

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie minier

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Génie minier

**Elimination du fer et des impuretés contenus dans le sable siliceux
provenant de la carrière SIDI BOU-ALI (Chélif) pour les besoins
de l'industrie du verre et photovoltaïque.**

Réalisé Par :

LAKEHAL Asma

GUEHAIZ Bouchra

Sous la direction de Dr. OULD HAMOU Malek

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

Composition du Jury :

Présidente de jury : Mme A.MERCHICHI

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

Examineur : Dr R. AKKAL

M.C.A Ecole nationale polytechnique

Rapporteur : Dr M. OULD HAMOU

M.C.A Ecole nationale polytechnique

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie minier

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Génie minier

**Elimination du fer et des impuretés contenus dans le sable siliceux
provenant de la carrière SIDI BOU-ALI (Chélif) pour les besoins
de l'industrie du verre et photovoltaïque.**

Réalisé Par :

LAKEHAL Asma

GUEHAIZ Bouchra

Sous la direction de Dr. OULD HAMOU Malek

Présenté et soutenu publiquement le (21/06/2017)

Composition du Jury :

Présidente de jury : Mme A.MERCHICHI

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

Examineur : Dr R. AKKAL

M.C.A Ecole nationale polytechnique

Rapporteur : Dr M. OULD HAMOU

M.C.A Ecole nationale polytechnique

Remerciement

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné tout de patience et de courage pour accomplir ce travail.

En guise de reconnaissance, on tient à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Nos sincères remerciements vont aux membres du jury de cette thèse. On remercie tout particulièrement Monsieur M.OULD HAMOU de nous avoir encadré et suivi notre travail avec ses précieux conseils. Nos remerciements les plus vifs à madame MERCHICHI pour ses conseils et son aide au niveau de laboratoire.

Nos remerciements vont également aux enseignants du département Génie Minier qui ont contribué à notre formation.

Et en fin nos meilleurs remerciements à nos parents, nos frères et sœurs et nos amies qui nous ont encouragé et aidé pour réaliser ce travail.

Dédicace

A mes chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mes chers et adorables frères et sœur, ma très chère Hana, la prunelle de mes yeux, Walid mon petit frère que j'adore, Mohammed, que j'aime profondément. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A mes très chères amies, Asma, Imane, mira, Nina et surtout à toi binoumti Bouchra.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A toute la promo génie minier mes chers camarades,

A tous ceux qui me sont chers.

À toute personne, de prêt ou de loin, m'avait encouragé à accomplir ce travail.

...Je dédie ce travail.

ASMA

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes chères parents en gratitude
spécialement (ma mère et mon père) de tout ce qu'ils ont fait pour
moi; par leurs soutiens moral et économique.*

A ma sœur mes frères et toute la famille Guehair

*A ma chère amie mon binôme Asma qui m'a supporté durant ces
trois dernières années et chez qui j'ai trouvé l'entente dont j'avais
besoin.*

A tous mes collègues de la promotion Génie Minier 2016/2017.

Bouchra

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des figures | |
| Liste des Tableaux | |
| Liste des abréviations | |
| Introduction générale..... | 15 |
| Introduction Générale | 16 |
| Chapitre 01 : | 3 |
| Présentation de la zone d'étude | 3 |
| Introduction | 19 |
| 1. Situation géographique..... | 19 |
| 1. Topographie..... | 20 |
| 2. Cadre géologique | 20 |
| 3. Historique des travaux..... | 21 |
| 4. Aspect climatologique :..... | 21 |
| 5. Hydrogéologie | 22 |
| 6. Minéralogie..... | 22 |
| 7. Les réserves géologiques | 23 |
| Chapitre II :..... | 24 |
| Elaboration du verre et des panneaux photovoltaïques..... | 24 |
| Introduction..... | 25 |
| 1. Le sable siliceux..... | 25 |
| 1.1. Définition..... | 25 |
| 1.2. Production et réserves mondiales..... | 26 |
| 1.3. Le sable siliceux en Algérie..... | 26 |
| 1.3.1. Les réserves et ressources géologiques | 26 |
| 1.3.2. La production algérienne..... | 27 |
| 2. LA SILICE | 27 |
| 2.1. Définition..... | 27 |
| 2.2. Etat naturel de la silice..... | 28 |
| 2.3. Caractéristiques de la silice :..... | 28 |
| 2.4. Description de la molécule de silice :..... | 28 |
| 2.5. Principales utilisations industrielles | 29 |
| 3.1. Les spécifications de sable siliceux utilisé pour la verrerie | 29 |
| 3.2. Elaboration du verre | 30 |
| 3.2.1. Définition | 31 |
| 3.2.2. Fabrication du verre | 31 |
| 3.2.3. Structure des verres..... | 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.2.4. | Composition du verre..... | 32 |
| 3.2.5. | Différents types de verre | 34 |
| 3.2.6. | Propriétés du verre | 35 |
| 3.2.7. | État physique du verre | 36 |
| 4. | La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque..... | 37 |
| 4.1. | L'industrie photovoltaïque..... | 37 |
| 4.2. | Demande en silicium de qualité photovoltaïque | 39 |
| 4.3. | Le silicium | 40 |
| 4.4. | La fabrication des cellules photovoltaïques | 40 |
| 4.4.1. | Etapes de raffinage du Silicium..... | 41 |
| 4.4.2. | Cristallisation et formation des plaques | 43 |
| | Conclusion | 44 |
| | Chapitre III : | 45 |
| | Généralité sur les méthodes de séparation..... | 45 |
| | Introduction | 46 |
| 1. | Préparation mécanique du minerai..... | 47 |
| 1.1. | L'échantillonnage..... | 47 |
| 1.1.1. | Prélèvement dans le stock (échantillon global) | 47 |
| 1.1.2. | Echantillonnage en laboratoire | 47 |
| 1.1.3. | Quartage | 48 |
| 1.1.4. | Echantillonneur (diviseur)..... | 48 |
| 1.2. | L'Analyse granulométrique | 49 |
| 1.2.1. | Le tamisage | 49 |
| 1.2.2. | But de l'analyse granulométrique : | 50 |
| 1.2.3. | Description de l'essai..... | 50 |
| 1.3. | La fragmentation des solides..... | 50 |
| 1.3.1. | La rupture des matériaux rocheux | 50 |
| 1.3.2. | Le broyage..... | 51 |
| 1.3.3. | But du broyage | 51 |
| 2. | Attrition : | 51 |
| 3. | La séparation magnétique : | 52 |
| 3.1. | Les méthodes basées sur le magnétisme..... | 52 |
| 3.2. | Critères de choix des appareils..... | 52 |
| 3.3. | Les séparateurs magnétiques..... | 53 |
| 3.3.1. | Séparateur magnétique à basse intensité à sec..... | 53 |
| 3.3.2. | Séparation humide a basse intensité | 53 |
| 3.3.3. | Séparateurs à haute intensité à sec..... | 53 |
| 3.3.4. | Les séparateurs à haute intensité en milieu humide..... | 54 |

| | | |
|---------------------------|--|----|
| 4. | Méthode de la flottation | 54 |
| 4.1. | Définition de la méthode | 54 |
| 4.2. | Types de Flottation..... | 55 |
| 4.2.1. | Flottation Directe..... | 55 |
| 4.2.2. | Flottation Inverse..... | 55 |
| 4.3. | Appareillage..... | 55 |
| 4.3.1. | Cellule de flottation | 55 |
| 4.3.2. | Colonne de flottation | 56 |
| 4.3.3. | Comparaison entre cellule et colonne de flottation :..... | 57 |
| 4.4. | Paramètres influant sur l'opération de flottation..... | 57 |
| 4.4.1. | La grandeur du minerai à flotter | 57 |
| 4.4.2. | La densité de la pulpe de flottation..... | 58 |
| 4.4.3. | La gamme des réactifs de flottation utilisés | 58 |
| 4.4.4. | L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe..... | 58 |
| 4.4.5. | La température de la pulpe | 58 |
| 4.5. | Les réactifs de flottation | 59 |
| 4.5.1. | Les collecteurs | 59 |
| 4.5.2. | Les déprimants | 60 |
| 4.5.3. | Les moussants..... | 60 |
| 4.5.4. | Les activants..... | 61 |
| 4.5.5. | Les régulateurs du milieu | 61 |
| Chapitre IV : | | 63 |
| Partie expérimentale..... | | 63 |
| Introduction..... | | 64 |
| 1. | Les caractéristiques minéralogiques et chimiques | 64 |
| 1.1. | Analyse chimique..... | 64 |
| 1.2. | Calcul du taux d'humidité..... | 64 |
| 1.3. | Echantillonnage..... | 65 |
| 1.3.1. | Quartage manuel..... | 65 |
| 1.4. | Analyse granulométrique..... | 66 |
| 1.4.1. | Principe de l'essai | 66 |
| 1.4.2. | Appareillage | 66 |
| 1.4.3. | Préparation de l'échantillon..... | 67 |
| 1.4.4. | Classement des tamis : | 67 |
| 1.4.5. | Le Tamisage | 67 |
| 1.4.6. | Pesage des refus..... | 67 |
| 1.4.7. | Traçage de la courbe | 68 |
| 1.4.8. | Résultat de l'essai | 68 |

| | |
|---|----|
| Conclusion : | 69 |
| 1.5. Analyse microscopique..... | 70 |
| 1.5.1. Observation microscopique des différentes classes granulométriques | 70 |
| 1.5.2. Interprétation | 71 |
| 2. Essais d'enrichissement du minerai de sable : | 71 |
| 2.1. Tamisage..... | 72 |
| 2.3. Attrition | 73 |
| 2.3.1. Mode opératoire..... | 73 |
| 2.3.2. Résultats de l'attrition..... | 74 |
| 2.3.3. Analyse microscopique..... | 75 |
| 2.3.4. Interprétation | 75 |
| 2.4. La séparation magnétique | 76 |
| 2.4.1. Essai de séparation magnétique par voie sèche | 76 |
| 2.4.3. Résultats de la séparation magnétique | 78 |
| 2.4.3.2. Interprétation des résultats | 79 |
| Conclusion..... | 82 |
| 2.5. La flottation..... | 83 |
| 2.5.1. Objectif | 83 |
| 2.5.2. Paramètres étudiés : | 83 |
| 2.5.3. Préparation des réactifs : | 83 |
| 2.5.4. Réactifs utilisés : | 84 |
| 2.5.6. Mode opératoire : | 85 |
| 2.5.7. Influence de la quantité du collecteur : | 87 |
| 2.5.8. Résultats : | 88 |
| 2.5.9. Interprétation des résultats | 89 |
| 2.5.10. Influence de la classe granulométrique | 89 |
| 2.5.11. Résultats | 90 |
| 2.5.12. Interprétation des résultats : | 91 |
| 2.5.13. Analyse microscopique après flottation : | 91 |
| Conclusion : | 94 |
| Conclusion générale | 96 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 99 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : situation géographique du gisement. | 19 |
| Figure 2 : carrière de Sidi Bou-Ali..... | 4 |
| Figure 3 : diagramme climatologique..... | 22 |
| Figure 4 : répartition des gisements de Silice en Algérie. | 26 |
| Figure 5 : évolution de la production de sable siliceux..... | 27 |
| Figure 6 : Structure du verre..... | 32 |
| Figure 7: Evolution de la puissance photovoltaïque mondiale installée par an. | 38 |
| Figure 8: répartition en pourcentage de différentes filières de produits photovoltaïques produites en 2015. | 39 |
| Figure 9 : chaine de production d'un PV..... | 41 |
| Figure 10: purification du silicium métallurgique..... | 43 |
| Figure 11: étapes de fabrication d'un module photovoltaïque..... | 44 |
| Figure 12: Schéma global des processus minéralurgique. | 46 |
| Figure 13: Opération de quartage. | 48 |
| Figure 14: Schéma d'une opération de division en utilisant un échantillonneur. | 49 |
| Figure 15: Colonne des tamis..... | 49 |
| Figure 16: Coupe transversale d'une cellule de flottation. | 56 |
| Figure 17: Schéma de cellule de flottation..... | 56 |
| Figure 18: Coupe transversale d'une colonne de flottation. | 57 |
| Figure 19: Schéma représentatif de l'action du collecteur. | 60 |
| Figure 20 : le mécanisme d'adsorption du moussant. | 61 |
| Figure 21: quartage manuel étape2..... | 65 |
| Figure 22: quartage manuel étape3..... | 65 |
| Figure 23: tamiseuse électrique..... | 66 |
| Figure 24 : Courbe granulométrique du sable siliceux. | 69 |
| Figure 25: Classe [-250+40] μm | 70 |
| Figure 26: Classe [-250+315] μm | 70 |
| Figure 27: Classe [-400+315] μm | 70 |
| Figure 28: Schéma d'enrichissement..... | 72 |
| Figure 29 : Broyeur à boulets | 73 |
| Figure 30: Résultats de l'attrition. | 74 |
| Figure 31: Attrition classe [-315+250] μm | 75 |
| Figure 32: Attrition classe [-400+315] μm | 75 |
| Figure 33: Attrition classe [-250+40] μm | 75 |
| Figure 34: séparateur magnétique par voie humide. | 76 |
| Figure 35: Séparateur magnétique SMHI (SMBI). | 77 |
| Figure 36: Résultats de la séparation magnétique. | 78 |
| Figure 37: séparation magnétique de[-400+315] μm | 79 |
| Figure 38 : séparation magnétique de[-315+250] μm | 65 |

| | |
|--|----|
| Figure 39 : séparation magnétique de[-250+40]µm | 79 |
| Figure 40 : Rendement pondéral des oxydes de fer de la classe [-400+315] µm. | 80 |
| Figure 41 : Rendement pondéral des oxydes de fer la classe [-315+250] µm. | 80 |
| Figure 42: Rendement pondéral des oxydes de fer la classe [-250+40] µm..... | 81 |
| Figure 43 : rendement pondéral du concentré des différentes classes granulométriques. | 81 |
| Figure 44 : récapitulatif des résultats de la séparation magnétique. | 82 |
| Figure 42 : Schéma de flottation. | 86 |
| Figure 46 : cellule de flottation (type soviétique). | 87 |
| Figure 47: rendement pondéral du quartz en fonction des quantités du collecteur. | 88 |
| Figure 48 : rendement pondéral des oxydes de fer en fonction des quantités du collecteur. | 89 |
| Figure 49 : rendement pondéral du quartz en fonction de la classe granulométrique. | 90 |
| Figure 50 : rendement pondéral des oxydes de fer en fonction de la classe granulométrique..... | 91 |
| Figure 51 : analyse microscopique des résultats de flottation variante1. | 92 |
| Figure 52: analyse microscopique des résultats de flottation variante 2. | 93 |
| Figure 53: schéma de traitement proposé..... | 98 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : spécifications de sable de silice pour différents usages. [4] | 30 |
| Tableau 2 : résultats d'analyse chimique par fluorescence X. | 64 |
| Tableau 3 : résultats de l'analyse granulométrique. | 68 |
| Tableau 4: Résultats de l'attrition. | 74 |
| Tableau 5 : Résultats de la séparation magnétique. | 78 |
| Tableau 6: les réactifs utilisés lors de l'essai de flottation. | 84 |
| Tableau 7: Consommation en réactifs variante1. | 84 |
| Tableau 8: consommation en réactifs variante 2. | 85 |
| Tableau 9 : Résultats de la Flottation. | 88 |
| Tableau 10: Résultats de la flottation. | 90 |

Liste des abréviations

| Abréviation | nom | unité |
|---------------|--|-------|
| SONAREM | Société Nationale de la Recherche Minière..... | |
| EREM | étude et réalisation d'ensemble mécanique..... | |
| ENOF | Entreprise Nationale des métaux Non-Ferreux..... | |
| G | Gramme..... | |
| Kg | kilogramme..... | |
| H | Heure..... | |
| % | Pourcentage..... | |
| μm | Micromètre..... | |
| ppm | Partie par million (1ppm = 0,0001%)..... | |
| L | Litre..... | |
| t | tonne..... | |
| eV | électron-volt..... | |
| Wc | watt-crête | |
| M | Masse..... | (g) |
| T | Température..... | (°C) |
| γ_c | rendement de la fraction | (%) |
| γ_r | rendement du rejet | (%) |
| T_V | la masse à l'alimentation..... | (g) |
| C | la masse du concentré..... | (g) |
| T | la masse du rejet | (g) |
| V | Volume..... | (ml) |

ملخص

تعاني صناعة الزجاج من مشاكل ناتجة عن نوعية المادة الأولية أو ما يسمى السليكا. بهدف تحسين نوعية المواد وتطبيقاتها في مجال الزجاج، عينات من الرمل مستخرجة من ودائع الرمل الكوارتز سيدي بو علي عرضوا لتحاليل فيزيائية (تحاليل حجم الجسيمات، تحاليل كيميائية والفحص المجهرية). وبناء على هذه التحاليل نجد أن الرمال تحتوي على شوائب ضارة مثل الهيماتيت والطين بنسب مرتفعة مقارنة بالمعايير الدولية المعتمدة لصناعة الزجاج.

الهدف من هذا البحث هو إيجاد طرق معالجة الرمل لتخصيب الرمال وتحسين نوعيتها لصناعة الزجاج للحصول على منتج قابل للتسويق يحتوي على الأقل 99% من SiO_2 .

طريقة المعالجة المعتمدة الفصل المغناطيسي في كثافة عالية مع فاصل مغناطيسي تليها التعويم.

وقد سمحت الطريقة المتبعة من رفع مستوى السليكا، وخفض كميات Fe_2O_3 و Al_2O_3 للوصول إلى عتبة التسامح. وأيضا الحصول على نتائج مشجعة للغاية فيما يخص مستوى SiO_2 ، وبالتالي هذه النتائج مرضية لصناعة الزجاج، وخاصة الزجاج المسطح وزجاج التكنولوجيا الفائقة.

الكلمات المفتاحية

الكوارتز الرملي، رمل سيدي بو علي، الفصل المغناطيسي، التعويم، الزجاج، والخلايا الكهروضوئية.

ABSTRACT

The glass industry is too frequented by the quality problems posed by the raw material, which is silica. In order to improve the quality of this material and its application in the field of glass, sand samples extracted from the SidiBou-Ali quartz sand deposit were subjected to a physicochemical characterization (particle size analysis, Chemical analysis and microscopic analysis). According to these analyzes, it is found that the sand contains harmful inclusions such as hematite and clay with grades higher than glass production standards.

The objective of this study is to develop a sand treatment process for glassware in order to obtain a commercial product containing at least 99% SiO_2 by mineral processing methods.

To do this, a high-intensity magnetic separation has been chosen using a magnetic separator followed by flotation.

