa, 1989).

Un mélange de tensioactif non ionique avec un tensioactif ionique permet d'augmenter l'émulsification du tensioactif non ionique insoluble dans l'eau et par là même, d'augmenter les probabilités de collision des particules huileuses avec la surface du minéral et d'augmenter la récupération du minéral par flottation (Polat et al. 1999).

Au niveau des interfaces solide/liquide, le synergisme des tensioactifs peut être considéré sur trois catégories telles que l'amélioration de la flottation et de la sélectivité, de l'adsorption du collecteur principal et l'augmentation de l'angle de contact du collecteur principal.

L'amélioration de la flottation et de la sélectivité peut être expliquée par le fait que l'ajout d'un agent non ionique permet de préserver le collecteur principal de l'effet des particules fines c'est-à-dire de diminuer la consommation du collecteur principal. Cet ajout à également un effet de préservation de réaction du collecteur principal avec les ions en solutions tels que Ca^{+2} et Mg^{+2} provenant de la dissolution des surfaces des minéraux en présence. L'ajout de

non ionique protège la fonction anionique du collecteur principal à une éventuelle combinaison avec les ions divalents présents dans la suspension (Sis et Chander. 2003).

L'augmentation de l'adsorption du collecteur principal peut être expliquée par la diminution des répulsions électrostatiques entre les têtes polaires du réactif ionique entre elles.

Et les interactions hydrophobes entre les chaînes alkyl permettent d'augmenter l'adsorption du réactif non ionique sur la surface minérale (Rao et Forssberg. 1997). De part ces deux principes, la présence d'un mélange de collecteur ionique/non ionique permet la formation de couches serrées de tensioactif sur la surface du minéral et d'augmenter l'hydrophobie de surface du minéral. (Vidyadhar et al. 2002a, 2002b; Filippov. 2011).

Enfin, il a été prouvé que lors de l'ajout d'un tensioactif non ionique, l'angle de contact du collecteur ionique augmente de 10°-20° ce qui a pour effet une augmentation de l'hydrophobie de surface du minéral que l'on veut séparer (Lu et al. 1997 ; Lu et al. 1999). Un autre effet des mélanges des réactifs ionique et non ionique consiste en la floculation sélective des fines particules qui a pour conséquence l'augmentation de la constante cinétique de flottation (Filippov et Houot. 1997).

4.3.3. MODE D'ADSORPTION D'UN COLLECTEUR CATIONIQUE SUR LA SURFACE MINÉRALE DES SILICATES

Suivant le pH, le mode d'adsorption des amines diffère. Suivant l'équation de dissociation des amines, il est possible de savoir sous quelle forme l'amine est majoritaire en fonction du pH et de ce fait, savoir quel sera le type d'adsorption sur la surface minérale, électrostatique ou moléculaire.

D'après la réaction de dissociation des amines, il peut en être déduit :

$$\text{pH} - \text{pK}_a = \log \left(\frac{(\text{RNH}_x \text{ aq})}{(\text{RNH}_y^+)} \right) \dots\dots\dots(31)$$

❖ Le mode d'adsorption électrostatique :

Dans le cas où le pH est inférieur aux pKa des amines, l'espèce majoritaire des amines est sous sa forme acide, ionique RNH^{+3} . La surface des silicates pour des pH supérieurs au pH de charge nulle ou P.C.N est chargée globalement négativement.

Les espèces chimiques permettant l'adsorption des amines de façon électrostatique sont chargées négativement.

❖ Le mode d'adsorption moléculaire :

Le pH est supérieur au pKa des amines et l'espèce majoritaire est RNH_2 . Les amines sont adsorbées à la surface des minéraux en formant des complexes avec les espèces du minéral présentes en surface.

4.3. HISTORIQUE DE LA SEPARATION DU FELDSPATH PAR FLOTTATION

Le tableau ci-dessous, permet de synthétiser les travaux antérieurs des essais de flottation des feldspaths.

Tableau 13. Historique de travaux de séparation des feldspaths

Chercheurs	Contenu
Shapolov et Polkin, 1958	Activation du microcline à pH élevé avec Ca^{+2}
Joy et al., 1966	Dépression du microcline à pH faible avec dodecylamine hydrochloride (DAH) en absence d'HF
Kovalenko, 1967	Flottation du feldspath potassique et dépression du feldspath sodique en présence de MgCl_2 et CaCl_2
Yanis, 1968	Flottation cationique des feldspaths sodique et potassique avec HF (brevet)
Starikova, 1968	Diminution de la teneur en K_2O en présence de NaCl par l'activation le fluorure
Revnitzev et al, 1968; Revnitzev et Putrin 1969	Dépression du feldspath potassique avec les ions K^+ , Rb^+ , Cs^+ et Ba^{+2} et ceux de feldspath sodique et calcique avec les ions Ca^{+2} , Na^+ , Sr^{+2} et Mg^{+2} ; sélectivité de l'albite augmente significativement avec KCl et celle de microcline avec NaCl
Klyachin et al., 1969	Flottation cationique du feldspath en utilisant HCl ou H_2SO_4 a la place d'HF (brevet)
Marius et Laura, 1970	Utilisation de collecteur cationique (Flotigam PA) pour la flottation de minéraux feldspathiques issus de pegmatite et en dosant le NaCl pour déprimer les feldspaths sodiques
Sheiko, 1972	Adsorption sélective de DAH sur l'albite et le microcline en présence de NaCl et KCl
Yanis et Gorelik, 1973	Effet des ions Na^+ , K^+ et Ca^{+2} en fonction de concentration de l'amine; le microcline se flotte sélectivement par comparaison avec l'albite. Dépression de feldspath potassique avec l'ion K^+ et feldspath sodique avec les ions Na^+ et Ca^{+2} .
Klunker et al. 1974	Flottabilité du feldspath est reliée au taux Na et K de minéraux, pulpe, collecteur, concentration de HF et la structure cristallin de feldspath
Severin et al. 1978	La différence de flottabilité dépend de réseau cristallin et de taux de Na et K de minéraux feldspathiques.
Ociepa, 1994	La Charge de surface du microcline est présentée plus négative que celle de l'albite et l'oligoclase en présence amine médium, indiquant une meilleur flottabilité de microcline à pH 5.8

El-Salmawy et al, 1993a et b ; 1995	Mise en évidence de l'effet des surfactants non-ioniques en présence des collecteurs cationiques sur la flottation du quartz et du microcline
Demir et al. 2001, 2003a et b and 2004	Séparation du feldspath potassique du feldspath sodique en présence de G-TAP et avec NaCl et CaCl ₂ à pH naturel.
Karaguzel et al. 2006	Un nouveau schéma de traitement (flow-sheet) proposé pour l'utilisation commercial de feldspath potassique issu de pegmatite.
Jidyadhar et al. 2001 - 2007	Mécanisme d'adsorption de mélange des collecteurs cationique- anionique dans le système de flottation de feldspath- quartz
I. Dogu ; A.I. Arol. 2003	séparation les minéraux sombres au feldspath par la floculation sélective avec l'Amidon.
Subhas G .Malghan, 1976	Séparation de feldspath par la flottation sélective dans un milieu non Floride
Immo H. Redeker, 1981	Flottation de feldspath, Spodumène, Quartz et Mica de pegmatite (Carolina, USA).
Cengiz Karaguzel, 2010	Sélective séparation de très fines particules avec DAF et examinassions de quelques paramètres de DAF (Dessolved Air Flottation).
N.Shehu et E.Spaziani	Note tech (séparation de feldspath du quartz avec EDAT(EthylDiAmineTetracetate) comme modificateur dans milieu acid).
M.E. Gaid et W. Gallala., 2011	Bonification de minerai de feldspath pour l'application dans l'industrie céramique : Influence de la composition sur les caractéristiques physiques.
Cengiz Demir; 2010	Selective separation of Na and K-feldspar from weathered granites by flotation in HF medium.
Vidyadhar, A., Hanumantha Rao, K., Chernyshova, I.V., 2002c	Etude spectroscopique des mécanismes de l'interaction d'amine-feldspath dans l'absence et la présence d'alcools.
Vidyadhar, A., Hanumantha Rao, K., Forssberg, K.S.E., 2002a.	Adsorption of N-Tallow 1,3 Propane-Diamine-Dioleate collecteur de minerai d'albite et quartz et flottation sélective de l'albite de minerai Feldspath de Greek Stefania.
Vidyadhar, A., Hanumantha Rao, K., Chernyshova, I.V., Pradip, Forssberg, K.S.E., 2002b.	Mechanisms of Amine-Quartz interaction in the absence and presence of Alcohols Studied by Spectroscopic Methods.

4.4. SYNTHÈSE DES ÉTUDES RÉALISÉES SUR L'ENRICHISSEMENT DU FELDSPATH

La flottation est une méthode possible de séparation sélective a suscité un intérêt considérable surtout parmi les scientifiques russes à la fin des années soixante et début des années soixante-dix (Yanis, 1968), et un très bref aperçu est donné par Manser (1975).

Kovalenko (1967) affirme que le feldspath potassique a été étendu dans le produit de mousse lors de l'utilisation de NaCl; avec l'addition de KCl le résidu dans la cellule contenait principalement Na-feldspath. En 1968, Yanis a affirmé que Mg^{+2} et d'ions Ca^{+2} que la flottation en amine avec HF agit comme déprimeur pour Na-feldspath et flotté le feldspath potassique. La séparation des feldspaths alcalins en phases pures de Na-feldspath et K-feldspath par des techniques classiques de traitement des minéraux n'a pas eu beaucoup de succès.

Stratikova (1968) a effectué la flottation différentielle des feldspaths de Na-K par activation en présence de fluorure 15 g / l de NaCl et a constaté une augmentation de la teneur en potassium du concentré feldspath.

Revnitzev et al. (1968) ont indiqué que tandis que le potassium et les ions ayant des rayons similaires, par exemple, Rb, Cs et Ba déprime le feldspath potassique, Na^+ , Ca^{+2} , Sr^{+2} , Mg^{+2} et Na-déprimés et Ca-feldspaths. Le traitement par HF a été trouvé à la fois augmenter la sélectivité et de diminuer la concentration de déprimeur du sel nécessaire. Les meilleurs résultats de flottaison avec pegmatites Voineasa contenant la même quantité de Na et K-feldspaths utilisant collectionneurs aminés ont été obtenus lorsque Na-feldspath était déprime avec NaCl (Marius et Laura, 1970).

Bayraktar et al, (1999) a étudié Demirci- pegmatite Turquie contenant 4.8% K_2O et 2.40% Na_2O ; mica et oxydes ont d'abord été retiré suivie d'une séparation des Na-et K-feldspath et quartz en utilisant NaCl. Ces chercheurs ont réalisé un dosage de concentré de 3.3% Na_2O 13.10% K_2O .

Gülsoy et al, (2005) ont étudié le même minerai de feldspath de la même région doser 5.94% K_2O , 3.14% Na_2O en utilisant une séparation magnétique, suivie par flottation avec du HF et du NaCl; un concentré a été atteint un teneur de 3.1% Na_2O et 12.65% K_2O .

Demir et al, (2001), a confirmé que les ions Na^+ déprime Na-feldspath en présence d'amine (TAP G) à pH naturel. De même, les ions Na^+ sont avérées efficaces pour la séparation sélective de minéraux de feldspath dans un milieu d'HF.

(Gülgönül. 2004) déterminé que divers minéraux feldspath particulier K-feldspaths présentent des propriétés de surface et de flottabilité due à la présence d'impuretés nano sur la surface minérale. Récemment (Demir et Gülgönül. 2004, 2010). Utilisés un mélanges des minéraux purs pour expliquer le mécanisme de séparation de minerais de feldspath par des expériences de microflottation. Cependant, il a également été observé que les minéraux purs ne sont pas toujours les minerais réels imiter tels que pegmatite, le granite, syénite etc.

Les conditions de formation de minerais de feldspath en particulier l'existence de la structure perthitique dans le minerai ou de roche influencent grandement les conditions de séparation.

L'aptitude des roches granitiques altérées pour la matière première de sable feldspath et de silice a indiqué que le granite est plus utile que granodiorites comme matière première, parce que le premier est riche en quartz et feldspath potassique.

Des bons résultats de flottation de feldspath ont été obtenus pour le granite par rapport à granodiorites. Ils ont également expliqué qu'un grain plus grossier est plus difficile à flotter qu'une plus fine, et feldspath potassique est plus facile de flotter à plagioclase.

4.4.1. ENRICHISSEMENT DES FELDSPATHS A L'ECHELLE MONDIALE

Gaied, M.E., Gallala. W. 2011, ont effectuées une étude, physique et physicochimique (méthodes d'attrition et flottation) pour améliorer la qualité du minerai du massif de feldspath à Sidi Aïch, situé dans la région de Gafsa dans le sud-ouest de la Tunisie.

Dans cette étude, ils ont appliquées une étude comparative entre la séparation du feldspath de quartz par flottation avec l'acide fluorhydrique et sans acide fluorhydrique.

Les résultats ont montré que la méthode HF / amine classique est la méthode la plus efficace et la plus sélective. Les essais de flottation avec HF ou H₂SO₄ comme les régulateurs de pH et Aero 3030C, Cutusamine 9002, collecteurs d'acétate d'amine conduit à des rendements de 95.44% et 86.99%, respectivement, et à condition de feldspath concentrés dosant 17% Al₂O₃. Ces concentrés contiennent 0.14% au total d'oxydes de fer.

Récemment une autre étude qui a été réalisé par Boulos, T.R., et al. (2015) sur deux échantillons de feldspath pegmatites égyptiens (microcline et orthose), a l'aide d'une flottation anionique-cationique pour objet de la séparation de feldspath du quartz et d'oxyde de fer.

Une flottation anionique de l'impureté d'oxyde de fer du produit broyé -0.25 + 0.03 mm a été réalisée avec l'acide dodécylbenzènesulfonique: Huile de son de riz: kérosène à pH 3.

Une flottation cationique de feldspath a été effectuée avec le sel d'ammonium quaternaire comme collecteur en présence de l'acide HF, comme un dépresseur de silice et d'un activateur de feldspath à pH 3, avec des concentrés finaux feldspath titrant 80.8% - 89.5% minéral feldspath, 0.119% - 0.127% Fe₂O₃ et 16.84% - 18.65% Al₂O₃.

D'autres études d'enrichissement sur un minerai de feldspath portugais ont été effectuées (Amarante, M.A, 1997) par une séparation magnétique suivi par la flottation, afin d'obtenir des produits finaux susceptibles d'être utilisés dans l'industrie de la céramique. Une opération de lavage assez simple pour briser les morceaux dans l'alimentation.

Ce travail met l'accent sur la valorisation de la fraction 500/74 µm, ce qui constitue environ 27% du minerai titrant 9.42% Al₂O₃, ce qui équivaut à environ 46% de feldspath, avec une teneur en fer moyenne de 0.29% d'oxydes de fer. Les essais La séparation magnétique suivi par la flottation a été réalisée, afin de diminuer la contamination de fer et augmenter la teneur en feldspath.

La séparation magnétique seule a réduit la teneur en oxyde de fer de la charge à des valeurs comprises entre 0.04 et 0.08% d'oxydes de fer avec un rendement moyen supérieur à 90%.

La flottation avec HF avec une combinaison de la séparation magnétique, à condition d'une reprise de feldspath de 45 à 46% avec un concentré dosage 17.6% Al₂O₃. L'utilisation de H₂SO₄, a donné une récupération de 35% à 36% de concentré de feldspath, dosant 16.1%

Al_2O_3 . Cependant, La teneur en fer de 0.12% d'oxydes de fer dans ces concentrés, peut être réduite à 0.04 à 0.05%.

Mousa Gougazeh (2006) a été étudié les processus d'enrichissement et de valorisation d'un minerai de feldspath jordanien qui sera finalement mis en œuvre dans l'industrie de la céramique. Son travail expérimental a été mené pour évaluer le rôle de la distribution granulométrique, de la composition chimique, de la teneur en minéraux et des impuretés magnétiques (Fe_2O_3 et TiO_2). L'enrichissement des fractions de -500 +45 μm , avec 10.9% d' Al_2O_3 , équivalent à environ 56% de feldspath, et une teneur de 0.95% en fer et en oxydes de titane. Des travaux de séparation magnétique à haute intensité et de flottation par moussage ont été effectués afin de diminuer la contamination du fer et d'augmenter la teneur en feldspath. La séparation magnétique seule a diminué la teneur en fer de l'alimentation dans une plage comprise entre 0.10 et 0.12% d'oxydes de fer avec un rendement moyen supérieur à 85%. La flottation avec HF a permis une récupération du feldspath de 45-55% avec des concentrés évaluant 17%, 27%, 35% d' Al_2O_3 . Le contenu en fer a été réduit de 0.46%, 0.68% à 0.17%, 0.23%.

4.4.2. ENRICHISSEMENT DES FELDSPATHS A L'ECHELLE LOCAL (AIN BARBAR)

L'Algérie dispose de nombreux gisements minéraux parmi lesquels le feldspath d'Ain Barbar. La demande de feldspath comme matière première pour l'industrie céramique sera en constante augmentation, ce qui implique une augmentation des importations de cette matière, il est donc devenu impératif de développer le gisement de minerai local, qui contient du feldspath potassium essentiellement, de quartz et l'oxyde de fer. Ces deux derniers sont l'une des principales impuretés qui pourraient conférer une couleur et à leur tour dégradent la qualité du minerai. Pour cela des travaux de recherches mise en place par différents chercheurs et organismes nationaux depuis les années soixante dix (1979) à ce jour afin de valoriser la matière première feldspathique.

Parmi les travaux réalisés on citera (Djouama. M.C, Bounouala. M ; et al 2005) par une étude de pré- concentration granulométrique qui ont révélé que le temps de séjour de tamisage améliore la qualité de la matière feldspathique surtout les fractions +0.2mm de point de vue teneur en fer par contre dans la fraction +0.08mm, ils ont vu un baissment importante de la teneur en SiO_2 (une teneur varie entre 62.21% ; 64.87% pour la classe 0.040mm contre une teneur de 74.42 dans le tout venant). Cette étude est menée par une classification des différentes fractions selon la couleur (blancheur) est montre que la fraction (-0.2 +0.08) mm prendre une couleur blanche avec une teneur de fer entre 0.65% et 0.76%.

Récemment une étude publiée par (Mohamed KECIR et al, 2014) dont l'objectif est de réduire le fer trouvé sous forme d'oxyde dans la matière première feldspathique. A cet effet, ils ont utilisé la séparation magnétique à haute gradient (HGMS), par voie sèche et humide.