The enrichment method adopted made it possible to improve the content of silica with a lowering contents of Fe_2O_3 and Clay Al_2O_3 to reach the tolerance threshold. The results obtained in terms of SiO_2 content and recovery are very encouraging, and consequently these results are satisfactory for the manufacture of glass, especially flat glass and high-tech glass.

Keywords:

Silica sand, SidiBou-Ali sand, magnetic separation, Flotation, glass, photovoltaic.

Résumé

L'industrie fait face à des problèmes de qualité posés par la matière première qui est la silice. Dans le but d'améliorer la qualité de cette matière et son application dans le domaine du verre, des échantillons de sable extraits à partir du gisement de sable quartzueux de Sidi Bou-Ali ont été soumis à une caractérisation physico-chimique (analyse granulométrique, analyse chimique et analyse microscopique). D'après ces analyses, on s'aperçoit que le sable contient des inclusions nocives comme l'hématite et l'argile avec des teneurs supérieures aux normes de fabrication du verre.

L'objectif de cette étude est l'élaboration d'un procédé de traitement de sable pour verrerie en vue d'obtenir un produit marchand titrant au moins 99% en SiO_2 par des procédés minéralurgiques.

Pour ce faire on a opté à une séparation magnétique à haute intensité à l'aide d'un séparateur magnétique suivie d'une flottation.

Le procédé d'enrichissement adopté a permis d'améliorer la teneur en silice avec l'abaissement des teneurs en Fe_2O_3 et en Argile Al_2O_3 pour atteindre le seuil de tolérance. Les résultats aussi obtenues en teneur et en récupération SiO_2 sont très encourageants, et par conséquent ces résultats sont satisfaisants pour la fabrication du verre, surtout le verre plat et le verre de haute technologie.

Mots Clés : sable siliceux, sable de Sidi Bou-Ali, séparation magnétique, Flottation, verre, photovoltaïque.

Introduction générale

Introduction Générale

Hier comme Aujourd'hui, le verre demeure un matériau omniprésent dans notre vie quotidienne, il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes. Ces qualités le placent dans divers domaines : dans le vitrage, ustensile de cuisine, décoration etc...

Aujourd'hui, le développement formidable de la science et la technologie a promu le verre à un rang d'un matériau noble pour plusieurs applications, et aussi a donné naissance à d'autres industries telle que le photovoltaïque. L'industrie photovoltaïque a connu une croissance considérable au cours des 15 dernières années et devient actuellement l'une des énergies renouvelables les plus en vue. Ainsi, la production des modules photovoltaïques a augmenté d'un facteur important entre 1998 et aujourd'hui. Ces technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base dont les panneaux solaires sont réalisés à partir de différents types de semi-conducteur : silicium cristallin ou amorphe.

Par ailleurs, la silice qui est le constituant principal du verre, formateur de réseau dans la composition du verre, et aussi produit à base du silicium, qui est la principale matière première dans la fabrication des modules photovoltaïques, est provenant à partir des gisements de sable ou bien des gisements de grès. Cependant, la silice naturelle ne possède pas en général les caractéristiques nécessaires pour la production du verre, parce qu'elle forme des minéraux complexes avec d'autres oxydes comme le fer (Fe_2O_3), le rutile (TiO_2) et les argiles (Al_2O_3), ce qui influe sur la qualité du verre. Pour cela on doit respecter les caractéristiques strictes de pureté et de granulométrie imposés par ces deux industries, et cela est réalisable par des traitements minéralurgiques du sable, par son enrichissement et calibration, afin qu'il puisse être utilisé par l'industrie de verre et photovoltaïque.

L'Algérie possède une importante réserve naturelle de silice. Malgré cette richesse, l'utilisation des sables siliceux en Algérie reste limitée suite à la qualité du matériau renfermant des inclusions minérales nocives. C'est le cas du gisement de Sidi Bou-Ali où la présence d'impureté notamment l'oxyde de fer limite industriellement l'utilisation du sable siliceux dans des nobles domaines tels que la production du verre de qualité.

Cette étude présente une démarche visant à améliorer la qualité du sable siliceux tout en diminuant sa teneur en fer et en augmentant sa teneur en silice pour obtenir un sable siliceux de haute pureté répondant aux besoins de la production de verre et de photovoltaïque.

Pour se faire quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et des conclusions sont développés et ce pour atteindre les objectifs attendus.

Le premier chapitre a fait l'objet d'une appréciation des conditions géologiques du gisement du sable siliceux de Sidi Bou-Ali-Chélif, à savoir la stratigraphie du gisement, la topographie et la minéralisation.

Le deuxième chapitre porte sur l'élaboration des verres et la fabrication des cellules photovoltaïques.

Le troisième chapitre présente des généralités sur les méthodes de séparation.

Le dernier chapitre de ces travaux de recherche s'articule autour des expériences réalisées par séparation magnétique et flottation en vue de réduire les quantités d'inclusions ferrifères et d'argile dans la matière initiale pour avoir un produit répondant aux normes strictes de l'industrie de verre et photovoltaïque .

Chapitre 01 :

Présentation de la zone d'étude

Introduction

La zone du développement des sables siliceux de Sidi Bou-Ali a été mise en évidence en 1975 à l'issue des travaux de la SONAREM qui consistaient en recherches régionales dans le nord-ouest d'Algérie.

La prospection détaillée des sables quartzeux du gisement de Sidi Bou-Ali a été réalisée conformément à la tâche assignée par le département de prospection et d'évaluation de l'EREM, et cette vertu de la commande de la direction générale de l'ENOF.

Le rapport géologique établi à la suite de ces études contenait les recommandations d'entreprendre les travaux spécialisés en vue de dégager le gisement de sable verre dans la manifestation de Sidi Bou-Ali.

Les travaux de prospection-évaluation exécutés ont constitué la seconde étape de la mise en évidence du gisement. A cette étape, la manifestation de sable de Sidi Bou-Ali a fait objet d'étude comprenant un grand volume d'itinéraires de recherches et de tranchées. Tout ceci a permis de procéder à une estimation expéditive des réserves de sable dans le secteur de Sidi Bou-Ali qui ont été évaluées à 9.8 millions de tonnes.

1. Situation géographique

Le gisement de sable siliceux de Sidi Bou-Ali est situé à 8 km au NE d'Ouled-Fares et à 13 km au nord d'Ech-Chélif.

La station de chemin de fer la plus proche est à 15 km (Ech-Chélif) ; le port le plus proche est celui de Ténès, situé à 35km plus au nord. Le gisement est relié avec le port et la station par une route chaussée. A 10 km au sud du gisement passe l'oued Chélif à cours d'eau permanent. [1]

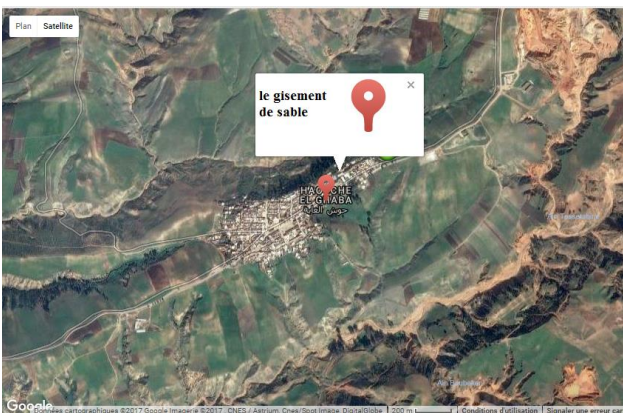


Figure 1 : situation géographique du gisement.



Figure 2 : carrière de Sidi Bou-Ali.

1. Topographie

Le gisement se localise dans les limites d'une colline qui est bien exprimée en relief et bornée de trois parts par des ravins bien profonds. La dénivellation relative de la surface y atteint 80m, les cotes absolues étant distribuées entre 340m et 419m.

La surface de la colline suit la pente générale qui descend du NE au SW. En plan, le gisement présente un polygone irrégulier qui s'étend du NE au SW, étant disposé sur les terres labourables d'état.

Le gisement est donc situé dans une région agricole. Les coordonnées en système Lambert sont :

375 050-375 950

332090-333 060

Les conditions de gisement de la substance utile favorables à l'exploitation à ciel ouvert. [2]

2. Cadre géologique

A. Mur de l'assise sablonneuse

Les roches les plus anciennes qui affleurent à la surface dans la région du gisement, sont présentées par les grès quartzeux gris, gris-jaunâtres et brun jaunâtres, grains très dures et compactes. D'après de nombreux restes de débris de coquilles qu'ils contiennent, ces grès ont été datés du pliocène.

Leur ciment est constitué de matière calcaro-argileuse. Ces grès affleurent dans le fond de l'ouest profond situé au NW du gisement. Ils s'étendent en direction N 270° à 300°E ; dans les affleurements, leur épaisseur apparente dépasse parfois 5m. Les grès sont recouverts par l'assise de sable.

B. Toit de l'assise sablonneuse

Des dépôts du niveau inférieur du villafranchien(VB) présentés par une assise d'argile calcaire compacte de différentes teintes grises comportant une partie inférieure formée par des argiles gris foncés et noires et d'une partie supérieure où on note des intercalations de sable gris et gris-jaunâtre.

C. Assise sablonneuse

Formée par des sables d'origine marine, datés du pliocène, ces sables ont été classés en 3 variétés géologiques (clairs, jaunes et bruns), séparés par des intercalations argileuses.

La coloration des sables est due généralement à la quantité d'hydroxyde de fer qu'ils contiennent, et partiellement aussi à la matière argileuse. [3]

3. Historique des travaux

La prospection du gisement de Sidi Bou-Ali comprenait les types de travaux suivants : itinéraires de recherche, coupes géologiques des affleurements les plus intéressants et continus, forage mécanique tranchées, puits échantillonnage.

Les travaux réalisés ont permis de déterminer la structure géologique et les paramètres du gisement et d'étudier la qualité de la substance utile jusqu'à la profondeur d'investigation.

Le principal type des travaux de prospection dans le gisement a été représenté par le forage. Vu que l'assise productive présentant les conditions géotechniques et minières favorables à l'exploitation a une forme allongée en plan, les sondages de prospection ont été implantés en profils orientés en travers du corps de substance utile.

Le gisement a été exploré par 23 sondages dont 21 dans le contour de calcul des réserves. Deux sondages ont été réalisés à l'étape de prospection-évaluation en vue de déterminer la direction du développement des sables à l'ouest du gisement. Le volume total du forage est égal à 916 m dont 640 m réalisés à l'étape de prospection détaillée.

Le forage a été exécuté avec l'installation SB21 D-150-ZJV, par la méthode de percussion, la capacité technologique de la foreuse a permis d'enfoncer les sondages jusqu'à la profondeur de 50 m ou jusqu'à la première intercalation de grès rencontrée dans l'assise sablonneuse.

Pour dresser une coupe géologique et découper les sables à structure intacte, 4 tranchées ont été creusées sur les abrupts de l'oued. Tous les ouvrages ont été soumis à l'échantillonnage.

Dans les tranchées, l'échantillonnage a été fait dans chaque variété lithologique (les trois principales couleurs du sable : blanc (gris), jaune, brun (rouge)).

A l'étape de prospection détaillée, les topographes de l'ENOF et de l'E.RE.M ont réalisé le levé topographique de la surface de gisement au 1 :2000 et à l'équidistance graphique de 1 m. La surface relevée est égale à 0.41 km². Les coordonnées sont présentées en système LAMBERT ; les altitudes, en système méditerranéen. [4]

4. Aspect climatologique :

Un climat tempéré chaud. Les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. En moyenne la température est de 17.5 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 469 mm.

Le mois le plus sec est celui de Juillet avec seulement 2 mm Avec une moyenne de 71 mm, c'est le mois de Décembre qui enregistre le plus haut taux de précipitations. Avec une température moyenne de 27.4 °C, le mois d'Aout est le plus chaud de l'année. Avec une température moyenne

de 9.3 °C, le mois de Janvier est le plus froid de l'année. La variation des précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 69 mm. Une différence de 18.1 °C existe entre la température la plus basse et la plus élevée sur toute l'année. [5]

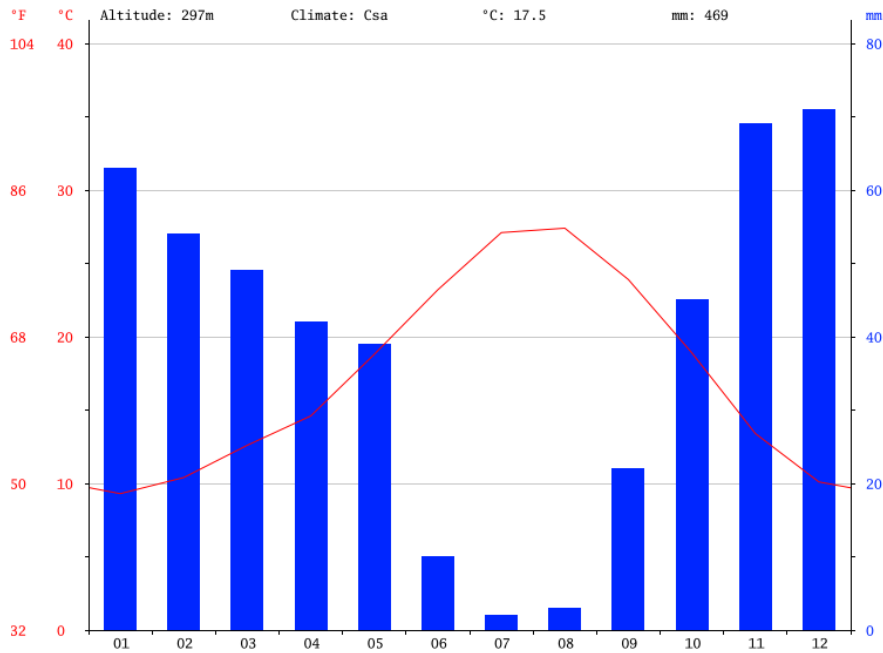


Figure 3 : diagramme climatologique.

5. Hydrogéologie

L'hydrogéologie du gisement présente les conditions favorables à l'exploitation, les réserves de la substance utile n'étant pas inondées. Les précipitations atmosphériques ne provoquent pas de difficultés, car elles s'infiltrent aux niveaux inférieurs. A 10 km au sud du gisement passe l'oued Chélif à cours d'eau permanent. [6]

6. Minéralogie

Le sable du gisement est caractérisé par une minéralogie régulière. L'analyse minéralogique faite sur La fraction lourde et légère a donné la composition moyenne des sables du gisement suivante :

A. La fraction légère

La fraction légère représente plus de 99.9% de la masse totale, constituée principalement par le quartz à 99% associés à des grains de feldspath et de carbonates.

La plupart des grains de quartz aux formes arrondies et sub-arrondies sont couverts d'une pellicule brun jaunâtre plus ou moins épaisse d'hydroxydes de fer et présentant des microfissures remplies d'hydroxyde de fer.

B. La fraction lourde

Les minéraux de la fraction lourde constituent moins de 0.1% de la masse totale du sable, composée dans sa majorité en minéraux faiblement magnétiques. Parmi les minéraux de cette fraction, les plus fréquents sont l'hématite, le rutile, la tourmaline. Dans quelques grains rares, on note parfois, l'ilménite, le grenat.

7. Les réserves géologiques

Le calcul des réserves a été exécuté par la méthode de moyenne arithmétique par blocs géologiques. Les dimensions des blocs ont été déterminées en fonction de la densité de réseau de prospection, compte tenu de la structure géologique.

Les réserves exploitables sont estimées à 9.8 M de T qui se répartissent comme suit :

- Sable blanc et gris : 3.1 M de T.
- Sable jaune : 3.8 M de T.
- Sable brun : 2.4 M de T. [7]

8. Conclusion

Le gisement de SIDI BOU-ALI est aménagé pour la mise en valeur. Les réserves des sables quartzeux prospectées en catégories commerciales constituent 9.9 millions de tonnes. Les réserves de catégorie B (3.1 mln de t) sont mises en évidence dans le secteur le plus avantageux économiquement qui doit être exploité en première priorité.

Les sables blancs font plus de 40% des réserves totales de catégorie B. La qualité des sables blancs dépasse de loin celle des sables jaunes et bruns. De plus, ils sont caractérisés par une meilleure capacité d'enrichissement.

Les sables blancs ne peuvent pas être utilisés en leur état naturel comme matière première pour la verrerie, d'où la nécessité d'élaborer un schéma technologique d'enrichissement de sable qui permet l'utilisation des sables enrichies dans plusieurs domaines de l'économie nationale.

Chapitre II :

Elaboration du verre et des panneaux photovoltaïques

Introduction

La silice, sous forme de sables siliceux de haute pureté, représente un composant principal utilisé dans de diverses applications telles que la fabrication des verres, les céramiques, les fonderies et même pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

Elle est utilisée principalement dans le domaine de la verrerie. Celle-ci représente une activité industrielle de premier ordre sur le plan économique, avec des technologies d'élaboration de plus en plus complexes, depuis la fabrication de verres creux, dont les caractéristiques s'améliorent sans cesse, à celle des verres plats et des verres technologiques à haute performance tels que les panneaux solaires.

1. Le sable siliceux

Toute construction et tout ouvrage de travaux publics nécessitent pour leur réalisation, outre le ciment, les agrégats, et l'eau, du sable en proportion adaptée, selon l'ouvrage envisagé.

Selon sa teneur en silice, le sable est utilisé dans d'autres domaines tels que la verrerie, la fonderie, etc... Qu'on appelle sable siliceux ou sable industriel.

1.1. Définition

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meubles n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5mm.

Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.

Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées.

La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice dépassant 98 %, un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis : sont appelés sables siliceux ou sables industriels.

1.2. Production et réserves mondiales

La production mondiale de sable siliceux pour l'industrie est de l'ordre de 120 Mt/an, est dominée par les USA (24%), les Pays-Bas (20%), la France, l'Allemagne et l'Autriche produisant environ 5% chacun. Une trentaine de pays ont une production supérieure à 1 Mt/an. Les réserves mondiales sont importantes et représentent plus d'un siècle au rythme de production actuelle.

1.3. Le sable siliceux en Algérie

On trouve en Algérie des gisements importants de matériaux siliceux, notamment dans l'ouest du pays, où ils sont liés aux dépôts de sables éoliens. Ce sont surtout ces gisements qui sont exploités pour la production du verre.

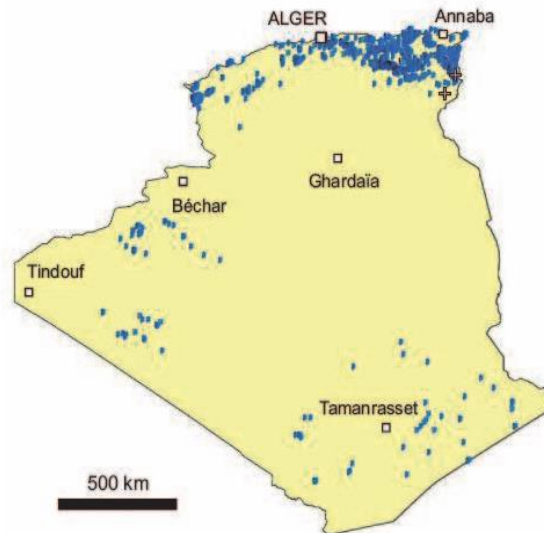


Figure 4 : répartition des gisements de Silice en Algérie.