La première méthode a permis de réduire la teneur en fer, de 0.60% à 0.40% Fe_2O_3 , qui est acceptable seulement pour les carreaux en grès pâte de type "porcelaine". Afin de réduire cette teneur en oxyde de fer, un HGMS humide a été réalisée sur une taille de grain plus fin (-40 + 20 μm) et a été permis d'obtenir un produit avec 0.19% de Fe_2O_3 , qui peut être utilisé dans l'industrie de la céramique sanitaire.

Un autre travail de recherche a été réalisé par (Akkal. R et Ould Hamou. M., 2015) afin d'obtenir une qualité de feldspath acceptable dans les différents secteurs de verre et céramiques, l'étude qui a été faite consiste à une épuration magnétique à haute intensité dont l'objet de réduire le pourcentage en oxyde de fer suivi par une réduction de la silice libre obtenue uniquement par flottation et plus particulièrement par blanchiment chimique (lessivage).

Le produit chimique de blanchiment utilisé est le milieu réducteur d'acide nitrique pour remplacer l'acide sulfurique et le dithionite en tant qu'agent réducteur, Ces essais ont été appliqués sur des fractions de taille (-0.6 + 0.1) mm ; (-0.6 + 0.250) mm ; (-0.250 + 0.1) mm ; (-0.8 + 0.1) mm et <0.1 mm.

Les tests d'application de lessivage ont donné des résultats négatives par contre la séparation magnétique à haute intensité, abaisse la quantité d'oxyde de fer Fe_2O_3 jusqu'à 0.34% avec des rendements en poids comparativement à tous les venants respectivement 41.26 %, 19.30% et 23.06%. Ces purifications a donné des résultats insatisfaisants, l'utilisation de la purification par flottation de ces fractions de mêmes taille a diminué la teneur des oxydes de fer de 0.39% à 0.23 pour (-0.8 + 0.1) mm et de 0.34 à 0.20% pour (-0.6 + 0.1) mm avec un rendement en poids de 54.63%, 38.40% respectivement par rapport les tout-venants. Ces niveaux 0.20% et 0.23% d'oxyde de fer sont appréciés par l'industrie du verre et de la céramique. Pour les fractions de taille (- 0.6 + 0.250) mm, (-0.250 +0.1) mm et < 0.1 mm, purification par flottation, la teneur en oxyde de fer diminué a 0.34% à 0.30% seulement, ces derniers ne répond pas aux exigences des consommateurs.

L'application du procédé hydro-métallurgique, à l'exclusion de l'effet de la pression dans un autoclave et de l'utilisation de l'acide sulfurique, a donné de mauvais résultats dans les conditions expérimentales.

Par contre le procédé de lessivage à l'acide nitrique dans un milieu réducteur ($HFNH_4F$) est efficace et pousse le degré d'élimination du Fe_2O_3 autour de 0.01%. Ce procédé a été appliqué aux fractions de taille (-0.8 + 0.1) mm préalablement repassées par une séparation magnétique à haute intensité réduit les teneurs en fer de 0,054% avec un poids de 58.32% par rapport à toutes les autres.

D'après la littérature scientifique sur l'enrichissement des matières feldspathiques nous avons constaté que l'enrichissement de ces dernier est réalisé soit par une séparation magnétique soit par flottation ou la combinaison entre eux, dans des conditions bien précise.

Suite aux différentes conditions qui ont été utilisé pour la séparation des matières feldspathiques par la flottation et les caractéristiques des différents réactifs utilisés pour la flottation on a proposé de faire des tests de séparation magnétique suivi par flottation, cette dernière a été réalisée avec un nouveau modificateur afin de substituer l'acide fluorhydrique (HF) par l'acide bromhydrique (HBr). Cette idée dont l'intérêt de point de vue économique, technique et environnemental, selon la comparaison entre les caractéristiques des deux modificateurs utilisés (cf.5).

- Qualité industrielle de l'acide bromhydrique : 40%, 48% (HBr), cas n°: 10035-10-6
- Prix de vente : US \$ 400-500 / Tonne métrique.
- Qualité industrielle de l'acide fluorhydrique : 40%, 55%, 70% (HF) cas n° : 7664-39-3
- Prix de vente : US \$ 1050-1460 / Tonne métrique (www.cnesst.gouv.qc.ca).

**Chapitre V : COMPORTEMENT DES MATIERES
FELDSPATHIQUES D'AIN BARBAR A LA SEPARATION
PHYSIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE**

5. COMPORTEMENT DES MATIERES FELDSPATHIQUES D'AIN BARBAR A LA SEPARATION PHYSIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE

Dans ce chapitre, nous mettrons les points sur la méthodologie des essais expérimentaux utilisés en détails ainsi les résultats obtenus avec ses interprétations.

5.1. ESSAIS EXPERIMENTAUX

Dans ce modeste recherche nous avons appliqué une combinaison entre la séparation magnétique a haute intensité et la séparation par flottation sur des échantillons représentatifs de minerai de k-feldspath (Orthose), pour objet de réduire la teneur en oxydes de fer et du quartz libre. Les minéraux ferromagnétiques peuvent être éliminés dans un stade plus avancé de traitement par une séparation magnétique par contre le procédé de flottation sera utilisé pour la séparation de la phase quartzifère du celle de feldspath (Orthose). Ce dernier est réalisé par Diamine et Sulfonâtes de pétrole comme des collecteurs et avec l'acide fluorhydrique (HF) ou l'acide bromhydrique (HBr) comme modificateur (activant et déprimant) afin d'obtenir un produit de qualité pour les céramistes et verreries.

Au cours de cette étude, les paramètres examinés sont l'effet de l'intensité du courant (l'intensité du champ), le pH et la quantité des différents réactifs utilisés, ainsi qu'une étude comparative entre les résultats obtenus.

5.2. ETUDE DE LA LIBERATION DU FELDSPATH D'AIN BARBAR

Il serait alors logique de penser que la libération de feldspath pourrait s'opérer pour un degré de broyage se situant à 20 μm (particules fines). Cependant, un tel broyage au point de vue procédé industriel aurait un cout important. De plus, ceci engendrerait une production de particules fines importantes lesquelles seraient un frein pour l'application de la flottation. En effet, la flottation des particules fines <20 μm engendre une consommation en réactif de flottation importante du fait de l'augmentation de la surface spécifique des particules minérales.

La flottation de ces dernières n'est pas sélective dans les conditions hydrodynamiques classiques de flottation et leur taux de récupération est faible (Gaudin et al. 1942).

En définitive, un broyage <250 μm serait une voie pour la libération de feldspath mais pourrait être industriellement très couteux du fait du broyage fin et des techniques spécifiques requises pour permettre une flottation sélective du minéral que nous souhaitons valoriser.

La caractérisation des particules minérales de l'échantillon de feldspath broyé à <500 μm a permis de conclure que le feldspath n'est pas libérée. Donc un broyage inférieur à 250 μm de feldspath permettrait d'arriver à une libération importante.

Cependant, l'étude de caractérisation effectuée sur les minéraux de gangue ainsi que la détermination des éventuelles substitutions présentes dans les réseaux cristallins, révèlent que les propositions de séparation de minerai utile à celle de la gangue, telles que la séparation de

feldspath des autres minéraux de gangue (quartz libre) pourraient s'avérer possible par le procédé de flottation.

Le taux de broyage -250 µm a été retenu, est qui représente une libération importante de l'orthose à celle de la gangue, pour la valorisation de l'orthose du minerai de feldspath, la taille des minéraux -250 µm +45 µm étant convenable pour appliquer le principe de flottation (Gaudin, A.M., Fuerstenau, D.W., 1955).

5.3. DESCHLAMMAGE DES PARTICULES FINES

Le déschlammage des particules fine est une condition cruciale pour la flottation et consiste à travailler avec des particules solides de granulométrie adéquate. En effet, pour que des bulles de diamètre compris généralement entre 0,1 et 1 µm puissent entraîner les solides, il faut que ceux-ci soient suffisamment fins, généralement de dimension inférieure à 300 µm, sauf dans des cas particuliers de particules de faible masse volumique telles que celles des charbons. Cependant, les très fines particules de dimension inférieure à 10-15 µm, ont des difficultés à flotter à cause de leur faible énergie cinétique, insuffisante pour se placer à la surface des bulles, ou de leur court-circuitage par entraînement direct dans les rejets. De plus, elles libèrent facilement des ions, consomment en pure perte des réactifs, sont responsables du phénomène d'adagulation, et augmentent la viscosité de la pulpe, et aussi que plus les solides sont broyés, plus la sélectivité de l'adsorption n'est faible et, lorsque leur surface est amorphisée, l'adsorption devient très difficile (Pierre Blazy et El-Aid Jdid. 2001).

Un broyage a <1 mm ou <0.5 mm n'est pas suffisant pour appliquer la flottation. En effet, pour ces tailles-ci, les minéraux trop lourd sédimentent non préférentiellement dans le fond de la cellule de flottation et ne peuvent être séparés de façon sélective par flottation.

Dans la première étape du processus de lavage (déschlammage) du minerai a enrichir, la fraction inférieure à 250 µm est mise en place dans un tamis de 45 µm permettant de nettoyer la surface du minerai de feldspath et enlève les particules fines inférieure a 45 µm, puis suivit d'une opération de séchage du produit à 105°C (Tableau 14).

Tableau 14. Composition chimique de l'échantillon utilise

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	PbO	ZnO	MnO	PAF
Teneurs(%)	73.26	14.71	7.78	0.33	0.79	0.59	0.31	0.05	0.02	0.02	0.03	0.01	1.04

5.4. ESSAIS DE SEPARATION MAGNETIQUE A HAUTE INTENSITE

L'étude des paramètres variables dépendant du procédé de la séparation magnétique des minerais est complexe à cause de la diversité des paramètres liés à cette dernière. Cependant, la valorisation par cette méthode consiste à séparer les particules contenues dans la matière première feldspathique selon leur comportement magnétique lors de l'application aux particules une force magnétique qui est fonction du volume et de la susceptibilité magnétique de cette dernières. Cette force est proportionnelle au produit de l'intensité du champ magnétique et du gradient de ce champ. En effet, l'efficacité d'une séparation magnétique

dépendra probablement des caractéristiques naturelles de la matière première ainsi que du type de séparateur magnétique utilisé.

Des essais d'enrichissement par séparation magnétique à haute intensité ont été réalisés sur une matière feldspathique d'Ain Barbar, les échantillons broyés, tamisés et lavés de 100 g chacun et d'une granulométrie de 250/45 μ m sont soumis à des tests avec une variation de l'intensité du courant électrique de 5 à 12 Ampères.

Dans ce travail de recherche, l'appareillage utilisé est un séparateur magnétique à haute intensité de laboratoire travaillant en voie sèche est composé de trois bobines entourant l'électroaimant muni d'un rotor cannelé tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique. Les pôles magnétiques ou pièces polaires, entre lesquelles tourne le rotor sont soumis à une induction magnétique.

L'alimentation du minerai est effectuée par trémie et à l'aide d'un alimentateur vibrant la matière minérale est séparée par le rotor magnétique. Les particules magnétiques adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées dans une zone de champ magnétique faible où sont décollées par une brosse. Les principaux paramètres du séparateur magnétique sont la densité du flux magnétique qui varie de 1.2 à 2 Tesla, la granulométrie doit être inférieure à 1 mm et la vitesse de rotation de 60 t/min (Bouabdallah et al. 2015).

Les échantillons d'une granulométrie de 250/45 μ m d'orthoclase soumis à des tests de séparation magnétique sont réalisés au niveau du laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement (LAVAMINE), département des Mines, Université Badji Mokhtar, Annaba.

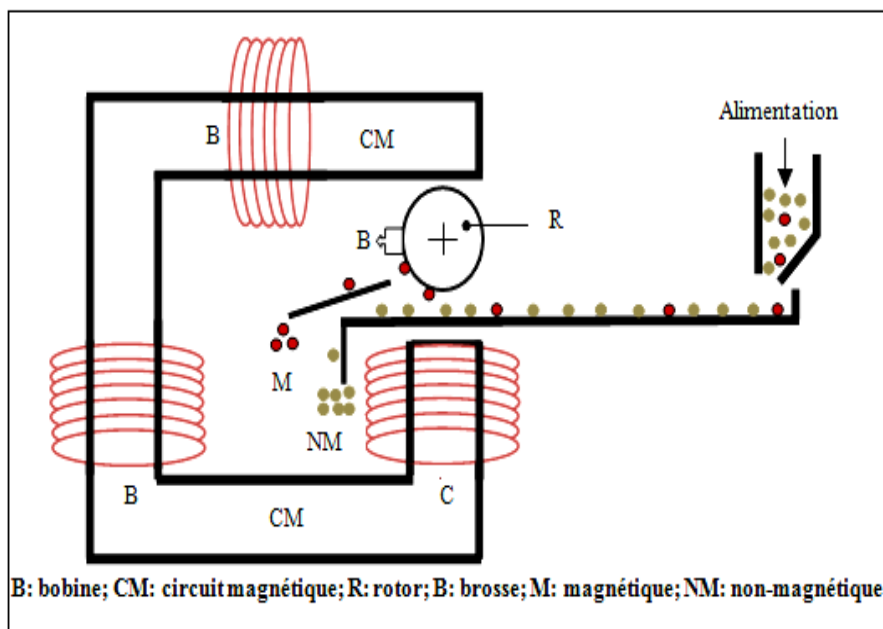


Figure 39. Séparateur magnétique à haute intensité (électroaimant).

5.5. ESSAIS DE SEPARATION PAR FLOTTATION

5.5.1. LES RAISONS JUSTIFIANTS LA FLOTTATION

La flottation est, sans aucun doute, le procédé le plus important parmi les différentes techniques employées pour la séparation. Cette technique polyvalente permet le traitement de plusieurs minerais complexes d'oxydes (hématite, magnétite, ...), et de minerais non-métalliques (quartz, feldspath, mica...). Grâce à la flottation, il est possible de concentrer de façon économique des minerais pauvres dont le traitement ne serait pas rentable en utilisant les techniques de concentration gravimétrique (Wills, 1988). Initialement breveté en 1906, la flottation a permis d'extraire des minerais de faible teneur et complexes qui auraient autrement été considérés comme non rentables. Dans la pratique antérieure, les résidus de nombreuses usines de gravité étaient d'un grade plus élevé que le minerai traité dans de nombreuses usines de flottation modernes.

La séparation du feldspath et du quartz n'est pas simple car ces deux minéraux se ressemblent étroitement dans leurs caractéristiques chimiques. Cependant, il peut être possible de développer une méthode basée sur la différence des caractéristiques électriques de surface des deux minéraux.

Le quartz a la charge du point zéro (PZC) = 2, le PZC du feldspath est de l'ordre de 1.5 (Fuerstenau, 1982; Rao et Forsberg, 1993). En effet, on devrait étudier la possibilité de séparation à l'aide des amines à longues chaînes dans un milieu acide ($\text{pH} \leq 4$), ces amines agissent en tant que collecteurs cationiques.

À $\text{pH} = 1.5$ à 2.5 le feldspath sera négativement chargée tandis que la silice apprêterait positif. En principe, le feldspath devrait être préférentiellement flotté par collecteur cationique Diamine dans cette gamme de pH.

5.5.2. CRITERES D'EVALUATION DES RESULTATS DE FLOTTATION

Les principaux critères d'évaluation de la performance d'une opération de flottation que nous avons retenus sont : le rendement de récupération du métal utile, le rendement pondéral du concentré, le taux de concentration de métal utile.

5.5.2.1. Rendement pondéral du concentré

C'est le rapport exprimé en pourcentage du poids du concentré au poids de l'alimentation. Pour une bonne opération de flottation, le rendement pondéral du concentré doit être le plus bas possible. Ce rendement est donné par la relation suivante :

$$\gamma = Q_c / Q_a * 100 = (\alpha - \theta) / (\beta - \theta) * 100 \dots \dots \dots (32)$$

Avec γ : rendement pondéral du concentré.

5.5.2.2. Rendement de récupération du métal

C'est le rapport en pourcentage du poids de métal contenu dans le concentré au poids de métal contenu dans l'alimentation. Le rendement de récupération doit être le plus élevé possible pour minimiser les pertes de métal dans les rejets.

Le rendement de récupération ζ du métal est donné par :

$$\zeta = (Q_c * \beta / Q_a * \alpha) * 100 = \beta (\alpha - \theta) / \alpha (\beta - \theta) * 100 \dots \dots \dots (33)$$

- Avec ; **α** : Teneur du métal dans l'alimentation;
 Q_a : Masse du minerai à flotter ;
 β : Teneur du métal dans le concentré ;
 Q_c : Masse du concentré ;
 θ : Teneur du métal dans le rejet.

5.2.2.3. Taux de concentration

C'est le rapport de la teneur du métal dans le concentré sur la teneur du métal dans l'alimentation. La flottation est d'autant meilleure lorsqu'au bout du compte, on obtient un concentré dont le taux de concentration de l'élément utile est plus élevé. Le taux de concentration est donné par l'expression :

$$T_c = \beta / \alpha \dots \dots \dots (34)$$

Avec : **T_c** : taux de concentration

5.2.3. Description de la cellule de flottation

Les essais de flottation de feldspath ont été réalisés dans une cellule de flottation de type rotor-stator Denver de 1L (cf.5). Les différentes parties composant de cet appareil sont présentées en Fig.40.

Les cellules de flottation consistent essentiellement en une structure géométrique définissant la forme (parallélépipède rectangulaire ou cylindre) de la cellule, dans laquelle se trouve placé un agitateur, constitué d'un rotor et un stator et d'un dispositif permettant d'introduire l'air dans la cellule. Les fonctions essentielles d'une cellule de flottation sont de mettre et maintenir les particules en suspension, disperser les bulles d'air dans la pulpe et assurer les conditions nécessaires pour le contact entre bulles d'air et particules hydrophobes.

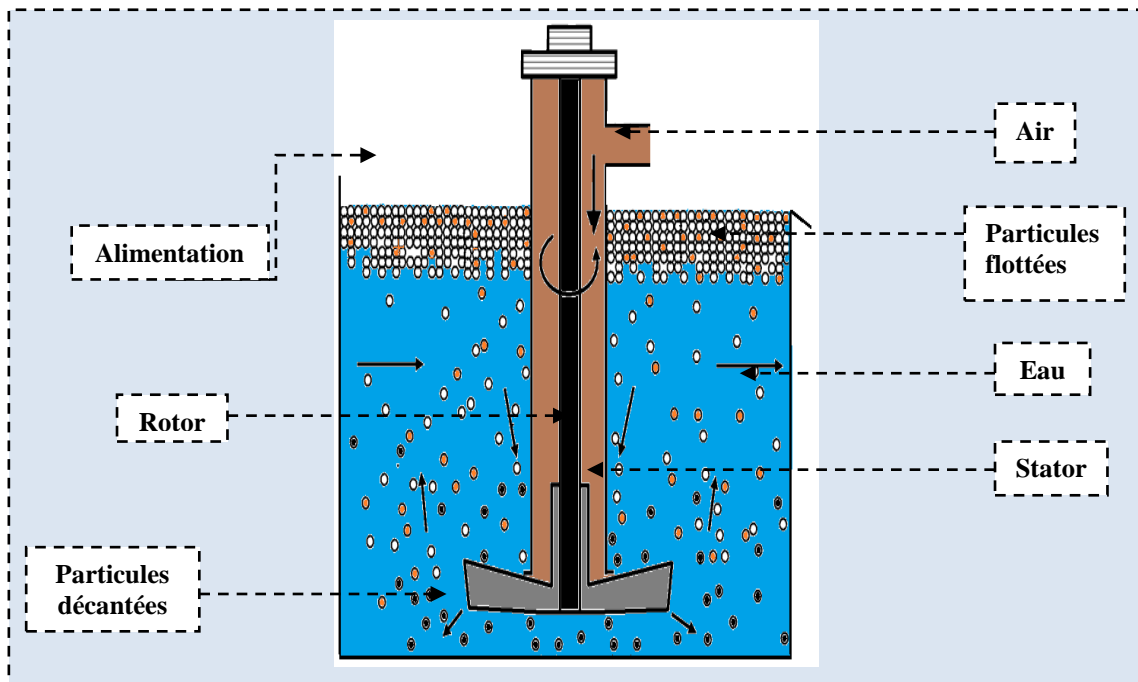


Figure 40. Cellule mécanique de flottation « Denver ».

5.2.4. PROTOCOLE DE SEPARATION PAR FLOTTATION

La séparation du feldspath (orthoclase) du quartz est difficile car elle révèle des propriétés de surface similaires. La flottation à la mousse est l'une des méthodes pour la séparation de feldspath du quartz, les conditions de cette méthode pour obtenir une sélectivité élevée sont rapportées dans un milieu acide avec une amine en tant que collecteur, et en présence du fluorure (acide fluorhydrique) comme modificateur, ce dernier est coûteux et polluant pour l'environnement.

Dans cette recherche on a essayé de faire une substitution d'HF par HBr comme modificateur parce que ce dernier ne présente pas des effets sur l'environnement par rapport de l'acide fluorhydrique et moins cher.

Les essais de flottation ont été effectués avec 500 g d'échantillon de minerai de feldspath d'Ain Barbar, issu de la séparation magnétique de taille 250/45 μ m.

Une pulpe contenant 40% de solides avec de l'eau, la pâte est agitée dans un réservoir de conditionnement pour assurer l'homogénéité du milieu. Dans un premier temps, on ajoute l'acide fluorhydrique ou l'acide bromhydrique avant de flotter le concentré (feldspath), qui sont ajoutés pour modifier la surface des particules de feldspath pendant le conditionnement pour être entraînés à la surface des bulles d'air, ce procédé est répété à chaque fois avant la flottation. Ensuite, on ajoute le collecteur, diamine ou sulfonâtes de pétrole, en suite on ajoute le moussant (l'huile de pin) avec une agitation de 3min,

La vitesse du rotor pendant la durée du conditionnement des collecteurs (5 minutes), de moussant (3minutes) et de la flottation (5 minutes) est fixée à 1200 tr/min (tableau 15).

L'opération de flottation est répétée pour chaque collecteur et modificateur.

Des essais de flottation ont été mise en place afin d'étudier l'effet de variation de pH et la quantité (concentration) des modificateurs utilisés pendant la flottation. Le pH de milieu est ajusté par l'ajout de H₂SO₄ et NaOH. Après chaque opération de flottation, on lave, on sèche et on filtre les deux produits obtenus afin des analyses. Les tests ont été effectués en laboratoire de valorisation des ressources minières et de l'environnement, Département des Mines, Université de Badji Mokhtar, Annaba et le laboratoire de valorisation des ressources minérales de l'université d'El-Manar Tunis.

Tableau 15. Protocole de flottation

Paramètres	Conditions
Température du milieu	20–25° C
granulométrie	–250 + 45 μ m
Vitesse de rotor	1200 rpm
%Solides	40%
Type de collecteur	Diamine, sulfonâtes de Pétrole
Quantité de collecteur	150 g/t
Type de moussant	Huile de Pin
Temps de conditionnement de collecteur	5 min
pH	pH Acide (1.5–4.0) HF, HBr
Quantité de d'HF	(300–1200 gr/t) H ₂ SO ₄ , si nécessaire
Quantité de d'HBr	(300–1200 gr/t) H ₂ SO ₄ , si nécessaire
Temps de conditionnement de moussant	3 min
Temps de Flottation	5 min

5.6. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.6.1. EFFET DE L'INTENSITE DU COURANT SUR L'EFFICACITE DE SEPARATION MAGNETIQUE DU FELDSPATH D'AIN BARBAR.

Évaluation de l'efficacité de l'élimination du fer. L'efficacité de l'élimination du fer peut être calculée par l'équation suivante:

$$E (\%) = [1 - (\text{Teneur } \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ dans le concentré} / \text{Teneur } \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ dans l'alimentation})] * 100 \dots \dots \dots (35).$$

Le tableau 16 montre l'effet de l'intensité du courant sur l'efficacité de l'élimination des oxydes de fer du feldspath, selon les résultats obtenus par séparation magnétique à haute intensité (MSHI), on a constaté une amélioration significative de la teneur en feldspath et une diminution remarquable des impuretés ferrifères (l'hématite) avec la variation de l'intensité du champ qui varie entre 10 et 12 ampères.

Avec l'augmentation de l'intensité du courant électrique à 12 Ampères, on constate que la teneur en impuretés en fer diminue de 0.32 à 0,09% avec une efficacité optimale d'élimination de l'oxyde de fer qui est de 71.81%.

Tableau 16. Réduction de la teneur en fer dans les fractions de taille du matériau 250 / 45µm, à différentes intensités de champ magnétique

Intensité (A)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	E (%)
5	0.32	0.28	06.6
7		0.24	25.0
9		0.19	40.7
10		0.11	65.7
12		0.09	71.81

5.6.2. EFFET DU pH SUR LA SEPARATION DU K-FELDSPATH (ORTHOSE)

La séparation du feldspath du quartz peut être effectuée avec des collecteurs cationiques en circuit acide à un pH voisin de 1.5 à 2.5. D'autres travaux ont montré que, à un pH de 2.5 à 3, pouvait être atteint une sélectivité maximale (Soonthornwiphat, N .2016). La séparation de feldspath du quartz est activée seulement à un bas pH environ 2.5, qui déprime le quartz et active le feldspath (Vidyadhar et al, 2002 ; Celik, 2001).

Les figures 41 et 42 montrent une sélectivité maximale à un pH varie entre 1.8 à 2 dans les deux cas, ou en utilisant le modificateur HF ou HBr et la diamine comme collecteur, à une concentration (quantité) de 150 g/t. par contre l'utilisation de sulfonates de pétrole ne donne pas une bonne sélectivité comme illustre les figure 43 et 44.

Le taux de récupération, le rendement, ainsi que la teneur de K_2O ont atteint un maximum, lorsque nous avons utilisés le collecteur Diamine et de l'acide bromhydrique (HBr) comme activateur de l'orthoclase et déprimant de quartz (respectivement 85%, 52.27% et 12.65%), et avec un taux de récupération légèrement faible a ce dernier lorsque nous avons utilisé le Diamine comme collecteur et l'acide fluorhydrique comme modificateur (respectivement 12.14%, 41.65% et 65%).

La remarque la plus intéressante dans cette étude c'est la teneur de silice qui se trouve dans les rejets ce qui montre qu'il y a une grande quantité de quartz libre ont été déprimé par l'acide fluorhydrique et surtout l'acide bromhydrique (HBr) fig. 41, 42, 43 et 44.

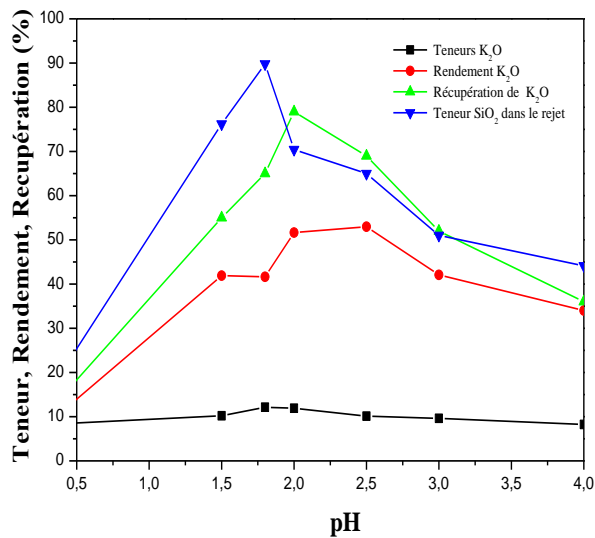


Figure 41. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HF et (150 g/t Diamine)

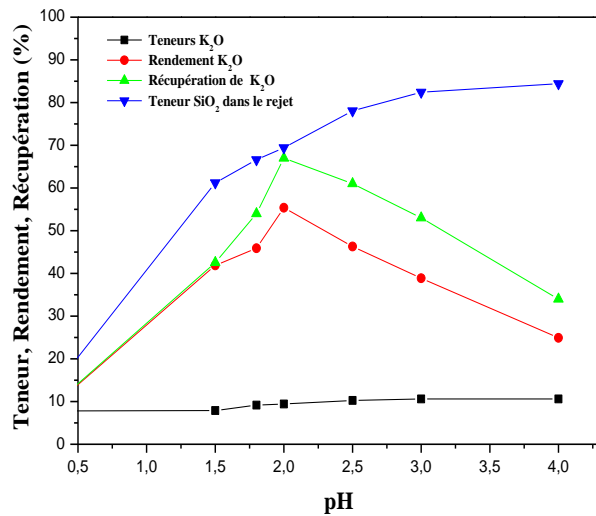


Figure 43. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HF et (150 g/t sulfonates de pétrole)

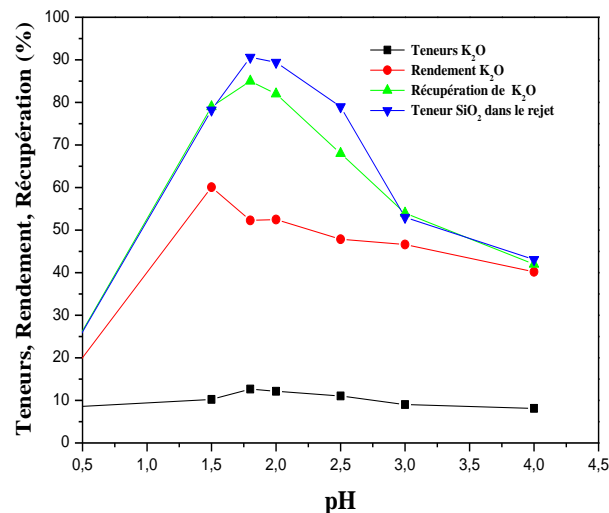


Figure 42. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HBr et (150 g/t Diamine)

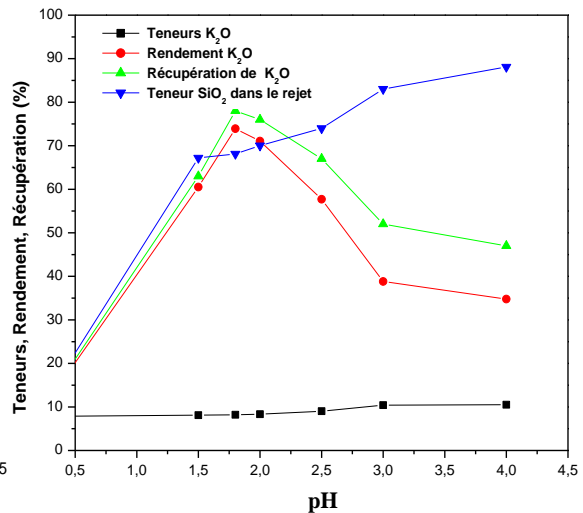
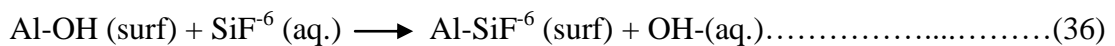


Figure 44. Effet de pH sur la flottation d'orthoclase avec HBr et (150 g/t sulfonates de pétrole)

Les résultats obtenus sont justifiés par le point de charge zéro (PCZ) de feldspath qui varie entre (1.5 à 2) et de quartz qui varie de (2 à 3.7), à un pH de 1.5 à 2.5 au-dessus de la valeur du point de charge zéro la surface d'orthose prend un signe positif tandis que le quartz a un signe négatif qui permettent de créer de nouveaux sites (une meilleure activation de la surface d'orthose) pour augmenter l'adsorption des collecteurs (Diamine).

Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres auteurs (Aly, M.H., Yehia, A. & Youssef A.A1992 ; Sulun, D.B, 1966 et Smith, R.W1965). Smith a constaté que l'angle de contact maximale sur le microcline et, par conséquent, la flottation maximale sont obtenus à pH 2-2.5 en présence de fluorure 10^{-2} mol.

Cependant, Smith, qui a étudié l'activation du béryl et du feldspath avec le fluorure dans les systèmes de collecteurs cationiques, a estimé que le fluorure d'hydrogène (HF) a attaqué l'acide de surface de silice sur le minéral résultant dans la formation d'ions SiF_6^{-6} dans la pulpe. Smith a envisagé le processus d'activation résultant de l'adsorption d'ions fluor-silicate sur les sites de surface d'aluminium (exposés suite à une attaque de fluorure), donnant lieu à des sites chargés négativement qui pourraient attirer des collecteurs cationiques. Une représentation du mécanisme proposé par Smith est la suivante (Smith, R.W1965).



Une teneur considérable de SiO_2 dans le résidu de plus de 90%, signifie une meilleure dépression du quartz lorsque l'on utilise HBr avec 150 g/t de Diamine à pH = 1.8.

L'utilisation de HBr augmente la dépression de quartz (augmente la vitesse de sédimentation), comparativement à l'utilisation d'HF, car la masse moléculaire de l'HBr est supérieure à la masse moléculaire de l'HF.

D'après les figures 42 et 43, l'utilisation de sulfonâtes de pétrole comme collecteur dans les deux cas (HF, HBr) on remarque que la teneur de K_2O , presque constante (une amélioration faible) mais avec de rendement et récupération considérable sur tout lorsque le $\text{pH} \geq 3$, ce qui signifie que l'adsorption du collecteur par la surface de quartz est commencer (début de flottation de quartz dans ce pH).

5.6.3. EFFET DE LA QUANTITE D'ACIDE FLUORHYDRIQUE OU BROMHYDRIQUE SUR LA SEPARATION DE L'ORTHOSE AVEC pH = 1,8 a 2 ET 150 g/t DE DIAMINE

Les études de flottation en milieu acide ont été réalisées en deux parties principales afin d'optimiser systématiquement la quantité des ions F^- et Br^- nécessaire pour activer l'orthose et déprimer le quartz en utilisant 150 g/t de Diamine ou de sulfonâtes de pétrole. Toutes les expériences ont été effectuées à un pH de 1.8 à 2 ajusté avec H_2SO_4 .

Les figures 45 et 46 illustrent qu'il y a une séparation sélective remarquable entre le K feldspath (orthose) et le quartz et avec des rendements et des récupérations considérable.

Les figures 47 et 48 illustrent qu'il y a une certaine séparation sélective entre l'orthose et le quartz et avec des rendements et des récupérations considérable. On constate également dans la présente étude que les conditions de formation de k-feldspath

affectent grandement la dose optimale d'HF et HBr pour l'activation de feldspath et la dépression de quartz, qui nécessite une concentration plus élevée d'HF et de l'HBr dont le rôle est d'éliminer les couches altérées et nettoie la surface pour faciliter la formation de complexes de fluorure d'alumine et bromure d'alumine.

L'huile de pin a été ajoutée à la cellule de flottation pour former la mousse, car l'addition d'HF ou HBr augmente la consommation du collecteur et détériore la qualité de la bulle.

L'addition d'HF ou de HBr comme modificateurs augmente la sélectivité de la flottation de feldspath (orthose) et la dépression de quartz comme indiqué les figures ci-dessous.

Les meilleurs résultats ont été enregistrés lorsque nous avons utilisé HBr comme modificateur avec le collecteur Diamine à une quantité de 800 g/t et 150 g/t respectivement. Ces résultats sont une teneur de 13.51% K_2O , un rendement de 52% et un taux de récupération de 90%, contre une teneur de 11.32% K_2O , un rendement de 48% et un taux de récupération de 77% dans les mêmes conditions de séparation.

L'utilisation de sulfonates de pétrole comme collecteur et HF ou HBr comme modificateur ne donne pas de résultats satisfaisants (une faible teneur de K_2O).