1.3.1. Les réserves et ressources géologiques

Dans la partie nord du pays, les réserves géologiques connues sont de plus de 150 Mt de roches siliceuses pures à teneur en silice élevée (> 97 % SiO₂) et plus de 100 Mt de roches siliceuses industrielles à plus de 90 % de SiO₂.

Des ressources potentielles en matériaux siliceux très importantes grâce à leur répartition, leur extension et à la diversité des gisements de roches siliceuses sous forme de sable, grès quartziques, quartzites, filons de quartz et en contextes de bassins sédimentaires et de zones de socle.

1.3.2. La production algérienne

La production de sable siliceux, en Algérie, est assurée par 12 sablières, dont 6 relèvent du secteur privé, réparties sur 08 wilayas.

En 2008, la production a atteint 498 035 tonnes. Le secteur privé domine cette activité avec 341 048 tonnes, soit un taux de 68,4%.

Depuis l'année 2000, la tendance de la production de sable siliceux est à la hausse ; de 230 013 tonnes produites en 2000, a plus que doublée en 2008 en atteignant 498 035 tonnes.

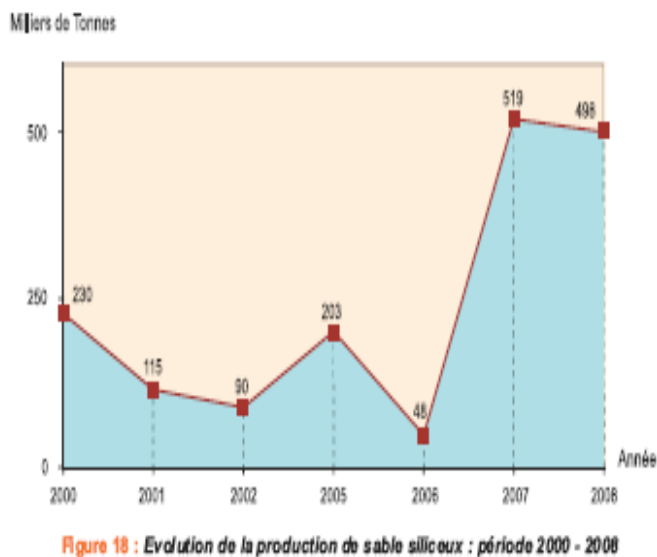


Figure 5 : évolution de la production de sable siliceux.

2. LA SILICE

2.1. Définition

La silice ou oxyde de silicium, de formule SiO_2 : composée de deux éléments : le silicium (Si) et l'oxygène (O), est le minéral le plus abondant de l'écorce terrestre, elle constitue 12% (en masse) de la lithosphère. La silice est le composant majeur des roches cristallines, et le constituant essentiel des roches détritiques.

Combinée avec d'autres éléments tels que l'aluminium, le magnésium, le fer, le calcium, le sodium, le potassium, la silice forme un groupe de minéraux appelés silicates, qui constituent la majeure partie de la croûte terrestre.

2.2. Etat naturel de la silice

La silice se trouve dans la nature sous forme compacte (galets, quartz filonien par exemple), ou sous forme de sable plus ou moins fin. On l'obtient aussi industriellement, sous forme pulvérulente. Elle se rencontre sous plusieurs formes, généralement cristallines, mais aussi amorphes suite à leur genèse par précipitation ou fossilisation.

La silice cristalline comprend elle-même une dizaine d'espèces cristallines polymorphes. Le quartz, qui est le deuxième minéral le plus répandu de la croûte terrestre, constitue de loin la forme la plus connue, que l'on trouve dans pratiquement toutes les roches, ignées, métamorphiques et sédimentaires.

2.3. Caractéristiques de la silice :

- Formule : SiO_2
- Température de fusion 1650°C .
- Température d'ébullition : 2230°C .
- Densité : 2,2.
- Dureté : 7.
- Coefficient de dilatation thermique très faible
- PH : neutre.
- Inertie chimique vis-à-vis de la plupart des acides.
- pouvoir isolant élevé.
- propriétés piézoélectriques et optiques pour le quartz ultras-pur.

2.4. Description de la molécule de silice :

Chaque atome de silicium est placé au centre d'un tétraèdre et lié à quatre atomes d'oxygène. Ces tétraèdres sont liés ensemble par le sommet de telle sorte que chaque atome d'oxygène est lié à deux atomes de silicium. [2]

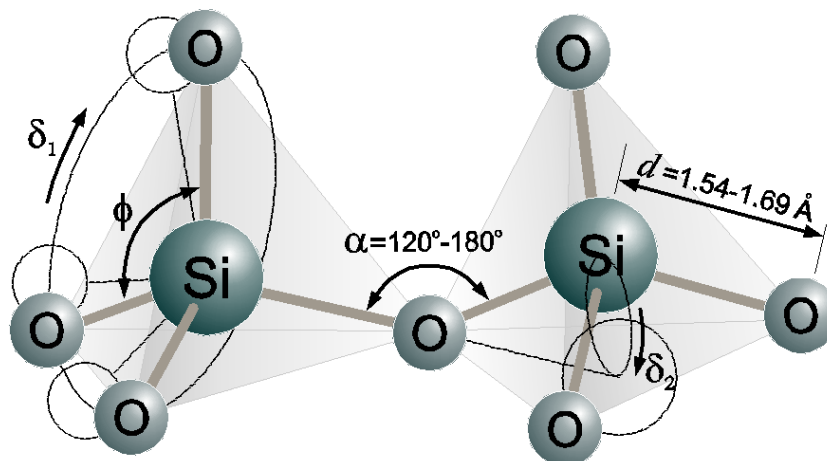


Figure 6 : description de la molécule de silice.

2.5. Principales utilisations industrielles

Les principales filières industrielles utilisant la silice sont :

- la verrerie (verres creux, verres plats, verres techniques pour optique, ampoules, fibre de verre, cristallerie) ;
- la fonderie (réalisation de moules de toutes tailles pour couler les métaux) ;
- l'électrometallurgie (élaboration du silicium métal, du Ferro-silicium, du silico-manganèse, du carbure de silicium et autres alliages), de réfractaires, d'abrasifs ... ;
- les céramiques fines, céramiques techniques, composants électriques, céramiques sanitaires... ;
- les dérivés chimiques (silice colloïdale, gel de silice, silice précipitée, silicones...) ;
- les charges minérales (pour plastiques, peintures, résines, caoutchouc...) sous forme de silice naturelle ou de silice précipitée.

3. La silice matière première pour le verre

La verrerie et la fonderie utilisent plus de 80 % de sable siliceux extraits à travers le monde. Pour l'industrie de verre, il n'y a pas de produit de substitution aux sables siliceux industriels, la teneur en silice doit être supérieure à 99 % , dont la silice est le composant principal de presque tous les types de verres pour les récipients (bouteilles et pots), le verre plat (vitres, miroirs, pare-brise), la vaisselle (verres, récipients, carafes), le verre d'éclairage (ampoules, tubes fluorescents), les écrans de TV et d'ordinateurs (y compris les écrans plats), le verre de décoration, le verre optique, etc..

3.1. Les spécifications de sable siliceux utilisé pour la verrerie

L'industrie du verre a établi différentes spécifications pour le sable de silice destiné à sept types de verre. Les exigences pour ces qualités de sable sont énoncées dans la norme BS 2975 :1988, méthodes standards britanniques pour l'échantillonnage et l'analyse de sable verrerie (BS 2975) qui couvre les applications suivantes :

- Verre optique et ophtalmique Grade A
- Table et de verre cristal de catégorie B
- verre borosilicate de grade C
- Incolore (ou clair) verre d'emballage Catégorie D
- Verre plat grade E
- Coloré verre d'emballage catégorie F
- Verre pour fibres isolantes année G

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

| Domaine d'utilisation | Taille des particules (μm) | Composition chimique |
|-----------------------------|---|---|
| Verre de qualité | 100-600 | SiO ₂ 98,5 à 99 %, Al ₂ O ₃ 0,2 à 1,6 %, Fe ₂ O ₃ (< 0,18 % verre récipient) et Fe ₂ O ₃ < 0,04 % verre plat |
| verre de première qualité | | SiO ₂ 99,8 %, Al ₂ O ₃ < 0,1 %, Fe ₂ O ₃ < 0,02% |
| Verre optique | | Fe ₂ O ₃ < 10 ppm |
| Fibres optique | | Fe ₂ O ₃ < 1 ppm |
| céramique de qualité | < 75 | SiO ₂ 97,5 %, Al ₂ O ₃ < 0,55 %, Fe ₂ O ₃ < 0,2 % |
| céramique prime plus élevée | < 45 | Fe ₂ O ₃ < 100 ppm |
| Réfractaires | | SiO ₂ > 97 %, Al ₂ O ₃ < 0,1%, Fe ₂ O ₃ < 0,2%, alcalis < 0,3 % |
| Fonderie de qualité | | SiO ₂ 98,6 à 99,6 %, Al ₂ O ₃ 0,08 à 0,5 %, Fe ₂ O ₃ < 0,03 % |

Tableau 1 : spécifications de sable de silice pour différents usages. [4]

3.2. Élaboration du verre

Parmi les nombreux domaines d'utilisation industrielle de la silice en Algérie, ce sont ceux du verre plat ou coulé (bâtiment et automobile) et du verre creux qui présentent actuellement un fort potentiel de développement.

Le mot « verre » représente à la fois une matière, à vocation artistique ou technologique, et des objets, articles ménagers ou composants pour l'industrie.

Le verre fait partie de notre vie quotidienne. Ses applications, innombrables, sont en perpétuelle évolution.

3.2.1. Définition

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

3.2.2. Fabrication du verre

L'élaboration du verre est l'ensemble des opérations au cours desquelles le mélange vitrifiable des matières premières est transformé en une masse liquide homogène de viscosité convenable pour être ensuite mise en forme, pour fabriquer un verre ayant des propriétés spécifiques.

Pour fabriquer un verre, on part d'un ensemble de matières premières constitué de roches naturelles (sable, calcaire) et de produits chimiques industriels (carbonate de sodium), pris en proportions définies. La préparation des matières premières nécessite une grande rigueur car les composants doivent être mélangés pour devenir parfaitement homogènes jusque dans la plus petite proportion.

Ce mélange hétérogène vitrifiable, appelé en langage verrier « composition », est porté à la fusion dans un four approprié. Mise à part les corps volatils qui s'échappent au cours de cette opération, tous les constituants du mélange initial fondent et forment un liquide homogène appelé verre fondu ou fonte qui vitrifie par refroidissement.

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.

Mise à part les modifications que peuvent apporter certains de ces traitements spécifiques, les propriétés du verre sont essentiellement fixées dès le départ par la nature et les proportions des constituants de la « composition ». Elles déterminent la qualité du verre et conditionnent les processus d'élaboration et de mise en forme.

3.2.3. Structure des verres

Dans tous les solides, ainsi que les verres, l'arrangement existant entre les éléments constituants détermine sa structure. Le verre, à l'état pur, est du bioxyde de silicium.

La silice (SiO_2) comme élément structural de base forme un tétraèdre de 4 anions O^{2-} avec un cation Si^{4+} en son centre, par définition, chaque liaison entre deux tétraèdres SiO_4 est effectuée par un atome d'oxygène qui, dans cette configuration est appelé oxygène pontant.

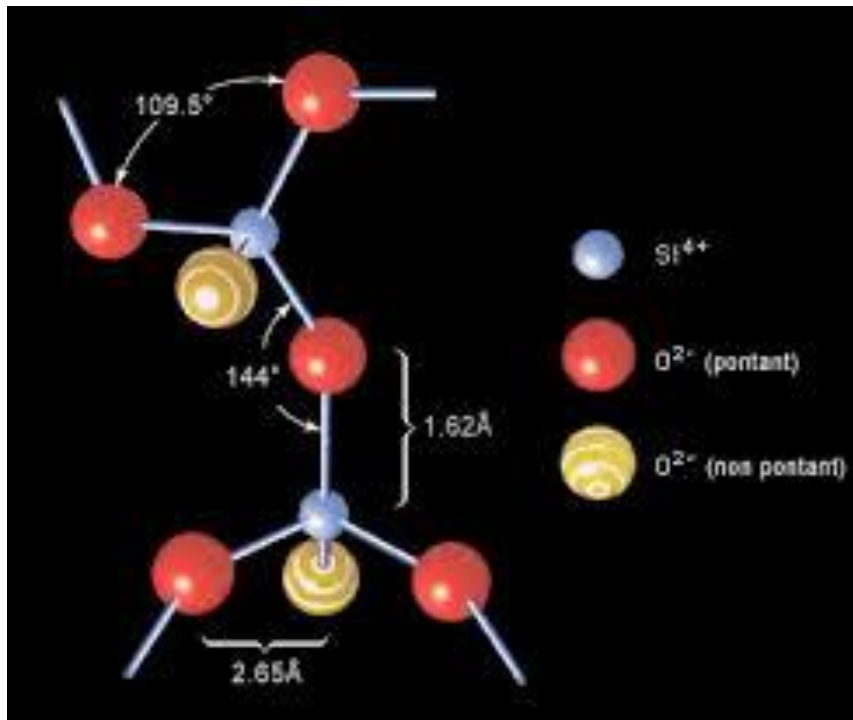


Figure 6 : Structure du verre.

3.2.4. Composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec l'oxygène (SiO₂) 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. Les stabilisants, qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

3.2.4.1. Oxydes formateurs (les vitrifiant)

– La silice (dioxyde de silicium SiO₂) : C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre.

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.

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

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

3.2.4.2. Oxydes modificateurs ou les fondants (oxydes alcalins)

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

3.2.4.3. 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

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

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.

3.2.4.4. 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 [5].

3.2.5. Différents types de verre

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

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

3.2.5.1. Verres silico-sodo calcique

Ils sont constitués en moyenne de 71% de Silice, 14% de soude et 10% de chaux. C'est le plus commun des verres. Il a une bonne stabilité chimique, mais il est sensible aux chocs thermiques. Il est utilisé pour la fabrication des verres plats et creux, des ampoules électriques et en bouteille Température de ramollissement pour 70% de silice = 700°C. Son coefficient de dilatation est élevé : 86×10^{-7} de 0 à 300° C.

3.2.5.2. Verres borosilicates

Ces verres sont composés de 80% de silice, 13% de bore anhydre, 4% de soude et 3% d'alumine. Le plus connu est le Pyrex qui possède une bonne résistance aux chocs thermiques. Les oxydes de bore augmentent la stabilité thermique, la résistance aux chocs thermiques, et aux agents chimiques externes. Ces propriétés permettent d'utiliser ce type de verre comme ustensiles de cuisine, de laboratoire et comme récipient pharmaceutique.

Les verres borosilicatés sont aussi utilisés dans l'industrie nucléaire pour la vitrification des déchets radioactifs. Le procédé consiste à confiner et solidifier dans une matrice de verre les déchets liquides de haute activité radioactive.

3.2.5.3. Verres au plomb

Ils sont constitués en moyenne de 62 % SiO₂, 21 % oxyde de plomb(PbO) et 7 % de potasse. L'ajout de 10% d'oxyde de plomb donne un indice de réfraction très élevé au verre. Le nom cristal de verre est donné uniquement au verre au plomb à plus de 24 % de PbO. Ces verres sont utilisés en optique (lentilles et objectifs d'appareils optiques), en cristallerie et verrerie d'art, dans la réalisation des téléviseurs et en électronique. Si les teneurs en plomb dépassent 60 %, le verre peut être utilisé comme protection contre les rayons X.

3.2.5.4. Verre de silice

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

3.2.5.5. Vitrocéramiques (ou vitro cristallins)

Ils sont fabriqués avec au moins 75% de silice, 15% d'alumine, 5% d'oxyde de titane et 3% d'oxyde de lithium. C'est des dérivés du verre dont la fabrication est basée sur le principe de dévitrification. La transformation en céramique semi cristalline s'obtient par un traitement thermique appelé « céramisation » qui permet d'obtenir un début de cristallisation. La température de cristallisation est à environ 800° et la cristallisation dure environ 2 heures.

3.2.6. Propriétés du verre

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

3.2.6.1. Propriétés physiques

- Transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.
- Dureté : Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de 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.

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

– Imperméabilité : Elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

3.2.6.2. Propriétés thermiques

– Dilatation : C'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre métal. Ce coefficient varie selon la composition.

– Conductivité : Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre) ; on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille, Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C. Il est ininflammable et incombustible.

3.2.6.3. Propriétés chimiques

– L'action de l'eau : L'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.

– L'action de l'air : Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

– L'action de la lumière : Exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.

– L'action des acides : Ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué, le verre peut donc être dissout.

3.2.7. État physique du verre

3.2.7.1. 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.

3.2.7.2. 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.

3.2.7.3. 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. Dans le sens inverse, en se refroidissant, la matière est de moins en moins visqueuse, elle redevient plastique, 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. [6]

4. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque

Avec la prise de conscience du réchauffement climatique par effet de serre, l'utilisation d'énergie solaire, énergie propre et inépuisable, s'est accrue et avec elle la production des cellules solaires.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Les panneaux solaires photovoltaïques fonctionnent grâce à des matériaux dits semi-conducteurs. Ceux-ci absorbent la lumière du soleil et la transforment en énergie électrique.

Connu par ses propriétés semi-conductrices, le silicium s'est imposé comme le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque et c'est le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui dans les circuits intégrés.

4.1. L'industrie photovoltaïque

La précarité des énergies fossiles et leurs effets sur l'environnement et la santé ont contribué à l'essor de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque laisse une faible empreinte écologique. De plus, elle adhère favorablement aux principes du développement durable, en contribuant entre autres à l'économie verte, avec 820 000 emplois estimés dans le monde en 2011.

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

La croissance exponentielle de la consommation d'énergie par l'homme au cours du 20ème siècle, a mis en évidence l'intérêt de l'utilisation de l'énergie solaire. L'effet photovoltaïque fut donc découvert en 1839 et représentait désormais une réalité scientifique.

Depuis sa création, l'énergie solaire a beaucoup lutté pour accroître l'efficacité et l'accessibilité de sa conversion et pour être aussi compétitif que les autres formes de production d'énergie.