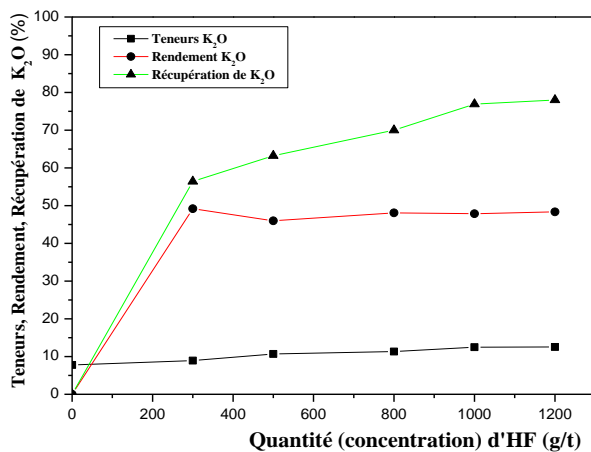


Figure 45. Effet de la quantité d'HF sur la séparation de l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et 150 g/t de Diamine

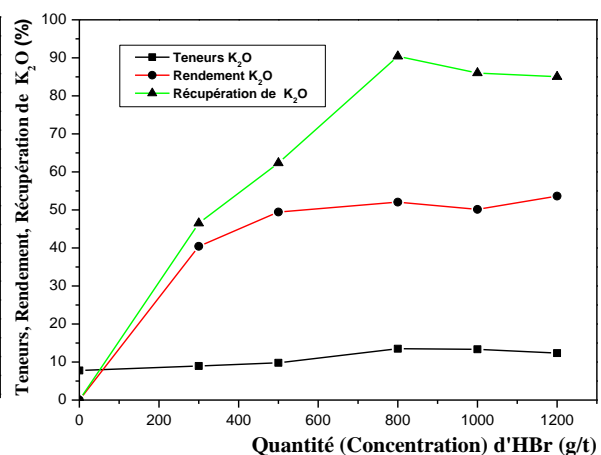


Figure 46. Effet de la quantité d'HBr sur de la Séparation de l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et 150 g/t de Diamine

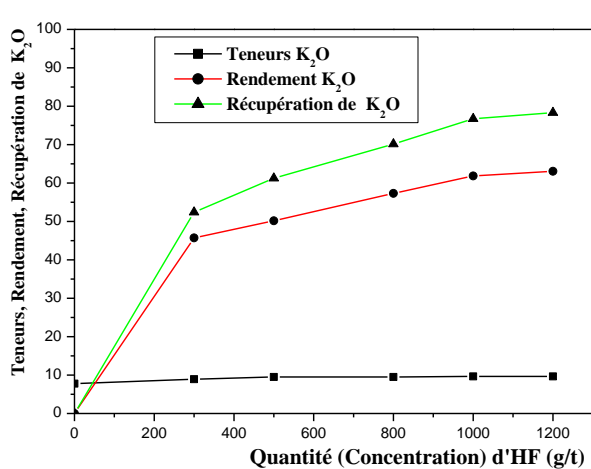


Figure 47. Effet de la quantité d'HF sur la séparation de l'orthose avec pH = 1,8: 2 et (150 g/t sulfonates de pétrole)

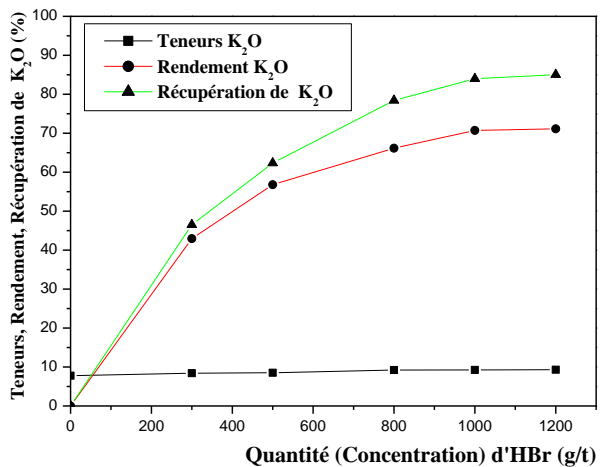


Figure 48. Effet de la quantité d'HBr sur la séparation de l'orthoclase avec pH = 1,8: 2 et (150 g/t de sulfonates pétrole)

5.6.4. COMPARAISON DES RESULTATS DE FLOTTATION DE L'ORTHOCLASE OBTENUS AVEC DES ACIDES FLUORHYDRIQUE OU BROMHYDRIQUE

La comparaison des résultats obtenus avec l'utilisation de l'acide fluorhydrique ou de l'acide bromhydrique dans la flottation d'orthoclase montre que l'utilisation de l'acide bromhydrique (800 g/t de HBr) donne un concentré de 90% d'orthose et 8% de quartz avec 13.51%K₂O contre a l'alimentation est de 56% d'orthoclase et 39% de quartz avec une teneur de 7.78% K₂O. D'autre part, l'utilisation d'acide fluorhydrique (800 g/t HF) fournit un concentré de 80% d'orthose et de 18% de quartz, avec une teneur de 11.32% de K₂O dans les mêmes conditions. L'utilisation de 1200 g/t d'HF a donné un concentré de 86% d'orthoclase et 12% de quartz avec 12.55% de K₂O.

Le taux d'enrichissement d'après la formule (34), $T_{\text{HBr}} = 1.73 > T_{\text{HF}} = 1.45$ donc la séparation de d'orthose par HBr est mieux que par HF dans les mêmes conditions.

L'acide bromhydrique (HBr) est un meilleur déprimant de quartz par rapport à l'acide fluorhydrique (HF) comme montre ce travail, donc la substitution de l'acide fluorhydrique (HF) par l'acide bromhydrique (HBr) est recommandée.

5.6.5. SEPARATION D'ORTHOSE D'AIN BARBAR PAR SEPARATION MAGNETIQUE SUIVI PAR FLOTTATION.

A partir de ces résultats, il est possible de bâtir un schéma de concentration tenant compte des divers aspects des étapes suivies pendant les essais de laboratoire.

Naturellement, même si ces résultats sont probants, la vérification expérimentale étant encore incomplète, nous ne pouvons pas recommander d'appliquer ce schéma d'écoulement au niveau d'étude semi-industrielle.

Les différentes étapes de procédés de valorisation de minerai de feldspath d'Ain Barbar sont illustrées dans le schéma de traitement sous dessous fig.49.

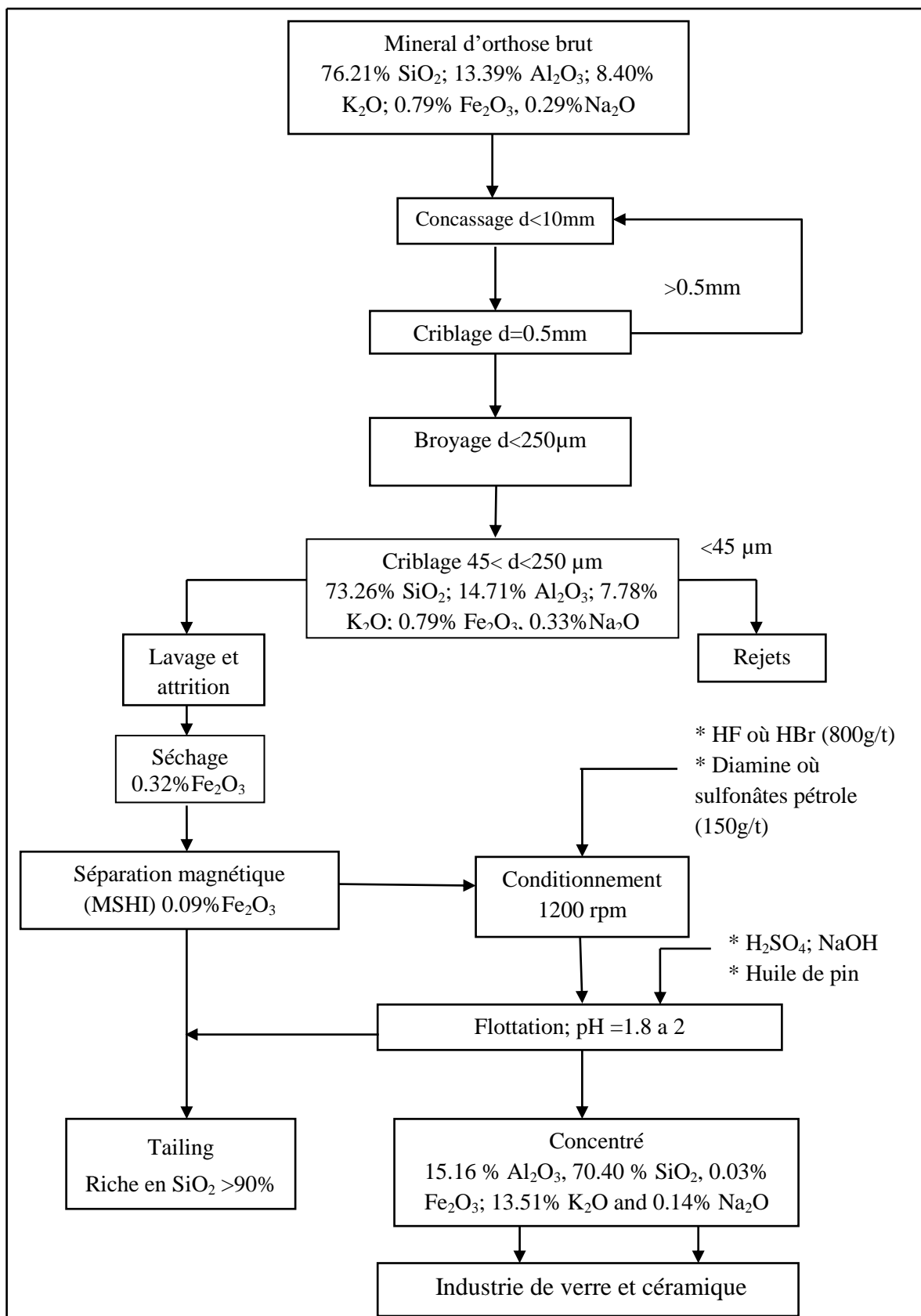


Figure 49. Flow sheet proposé d'enrichissement de feldspath potassique (orthose) d'Ain Barbar.

5.6. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus on peut conclure que ;

- L'enrichissement du minerai de feldspath (orthose) d'Ain Barbar avec les conditions utilisées dans cette étude a révélé un produit de qualité, avec 15.16% d' Al_2O_3 , 70.40% de SiO_2 , 0.03% d'oxydes de fer totaux, 13.51% de K_2O et 0.14% de Na_2O , ce dernier peut être utilisé dans la céramique et la verrerie.
- Lavage et attrition est nécessaire pour l'enrichissement d'orthose, ainsi qu'une séparation magnétique est conçue pour éliminer les impuretés contenant du fer (réduction de teneur en Fe_2O_3 de 0.79% à 0.32%), comme présenté dans notre étude.
- La séparation magnétique à haute intensité est cruciale pour éliminer les minéraux ferrifères comme montre cette étude (réduction de teneur en fer de 0.32% à 0.09%).
- La séparation de l'orthoclase du quartz par flottation avec les conditions utilisées dans cette étude est très importante car elle donne des bons résultats en termes de qualité du produit ainsi qu'en termes de coût économique et de protection de l'environnement (l'utilisation de HBr est économique et moins dangereuse que l'utilisation de HF).
- La flottabilité de feldspath potassique en présence de réactifs cationiques, atteint son maximum à un pH entre 1.8 à 2.
- La substitution de l'HF par le HBr est possible car la flottation du K-feldspath (orthoclase) à un pH variant de 1.8 à 2 par la diamine en tant que collecteur et HBr comme modificateur (activant et déprimant) révèle à une dose de 800 g/t des résultats significatifs en récupération, par rapport aux sulfonates de pétrole et la diamine avec l'HF.

**Chapitre VI : ANALYSE DE L'IMPACT DES PROCÉDES
D'EXPLOITATION ET D'ENRICHISSEMENT DE LA
MATIÈRE FELDSPATHIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT**

6. ANALYSE DE L'IMPACT DES PROCÉDES D'EXPLOITATION ET D'ENRICHISSEMENT DE LA MATIÈRE FELDSPATHIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT

6.1. INTRODUCTION

Les activités liées à l'exploitation d'une carrière sont à l'origine de nuisances et d'altérations de l'environnement touchant principalement à :

- L'atmosphère, par l'émission de poussières et gaz nuisibles à la salubrité, santé publique et à la flore et faune.
- La quiétude et santé des riverains, du fait des bruits, les vibrations et la projection. Elles touchent également aux biens immobiliers de ces riverains.
- L'aspect paysager du fait de la modification de la topographie du site et de la disparition du couvert végétal et de la faune qui y vivait.
- De la modification des cours d'eau' de la probable disparition de sources, de la contamination des nappes et des retenues d'eau.

Les paramètres d'évaluation de chaque impact sont sa portée, sa durée, sa qualité et son type respectivement.

Selon sa portée l'impact peut-être voisins (rayon < 1 km), locale (1 km < rayon < 5 km), zonale (5km < rayon < 100 km), régionale (100 km < rayon < 500 km), suivant sa durée l'impact peut être indéterminée, immédiate (< 30jour), proche (30jour ≥ date de manifestation ≤ 06 mois), très court terme (12 mois ≥ date de manifestation ≤ 36 mois), moyen terme (36 mois court terme (06 mois ≥ date de manifestation ≤ 12 mois), date de manifestation ≤ 10 années), long terme (date de manifestation ≥ 12 années) ou infinie l'envergure de l'impact dure un temps supérieur à 50 années à partir de sa date de manifestation. D'après sa qualité de l'impact peut être déterminant c'est-à-dire l'impact est susceptible de provoquer une modification importante ayant une action déterminant sur le fonctionnement normal de l'élément qu'il touche, ou non déterminant c'est-à-dire l'impact est susceptible de provoquer une modification non déterminante sur le fonctionnement normal de l'élément qu'il touche. Concernant le type de l'impact peut être atténuable, partiellement atténuable ou non atténuable, ce critère renseigne sur le caractère réparable ou non de l'impact.

Dans ce qui suit nous allons développer les différents impacts induits par l'exploitation de la carrière ainsi que de traitement de minerai du feldspath.

6.2. IMPACTS DES PROCEDES D'EXPLOITATION DE FELDSPATH SUR L'ENVIRONNEMENT

Concernant les impacts de l'exploitation à ciel ouvert on distingue deux impacts principaux
Impact sur les milieux physiques qui englobe les impacts suivants :

- ✓ Impact sur le sol ;
- ✓ Impact sur hydrogéologie ;
- ✓ Impact sur hydrologie ;
- ✓ Impact sur l'air ;
- ✓ Impact sur les eaux ; et Impact sur et le cadre de vie et environnement qui est aussi subdivise en impact sur:
 - ✓ Sites et paysages ;
 - ✓ Bruits ;
 - ✓ Vibrations ;

6.2.1. IMPACT SUR LES MILIEUX PHYSIQUES

6.2.1.1. Impact sur les sols

L'extraction des feldspaths perturbe l'ordonnement des couches géologiques, par la suppression des niveaux exploites et par le mélange des matériaux de recouvrement. Elle perturbe également la stabilité des terrains.

De plus l'érosion éolienne et hydrique sur le sol sera aggravée, par une suppression de la végétation et l'aménagement des gradins. Le stockage du gasoil sur le site peut être à l'origine des fuites et écoulements dans et sur le sol ; la maintenance des équipements et engins de roulage met souvent a contribution des solvants a contribution des solvants et génère des huiles usagées. il est a craindre que ces produits soient évacués dans la nature ce qui laisse supposer des issues non écologiques ; si ces produits venaient a être déversés dans la nature ; ils contamineraient le sol ainsi que les eaux et par conséquent les cultures.

6.2.1.2. Impact sur hydrogéologie

L'extraction des matériaux dans les niveaux aquifères peut provoquer ;

- ✓ Une modification du niveau piézométrique de la nappe
- ✓ Une modification de la qualité des eaux.
- ✓ Une déviation ou un tarissement des points point d'eau.
- ✓ De modification de l'écoulement hydrique.

Dans notre cas, l'exploitation de la carrière n'aura pas d'incidence étant donne qu'il n'y a pas de nappes ni de sources aux environs.

6.2.1.3. Impact sur hydrologie

Les travaux de terrassements modifient les bassins versants et la suppression de la végétation provoque une augmentation des coefficients de ruissellement. Ces modifications conduisent généralement à des arrivées d'eau importantes en période de fortes pluies.

6.2.1.4. Impact sur l'air

Ces impacts sont généralement liés à la pollution de l'air pouvant entraîner des maladies chroniques chez l'être humain tel que : L'asthme. Elle peut également provoquer la perturbation de la photosynthèse chez la flore du fait d'un tapissemment des feuilles par la poussière ce qui provoque son pourrissement, donc sa mort.

L'activité de la carrière est également une source d'émission de poussières provenant généralement des opérations suivantes:

- ✓ Décapage et de la découverte du site.
- ✓ Travaux de chargement et déchargement.
- ✓ L'abattage à l'explosif.
- ✓ La circulation des engins et des camions dans la carrière.

Le mouvement des camions chargés constitue un impact sur l'air et ceci en engendrant des bruits et en polluant l'air.

La circulation des engins génère des pollutions atmosphériques par les particules d'hydrocarbures, le monoxyde de carbone (CO, CO₂) et les oxydes de sulfures (SO_x) qui viennent s'ajouter en période sèche aux polluants particuliers (poussières).

Les premiers tirant leur origine des moteurs diesels, les seconds seront soulevés par l'abattage à l'explosifs et la circulation des engins et camions.

Les particules d'hydrocarbures et surtout le CO et les oxydes de soufre (SO_x) peuvent avoir un effet sur la santé des ouvriers et les espèces végétales et animales en contact immédiat avec l'exploitation. Cet effet sera certainement très minime puisque la dilution des polluants dans l'atmosphère est assez rapide vu qu'il ne s'agit pas d'un milieu fermé.

Au niveau de la santé des ouvriers, ces polluants sont connus pour leurs effets sur le système respiratoire et même nerveux.

Ainsi, le monoxyde de carbone résultant généralement des combustions incomplètes (injection et/ou carburation mal réglées) agit sur l'organisme humain en provoquant une asphyxie par fixation sur les sites de fixation de l'oxygène du sang ; ce phénomène est connu sous le nom de méthémoglobinémie.

Cette intoxication se traduit par une fatigue générale, une somnolence allant jusqu'à la perte de conscience et la mort par asphyxie dans le cas d'une exposition prolongée.

L'effet des particules d'hydrocarbures étant partiellement semblable à celui du monoxyde de carbone, un effet cancérigène peut être observé chez les individus exposés à long terme à des doses considérables.

Les oxydes de type SO_x sont quant à eux susceptibles de provoquer de graves lésions au niveau des tissus tapissant les voies respiratoires allant jusqu'aux lésions des bronches et alvéoles pulmonaires se traduisant par des expectorations de sang. À long terme, l'exposition à ce type de polluant peut déclencher des maladies respiratoires chroniques telles que l'asthme et d'autres broncho-pneumopathies.

Chez les plantes, les oxydes de soufre sont connus pour leurs effets de destruction des tissus végétaux se traduisant par des nécroses foliaires progressives entraînant la chute des feuilles ainsi que la perte des fruits de certaines espèces arborescentes avant maturation.

Les résineux perdent sous l'effet des retombées acides (SO_x et NO_x) la couche de cire qui protège leurs aiguilles ce qui permettra alors le pourrissement des aiguilles et leur chute, d'où la mort progressive de l'arbre.

En ce qui concerne les poussières soulevées, celles-ci peuvent avoir un effet sur la santé des ouvriers exposés à des taux constamment élevés de poussières en milieu de ferme ce qui n'est pas le cas d'une exploitation à ciel ouvert.

Par contre si aucune mesure n'est prise par l'exploitant pour minimiser les émissions de poussières dans l'atmosphère, l'effet de celle-ci concernera également les plantes vertes qui enregistrent des dépôts de poussières sur leurs tissus, bloquant les processus respiratoires et photosynthétiques d'où la mort progressive des plantes s'il n'y a pas de lessivage hydrique ou éolien de ses tissus.

6.2.1.5. Impact sur les eaux

La qualité des eaux de ruissellement peut être affectée par le contact avec les zones d'exploitation augmentation des matières en suspension ou modification chimique.

Le gisement de feldspath d'Ain Barbar est situé dans une région où il n'y a pas d'apport d'eau considérable dans la région prospectée.

Pratiquement tous les gîtes se trouvent au-dessus des oueds locaux, ce qui assure un écoulement et un drainage naturels des eaux.

6.2.1.6. Impact sur la flore et la faune

L'exploitation d'une carrière à ciel ouvert supprimera toute végétation dans les zones d'extraction et par conséquent une migration de la faune qui y vivait.

Le site étudié est caractérisé par une couverture végétale forestière et maritime, les travaux qui seraient effectués seront accompagnés par un débroussaillage mais la faune va regagner les lieux dès la fin des travaux.

De plus le site où est situé le gisement ne présente pas un intérêt botanique important.

6.2.2. Impact sur l'environnement et le cadre de vie

6.2.2.1. Site et paysage

La réalisation de projet d'exploitation d'une carrière dans cette région a entraîné la création de formes artificielles aiguës et régulières (Impact paysager) en plus des installations qui ont donné un aspect artificiel au site visible depuis les alentours (Impact visuel).

6.2.2.2. Les bruits

Durant l'exploitation, les opérations faisant l'objet de sources importantes de bruit et qui peuvent constituer une source de nuisance surtout pour l'homme en tant qu'individu ou groupe social sont :

- Les opérations de forassions des trous
- Le tir à l'explosif
- La mise en marche du compresseur
- Le déplacement de camions et d'engins de carrière.
- La circulation des camions de transport du feldspath sur les chemins d'accès.

Le bruit représente en effet un risque qui peut entraîner diverses réactions physiologiques allant de la baisse temporaire de l'acuité auditive (niveau sonore faible) jusqu'à la détérioration permanente de celle-ci (sons intenses répétitifs et durables).

Le bruit peut aussi entraîner des effets subjectifs comme la gêne ou la fatigue auditive pouvant se manifester chez l'individu ou le groupe d'individus (gêne sociologique).

Dans notre cas, toutes ces sources de nuisances, n'ont que très peu d'effets sur l'environnement compte tenu d'une part de l'inexistence d'habitations avoisinantes et normalisation des équipements fixe et mobiles.

6.2.2.3. Vibration et projection

L'emploi des explosifs dans les carrières à ciel ouvert est une pratique courante, mais il occasionne des inconvénients tels que les vibrations et les projections qui peuvent être des nuisances

Les vibrations émises suite à un tir à l'explosif représentent l'un des plus importants problèmes. En effet, les tirs provoquent des vibrations dans les massifs qu'ils ne détruisent pas ; elles peuvent causer des dégâts au niveau des constructions avoisinantes allant de la fissuration à la chute des murs, habitation, ouvrages, les vibrations générées par des tirs non étudiés pourraient favoriser ou provoquer :

- Le détournement des sources ;
- Le mouvement des terrains ou glissement surtout ceux situés en pente ;
- Comblement des puits ;
- Fissurations au niveau des habitations.

Les tirs projettent des matériaux (pierre, cailloux) selon des trajectoires perpendiculaires aux fronts de taille ; ces projections peuvent toucher le personnel opérant sur le site de la carrière ainsi que les infrastructures de celle-ci ; les dispositifs de surfaces telles que les cordons détonants peuvent être touchés par les projections occasionnant des ratées avec les risques que cela constitue pour le personnel. (A. Boutiche 2014).

5.3. IMPACTS DES PROCÉDES D'ENRICHISSEMENT DE FELDSPATH D'AIN BARBAR SUR L'ENVIRONNEMENT

La flottation des minerais est une science complexe dans laquelle différents réactifs sont utilisés, ces derniers avec la présence des différents paramètres provoquent l'environnement par des effets nocifs tel que le drainage minier acide miniers. Les principaux réactifs de flottation utilisés sont présentés dans le chapitre 5.

Comme il a été précisé précédemment, il existe plusieurs sources potentielles de contamination des eaux sur le site. Les eaux de pompage de la carrière et les eaux percolant à travers les empilements de stériles et de minerais peuvent être contaminées par les résidus d'explosifs (composés azotés) ainsi que des huiles et des graisses. Les boues et les eaux de traitement du minerai contiennent différents réactifs ayant servi lors de la flottation ainsi que des traces de graisse et d'huile provenant des équipements.

Après que les minéraux d'intérêt soient séparés de la gangue lors de la flottation, les résidus contenant de 20 à 50 % de solide sont éliminés. En plus des minéraux de la gangue, on y retrouve de faibles concentrations de minéraux économiques. La partie liquide est, quant à elle, composée d'eau, de solides dissous ainsi que de faibles quantités des réactifs non consommés lors du processus de flottation (U.S. Bureau of Mines, 1984, 1994).

Différents auteurs se sont intéressés à la toxicité des différents réactifs utilisés lors de la flottation des minerais de métaux de base. L'étude la plus exhaustive est celle effectuée par Hawley (1972). L'auteur s'est intéressé à la toxicité létale (mortelle) de la plupart des réactifs utilisés lors de la flottation. Il ressort de cette étude que tous les réactifs utilisés amènent une

mort chez 50 % des individus de différentes espèces de poissons et d'organismes aquatiques à des concentrations variant entre 0.05 et 10 000 ppm (TL50).

Les composés les plus toxiques sont le cyanure de sodium (TL50 de 0,05 à 10 ppm) ainsi que les xanthates (TL50 de 0,18 à 1,8 ppm pour Na isopropyl xanthate chez la truite arc-en-ciel) et les dithiophosphates (TL50 de 0,1 à 1,0 ppm pour le Na diisopropyl dithiophosphate chez *Daphnia magna*).

➤ **Drainage minier acide (DMA)**

Au cours du traitement et de la concentration du minerai, la matière première feldspathique est concassée et broyée afin d'être séparés de la gangue. Cette dernière est entreposée dans un parc à résidus.

L'oxydation des minéraux de la famille des sulfures, particulièrement la pyrite qui est le sulfure existant dans notre minerai brut est décrite à l'aide des équations suivantes (Blowes et Ptacek, 1994; Perkins *et al*, 1995; Morin et Hutt, 1997), ainsi que la matière feldspathique d'Ain Barbar contient aussi des traces des métaux lourds comme montre les analyses chimique chapitre 03.

La première étape est l'oxydation directe ou indirecte de la pyrite (FeS₂) par l'oxygène qui va produire des sulfates (SO₄⁻²), du fer ferreux (Fe⁺²) et de l'acidité (H⁺) :

La réaction d'oxydation directe se produit à des pH proches de la neutralité (5 < pH < 7).

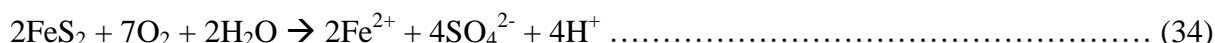
L'oxydation indirecte survient à des valeurs de pH plus faibles (pH < 3).

On peut présenter les étapes de l'acidification des effluents de la façon suivante:

1ère étape:

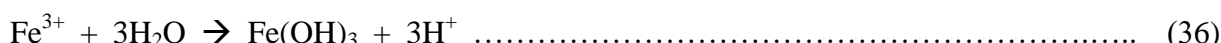
La pyrite ainsi que d'autres minéraux sulfureux sont mis en contact avec une eau (pH ≤ 7). Ils subissent d'abord une oxydation chimique lente suivant l'équation (34).

Le milieu s'acidifie graduellement et la deuxième étape du processus s'amorce.



2^{ème} étape:

Consiste en la transformation du fer ferreux en fer ferrique selon l'équation (35). Il y a alors précipitation d'un hydroxyde de fer (Fe(OH)₃), ce qui contribuera à acidifier davantage le milieu (éq. 36), engendrant ainsi un pH de plus en plus bas. En deçà de 3,5 environ, le fer ferrique reste en solution et devient un agent oxydant pouvant oxyder la pyrite selon la réaction (37); c'est l'étape de l'oxydation indirecte.



3^{ème} étape:

À la 3^{ème} et dernière étape, on a l'effet catalytique marqué des bactéries acidophiles qui contribueraient à accélérer le processus d'oxydation du fer ferreux en fer ferrique, ce qui se traduit par une augmentation le taux d'acidification. La présence de ces bactéries permet l'établissement d'un processus cyclique mettant en jeu les réactions (35) et (37) (sans passer par la réaction 36). Les métaux lourds présents dans les feldspaths (Zn, Pb, Mn, Fe,) seraient ainsi libérés en même temps que de grandes quantités d'acide sont générées.

La notion de génération de drainage minier acide devient explicite lorsqu'on combine les réactions précitées (éq. 34 à 37) pour obtenir la réaction globale (éq. 38) qui produit de l'acide sulfurique et un hydroxyde de fer :

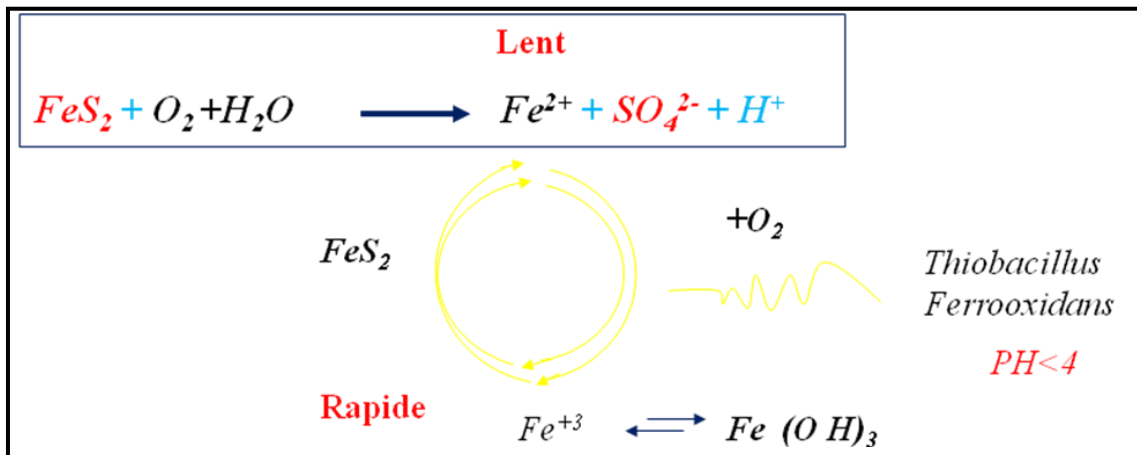


Figure 50. Oxydation des sulfures et production du DMA

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'étude de caractérisation physico-chimique menée à des objectifs de valorisation de la matière première feldspathique d'Ain Barbar/Annaba pour son utilisation et son application industrielle en céramique et en verre.

L'analyse physico-chimique du feldspath d'Ain Barbar nous a permis, à partir d'échantillons représentatifs d'identifier et de reconnaître les caractéristiques naturelles de cette matière. A cet effet, plusieurs techniques d'analyse et de caractérisation ont été utilisées (DRX, FX, Microscopie métallographique,.....).

- Les analyses par DRX et lames minces du minerai révèlent une composition minéralogique qui renferme principalement du feldspath de type orthose (d'orthoclase) avec un pourcentage de moyenne de 53%, de quartz libre avec un taux de 40%, et des petites quantités d'oxyde de fer, d'albite, d'anorthite, d'argiles et de mica.

- L'analyse chimique des échantillons par FX montre que le feldspath d'Ain-Barbar est d'une teneur élevée en silice de 76 %SiO₂ et varie entre 0.18% à 1.06% Fe₂O₃. Cependant, Ces teneurs en oxyde de fer et de silice restent très élevées et ne répondent pas aux spécifications demandées dans les différentes applications industrielles, Ces dernières influent négativement sur la qualité des verres et des céramiques industriels.

- Les essais de pré-concentration par lavage (PCL) et séparation magnétique à haute intensité (SMHI) permettent de réduire la teneur en fer jusqu'à 0.09% Fe₂O₃ ainsi que la teneur en silice à 73.26%SiO₂.

- L'attrition par lavage est nécessaire pour l'enrichissement de l'orthose, ainsi qu'une séparation magnétique à haute intensité est cruciale et conçue pour éliminer les impuretés contenant du fer, comme illustré dans notre étude.

- L'enrichissement du minerai de feldspath (d'orthose) d'Ain Barbar par les conditions utilisées dans cette étude a révélé un produit de qualité, avec 15,16% d'Al₂O₃, 70,40% de SiO₂, 0,03% d'oxydes de fer totaux, 13,51% de K₂O et 0,14% de Na₂O, soit une récupération de 90% d'orthose contre 8% de rejet de quartz, ce dernier peut être utilisé dans la céramique et la verrerie.

- La séparation de l'orthoclase du quartz par flottation (FLOTT) avec les conditions utilisées dans cette étude est très importante car elle donne des bons résultats en termes de qualité du

produit ainsi que en termes de coût économique et de protection de l'environnement (l'utilisation de HBr est économique et moins dangereuse que l'utilisation de HF).

- La flottabilité de l'orthose en présence des réactifs cationiques (collecteur), atteint son maximum à un pH entre 1,8 à 2.

- La substitution de l'HF par le HBr est possible car la flottation du K-feldspath (orthose) à un pH variant de 1,8 à 2 par la diamine en tant que collecteur et HBr comme modificateur (activant et déprimant) révèle à une dose de 800 g/t des résultats significatifs en récupération, par rapport au sulfonates de pétrole et la diamine avec l'HF.

- Il serait intéressant de poursuivre des études sur une granulométrie inférieure à 45 μ m afin d'obtenir d'autres nuances de produits de très haute qualité industrielles.

- Les effets des rejets liquides ou solides de la flottation de feldspath sur l'environnement et sur la santé humaine doivent faire l'objet d'une étude ultérieure à cause des poussières siliceuses provoquant des maladies professionnelles.

- Confection des pastilles de céramique et de verre par le feldspath enrichi pour mieux cerner l'aspect quantitatif et qualitatif de caractéristiques industrielles de l'orthose.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Aly, M.H., Yehia, A, & Youssef A.A.1992**, Beneficiation of Egyptian pegmatitic feldspar for the ceramic industry, AMSE Trat-ractions, AMSE Press, 10, No. 3, 44-53.
- Amarante, M.A. Botelho de Sousa, A. et Machado Leite, M.; 1997**, Beneficiation of a feldspar ore for application in the ceramic industry, Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, No193:196.
- Andersen, J.B., El-Mofty, S.E., Somasundaran, S., 1991**, Using electrophoresis for determining the mechanism of amine, sulfate and oleate adsorption in calcite, Colloids and Surfaces, 55, 365-368.
- Anonyme ou Néant ; Stratégie d'échantillonnage**
- Ananthapadmanabhan, K.P., Somasundaran, P., 1985**, Surface precipitation of inorganics and surfactants and its role in adsorption and flotation, Colloids and Surfaces, 13, 151-167.
- Akkal.R.et Ouldhamou. M.2015**, Comparative Study of Mineral Processing Applied to the Local Feldspar's Assessment, National Polytechnic School of Algeria, Alger's, Algeria, 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET'15 Antalya, Turkey, April 14-17.

B

- Blazy, P., et Jdid. E.A., 2001**, Flottation : Mécanismes et réactifs. In Techniques de l'Ingénieur, Génie des procédés, p. 22.
- Blazy, P., et E.A. Jdid., 2001**, Flottation : Aspects pratiques. In Techniques de l'Ingénieur, Génie des procédés, p. 25.
- Blazy P., 2001**, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés «Valorisation des minerais».
- Blazy. P. Et Jdid. E.A., 2000**, Flottation : aspects pratiques. Traité Génie des procédés. [J 3 360].
- Bouchard S., 2001**. Traitement du minerai: Flottation – Méthodes physiques. Editions Le Griffon d'argile, 373p.
- Barbian, N., Hadler, K., Ventura-Medina, E., and Cilliers, J.J., 2005**, The froth stability column: Linking froth stability and flotation performance, *Minerals Engineering*, 18(3), Mar. 317-324.
- Bogdanov, O.S., Hainman, V.J. Et Moxomov, L. L., 1965**, On certain physical-mechanical factors determining de rate of flotation. 7^{ème} international Mineral Processing Congress, New York, 1964 dans N. Arbiter (Ed) New York, Gordon and Breach, Pt 4 pp. 169-174.
- Buckenham, M.H., Rogers, J., 1954**, Flotation of quartz and feldspar by dodecylamine, Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, 64, 11-30.
- Buttner, B.M., Grote, J., Vogt, V., Bahr, A., 1991**, Flotation and flocculation of ultrafine-grained apatite ores, In: Proceedings of XVIIth International Mineral Processing Congress, Bergakademie, Freiberg, 1, 71-82.
- Boulos, T. R., Ibrahim, S. S., &Yehia, A. 2015**, Differential Flotation of Some Egyptian Feldspars for Separation of Both Silica and Iron Oxides Contaminants. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 3(06), 435.
- Bouabdallah, S., Bounouala, M., Chaib, A. 2015**, Removal of iron from sandstone by magnetic separation and leaching: Case of El-Aouana deposit (Algeria), Mining Science, vol. 22, 33–44.
- Boutiche. A. 2014**, Etudes d'impact sur l'environnement et plan de gestion.
- Blowes, D.W. et Ptacek, C.J. 1994**, Acid-neutralization Mechanisms in Inactive Mine tailings. Short course handbook on environmental geochemistry of sulphide mine wastes, Éditeurs: Jambor, J.L. et Blowes, D.W., p. 271-292.

C

-
- Casteel, K., 2001, 2002**, Magnetic separation, States of flux.
Chevalier J, 2006, What future for zirconia as biomaterial. *Biomaterials*.2006;27(4):535-43.
Crozier R. D., 1992, Flotation: Theory, reagents and ore testing. Pergamon Press, 335p.
Connolly, JR., 2003, Introduction to quantitative X-ray Diffraction Methods. Note de cours EPS 400-002, University of New Mexico.

D

-
- Demir, C., Bentli, I., Gülgönül, I., & Celik, M. S., 2003**, Effects of bivalent salts on the flotation separation of Na-feldspar from K-feldspar. *Minerals Engineering*, 16(6), 551-554.
Demir, C. 2010, "Selective separation of Na- and K-feldspar from weathered granites by flotation in HF medium, *Ceramics – Silikaty* vol. 54, no. 1, 60-64.
Djouama. M.C., Bounouala. M., Ain-Souya. A et Ghers.M., 2005, Caractérisation et pré-concentration granulométrique de la matière feldspathique d'Ain-Barbar, Algerie. *J.Phys.IV France*124(2005) 103-109
Disediakan oleh et Kamar Shah Ariffin, 2003, Mineral perindustrian feldspar, incomplète kaolinisés rochers. Page 3 sur 16.
Dobby, G. S., Finch, J. A., 1986, Particle collection in column- gas rate and bubble size effects. *canadian Metallurgical Quaterly*, vol 25, no1, p.9-13.
Duval, Y., Mielczarski, J.A., Pokrovsky, O.S., Mielczarski, E., Ehrhardt, J.J., 2002, Evidence of the existence of three types of species at the quartz: Aqueous solution interface at pH 0-10: XPS surface group quantification and surface complexation modeling, *The Journal of physical chemistry. B*, 106, 11, 2937-2945.
Documents du ministère de l'énergie et des mines, 2010, Direction des mines de la wilaya d'Annaba. Evolution des activités minières 1994-2004. Année 2010.