Actuellement le marché du photovoltaïque prend de l'ampleur : la production de cellules photovoltaïques s'établit à 3,8 GWc pour l'année 2007 (figure 7). La croissance de la production est d'environ 40% par rapport à 2006, la production mondiale cumulée est de 12,4GWc. Le photovoltaïque apparaît comme une source d'énergie prometteuse disponible pour tous en de grande quantité. D'autres experts pensent que l'énergie photovoltaïque deviendra compétitive aux alentours de 2020-2030 suivant l'ensoleillement des régions.

Mais pour atteindre un tel objectif, la garantie de l'approvisionnement en matières premières (silicium, indium, sélénium, tellure, cadmium...) est indispensable.

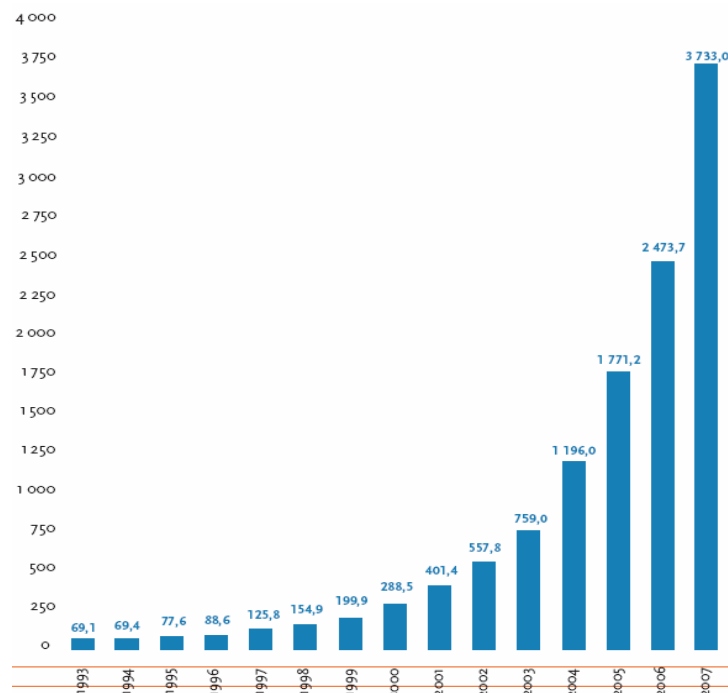


Figure 7: Evolution de la puissance photovoltaïque mondiale installée par an.

4.2. Demande en silicium de qualité photovoltaïque

Les cellules solaires sont des dispositifs à base de semi-conducteurs qui convertissent la lumière solaire en énergie électrique en utilisant « l'effet photovoltaïque ».

Actuellement les matériaux utilisés se distinguent suivant quatre branches principales :

- le silicium cristallin
- les couches minces
- les composants III-V (colonne 3 et 5 de la classification périodique)
- les concepts innovants (cellules organiques, cellules à colorant...)

Le silicium cristallin reste le matériau principal du photovoltaïque et malgré les innovations attendues dans les technologies couches minces, on considère qu'en 2030, le silicium cristallin représentera encore 80% des cellules photovoltaïques produites.

Ses caractéristiques spécifiques ainsi que son abondance (deuxième élément de la croûte terrestre 28%), en font l'élément par excellence de la microélectronique et du photovoltaïque. La croissance continue et soutenue de l'industrie photovoltaïque impose une production plus importante de silicium de qualité photovoltaïque.

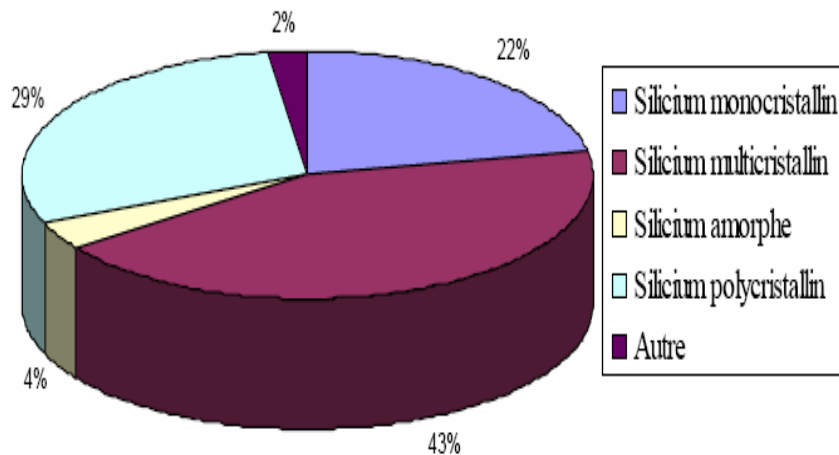


Figure 8: répartition en pourcentage de différentes filières de produits photovoltaïques produites en 2015.

4.3. Le silicium

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes, de symbole Si et de numéro atomique 14, On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres. Utilisé depuis longtemps sous forme d'oxyde de silicium (SiO_2) comme composant essentiel du verre, du ciment ou dans la fonderie, le silicium pur est aujourd'hui utilisé pour ses propriétés semi-conductrices dans l'industrie de l'électronique (puces électroniques) et pour la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques.

Le silicium est obtenu par réduction et purification de la silice, contenue dans le sable siliceux ou le quartz, le silicium est obtenu en réduisant la silice (le sable, SiO_2) par le carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté (les semi-conducteurs).

Actuellement les technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur largeur de bande interdite moyenne s'adapte bien aux contraintes imposées par les applications à des températures normales, soit de 0 à 100°C. A de plus hautes températures, la performance des technologies sur le silicium se dégrade progressivement. [7]

4.4. La fabrication des cellules photovoltaïques

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

- Les cellules dites cristallines (poly et mono)
- Les cellules dites couches minces

La fabrication d'un panneau photovoltaïque suit différentes étapes. Il s'agit dans un premier temps d'élaborer du Silicium de grade solaire utilisable pour former des plaques de Silicium.

Vient ensuite la fabrication des cellules en elles-mêmes, leur assemblage en modules et la composition d'une installation finale avec sa structure porteuse, ses différents composants électriques et électroniques.

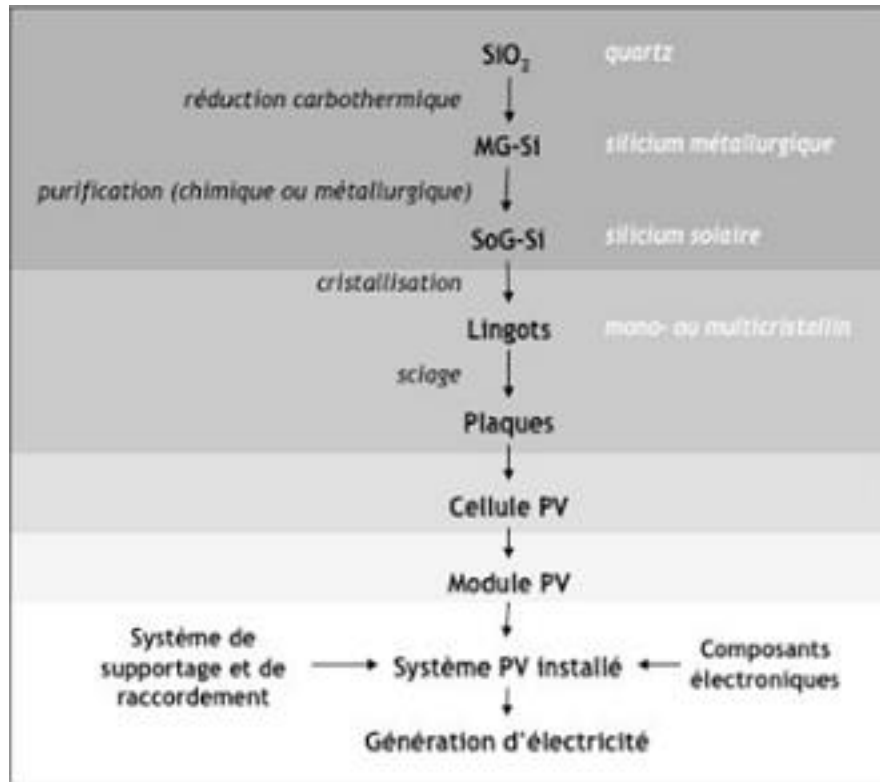


Figure 9 : chaîne de production d'un PV.

4.4.1. Etapes de raffinage du Silicium

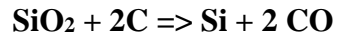
Le Silicium est tiré de la Silice, que l'on trouve abondamment dans la nature, dans le quartz ou dans le sable. Le procédé le plus répandu consiste à extraire le silicium du quartz pour créer du Silicium métallurgique qui sera ensuite purifié pour donner du Silicium de grade solaire. Ce dernier est par la suite coulé en lingots desquels sont tirées les plaques de Silicium avec lesquelles sont faites les cellules.

4.4.1.1. De la Silice au Silicium Métallurgique

Industriellement, le silicium Si-MG est produit par réduction carbothermique de la silice SiO_2 (introduite sous forme de galets ou de morceaux de quartz filonien) en mélange avec des réducteurs, tels que le bois, le charbon de bois, la houille ou le coke, dans un four à arc électrique où plongent des électrodes de graphite, qui apportent la puissance de 30 MW et la température requises.

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

Il est donc extrait de la silice (SiO₂) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :



Il s'agit en fait d'extraire l'oxygène de la Silice (SiO₂) en chauffant le quartz avec des espèces contenant du carbone comme la houille par exemple. Ces espèces carbonées sous l'effet de la chaleur vont se combiner avec l'oxygène du Quartz pour former du monoxyde de carbone (CO) puis du dioxyde de carbone (CO₂). La chaleur nécessaire à la réaction est fournie par les arcs électriques créés par des électrodes contenues dans le fameux four. A la fin de ce processus on obtient du Silicium Métallurgique (MG Si) qui n'est pas encore exploitable pour la création de panneau solaire.

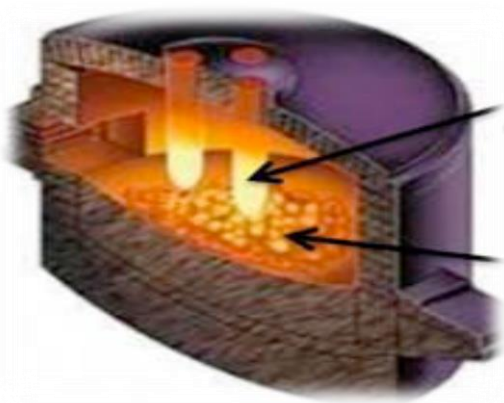


Figure 8 : four à arc.

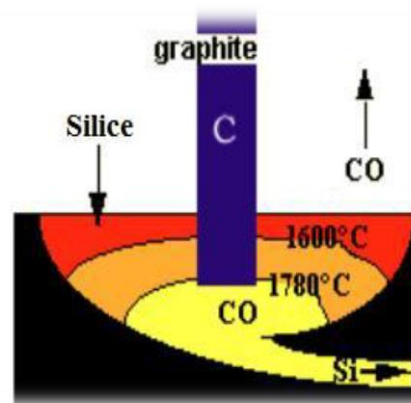


Figure 9 : réduction de la silice par le carbone.

4.4.1.2. Purification du Silicium Métallurgique

Il est nécessaire de purifier le Silicium métallurgique afin d'éliminer les impuretés qui endommagent la stabilité des cellules solaires dans le temps et obtenir un Silicium de grade solaire utilisable pour la fabrication des cellules. Cette purification peut se faire de différentes manières mais la voie chimique est la plus répandue.

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

On utilise en principe du Chlore du fait de la forte attraction des atomes de Silicium et des ions chlorures (Cl⁻). Ces composés sont purifiés ensuite par distillation et décomposition thermique.

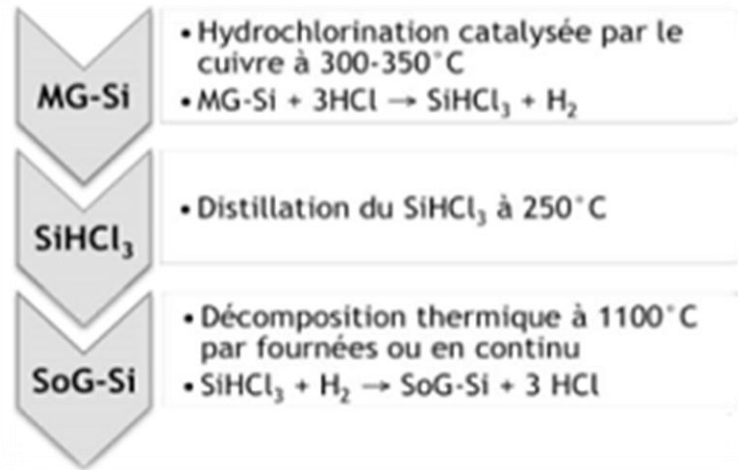


Figure 10: purification du silicium métallurgique.

4.4.2. Cristallisation et formation des plaques

Le Silicium solaire ou poly-cristallin obtenu lors de la précédente étape va être ensuite fondu et solidifié en lingots. C'est dans ces lingots que l'on découpe finalement les plaques de silicium qui serviront à fabriquer les cellules. En effet, c'est lorsque le silicium est en fusion que les produits dopants sont ajoutés afin qu'un courant électrique se forme au sein des cellules. C'est aussi lors de cette étape que se crée la distinction entre panneaux monocristallins et poly cristallins.

Le silicium monocristallin est constitué d'un seul cristal ; on procède à un étirage pour former un lingot cylindrique à partir d'un monocristal.

Le Silicium poly cristallin est quant à lui formé d'une mosaïque de cristaux obtenus par coulage dans une lingotière et par un refroidissement lent. [8]

Chapitre II : Elaboration de verre et des panneaux photovoltaïques

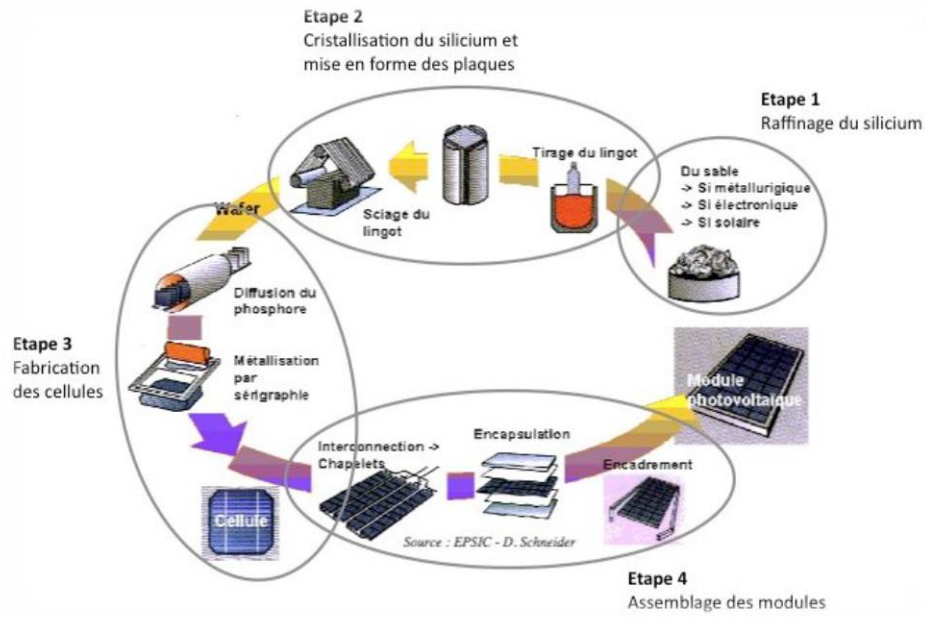


Figure 11: étapes de fabrication d'un module photovoltaïque.

Conclusion

Généralement la silice qui est le composant principal de presque tous les types de verres et la source de silicium, le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque, ne se trouve pas pure dans la nature, utilisée sous forme de sables siliceux de haute pureté dit sable industriel ou sable extra siliceux avec plus de 98 % de silice.

Les sables siliceux servent principalement aux industries du verre (50 %), de la fonderie (15 %) et du bâtiment (15 %). Outre la teneur en silice ce sable il a toujours des impuretés tel que le fer et l'alumine.

Les sables extraits de carrières ne sont pas utilisables en leur état naturel et doivent être traités pour augmenter la teneur en silice, réduire le contenu d'impuretés (matière organique, oxydes, argiles, autres minéraux) et obtenir un produit marchand correspondant aux normes des utilisateurs industriels (pour les verres blancs par exemple $\text{SiO}_2 > 99\%$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,03\%$).

Tout ça a provoqué les chercheurs dans ce domaine de trouver un processus de traitement ou de valorisation de ce minerai selon les exigences qualitatifs et quantitatifs pour des fins de l'industrie, et d'optimiser des méthodes de purification et traitement du sable pour objet d'éliminer ces impuretés.

Chapitre III :
Généralité sur les méthodes de séparation

Introduction

Le minerai brut extrait de la carrière ou de la mine subit plusieurs processus de préparation mécanique et de concentration pour produire un concentré de valeur économique. On entend par enrichissement du minerai l'ensemble de ces opérations qui permet de passer du minerai brut au minerai marchand tout en augmentant la teneur en minérale et en éliminant les impuretés.

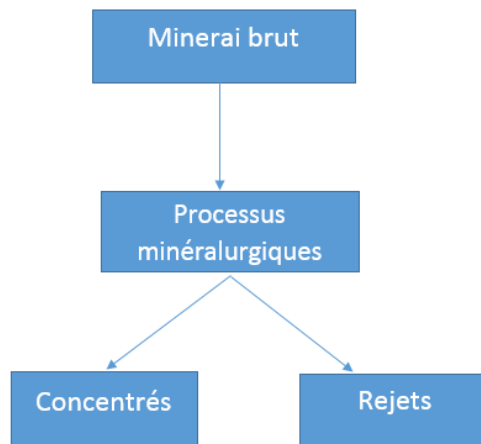


Figure 12: Schéma global des processus minéralurgique.

Un procédé de traitement minéralurgique comporte grossièrement deux étapes successives :

- la préparation mécanique (fragmentation), composée d'un concassage éventuellement suivi d'un broyage ; ces opérations peuvent s'effectuer en plusieurs étapes, avec des criblages intermédiaires visant selon le cas à éliminer une partie (stérile) du minerai ou à recycler vers l'amont les plus grosses particules ;
- la séparation proprement dite des phases minérales intéressantes et de la gangue (ou stérile) ; on peut utiliser des méthodes purement physiques (magnétiques, gravimétrique), physico-chimiques (flottation, lixiviation, etc.), biochimiques (action de bactéries), ou chimique (grillage, solubilité, etc.)

Ces procédés se basent sur les propriétés mécaniques, électromagnétiques, physico-chimiques et chimiques de ces minéraux.

Seules les méthodes de séparation magnétique et la flottation seront décrites dans les sections qui suivent.

1. Préparation mécanique du minerai

1.1. L'échantillonnage

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de minerai, qui permette de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du minerai, dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

Pour que la caractéristique mesurée soit la plus représentative possible du lot, que l'on veut contrôler, il est nécessaire d'être extrêmement rigoureux dans la réalisation du prélèvement, qu'il soit sur camion ou bien stocké.

Des règles précises sont à respecter, notamment :

- Prélever l'échantillon à plusieurs endroits (haut ou pied, avant ou en arrière du stock, dessus de benne de camion ...)
- Homogénéiser au préalable le lot à prélever avec un moyen approprié (pelle, godet de chargeur...).
- Effectuer au minimum 10 prises élémentaires (500 g à 1 kg chacune), réparties régulièrement sur l'ensemble du stock.
- Réunir ensuite l'ensemble des prises élémentaires pour homogénéisation et quartage avant toute réalisation d'essai.

En général, Le prélèvement des échantillons se pratique en deux temps :

- Prélèvement sur la mine, la carrière ou l'usine d'une quantité de minerai nettement plus grande, que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

1.1.1. Prélèvement dans le stock (échantillon global)

Lorsqu'un minerai est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas, tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

1.1.2. Echantillonnage en laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur (par division).

L'échantillon doit être séché en étuve à 105°C. [1]

1.1.3. Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle, ne nécessitant que très peu de matériel. La figure (13) détaille cette opération :

- étaler l'échantillon selon une forme circulaire régulière sur une feuille.
- à l'aide d'une petite pelle ou d'une lame de papier rigide, séparer l'échantillon verticalement en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres, en prenant garde à ce qu'un minimum de poudre demeure sur la feuille de base.
- Scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts identiques.
- Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée. Quant aux quarts 2 et 4, ils serviront de témoins.

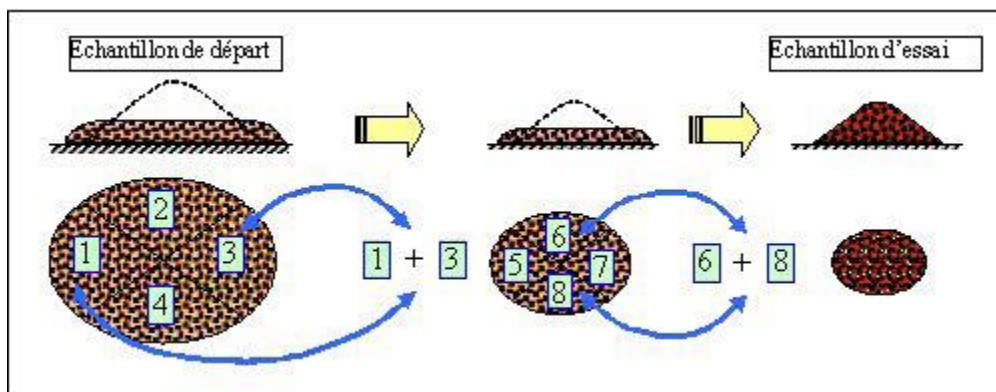


Figure 13: Opération de quartage.

1.1.4. Echantillonneur (diviseur)

Cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques.

Le procédé peut être résumé par la figure (14). Celle-ci permet de sélectionner une masse (M) à partir d'un prélèvement de masse 3 m. [2]

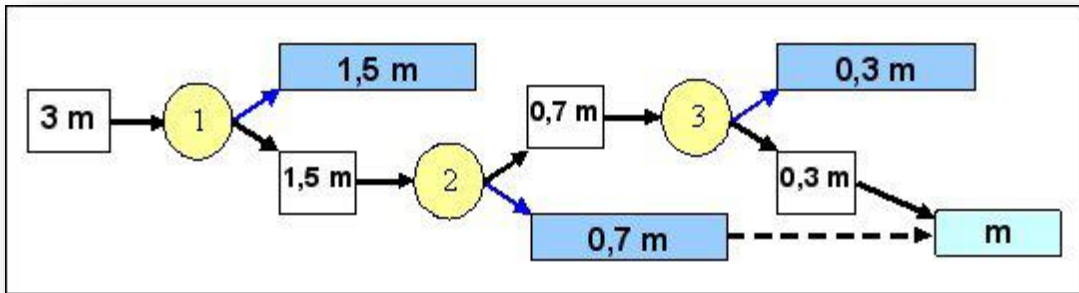


Figure 14: Schéma d'une opération de division en utilisant un échantillonneur.

1.2. L'Analyse granulométrique

On appelle « granulométrie » l'ensemble des propriétés caractérisant les dimensions, les proportions et la forme des particules constituant un lot de solides dispersés. Les dimensions des produits d'une opération de fragmentation peuvent être mesurés suivants plusieurs méthodes :

- La mesure par tamisage
- La mesure par sédimentation
- La mesure par microscope

1.2.1. Le tamisage

La mesure par tamisage s'effectue en faisant passer l'échantillon sur une série de tamis dont les ouvertures et le temps d'agitation mécanique sont normalisés. Le procédé peut être appliqué en voie sèche ou humide, cette dernière méthode permettant une meilleure appréciation de la distribution granulométrique des poudres fines ou légèrement humides. La limite courante du procédé est de 40 μ m.

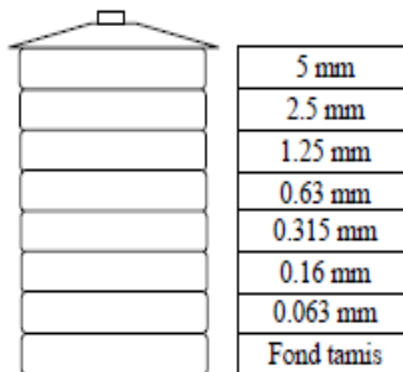


Figure 15: Colonne des tamis.

1.2.2. But de l'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de séparer les grains d'un minerai et de les classer par diamètre afin de connaître leurs distributions granulométrique. Le diamètre des mailles des tamis définit ces classes.

1.2.3. Description de l'essai

- 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 fines. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de minerai pendant le tamisage.
- Le minerai 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 minerai présente sur le tamis et son ouverture.
- 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 des 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 minerai pendant l'opération de tamisage n'excéder pas plus de 2 % du poids total de l'échantillon de départ.

1.3. La fragmentation des solides

La fragmentation des solides dans le cadre de l'enrichissement des minerais regroupe un ensemble de techniques ayant pour but de réduire, par action mécanique externe et parfois interne, un solide, de volume donné, en élément de volume plus petit. Elle a pour but de libérer, dans le matériau hétérogène que constitue généralement une roche, les éléments valorisables, des minéraux de la gangue, ou de déduire une matière minérale donnée à des dimensions dictées par l'utilisation.

1.3.1. La rupture des matériaux rocheux

Lors des opérations de fragmentation, les roches sont soumises à des forces qui suscitent dans le matériau des contraintes de compression, de traction ou de cisaillement. Ces contraintes conduisent à des déformations et à des ruptures. Le comportement des roches fait l'objet d'une discipline récente « la mécanique des roches ».

Les principaux facteurs pétrographiques d'une roche intervenant dans le phénomène de rupture sont essentiellement les suivants :

- Le degré d'altération et de fissuration
- Nature des minéraux constitutifs
- Forme et dimension de ces minéraux
- Hétérogénéité (répartition dans l'espace des minéraux). [4]

1.3.2. Le broyage

Le broyage est une opération consistant à diviser un solide, pour augmenter sa surface spécifique et donc sa réactivité.

En minéralurgie, le broyage se fait jusqu'à la maille de libération. La maille de libération d'un minéral est la taille au-dessous de laquelle une particule de minéral est parfaitement libérée, c'est-à-dire constituée uniquement de l'espèce minérale à valoriser.

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

1.3.3. But du broyage

L'objectif du broyage est de réduire les dimensions des particules afin d'atteindre la classe granulométrique ciblée, aussi l'augmentation des surfaces ou même la création de nouvelles surfaces spécifique des particules pour l'adsorption des réactifs chimiques utilisés lors de la séparation par flottation.

2. Attrition :

L'attrition est la méthode d'enrichissement la plus courante et économique pour l'enrichissement de sable. Elle permet le nettoyage des grains de quartz pour éliminer les pellicules des oxydes de fer et des argiles.

Les principaux paramètres qu'on peut les modifier lors de l'attrition sont :

- **La durée de l'attrition** : est un paramètre jouant un rôle majeur sur l'efficacité du procédé d'attrition.
- **La vitesse de rotation** : est un paramètre opératoire très important. C'est en grande partie ce dernier qui contrôle l'hydrodynamique des particules et les conditions de turbulence.

3. La séparation magnétique :

3.1. Les méthodes basées sur le magnétisme

Les techniques de séparation magnétique consistent à soumettre des grains de minerais à des forces magnétiques et mécaniques développées par un séparateur. Suivant leurs propriétés magnétiques, les différentes catégories minéralogiques possèdent des trajectoires caractéristiques de leur nature on obtient, de la sorte, des fractions extractibles de composition chimique et minéralogique particulière. Les trajectoires des grains résultants avant tout de l'interaction des forces mécaniques et des forces magnétiques.

D'une manière générale, il faut que, pour une fraction minéralogique du minerai, les forces magnétiques s'exercent sur les grains appartenant à cette fraction pour espérer leur extraction.

3.2. Critères de choix des appareils

Le choix d'un des séparateurs va être guidé par un certain nombre de critères communs aux différents types de traitements (disponibilité en énergie, en eau, débit de minerai sec, facilité d'entretien, approvisionnement de pièces d'usure, environnement technologique, etc.), mais surtout par trois critères :

- a) les propriétés magnétiques des minéraux

Les propriétés magnétiques vont guider l'utilisateur sur une des classes d'appareils disponibles :

- à basse intensité pour les matériaux fortement magnétiques (ferrimagnétiques et ferromagnétiques) ;
- à haute intensité ou à haut gradient (en relation étroite avec la granulométrie) pour les matériaux faiblement magnétiques (paramagnétiques).

Dans les cas d'associations minéralogiques complexes, où les deux types de substances coexistent, les séparations à basse et à haute intensité doivent être généralement envisagées.

- b) leur minéralogie

Suivant la minéralogie ou la texture il est souvent nécessaire de connaître avec une bonne précision la valeur des susceptibilités magnétiques des minéraux à traiter ou des grains mixtes.

Cette connaissance, tout en donnant des indications sur l'appareil à utiliser, peut également renseigner sur la qualité du produit fini (teneur et récupération). En effet, deux espèces minérales n'ayant pas un écart de susceptibilité magnétique suffisant ne pourront être séparées. Il en est de même pour des grains mixtes (magnétite-quartz par exemple) qui peuvent se retrouver suivant leurs tailles dans la fraction magnétique ou non magnétique, quelles que soient les conditions de séparation. Vouloir éliminer de tels éléments pour augmenter la teneur du concentré entraîne également une baisse de la récupération de métal par perte de particules fines riches. Le choix de la méthode ou de l'appareillage peut également être guidé par les objectifs à atteindre : qualité du concentré ou taux de récupération.

c) leur granulométrie

Le critère granulométrique détermine le mode de traitement (sec ou humide), mais également le type d'appareils.

En règle générale, les produits grossiers se traitent en voie sèche et les produits fins (à partir de 1 mm) en voie humide. Le traitement en voie humide est plus sélectif, du fait de la non-existence des forces inter-particulaires, et a une capacité plus importante puisqu'il n'y a plus la nécessité de travailler en couche mince. Mais, dans certains cas, le traitement en voie sèche peut être rendu indispensable pour des raisons techniques (impossibilité de mouiller le produit, manque d'eau) ou économique (séchage). [11]

3.3. Les séparateurs magnétiques

On distingue quatre types d'appareils suivant qu'ils fonctionnent en basse intensité ou en haute intensité et suivant qu'ils travaillent sur un matériau sec ou humide.

3.3.1. Séparateur magnétique à basse intensité à sec

Le Séparateur magnétique à basse intensité ne concerne que les matériaux ferromagnétiques.

3.3.2. Séparation humide a basse intensité

Ses séparateurs sont utilisés pour la purification des médiums ferromagnétiques des liquides denses et pour la concentration des minerais de magnétite.

3.3.3. Séparateurs à haute intensité à sec

Il existe deux sortes de séparateurs à haute intensité à sec :

3.3.3.1. Les séparateurs à déviation

Ils comportent une pièce polaire plane et verticale a l'opposé d'un rotor denté. Le minerai est alimenté en chute libre contre la pièce polaire. Les particules paramagnétiques sont déviées vers le

rotor. Si elles collent contre le rotor, le phénomène est de faible durée, la force centrifuge décollant très rapidement les particules fixées.

3.3.3.2. Les séparateurs à collage préalable

Une pièce polaire plane est située obliquement à l'opposé du rotor induit denté. Le minerai est déposé de préférence sur le rotor tangentiellement, suivant un plan parallèle de la pièce polaire oblique. Les particules non magnétiques quittent le rotor, tandis que les particules paramagnétiques sont fixées sur le rotor aussi longtemps que les forces magnétiques contrebalancent l'action de la force centrifuge et de la pesanteur.

3.3.4. Les séparateurs à haute intensité en milieu humide

La séparation à haute intensité humide est rarement utilisée industriellement. Les constructeurs se heurtent dans ce domaine à de grosses difficultés technologiques soit dans le domaine de l'étanchéité des rotors, soit dans le domaine des réglages. Toutefois, il existe des séparateurs à rotor conçus de telles façons que le rotor ne plonge pas dans la pulpe.

Le minerai arrive avec l'eau sous forme d'une couche mince de pulpe, s'écoulant sur une goulotte inclinée. Le courant d'eau descendant oppose une résistance à l'entraînement des particules non magnétiques par les magnétiques.

Cependant, il importe que les particules du minerai ne soient pas entraînées trop rapidement par le courant de pulpe à travers la zone de travail de l'appareil. Des études sur les coefficients de frottement montrent que la pente α de la goulotte doit être supérieure à 7° et inférieure à 15° . [6]

4. Méthode de la flottation

4.1. Définition de la méthode

La flottation est un procédé de traitement physico-chimique basé sur les propriétés superficielles des particules minérales, selon qu'elles soient en contact avec de l'air ou de l'eau. Dans cette optique, on met en suspension dans l'eau les particules de minerai finement broyées, puis on conditionne le mélange minerai/eau (ou pulpe) avec un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface de la substance à flotter, afin que celle-ci soit plus encline à adhérer aux bulles d'air qu'aux particules d'eau.

La pulpe est alors introduite dans un appareil muni d'un agitateur et d'une arrivée d'air. Les bulles d'air injectées vont se fixer sur les particules devenues hydrophobes, et ainsi les faire remonter à la surface de la pulpe. Il suffira par la suite de recueillir la mousse résultante ; le concentré minéral est obtenu par simple lavage suivi d'un séchage. La qualité de la mousse est assurée par l'ajout d'un réactif appelé moussant. [7]

4.2. Types de Flottation

Selon les besoins de l'industrie concernée et l'intérêt économique pour telle ou telle substance minérale, on définira deux types de flottation : directe et inverse. Celles-ci se distinguent l'une de l'autre par le procédé selon lequel on cherche à récupérer les minéraux à concentrer. Ces derniers doivent donc être préalablement définis. Par souci de clarté, on appellera par la suite substance utile le produit à concentrer, et gangue le reste.

4.2.1. Flottation Directe

Lors de ce procédé, on cherche à extraire prioritairement la substance utile comme produit de mousse et on laisse la gangue plonger en produit de cellule. On effectuera donc une flottation directe du minéral utile. Cette flottation est généralement utilisée pour récupérer des petites quantités valorisables présentes dans une gangue importante, ou purifier le produit de cellule des impuretés qui y sont présentes.

4.2.2. Flottation Inverse

En revanche, ce procédé consiste à faire flotter la gangue, en laissant la substance utile en produit de cellule. Dépendamment des quantités à récupérer et des réactifs nécessaires, il peut parfois être plus intéressant d'effectuer une flottation inverse de la substance utile, notamment lorsque la flottation sélective de certains minéraux s'avère difficile à effectuer car demandant des conditions particulières qu'il est ardu d'obtenir et de conserver.

4.3. Appareillage

Selon le principe de création des bulles d'air, on distingue deux types d'appareils : cellule et colonne de flottation.

4.3.1. Cellule de flottation

Ce sont des machines à agitation mécanique. Elles sont généralement constituées d'une cuve parallélépipédique ou cylindrique et l'agitation est assurée par un ensemble rotor-stator. L'air est introduit dans la cellule par l'axe creux du rotor, via un tube extérieur à l'axe ou par un système de tuyauterie situé sous le rotor. La pulpe est en général introduite latéralement dans la cellule, les mousses sont récupérées soit par débordement, soit mécaniquement par des pales tournantes. Le produit non-flotté passe directement dans la cellule suivante.

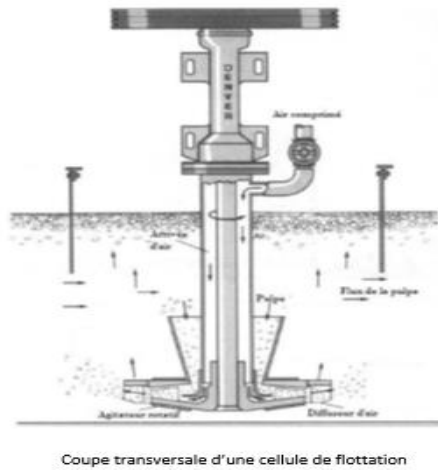


Figure 16: Coupe transversale d'une cellule de flottation.

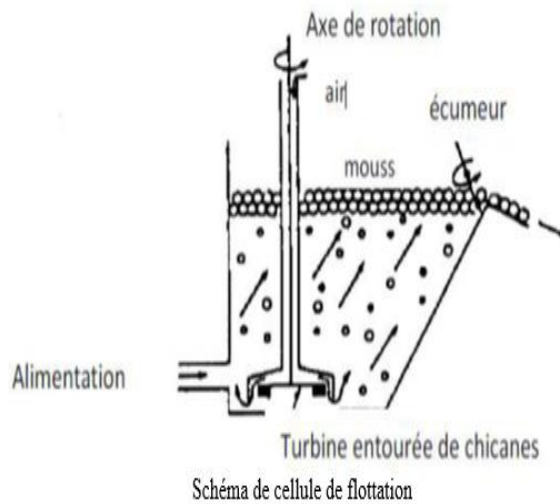


Figure 17: Schéma de cellule de flottation.

4.3.2. Colonne de flottation

Ce sont des cellules ne comportant généralement pas d'agitation mécanique. L'air y est introduit par un générateur de bulles, en fond de cellule. Quant à la pulpe, elle est injectée à environ les deux tiers de la hauteur de la colonne. Les particules solides cheminent à contre-courant du flux des bulles. Les mousses recueillies à la partie supérieure sont lavées par aspersion d'eau.