E

-
- Ewa Lewicka. 2010**, Conditions of the feldspathic raw materials supply from domestic and foreign sources in Poland. *Gospodarka surowca mineralnymi*, Tom 26, 2010 Zeszyt 4, Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences, Kraków, Poland.

F

-
- Filippov, L.O., Filippova, I.V., Severov, V.V., 2010a**, New technology for producing hematite concentrate from wastes generated in the processing of iron quartzite's, *Metallurgist*, 54, 5–6, 268–272.
Filippov, L.O., Filippova, I.V., Severov, V.V., 2010b, The use of collector's mixture in the reverse cationic flotation of magnetite ore: the role of Fe-bearing silicates, *Minerals Engineering*, 23, 91–98.
Filippov, L.O., 2011, Flotation Process for Recovering Feldspar from Feldspar Ore, European Patent Application No. EP 2343131A1, Bulletin 201/28.
Filippov, L.O., Filippova, I.V., 2006, Synergistic effects in mix collector systems for International Mineral Processing Congress, Istanbul, Turkey, 3–8 September 2006, pp. 631 634.

G

-
- Gérard Pajean, Octobre 2007**, Verre, L'élaboration du verre, VOL.13 N°5.
Gill. C. B., 1991. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 245 p.
Gillet Gérard., 2003, Séparation magnétique : Théorie et modélisation (*Techniques de l'Ingénieur - Mars /J3 220*), pp (2-5).

Gillet Gérard., 2004, Séparation magnétique haute gradient (SMHG) et champ. (Techniques de l'Ingénieur, Novembre).

-Parties I, 01/02/2001, p. 22 et 24 -Partie II, 03/ 2002, p. 46 et 48.

Gosselin, A., Blackburn, D., Bergeron, M., 1997, Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques Sain le Foy 133p.

Gefvert. D. L., 1986, Cationic flotation reagents for mineral beneficiation, in Chemical Reagents in the Minerals Industry, ed. D. Malhotra and W.F. Riggs, SME Inc., Littleton, 85.

Gülsoy, O.Y., Can, N.M., & Bayraktar, I. 2005, "Production of potassium feldspar concentrate from a low-grade pegmatitic ore in Turkey", Mineral Processing and Extractive Metallurgy 114 (2), 80–86

Gaied, M.E., Gallala, W. 2011, Beneficiation of feldspar ore for application in the ceramic industry: Influence of composition on the physical characteristics. Arabian Journal of Chemistry (2011), doi:10.1016/j.arabjc. 04.011.

Gaudin, A.M., Fuerstenau, D.W., 1955, On quartz flotation on cationic collectors, Trans. AIME, 202,258-263.

Gaudin, A.M., Schuhmann, R., Schlechten, Jr., A.W., 1942, Flotation kinetics II. The effect of size on the behaviour of galena particles, Journal of Physical Chemistry, 46, 902 910.

Gochin, R.J., 1990, «Flotation» dans SVAROUSKY, L, 3^{ème} ed. solid-liquid separation, Butterworth's.

H

Hilly, 1957 ; Marignac, 1982, Etude géologique du massif de l'Edough et cap de fer thèse doctorat d'Etat université de Nancy.

Hopstock, D.M., Agar, C.E., 1968, The effects of cations on the amine flotation of quartz, Transaction, 241, 466-470.

Harris, P.J., 1982, Frothing phenomena and froths, in Principles of Flotation, ed. R.P. King., S. Afr. Inst.Min. Metall., Johannesburg.

Hatfield, D., Robertson, C., Burdukova, L., Harris, P.,and Bradshaw, D., 2004, Evaluation of the effect of depressants on froth structure and flotation performance of a platinum bearing ore, 2004 SME Annual Meeting, Denver, 1, 23-25 Feb., Preprint no. 04-186.

Hhuang, s.d., 1992, Preconcentration techniques for traces elements, chapitre 9.

Huang, C.P., 1981, The surface acidity of hydrous solids, in: M.A. Anderson, A.J. Rubin (Eds.), Adsorption of Inorganics at Solid-liquid Interface, Ann Arbor Science, Michigan.

Heyes, G., Allan, G., Bruckard, W., & Sparrow, G. 2012, Review of flotation of feldspar, Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans IMM Section C), 121(2).

Ha Wley, J.R. 1974, The Use, Characteristics and Toxicity of Mine/Mill Reagents in the Province of Ontario. Ontario Ministry of the Environment, 242 p.

I

Ityokumbul, M.T., 1993, Technical note 1 Maximum gas velocity in column flotation. Minnerals Engineering, vol 6, no 12, pp. 1279 1286.

J

Jean Marie Kanda Ntumba., 2012, Thèse en sciences de l'ingénieur Etude de la flottabilité de la malachite à l'aide de l'amylxanthate de potassium et des acides gras. Cas d'étude : Flottation du minerai oxydé de Kamfundwa au Katanga en RD Congo, P 200.

Jameson, G. J., Nam, S., Moo Young, M., 1977, Physical factors affecting recovery rates in flotation. Minerals Sci. Engng., vol 9, no 3, p.103-118.

K

-
- Kelly, E.G. Et Spottiswood, D.J., 1982**, Introduction to mineral processing, Chapitres 16.
- Klessen, V. I. Et Mokrousov, V. A, 1963**, an introduction to the Theory of Flotation, Butterworths, London, 493 p.
- Karjalahti, K., 1972**, Factors affecting the conditioning of an apatite ore for agglomeration flotation, Transactions of The Institution of Mining and Metallurgy, 81, C119-C226.
- Kamar Shah Ariffin, (6 / 2003)**, Mineral Perindustrian Feldspar Disediakan oleh, Page 3 sur 16 incomplète kaolinisés rochers.

L

-
- Lu, S., Zhou, Q., Xu, H., Zou, J., Duan, Q., 1997**, Surfactant-synergy in fatty acid flotation, In: Proceedings of XXth International Mineral Processing Congress, Aachen, vol.3, pp. 593-604.
- Lu, Y., Liu, N., Wang, X., Miller, J.D., 1999**, Improved phosphate flotation with nonionic polymers, In: Zhang, P., El-Shall, H., Wiegel, R. (Eds.), Beneficiation of Phosphates: Advances in Research and Practice, pp. 3-19.

M

-
- Marignac, 1976**, Etude des successions paragénetiques dans les minéralisations filoniennes polymétalliques d'Ain Barbar. Première approche des paramètres physico chimique de leur mise en place. Thèse doctorat INPI-France.
- Marignac-C, Zimmerman J.L, 1983**, AGES K-Ar de l'événement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé miocènes D'Ain Barba. Minéral disposait 18, P457-467.
- Michael J. Potter, 2002**. Feldspar and nepheline syenite by; u.s. geological survey minerals yearbook
- Martin benjamin et SAJE Stéphane, 2001-2004**, Le recyclage de verre par p 5.6, 11 .12.13
- M. Ghomari F. & Mme Bendi-Ouis. A.2008**, Analyse granulométrique
- Mousa Gougazeh, 2006**, Evaluation and Beneficiation of Feldspar from Arkosic Sandstone in South Jordan for Application in the Ceramic,. American Journal of Applied Sciences 3 (1): 1655-1661, ISSN 1546-9239 © Science Publications.
- Morin K.A., et Hutt N.M., 1997**, Environmental geochemistry of mine site drainage: practical theory and case studies. MDAG Publishing, Vancouver. 333.

N

-
- Nguyen, A.V., I. D. Wilson, M. Cooke and C. Poole.E.d., 2007**, Encyclopedic of Flotation separation science, Elsevier, Oxford, UK, 1, 1-27

P

-
- Pinto, C.A.F., Yarar, B., Araujo, A.C., 1991**, Apatite flotation kinetics with conventional and new collectors, Prerint 91-80, SME Annual Meeting, Denver, Colorado, February 25-28.
- Polat, H., Polat, M., Chander, S., 1999**, Kinetics of oil dispersion in the absence and presence of block copolymers, AIChE, 45, 9, 1866-1874.
- Perkins, E.H., Nesbitt, H.W., Gunter, W.D., St-Arnaud, L.C. et Mycroft, J.R. 1995**, Critical Review of Geochemical Processes and Geochemical Models Adaptable for Prediction of Acidic Drainage from Waste Rock. MEND Report, Project 1.42.1.
- Poujade JM, Zerbib C, Serre D. 2003**, Céramiques dentaires. Encyclopédie Médico-Chirurgicale ; Odontologie ; 23-065-G-10

Q

Quemard Le Meins. C. 2007, dentCeram LF céramique basse fusion nouvelle génération, 1e partie : approche scientifique du matériau céramique, Stratégie prothétique février 2007 • vol 7, n° 1.

R

Robert D, 1984, Enrichissement et épuration des minerais feldspathiques, société de l'industrie minérale, vol.56, n°12, pp.489-500.

Ramalho. R. S., 1983, Introduction to Wastewater Treatment Processes. 2^{ème} édition New York Academic Press., pp (80-132)

Rosen, M.J., Hua, X.Y., 1982, Surface concentrations and molecular interactions in binary mixtures of surfactants, Journal of Colloid and Interface Science, 86, 1, 164-172.

Rao, K.H, Forsberg, K.S.E., 1997, Mixed collector systems in flotation, International Journal of Mineral Processing, 51, 67-79.

S

SONAREM 1976, Rapport, Travaux de prospection détaillées exécutées en 1976 sur le gisement de felsites céramiques d'Ain Barbar. * Fiche technique de gisement de feldspath d'Ain Barbar.

Stéphane Gaston, mars 2010, Les céramiques dans tous leurs états, Technologie 166.

Sadoun M, 2000, Céramiques dentaires. Matériau céramique et procédé de mise en forme. Tech Dent 2000 ; 165/166 :13-17.

Somasundaran, P., 1979, Processing mineral fines. Engineering and minning Journal, vol 180, no 12, pp.63.68.

Sandvik, K.L., Solbakken, A., 1968, The adsorption of long-chained amines on quartz, Society of Mining Engineers, AIME, Transactions, 241, 418-420.

Smith R.W., Scott, J.L., 1990, Mechanisms of dodecylamine flotation of quartz, Mineral processing and extractive metallurgy review, 7, 2, 81-94.

Smith, R. W., Akhtar, S., 1976, Cationic flotation of oxides and silicates, Flotation, 1, 87.

Smith, R.W.1965, Activation of beryl and feldspar by fluorides in cationic flotation systems, TralSoc. Min. Eng., AIME, 232, 106-108 (1965).

Smith, R.W.1963, Co-adsorption of dodecyl amine ion and molecule on quartz, Proceedings South Dakota Academy of Science, 42, 62 (1963).

Scott, J. L., Smith, R.W., 1993, Calcium effects in amine flotation of quartz and magnetite, Minerals Engineering, 6, 12, 1245-1255.

Somasundaran, P., Xiao, L., Vasudevan, T.V., 1991, Separation of salt-type minerals by flotation using structurally modified collectors, In: Proceedings of the XVIIth International Mineral Processing Congress, Bergakademie, Freiberg, 2, 379-391.

Suri, S.K., Randhawa, 1989, Studies on the micellar behavior of binary surfactant systems: sodium oleate + alcohol oxyethylates, Journal of Surface Science and Technology, 5, 4, 355-363.

Sis, H., Chander, S., 2003, Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review, Minerals Engineering, 16, 577-585.

Soonthornwiphat, N., Saisinchai, S., and Parinayok, P., 2016, Recovery Slime Waste from Feldspar Flotation Plant at Attanee International Co. Ltd., Tak Province, Thailand. Engineering Journal, No. 20(4), pp. 69–78.

T

Tortorelli, J. P., Craven, J. W., Toguri, J. M., Dobby, G. S., Agar, G.E., 1997, The effect of external gas/solvent contact on the flotation of fine particles.» *Minerals Engineering*, vol 10, no 1 O, p. 1127-1138.

U

U.S. Environmental Protection Agency. 1994, Extraction and beneficiation of ores and minerals, Volume 1, Lead-Zinc. Technical Resource Document EPA 530-R-94-011, 127 p.

U.S. Bureau of Mines. 1984, Waste Disposal Activities and Practices in the United States: Copper, Lead, Zinc, Gold, and Silver. Division of Minerals. Washington, DC.

V

Viera, A. M., Peres, A.E.C., 2007, The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz, *Mineral Engineering*, 20, 1008-1013.

Vidyadhar, A., Hanumantha Rao, K., Forsberg, K.S.E., 2002a, Adsorption of N-Tallow 1,3 propanediamine-Dioleate Collector on Albite and Quartz Minerals and Selective Flotation of Albite from Greek Stefania Feldspar ore, *Journal of Colloid and Interface Science*, 248, 1, 19- 29.

Vidyadhar, A., Hanumantha Rao, K., Chernyshova, I.V., 2002b, Mechanisms of amine-feldspar interaction in the absence and presence of alcohols studied by spectroscopic methods, *Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Engineering. Aspects*, 214, 127-142.

W

Wills, B.A., 2001, *Mineral Processing Technology*, An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, 6th edition, Butterworth-Heinemann.

Wills, B.A., 1992, *Mineral processing Technology*, 5th edition, Pergamon Press.

Wills. B. A., 1988, *Mineral Processing Technology*, 4th edition ed. Oxford: Pergamon Presse.; 855p.

Wang, Y.H, Yu, F.S., 2007, Effects of Metallic Ions on the flotation of spodumen and beryl, *Journal of China University of Mining & Technology*, 17, 1, 35-39.

www.mem-algeria.org

www.dnpm.gov.br/dnpgl.html. Feldspar, Mineral Summary 2001,

www.ima-eu.org/eurofel.html)

www.infovitrail.com/verre/fabrication-du-verre (Dévitrification des verres).

www.google.com/32, TWG céramiques, 2006.

www.la.Refer.Org/Materiaux/ Chapitre 3. Analyse Granulométrique.

www.cnesst.gouv.qc.ca

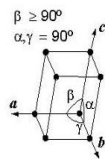
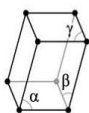


Z

Zachwieja, J.B., 1994, An overview of cationic reagents in mineral processing, In *Reagents for Better Metallurgy*, ed. P.S. Mulukutla, SME, Inc., Littleton.

ANNEXE

ANNEXE 1

Tableau I. Fiche d'identification des feldspaths alcalin à l'œil nu et au microscope polarisant.

Feldspaths alcalins	Formule chimique		Système de cristallisation	
	Orthose : $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{K}$ Albite : $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$		Monoclinique (Orthose seulement)	Triclinique (tous les autres)
	Tectosilicate (tous les tétraèdres sont liés entre eux)			
Caractères macroscopiques	<p>Éclat : vitreux.</p> <p>Forme : cristaux prismatiques montrant des clivages constants et des macles ; faces miroitantes correspondant à des plans de clivage.</p> <p>Cassure : selon les plans de clivage.</p> <p>Dureté : voisine de 6 (6 précisément pour l'orthose puisqu'elle est une des références de l'échelle de Mohs)</p> <p>Flexibilité : aucune.</p>		<p>Couleur : variable, incolore, blanc, rose ; teinte claire, porcelanée, mais variable selon la pureté, la présence ou l'absence de pigmentation.</p> <p>Densité : voisine de 2,5.</p> <p>Caractère au toucher : rien de particulier.</p> <p>Magnétisme : aucun.</p>	
Caractères microscopiques	 Lumière polarisée non analysée	Caractères cristallographiques		
		<ul style="list-style-type: none"> - Forme : sections automorphes ou subautomorphes ± allongés ; souvent deux faces parallèles. - Clivages : souvent net suivant (001). 		
	 Lumière polarisée analysée	Caractères optiques		
		<ul style="list-style-type: none"> - Relief faible : 1,51 à 1,58 ; négatif pour l'orthose : $n = 1,518$. - Pléochroïsme : incolore. - Incolores ; plus ou moins opaques (bruns et troubles) suivant le degré d'altération. 		
		<p>Biréfringence : faible.</p> <p>Teinte de polarisation : elles se situent dans les gris blancs du 1^{er} ordre.</p> <p>Macles : fréquentes : macles de Carlsbad, de Manebach et de Baveno ou macles de l'albite et de la péricline ; souvent, ces deux dernières s'associent et déterminent ainsi un quadrillage fin sur les faces 001.</p>		
Altération	Le plus souvent en kaolin par élimination des alcalins (K,Na) ; le feldspath prend alors une teinte rosâtre , assez caractéristique des feldspaths alcalins. Cette teinte est due à une fine pigmentation d' hématite .			
Gisement	Roches métamorphiques , roches magmatiques acides et leurs pegmatites ; plutôt rares dans les laves.			
Différentes variétés de feldspaths alcalins	<p>Sanidine : polymorphe de feldspath alcalin stable à HT ; caractéristique des rhyolites et autres roches magmatiques silico-potassiques solidifiées rapidement ; elle s'y forme, au-dessus de 700 °C, généralement en gros cristaux isolés ; la proportion d'albite peut être élevée sans qu'apparaissent de perthites* parce que le refroidissement ayant été rapide, celles-ci n'ont pas le temps de se former.</p> <p>Orthose : polymorphe de température intermédiaire.</p> <p>Microcline : polymorphe de basse température ; principal feldspath potassique des roches métamorphiques.</p> <p>Anorthose : microcline sodique ; roches effusives acides (rhyolites, trachytes).</p> <p>* Les perthites sont des structures particulières apparaissant lors du refroidissement du magma ; l'orthose ou le microcline et l'albite se séparent et l'albite se rassemble dans le réseau du microcline en petites veines ou facules qu'on appelle « perthites ».</p>			

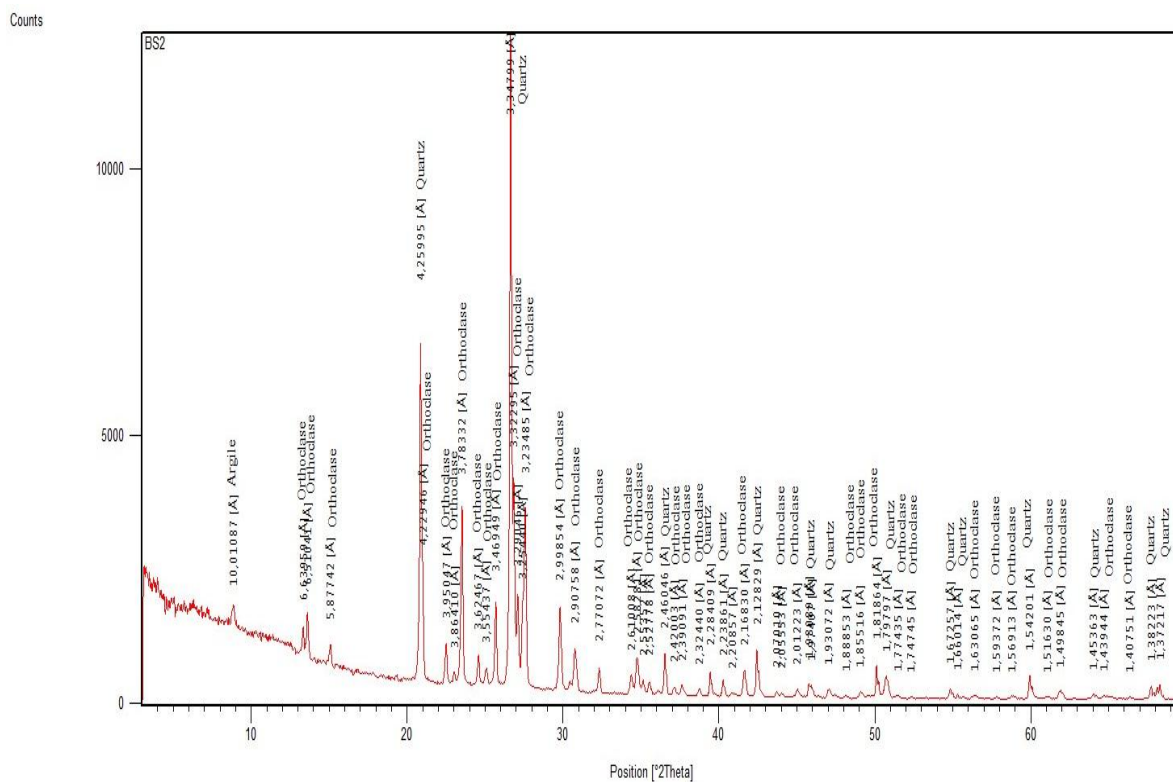
ANNEXE 2

Figure I. Diffractomètre des rayons X

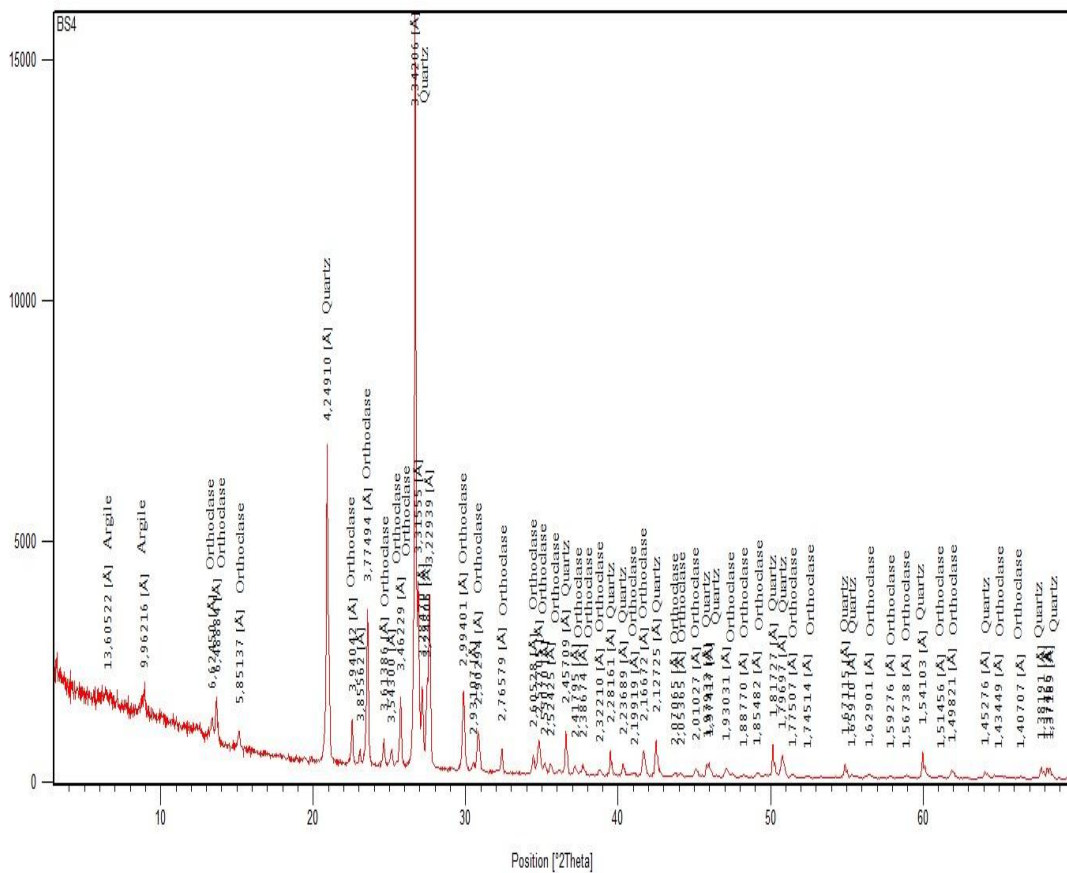


ANNEXE 3

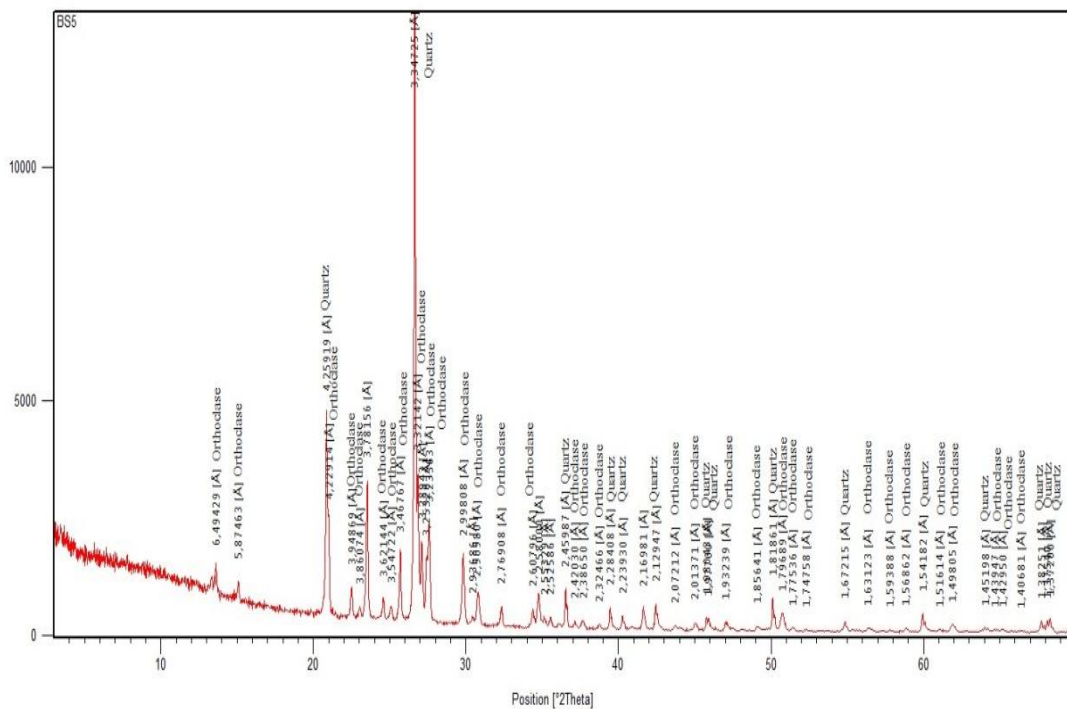
Figure II. Spectres des diffractions des rayons X de différentes tranches granulométriques.

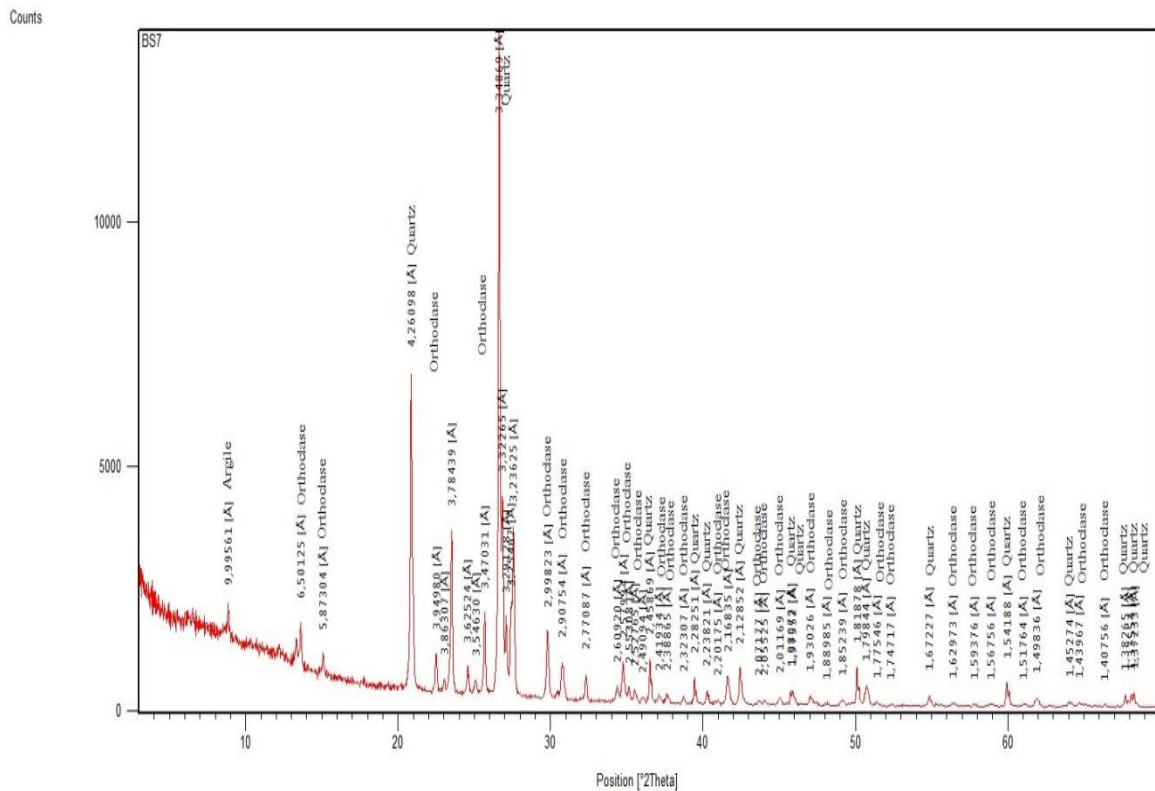
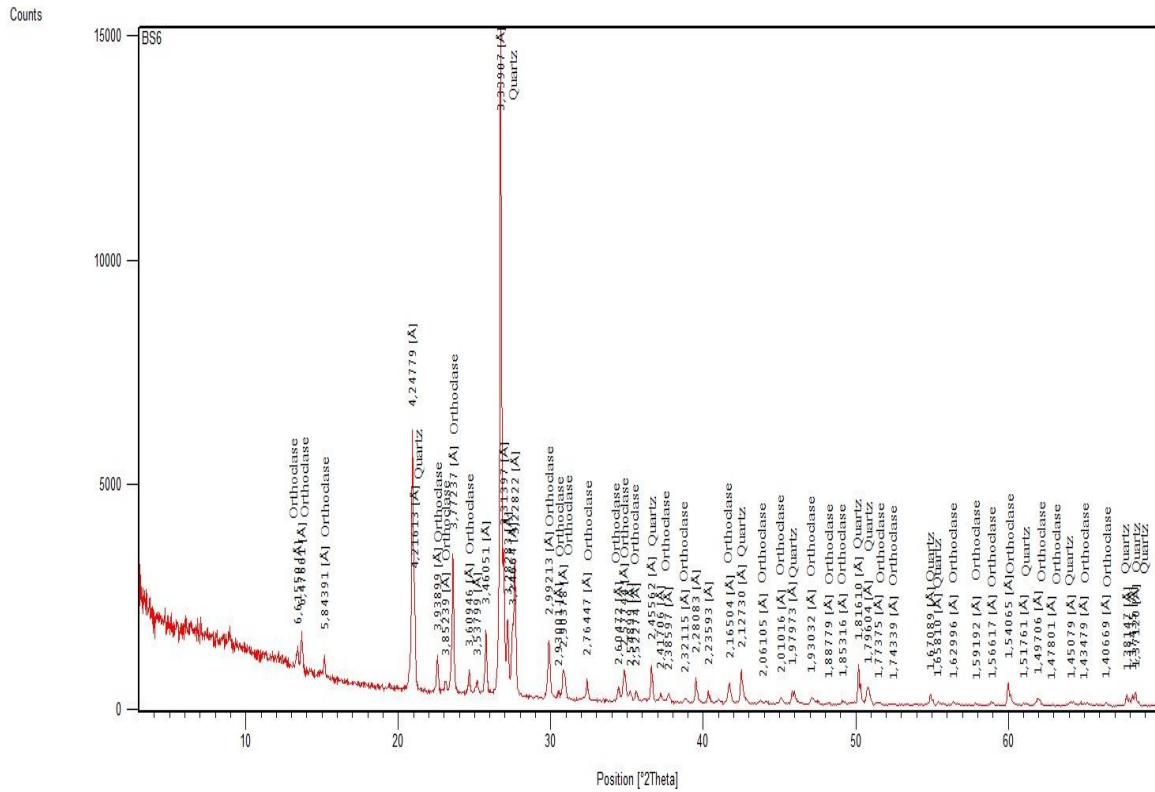


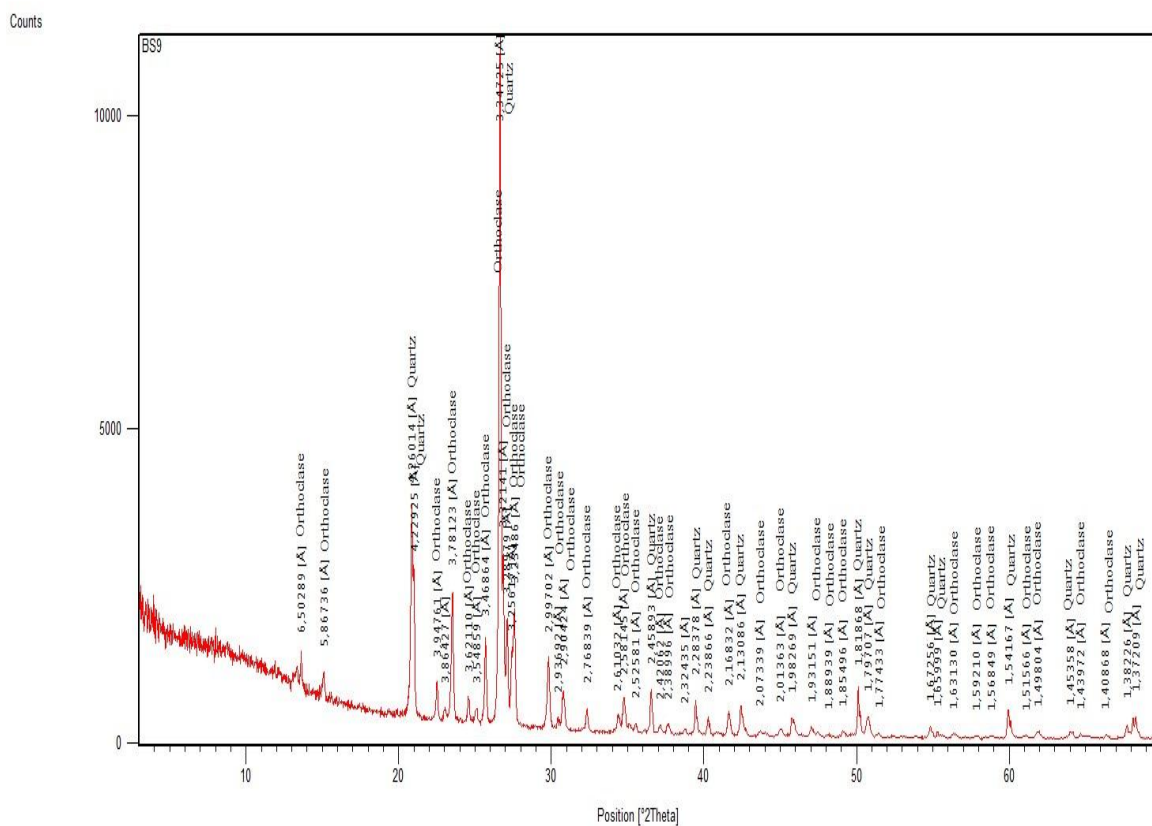
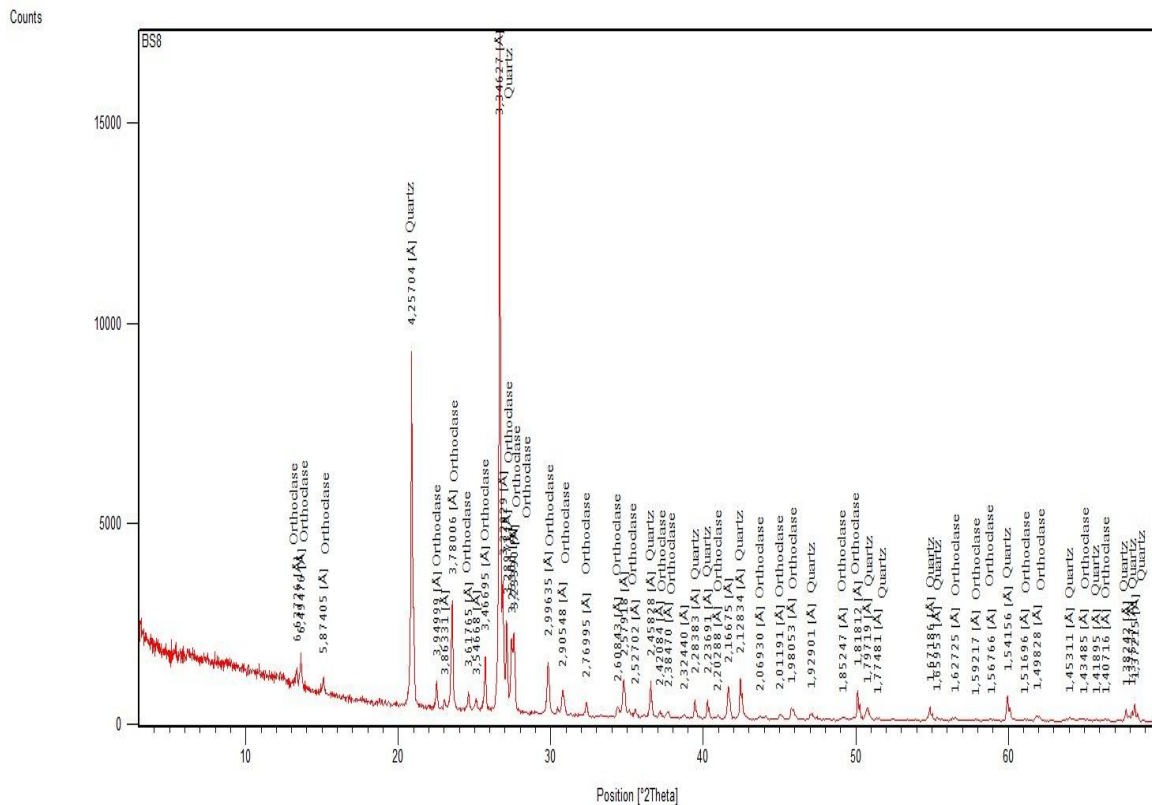
Counts