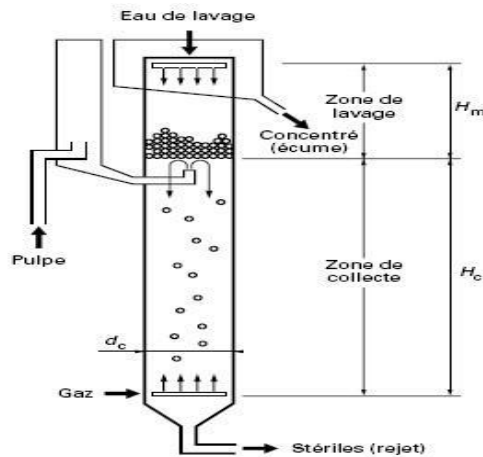


Figure 18: Coupe transversale d'une colonne de flottation.

4.3.3. Comparaison entre cellule et colonne de flottation :

Les principales différences entre la cellule et la colonne de flottation se retrouvent d'une part au niveau de la récupération et d'autre part au niveau de la qualité du concentré en effet, un meilleur enlèvement et une plus grande pureté sont notés au niveau de la colonne, et ce, en raison des trois points suivants :

- L'ajout de l'eau de lavage minimise l'entraînement des particules parasites dans le concentré
 - L'absence dans la colonne d'agitation mécanique de la pulpe restreint la force de contact bulle-solide et, par le fait même, limite le décrochage des particules à la surface des bulles
 - La hauteur plus importante de la colonne qui favorise un plus grand nombre de collisions.
- [8]

4.4. Paramètres influant sur l'opération de flottation

L'efficacité du procédé de flottation dépend des conditions suivantes :

4.4.1. La grandeur du minerai à flotter

La préparation mécanique d'un minerai avant sa flottation revêt une importance considérable, car le degré ainsi que le mode de broyage ont une influence directe sur le rendement de l'opération. En effet, il faut en premier lieu que la maille de libération du minéral à extraire soit atteinte, de façon à obtenir une récupération optimale du minéral avec un minimum de gangue. Par ailleurs, il est absolument nécessaire d'éviter le sur-broyage du minerai qui aurait pour effet de créer un phénomène d'adagulation, ou slime coating (littéralement : recouvrement par les ultrafines) ; les ultrafines, ou schlamms, recouvrent les particules minérales, gênant ainsi la fixation du collecteur et diminuant le rendement de l'opération. De même, les grandes particules sont indésirables pour la

flottation, vu qu'elles exigent une grande consommation des collecteurs pour augmenter leur hydrophobie.

4.4.2. La densité de la pulpe de flottation

Il est indésirable d'avoir des pulpes très denses ainsi que les pulpes très diluées. La dilution optimale de la pulpe dépend de la grosseur du minéral à flotter, sa densité et de la qualité voulue du produit de mousse.

La densité optimale de la pulpe augmente avec l'augmentation de la grosseur et de la densité du minéral à flotter. Pour diminuer les pertes du minéral utile dans un rejet on utilise les pulpes plus denses. Alors que pour augmenter la qualité du produit de mousse, on utilise les pulpes plus diluées.

4.4.3. La gamme des réactifs de flottation utilisés

Il s'agit de :

- La gamme des réactifs de flottation
- Le dosage des réactifs de flottation
- Les points de chargement
- La durée de conditionnement de ces produits

4.4.4. L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe

Dans les machines de flottation mécaniques, l'aéragé dépend de l'agitation de la pulpe ou bien de la vitesse de rotation des agitateurs. Plus grande est l'agitation, plus grand est l'aéragé, mais il faut rappeler que l'agitation forte contribue à l'augmentation des fines détachants des bulles d'air, alors que la faible agitation contribue à la décantation des grosses particules au fond de la cellule de flottation. En résumé, l'agitation doit être optimale pour assurer un bon aéragé et une meilleure distribution des particules des bulles d'air dans tout le volume de la cellule.

4.4.5. La température de la pulpe

La flottation est un procédé physico-chimique dont la vitesse dépend de la température du milieu ; en effet, l'augmentation de la température de la pulpe implique une amélioration en termes de dispersion du collecteur dans la cellule et donc, une augmentation de la vitesse de flottation. [9]

4.5. Les réactifs de flottation

4.5.1. Les collecteurs

Un collecteur est le centre nerveux d'un processus de flottation. Les raisons sont que, d'abord, le collecteur est souvent le réactif le plus sélectif, c'est-à-dire qu'il est adsorbé à l'interface d'un seul minéral. Ensuite, un processus de flottation est généralement plus sensible au dosage du collecteur qu'au dosage des autres réactifs. Les collecteurs sont divisés en trois grandes catégories :

4.5.1.1. Les collecteurs non ionisés et non polaires

Leur particularité est qu'ils ne contiennent pas la partie polaire, c'est pourquoi ils n'agissent pas avec l'eau et avec les surfaces des minéraux, mais ils ont la possibilité de se fixer sur la surface hydrophobe des minéraux. On utilise ces collecteurs pour la flottation des minéraux hydrophobes, ayant une haute flottabilité naturelle. Il s'agit dans ce cas des hydrocarbures.

4.5.1.2. Les collecteurs anioniques

Ce sont des collecteurs lors de la dissociation desquels le radical hydrocarbure entre dans la composition de l'anion. On distingue les carboxyles et les thiocarboxyles. On peut citer les xanthates et les aérofloats...

4.5.1.3. Les collecteurs cationiques

Ce sont les collecteurs lors de la dissociation desquels le radical hydrocarbure entre dans la composition du cation. Ce sont les amines et leurs sels.

Tous les collecteurs sont des réactifs organiques. La plupart du temps, ce sont des composés hétéropolaires constitués de deux extrémités : une non-polaire ou hydrophobe, généralement une chaîne hydrocarbonée. L'autre, polaire et hydrophile, est souvent chargée négativement ou positivement.

Le mécanisme d'action du collecteur est le suivant : la tête polaire va se fixer sur la surface de la particule dont la charge a été acquise lors du broyage, et la chaîne organique va, par adsorption, rendre la surface de la particule hydrophobe. Ce mécanisme est schématisé sur la figure suivante.

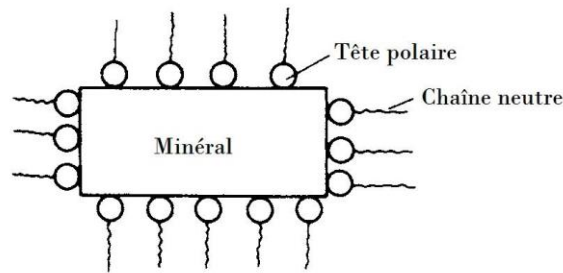


Figure 19: Schéma représentatif de l'action du collecteur.

4.5.2. Les déprimants

Mis à part les collecteurs, les agents déprimants sont les produits chimiques sélectifs les plus utiles en flottation. Il en existe une gamme très étendue entre des réactifs organiques et inorganiques. Les minéraux qui se rapportent à la même classe (ex : minéraux sulfatés) flottent avec le même collecteur. L'utilisation du déprimant permet d'augmenter la sélectivité de l'action du collecteur aux minéraux appartenant à la même classe.

Le rôle du déprimant est d'annuler l'effet du collecteur sur certaines surfaces minérales précises, et ainsi de faire plonger les minéraux que l'on ne veut pas flotter, en évitant par-là leur piégeage dans le produit de mousse. On peut citer quatre mécanismes principaux de l'action des déprimants :

- a) La dissolution de la couche du collecteur qui se trouve sur la surface du minéral et la création des conditions qui empêchent la formation d'une telle couche.
- b) La supplantation des ions du collecteur par les ions du déprimant forment avec les ions du minéral la combinaison hydrophile difficile à dissoudre.
- c) La formation sur la surface du minéral d'une combinaison superficielle hydrophile (sans supplantation du collecteur).
- d) La formation sur la surface du minéral déprimé de la couche hydrophile qui est constituée de particules fines.

4.5.3. Les moussants

Le moussant est un surfactant permettant l'obtention d'une mousse stable, solide, mais aussi facilement abattable à son extraction. Il favorise la fixation et la minéralisation des bulles d'air sur la surface de la cellule, évitant ainsi qu'elles n'éclatent et que les particules minérales qui y sont collées ne retombent en fond de cellule.

Le moussant possède trois fonctions principales :

- Créer des interfaces liquide-gaz importantes en réduisant la taille des bulles et régularisant leur forme ; plus sphériques et plus petites, les bulles remontent plus facilement et plus lentement à la surface, et leur finesse augmente la surface de l'interface liquide-gaz.
- Faciliter la fixation des particules sur les bulles d'air par coadsorption avec le collecteur.

Chapitre III : Généralités sur les méthodes de séparation

- Stabiliser la mousse à la surface de la cellule, ce qui permet une meilleure récupération du minerai à flotter, tout en évitant de le mélanger avec les autres minéraux en présence dans la pulpe.

Même si quelques substances inorganiques peuvent donner de bonnes mousses, les moussants les plus efficaces restent organiques. Quoiqu'il en soit, l'une des principales exigences sur ces réactifs est qu'ils doivent avoir une très faible capacité collectrice, pour conserver toute la sélectivité de la flottation et éviter de perturber son rendement.

Le mécanisme d'adsorption du moussant est schématisé sur la figure suivante :

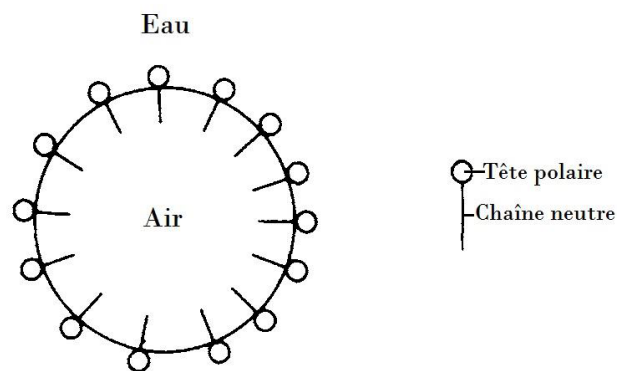


Figure 20 : le mécanisme d'adsorption du moussant.

4.5.4. Les activants

L'activant est employé avant d'ajouter le collecteur pour rendre la surface d'un minéral donné apte à l'adsorber, il contribue donc à une meilleure fixation du collecteur sur les surfaces minérales.

Généralement, les activants sont des sels solubles qui s'ionisent en solution. Les ions réagissent alors avec les surfaces minérales pour former de nouveaux composés, peu solubles, qui se déposent de nouveau sur ces surfaces et forment avec le collecteur un film hydrophobe qui permettra la récupération des minéraux voulus.

4.5.5. Les régulateurs du milieu

Les collecteurs, les déprimants et les activants réagissent directement avec les minéraux en changeant leurs flottabilité.

Chapitre III : Généralités sur les méthodes de séparation

Les régulateurs des milieux exercent leur influence sur la flottabilité des minéraux par voie indirecte en changeant la composition ionique de la pulpe.

Un régulateur est un réactif déterminant le degré d'acidité ou d'alcalinité de la pulpe. Il s'agit d'acides ou de bases, utilisés pour régler le pH du milieu qui, comme indiqué précédemment, possède une grande influence sur le rendement d'une opération de flottation.

Les fonctions principales de ces réactifs sont la régulation du PH de la pulpe ainsi que l'élimination des ions indésirables. [10]

Conclusion

Le métier d'enrichissement et de purification du sable de quartz a de nombreux procédés technologiques. Afin de se confirmer qui est le meilleur raisonnable, il est généralement basé sur les types d'impuretés, le contenu, le mode de survenue et la qualité des produits du sable de quartz.

Chapitre IV :

Partie expérimentale

Introduction

Cette partie consiste à traiter le sable quartzueux ramené de la carrière de Sidi Bou-Ali, commençant par la caractérisation minéralogique et l'analyse granulométrique, après on a soumis le sable aux différentes méthodes de séparations (la séparation magnétique et la flottation) afin d'avoir un produit fini qui répond aux exigences de l'industrie de verre et photovoltaïque.

1. Les caractéristiques minéralogiques et chimiques

1.1. Analyse chimique

Afin de déterminer les éléments constituant le minerai étudié une analyse chimique du tout-venant, a été réalisée par fluorescence X ; les résultats obtenus sont reportés sur le tableau ci-dessous :

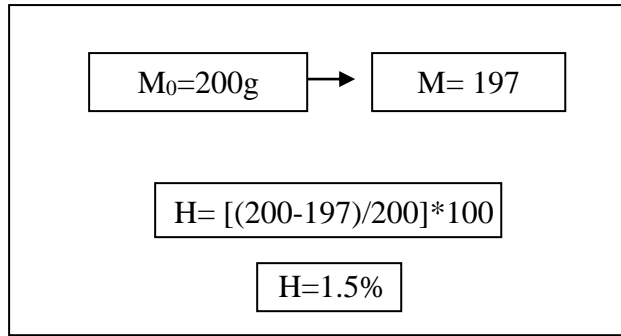
| Elément chimique | Teneur en % |
|------------------------------------|--------------|
| SiO₂ | 97.84 |
| Al₂O₃ | 0.52 |
| Fe₂O₃ | 0.461 |
| CaO | 0.011 |
| MgO | 0.015 |
| Na₂O | 0.059 |
| TiO₂ | 0.077 |
| K₂O | 0.008 |

Tableau 2 : résultats d'analyse chimique par fluorescence X.

1.2. Calcul du taux d'humidité

Une prise de l'échantillon de masse initiale M_0 préalablement homogénéisée, et introduite dans un four utilisé comme étuveuse à 105° pendant 24h. L'échantillon séché et ensuite repesé. La différence du poids initial et final nous donne le taux d'humidité :

$$H (\%) = [(M_0 - M) / M_0] * 100$$



1.3. Echantillonnage

Un échantillonnage a été réalisé afin de diviser une quantité donnée du minerai, de manière à en obtenir une partie représentative, tout en conservant les propriétés initiales de l'ensemble à partir duquel elle a été tirée. La méthode que nous avons suivie pour faire l'échantillonnage est le quartage manuel.

1.3.1. Quartage manuel

On dispose le minerai sur une surface plane en formant un parallélépipède de faible épaisseur. Après brassage, on le partage en quatre quarts équitables, et on choisit deux quarts opposés que l'on gardera comme échantillons. Le reste constituera un stock témoin.



Figure 22: quartage manuel étape1.



Figure 21: quartage manuel étape2.



Figure 22: quartage manuel étape3.

1.4. Analyse granulométrique

1.4.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns 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.

L'analyse de tamisage est faite par une série de tamis Retsch ISO 3310, en utilisant la tamiseuse Retsch AS200.

1.4.2. Appareillage

- Bacs.
- Pinceaux.
- Balance.
- Série de tamis dont l'ouverture sera de $400\mu\text{m}$ à $40\mu\text{m}$.



Figure 23: tamiseuse électrique.

1.4.3. Préparation de l'échantillon

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.

On réduit l'échantillon global avec un diviseur ou par quartage, jusqu'à avoir un échantillon supérieur ou égal à 200 g, selon la norme EN 933-1.

1.4.4. Classement des tamis :

Le choix des tamis s'est fait sur la relation constante entre les tamis successifs selon les modules utilisés a ($\sqrt{2}$; $^4\sqrt{2}$; $^{10}\sqrt{10}$)

Dans notre cas nous avons pris le module $^{10}\sqrt{10}$ moyen.

à partir de la formule $D_{\text{inf}} = D_{\text{sup}}/1,26$ représentant la série normalisée américains de tamis Tyler
Où :

D_{sup} : est l'ouverture du premier tamis de la colonne

D_{inf} : est l'ouverture du tamis suivant.

Le tamisage a été effectué en 1 série de 5 tamis, sur une durée de 20 mn. Le premier tamis a une ouverture de 500 μm .

Les tamis sont classés par ordre de grosseur croissante normalisée (les modules les plus faibles en bas). La colonne de tamis est inscrite sur la feuille de paillasse.

1.4.5. Le Tamisage

On secoue tamis par tamis au-dessus d'un plateau jusqu'à ce qu'aucun grain ne passe à travers les mailles. Le matériau passé à travers le tamis appelé (tamisât) doit être remis dans le tamis de dimension immédiatement inférieure à celui utilisé.

1.4.6. Pesage des refus

Le matériau resté sur le tamis (refus) doit être pesé, ainsi de suite, jusqu'à remplir la feuille de paillasse, dont on y trouvera :

- les refus cumulés en poids (g).
- les pourcentages des refus cumulés.

1.4.7. Traçage de la courbe

On trace la courbe granulométrique sur un graphe comportant en ordonnée le pourcentage de tamisât en échelle arithmétique, dont les valeurs des mailles sont portées en abscisse selon une graduation logarithmique.

Le poids de tamisât successifs permet de déterminer les pourcentages du tamisât correspondant à chacun des tamis utilisés.

1.4.8. Résultat de l'essai

| Ouverture de tamis μm | Fractions des tamis | | Ouverture nominale μm | Passants cumulés (%) |
|--|---------------------|-------|--|-------------------------|
| | Poids(g) | % | | |
| +500 | 13 | 1.31 | 500 | 98.69 |
| -500 +400 | 89 | 8.98 | 400 | 89.71 |
| -400 +315 | 313 | 31.58 | 315 | 58.12 |
| -315 +250 | 417 | 42.08 | 250 | 16.04 |
| -250 +160 | 142 | 14.33 | 160 | 1.72 |
| -160 +125 | 7 | 0.71 | 125 | 1.01 |
| -125 +0 | 10 | 1.01 | 0 | 0.00 |

Tableau 3 : résultats de l'analyse granulométrique.