Counts







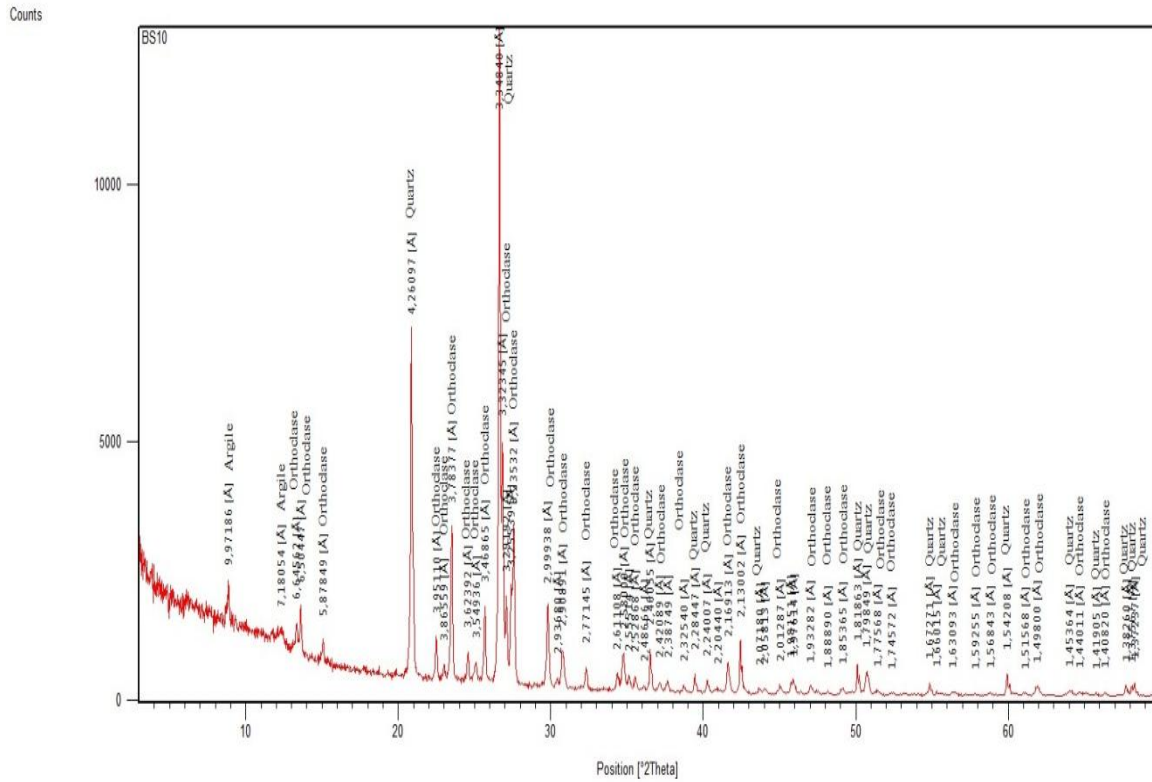
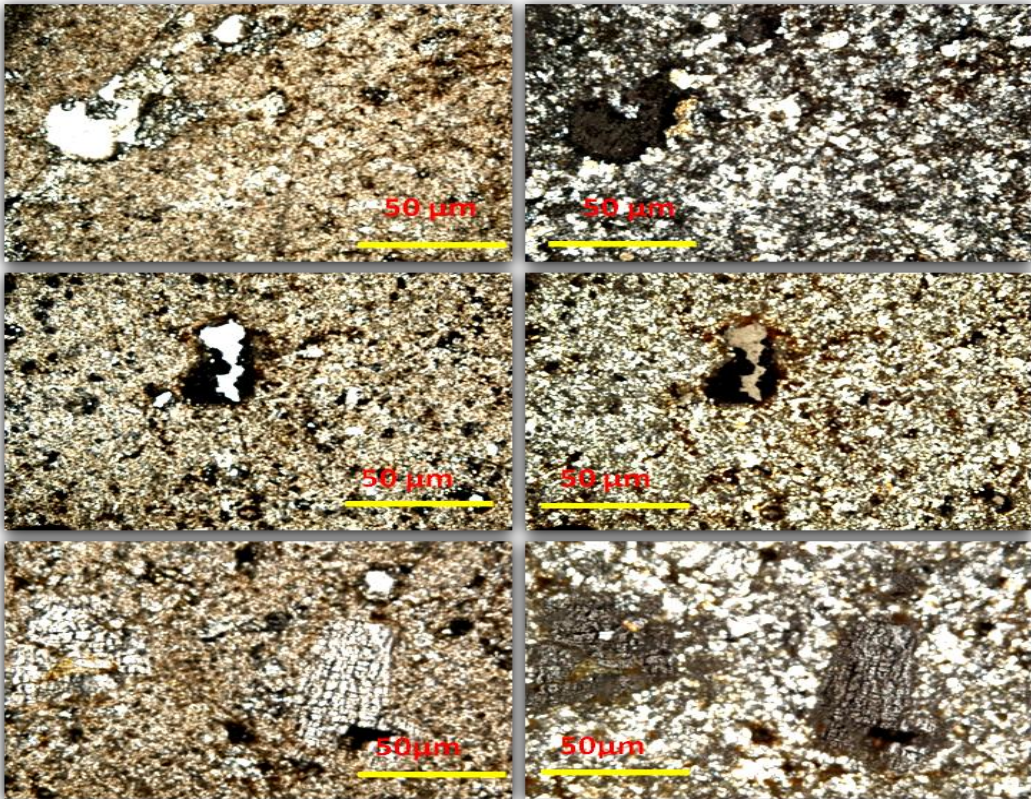
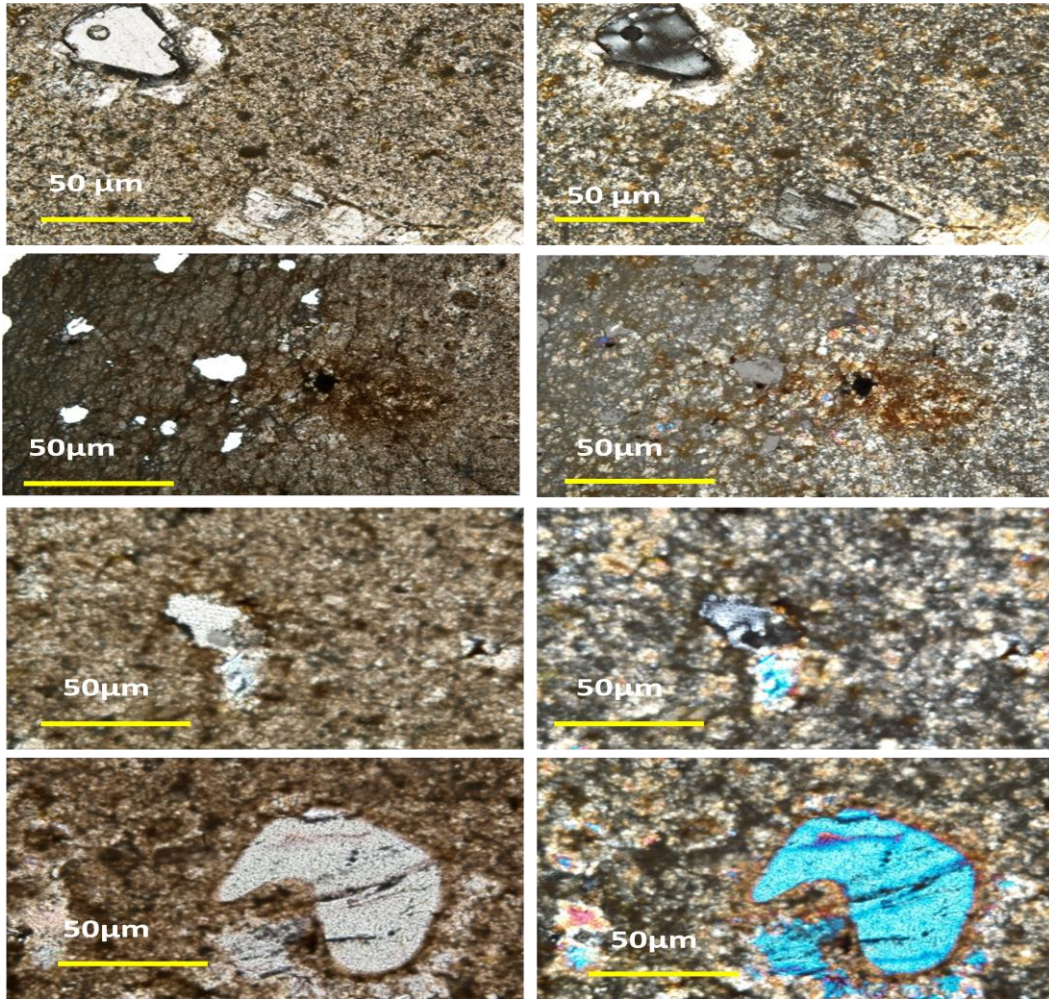


Figure III. Photo des lames minces au microscope polarisant





ANNEXE 4

Calculs normatifs : Evaluation des proportions minéralogiques des roches

Exemple : imaginons une roche comprenant entre autres 20 mmol de CaO et 1 mmol de P_2O_5 . CaO se répartit dans de nombreux minéraux : plagioclases, pyroxènes calciques, sphène, .; P_2O_5 ne rentre que dans la composition de l'apatite ($P_2O_5 \cdot 3CaO$). Nous allons donc construire 1 mmol d'apatite (= nombre de moles de P_2O_5); après cette étape, la quantité de P_2O_5 est nulle. La construction d'apatite consomme 3 fois plus de CaO que de P_2O_5 , soit 3 mmol; il restera donc $20 - (3 \cdot 1) = 17$ mmol pour construire les autres minéraux calciques.

A la fin du calcul, toutes les quantités d'éléments doivent être à zéro. Le dernier minéral à être formé dans le calcul est le quartz, qui consommera le dernier oxyde qui n'aura pas été incorporé, c'est-à-dire SiO_2 . Si la roche ne contient pas assez de SiO_2 , alors il faut reprendre en partie le calcul et former des feldspathoïdes à la place des feldspaths.

Règles simplifiées de la répartition des molécules entre les minéraux normatifs

La démarche à suivre est constituée d'une succession d'étapes qui est ci-dessous :

1. A partir de la composition chimique de la roche en % de poids d'oxydes, calculer les proportions moléculaires, en divisant le % de chacun d'eux par le poids moléculaire correspondant.

2. Les quantités inférieures à 2 millimolécules sont négligées.
3. MnO est compté avec FeO.
4. Joindre CaO à P₂O₅ dans le rapport 3/1 pour former l'apatite.
5. Joindre FeO à TiO₂ pour former l'ilménite.
6. Joindre Al₂O₃ à K₂O et à 6SiO₂ pour former l'orthose.
7. Joindre Al₂O₃ à Na₂O et à 6SiO₂ pour former l'albite.
8. Joindre Al₂O₃ à CaO et à 2SiO₂ pour former l'anorthite.
9. Si après l'étape 8 il reste : Al₂O₃, le compter comme corindon. S'il reste TiO₂, le joindre à CaO et SiO₂ pour former du Sphène. S'il reste Na₂O, le joindre à Fe₂O₃ et 4SiO₂ pour former l'aegyrine.
10. Joindre Fe₂O₃ et FeO pour former la magnétite.
11. S'il y a un excès de Fe₂O₃ après l'étape 10, former l'hématite.
12. Former du diopside. La formule du diopside est CaO SiO₂, x(FeO SiO₂), y(MgO SiO₂) avec x+y=CaO. Il faut donc résoudre le système :

$$\begin{cases} x + y = \text{CaO disponible} \\ \frac{x}{y} = \frac{\text{MgO}}{\text{FeO}} \end{cases}$$

13. Si après l'étape 12, il reste CaO, former de la wollastonite.
14. Si après l'étape 12, il reste du MgO et du FeO, constituer de l'hypersthène.
15. Si après toutes ces opérations, il reste de la silice, la compter comme quartz. Le calcul est alors terminé.
16. Si après l'étape 14, il y a un déficit de silice, il faut répartir MgO et FeO restant entre l'hypersthène et l'olivine puisque cette dernière demande deux fois moins de silice que l'hypersthène.

Si x = hypersthène et y = olivine, il faut résoudre le système :

$$\begin{cases} x + y = \text{SiO}_2 \text{ disponible} \\ x + 2y = (\text{FeO} + \text{MgO}) \end{cases}$$

17. Si le système de l'étape 16 ne peut pas se résoudre, ne constituer que de l'olivine. Transformer le sphène (s'il y a lieu) en pérowskite
18. Si un déficit de silice persiste de l'étape 17, il est alors nécessaire de former de la néphéline qui au lieu de 6 moles SiO₂ par mole Na₂O comme l'albite, ne demande que 2SiO₂ par Na₂O. Si x=albite et y=néphéline, la répartition se fera en résolvant le système

$$\begin{cases} x + y = \text{Na}_2\text{O} \\ 6x + 2y = 6\text{Na}_2\text{O} - \text{deficit de silice} \end{cases}$$

19. Si après l'étape 18, il persiste encore un déficit de silice, le répartir entre orthose et leucite en résolvant :

$$\begin{cases} x + y = \text{K}_2\text{O} \\ 6x + 4y = 6\text{K}_2\text{O} - \text{deficit de silice} \end{cases}$$

Toutes les opérations sont alors terminées.

20. Etablir la composition virtuelle de la roche en multipliant les proportions moléculaires des minéraux étalons par les masses moléculaires correspondantes.

ANNEXE 5

Tableau représente les caractéristiques principales de l'Acide fluorhydrique et de l'Acide bromhydrique.

Caractéristiques	Acide fluorhydrique (HF)	Acide bromhydrique (HBr)
Solubilité dans l'eau	Soluble	Soluble
Réaction	$\text{HF}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{F}^-$	$\text{HBr}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Br}^-$
Electronégativité	3,98	2,96
Acidité	acide faible	acide fort
pKa	3,15	Très faibles (-9)
Ka	$7.1 \cdot 10^{-04}$	Très élevées
Poids moléculaire	20.01g/mole	80.91 g/mole
Prix de vente	US \$ 1050-1460 / Tonne métrique	US \$ 400-500 / Tonne métrique
Corrosivité	très corrosif	corrosif
Pureté	40%, 55% et 70%	40% à 48%
Point de fusion	-35°C	-11 °C
Point d'ébullition	19.5 °C à 760 mm Hg	28.9 °C à 760 mm Hg
Densité Relative	1.016	1.480
Tension de vapeur	922 mm Hg à 25 °C	654 mm Hg à 25 °C
Toxicité	Fortement toxique, provoque de graves brûlures, très toxique par inhalation, contact avec la peau et par ingestion.	Dangereux, provoque des brûlures, irritant pour les voies respiratoires.

Figure IV. Cellule de laboratoire utilisé pour les essais d'enrichissements



RESUME

Les feldspaths sont répandus dans l'écorce terrestre mais seuls les feldspaths potassiques et sodiques sont très recherchés dans l'industrie céramique et verrière. Pour qu'ils soient utilisables, ces matériaux doivent contenir très peu d'impuretés nocives de fer et surtout de silice.

La carrière d'Ain Barbar exploite la matière feldspathique (feldspath potassique) de teneurs moyennes respectives 76.21 SiO₂; 13.39% Al₂O₃; 8.40% K₂O; 0.79 % Fe₂O₃ et 0.29% Na₂O.

Toutefois, on constate un taux très élevé en quartz ce qui diminue la valeur du produit marchand et une teneur élevée en fer ce qui donne au produit fabriqué des aspects de coloration le rendant impropre à la commercialisation.

A cet effet une caractérisation minéralogique et chimique a été réalisée sur des échantillons prélevés du site d'extraction de la substance utile.

Des échantillons soumis à des tests de pré-concentration granulométrique (PCG), une séparation magnétique à haute intensité (SMHI) suivie d'un enrichissement par flottation (FLOTT) révèlent des résultats significatifs en teneur et en récupération de l'orthose.

Les concentrés obtenus par flottation offrent des teneurs moyennes de 15.16 % Al₂O₃, 70.40 % SiO₂, 0.03% Fe₂O₃; 13.51% K₂O and 0.14% Na₂O soit une récupération de 90% d'orthose contre 8% de rejet de quartz.

Les résultats obtenus sont très notables en qualité du produit enrichi pour son utilisation industrielle en verres et en céramiques.

Mots clés : *Annaba, Ain Barbar, K-feldspath, séparation magnétique, flottation, verre, céramique.*



ABSTRACT

Feldspars are Common within the earth's crust, but only the potassium and sodium feldspars are highly sought in the ceramic and glass industries. To be utilized, these materials must contain very little harmful impurities especially iron and silica.

The Ain Barbar quarry exploits the feldspar material (potassium feldspar) with respective average grades of 76.21% SiO₂; 13.39% Al₂O₃; 8.40% K₂O; 0.79 % Fe₂O₃ and 0.29% Na₂O. However, there is a very high rate of quartz which decreases the value merchant product and a high iron content which gives to the product coloring aspects making it unmarketable.

For this purpose a mineralogical and chemical characterization were performed on samples obtained from site extraction of the useful substances with a deep bibliographic study about this research.

Pre-concentration grain size test and magnetic separation were followed by a physico-chemical concentration (flotation) to provide a valuable quality product including 15.16 % Al₂O₃, 70.40 % SiO₂, 0.03% Fe₂O₃; 13.51% K₂O and 0.14% Na₂O corresponding almost a 90% of the orthoclase and 8% of the quartz, which is acceptable for ceramists.

Keywords: *Annaba, Ain Barbar, K-feldspar, magnetic separation, flotation, glass, ceramics.*