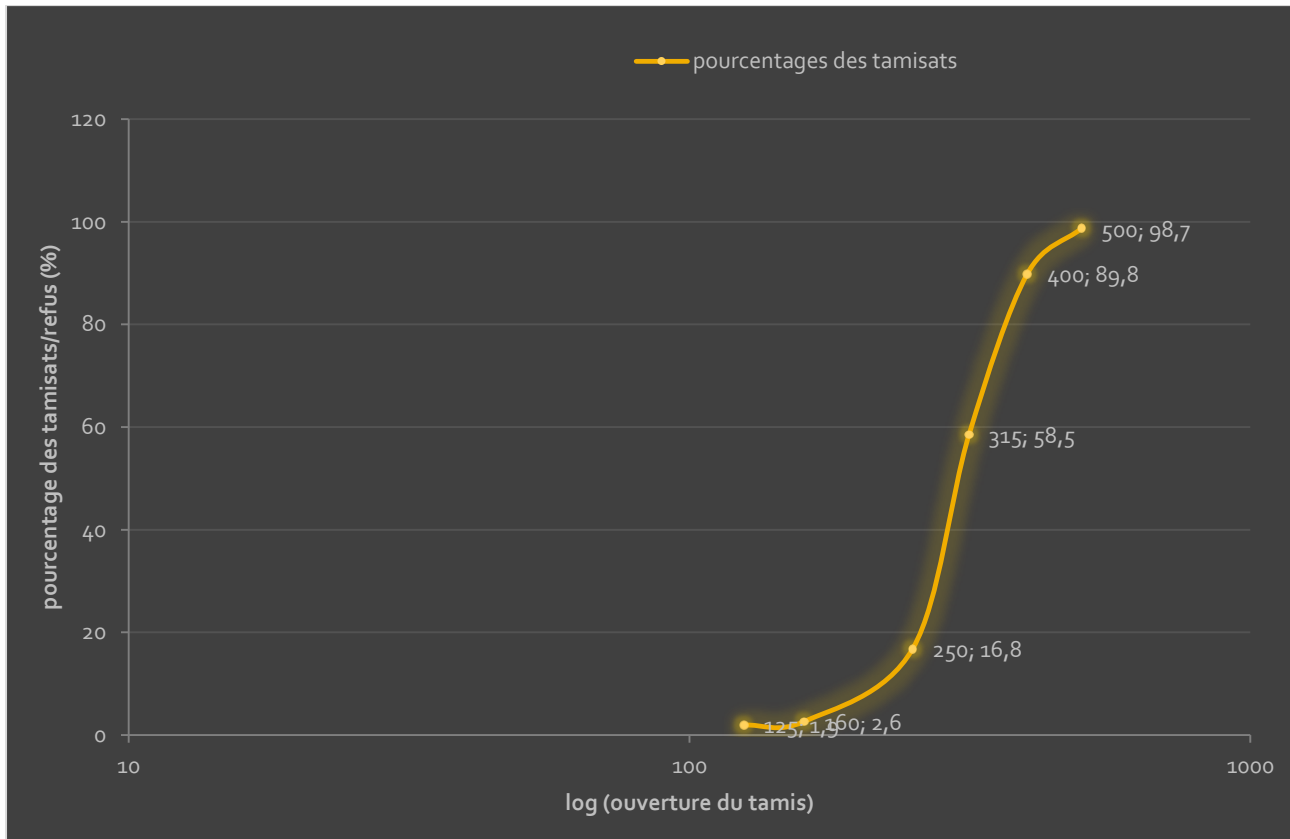


Figure 24 : Courbe granulométrique du sable siliceux.

Conclusion :

L'analyse granulométrique facilite la détermination de la répartition des grains d'un minerai et on peut visualiser ce résultat sur la courbe granulométrique, qui nous indique le type du minerai étudié, et dans notre cas on peut facilement déduire que les particules sont très bien graduées sur les classes suivantes :

[400 :315] ; [315 :250]; [250 :160] μm .

1.5. Analyse microscopique

Des observations microscopiques ont été réalisées sur le minerai brut et à différentes fractions granulométriques pour déterminer les caractéristiques morphologiques et de couleur des différents minéraux constituant le sable, objet de notre étude.

1.5.1. Observation microscopique des différentes classes granulométriques

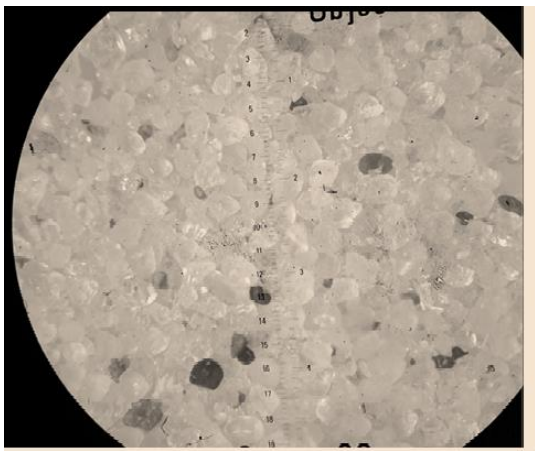


Figure 25: Classe [-250+40] μm .

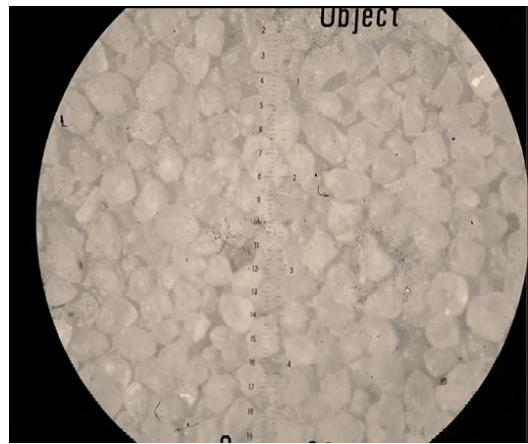


Figure 26: Classe [-250+315] μm .

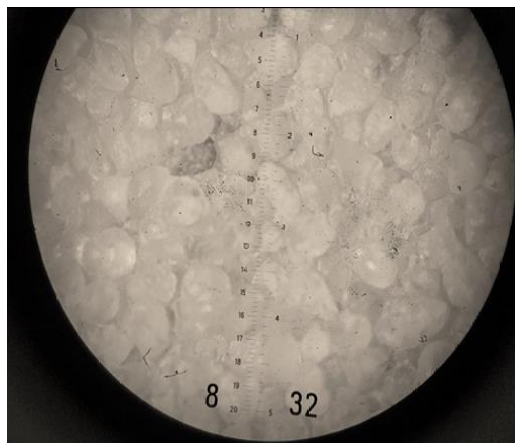


Figure 27: Classe [-400+315] μm .

1.5.2. Interprétation

L'observation au microscope optique, nous a permis d'identifier et de qualifier les minéraux en évidence selon les points suivants :

- Le quartz : il apparaît dans une couleur blanche, les grains sont Majoritairement arrondis.
- Les oxydes de fer : ils se présentent sous forme de grains indépendants. Ils sont opaques et apparaissent sous une couleur noire ou rougeâtre.
- Les analyses microscopique des différentes fractions granulométriques de sable ont montré des caractéristiques de texture très similaires, les grains de quartz se trouvent fréquemment libérés dans ces classes granulométriques de granulométrie inférieure à 400 μm , néanmoins des traces d'oxyde de fer sont toujours détectées sur les particules de la silice.

2. Essais d'enrichissement du minerai de sable :

Dans le but d'améliorer la qualité de notre sable un traitement minéralurgique est nécessaire pour éliminer les impuretés qui nuisent à la fabrication du verre de qualité, donc il est nécessaire d'élaborer un schéma technologique qui devrait être respecté pour la réalisation des essais d'enrichissement de ce minerai.

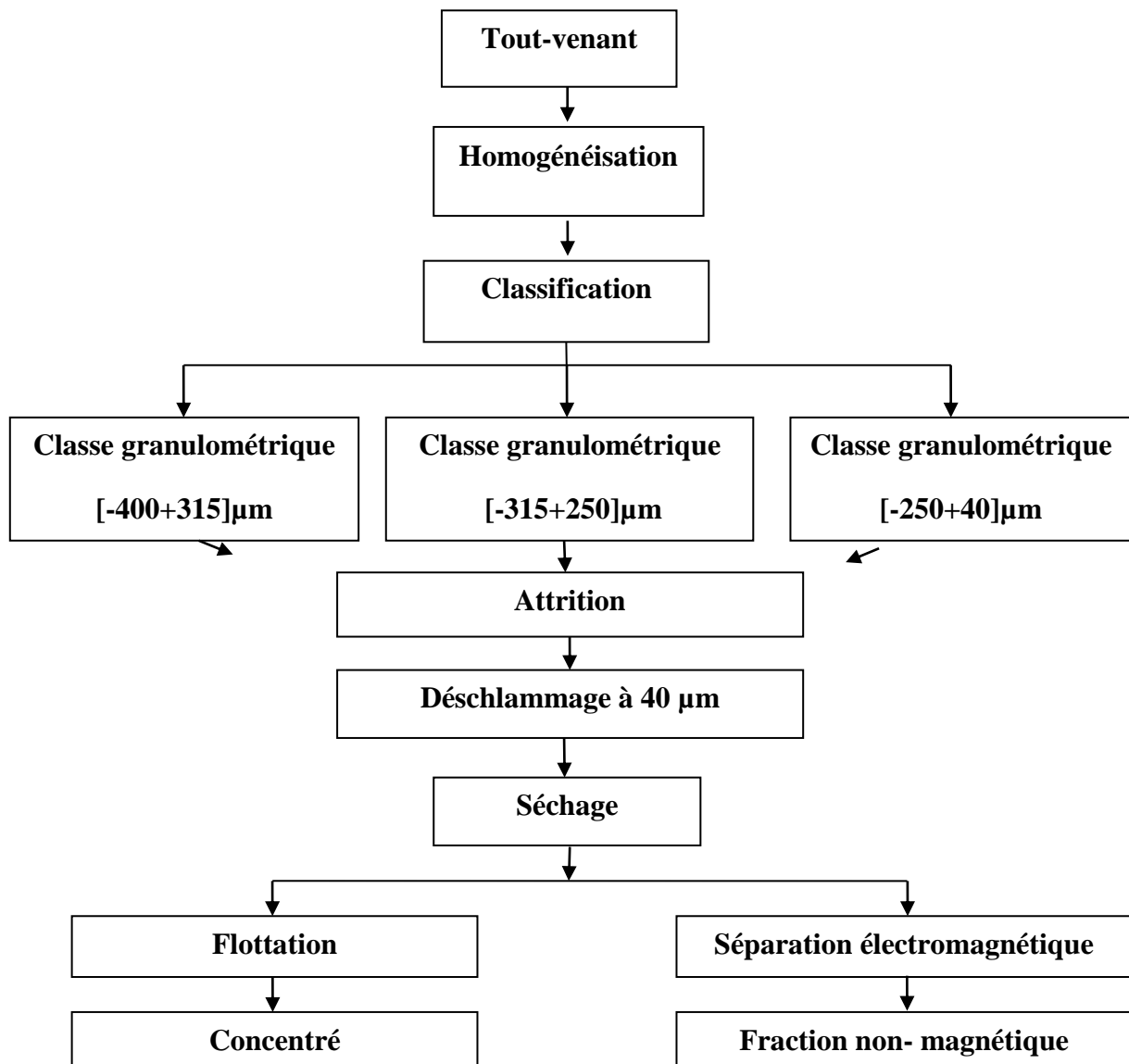


Figure 28: Schéma d'enrichissement.

2.1. Tamisage

Un tamisage vise à éliminer les fractions grossières et fines qui contiennent habituellement une grande partie des impuretés ; cette étape consiste à faire dégager les classes [-400+315] ;

[-315+250] ; [-250+40] µm par tamisage à sec. Ces tranches représentent une meilleure libération de minerai de valeur et répondent aux exigences des utilisateurs verreries et photovoltaïques.

2.2. Le broyage

Cette étape consiste à réduire encore la grosseur des grains jusqu'à une certaine granulométrie afin de pouvoir effectuer les essais de séparation magnétique et de flottation qui exigent une certaine granulométrie.

Dans le but d'atteindre la grosseur souhaitée, le broyage a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets du laboratoire de minéralurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ce dernier permet d'avoir des granulométries allant jusqu'à moins de 74 μm et au-delà.



Figure 29 : Broyeur à boulets.

2.3. Attrition

2.3.1. Mode opératoire

Afin d'améliorer la qualité de notre sable, un essai d'attrition à l'eau distillée a été réalisé sur des échantillons de 200 gr des différentes classes granulométriques et ceci pendant 10 minutes, avec un rapport solide liquide 20% solide.

Une fois la durée de l'essai écoulée, un déschlammage au tamis de 40 μm a été effectué afin d'éliminer les schlamms inférieures à 40 μm pour chaque classe.

Cette opération vise à nettoyer les particules du minerai utile par friction des particules les unes contre les autres.

2.3.2. Résultats de l'attrition

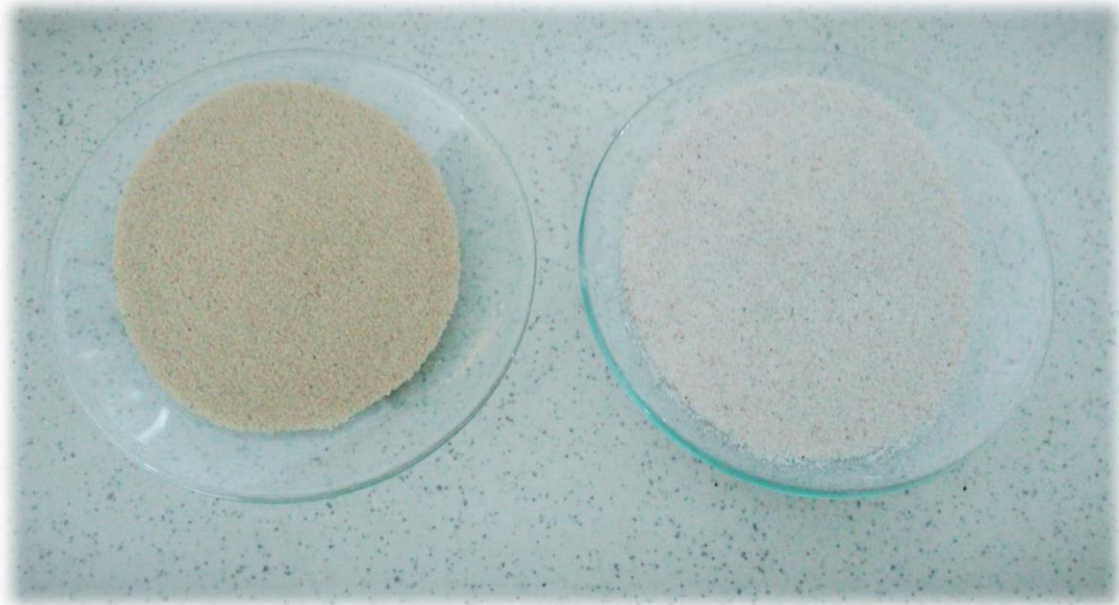


Figure 30: Résultats de l'attrition.

| Classe granulométrique μm | [400-315] | [315-250] | [250-40] |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------|
| La masse à l'alimentation(g) | 200 | 200 | 200 |
| Masse récupérée (g) | 194 | 193 | 190 |
| Rendement du poids du concentré (%) | 97 | 96.5 | 95 |
| Rendement du poids du rejet (%) | 3 | 3.5 | 5 |

Tableau 4: Résultats de l'attrition.

2.3.3. Analyse microscopique

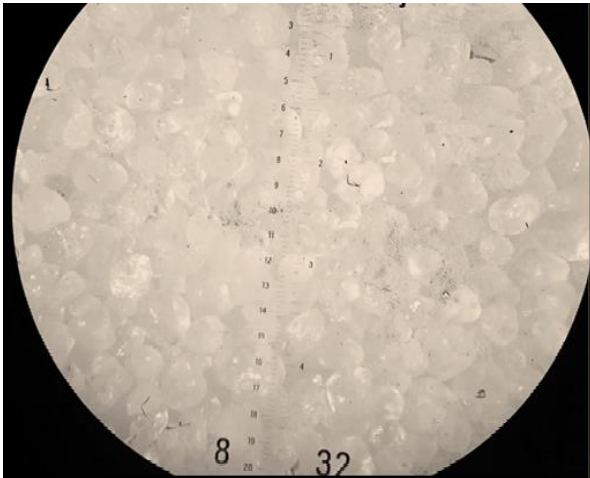


Figure 32: Attrition classe [-400+315] μm .

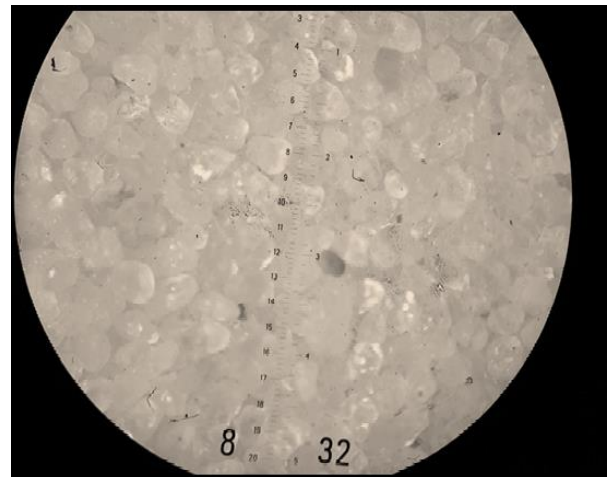


Figure 31: Attrition classe [-315+250] μm .

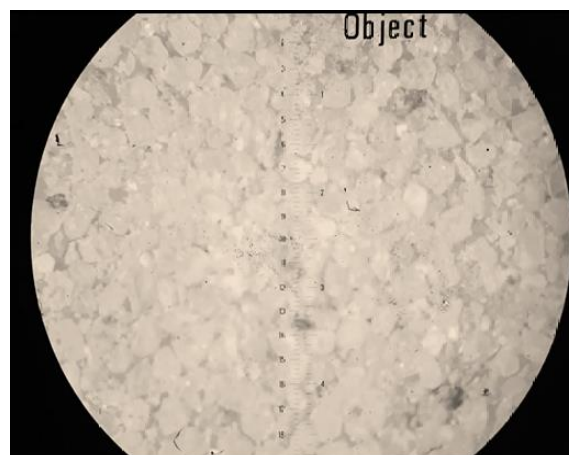


Figure 33: Attrition classe [-250+40] μm .

2.3.4. Interprétation

Cette opération nous a permis d'éliminer par lavage les éléments indésirables, essentiellement les argiles et détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules.

2.3.5. Conclusion

Les résultats des expériences montrent que l'attrition de sable a donné une amélioration progressive de la qualité de sable dont on constate une augmentation de la teneur en silice avec la diminution de taux de fer et d'argile et aussi les particules fines qui gênent généralement les procédés de traitement. Ce qui montre que le lavage et l'attrition sont des opérations indispensables pour le traitement de sable.

2.4. La séparation magnétique

Nous avons utilisé la séparation magnétique par voie humide .Finalement, les résultats par voie humide n'ont pas été satisfaisants, nous n'avons pas souhaité les discuter. L'essai a été réalisé à l'aide d'un séparateur magnétique par voie humide (figure34) :



Figure 34: séparateur magnétique par voie humide.

2.4.1. Essai de séparation magnétique par voie sèche

L'enrichissement par cette méthode consiste à séparer les fractions magnétiques d'oxyde de fer contenues dans la matière première sous l'action d'un champ magnétique intense.

Les essais d'enrichissement par séparation magnétique à haute intensité ont été réalisés par un séparateur à circuit conventionnel (électroaimant) dont l'intensité du champ est réglable de 0 à 14A.

Sous un champ magnétique intense créé par les électroaimants, dont l'alimentation est faite à l'aide d'un alimentateur vibrant horizontal. Les particules ayant une susceptibilité magnétique adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées par la rotation dans une zone de champ magnétique forte et sont déversées dans la fraction magnétique (rejet dans notre

cas), et les autres particules diamagnétiques, c'est à dire la fraction non magnétique (concentré dans notre cas), sont déversés dans le côté opposé. Comme la montre la figure :



Figure 35: Séparateur magnétique SMHI (SMBI).

2.4.2. Paramètres modifiés

Les principaux paramètres que nous avons pris en considération lors les essais sont l'intensité du champ magnétique, l'ouverture du clapet et la granulométrie du produit à séparer ;

- Le poids initial d'alimentation est de 250 g pour chaque essai.
- Les ouvertures de clapet pour aux différentes positions sont : 36°, 40°, et 50° par rapport à l'horizontale (orientation vers la droite).
- L'intensité du champ (H) appliquée est fixée à 14 ampères.
- Granulométrie du produit comporte les différentes classes granulométriques [-400+315], [-315+250], [-250+40] μm .

2.4.3. Résultats de la séparation magnétique



Figure 36: Résultats de la séparation magnétique.

L'efficacité de séparation est liée à la granulométrie de la particule, et aussi à l'intensité du champ magnétique. En premier lieu on a effectué des essais sur les différentes classes granulométriques, dont des échantillons sont soumis à une variation de l'intensité du courant électrique.

Pour des faibles intensités on a rien obtenu ce qui montre que les particules de fer sont paramagnétiques de faible susceptibilité magnétique donc pour adapter une meilleure séparation et une récupération maximale nous avons choisies une séparation magnétique à haute intensité pour les trois classes granulométriques. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

| Tranche granulométrique | [-400+315] μm | | | [-315+250] μm | | | [-250+40] μm | | |
|-------------------------|--------------------------|------|------|--------------------------|------|------|-------------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Position | | | | | | | | | |
| TV(g) | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| C(g) | 249 | 248 | 248 | 249 | 247 | 248 | 247 | 247 | 248 |
| T(g) | 0.96 | 0.89 | 0.74 | 0.86 | 0.85 | 0.6 | 1.13 | 1.02 | 0.95 |
| $\gamma_c\%$ | 99.6 | 99.2 | 99.2 | 99.6 | 98.8 | 99.2 | 98.8 | 98.8 | 99.2 |
| $\gamma_r\%$ | 0.38 | 0.35 | 0.29 | 0.34 | 0.34 | 0.24 | 0.45 | 0.40 | 0.38 |

Tableau 5 : Résultats de la séparation magnétique.

2.4.3.1. Analyse microscopique

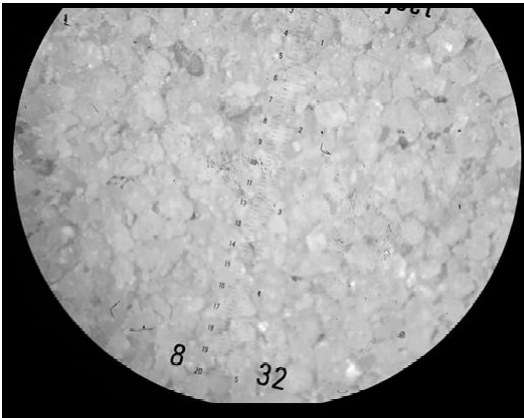


Figure 37: séparation magnétique de
La classe [-400+315] μm .

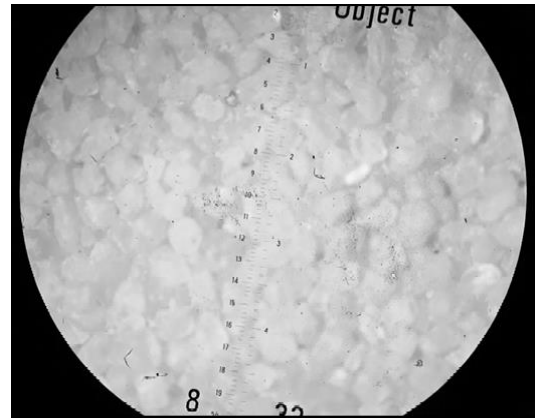


Figure 38 : séparation magnétique de
La classe [-315+250] μm .



Figure 39 : séparation magnétique de
La classe [-250+40] μm .

2.4.3.2. Interprétation des résultats

Les indices technologiques sont calculés suivant les relations suivantes :

$$\gamma_i = (C/TV) * 100.$$

γ_c : rendement pondéral du concentré en (%).

γ_r : rendement pondéral du rejet en %.

T_v , C , T respectivement la masse à l'alimentation, du concentré et du rejet en (g).

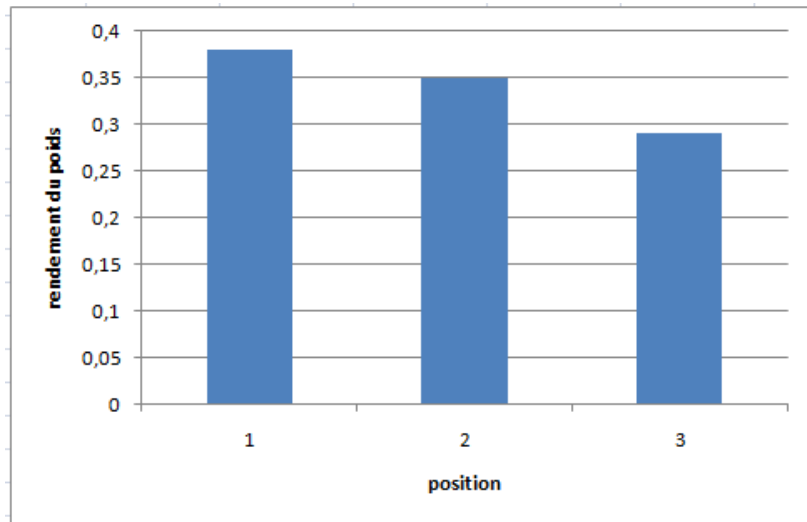


Figure 40 : Rendement pondéral des oxydes de fer de la classe [-400+315] μm .

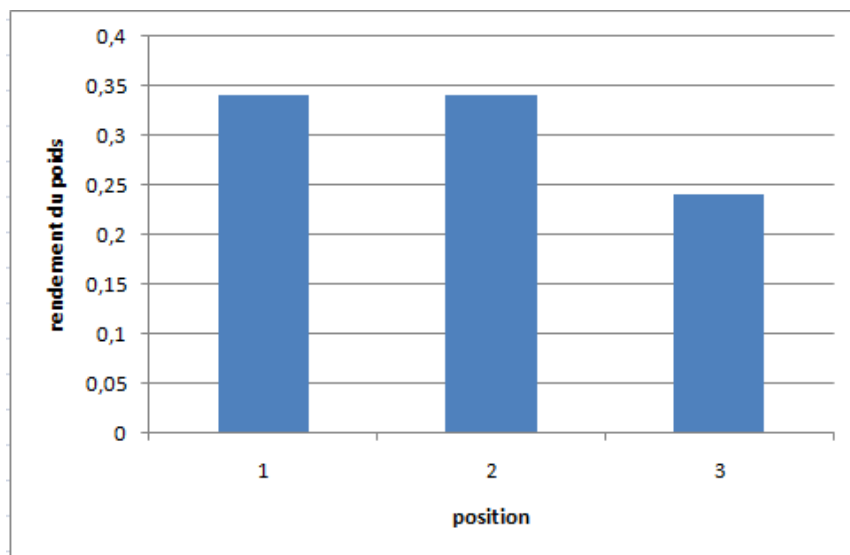


Figure 41 : Rendement pondéral des oxydes de fer la classe [-315+250] μm .

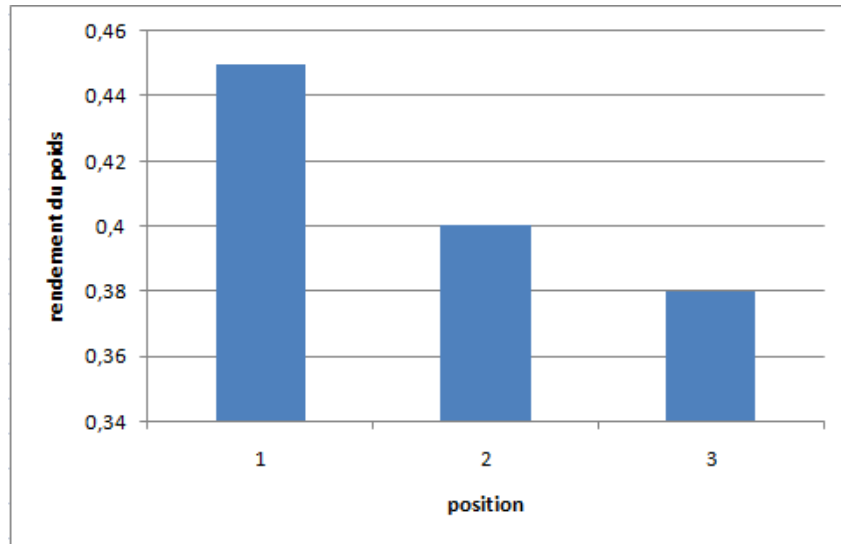


Figure 42: Rendement pondéral des oxydes de fer la classe [-250+40] μm .

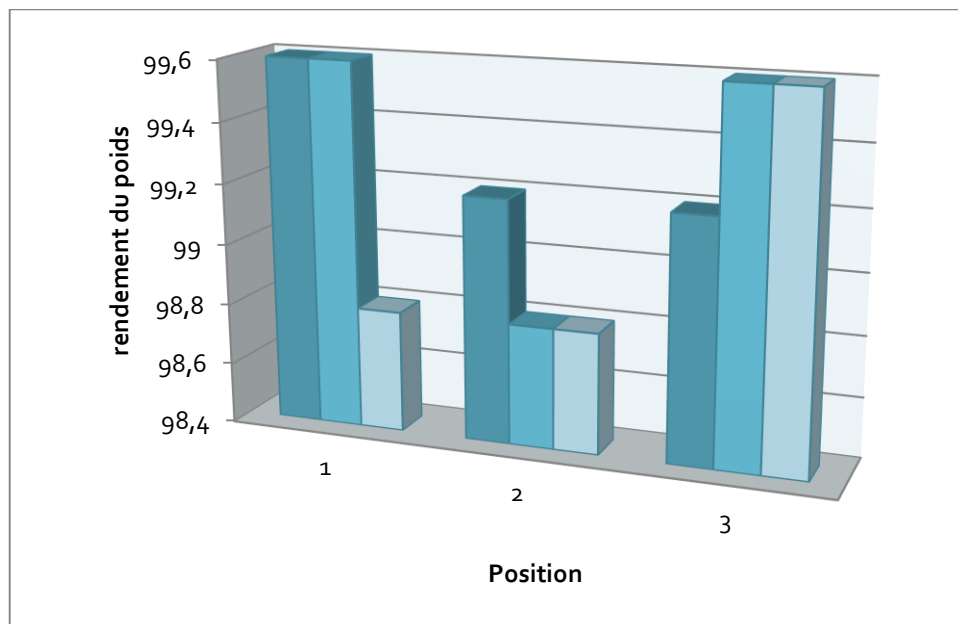


Figure 43 : rendement pondéral du concentré des différentes classes granulométriques.

2.4.3.3. Observation

En ce qui concerne les ouvertures du clapet on a remarqué que l'ouverture à la position 1 nous a donné un rendement poids de fer plus important que les deux autres positions ce qui fait une meilleure élimination du fer contenu dans le sable.

Pour La tranche granulométrique $[-250+40]$ μm on a obtenu un taux de fer élevé par rapport aux deux autres classes ceci est en fonction de la distribution du fer, donc on peut constater une présence élevée du fer dans cette tranche granulométrique.

Conclusion

La séparation magnétique utilisée dans le cadre de notre étude en éliminant les minéraux lourds et les oxydes de fer ayant une faible susceptibilité magnétique a donné des meilleurs résultats pour la position 1 qui correspond à un angle de 36° , avec une intensité max $I=14$ Ampères, il s'agit dans notre cas d'un minéral faiblement magnétique. N'ayant pas d'autres outils pour caractériser les résultats (SAA), nous avons fait appel aux analyses microscopiques. En utilisant cette méthode, nous sommes arrivés à éliminer le fer dans l'ordre de 0.38 % à 0.4 % du tout-venant. Les résultats sont portés dans le diagramme suivant :

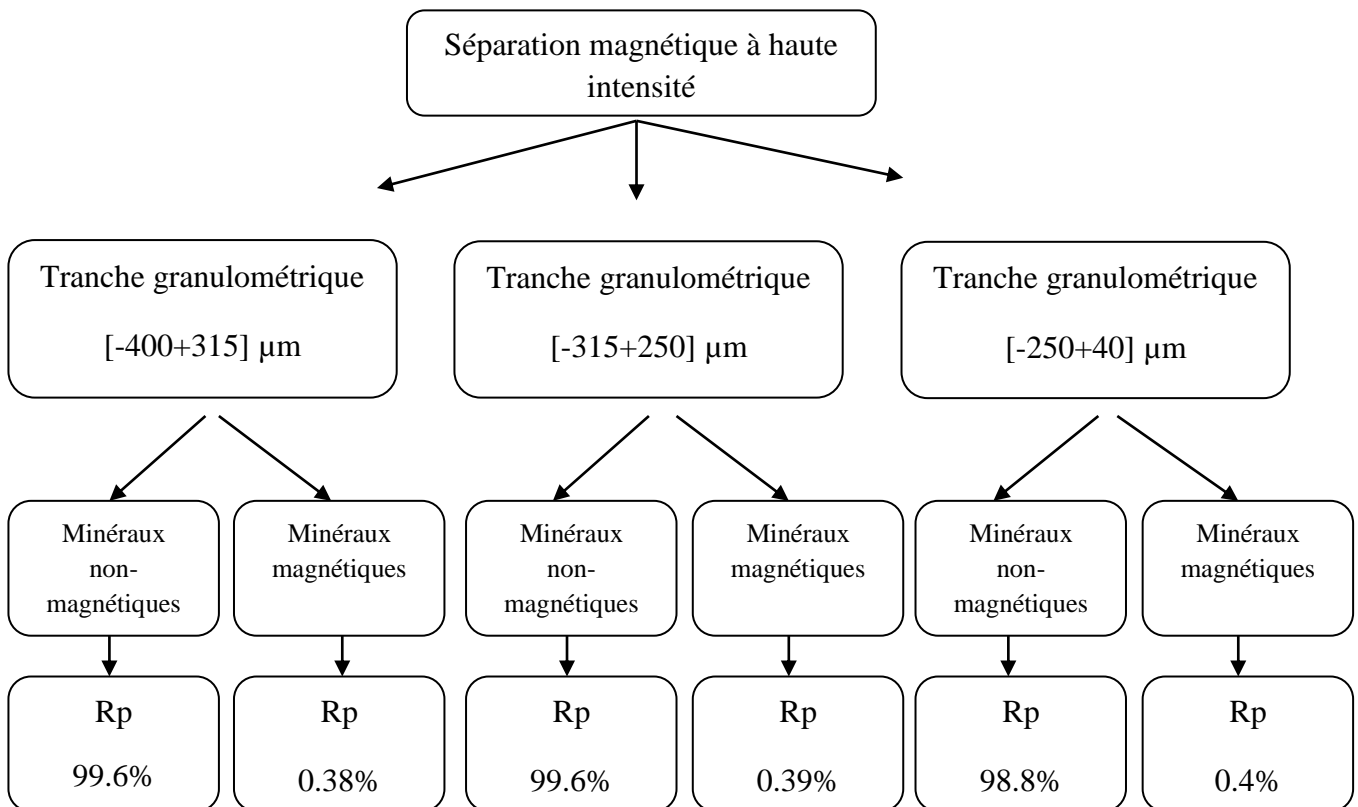


Figure 44 : récapitulatif des résultats de la séparation magnétique.

2.5. La flottation

La flottation est un procédé de traitement physico-chimique pour les particules fines, basé sur les propriétés superficielles des minéraux, elle est parmi les méthodes de séparation les plus utilisées en industrie, notamment parce qu'elle permet des taux de récupération élevés pour de faibles teneurs et de petites granulométries.

2.5.1. Objectif

Dans cette partie, l'objectif est de réduire la teneur de la gangue contenue dans le sable. Nous avons utilisé la méthode de flottation inverse qui consiste à faire flotter la gangue constituée dans notre cas surtout de minéraux lourds et avoir un produit de cellule le SiO_2 qui est le concentré (produit marchand).

2.5.2. Paramètres étudiés :

Les essais de flottations comprennent plusieurs paramètres qui peuvent influencer sur la récupération du concentré ou bien du produit de la cellule et d'avoir une teneur plus élevée d'où l'objectif de cette méthode, le contexte de notre travail est d'optimiser les paramètres de flottation, donc notre étude s'est basée sur :

- ✓ L'influence de la concentration du collecteur.
- ✓ L'influence de la classe granulométrique.

Pour mettre en œuvre cette procédure nous avons fixé au départ la constante de tout venant et avons varié la constante du collecteur

Les essais suivants ont été réalisés sur la base du résultat obtenu sur le tout-venant pour pouvoir sélectionner la meilleure concentration du collecteur, une fois la quantité du collecteur est fixée nous avons varié l'autre paramètre qui est la classe granulométrique.

2.5.3. Préparation des réactifs :

Avant de commencer nos essais de flottation, il faut d'abord préparer tous les réactifs nécessaires dans ces essais.

2.5.3.1. Préparation des réactifs à partir des produits solides :

Il s'agit de KCN et la chaux. Pour le KCN nous avons pesé 10g de produit solide que nous avons mélangé avec 500 ml d'eau distillée que nous avons agité dans une fiole.

Pour la chaux (CaO) la démarche est la même. Sauf qu'il faut peser 25g de produits solide au lieu de 10g dans le premier cas.

2.5.3.2. Préparation des réactifs à partir des solutions concentrées :

Il s'agit dans ce cas de Na_2SiO_3 et l'acide oléique. Pour ce dernier, la démarche consiste à mettre un peu d'éthanol dans une fiole jaugée de 500 ml et mettre ensuite 10 ml d'acide oléique concentré puis compléter le volume de la fiole jusqu'au traits de jauge avec de l'éthanol et bien mélanger le contenu. Pour le Na_2SiO_3 c'est la même démarche sauf qu'on remplace l'éthanol par l'eau distillé.

2.5.4. Réactifs utilisés :

Les réactifs utilisés dans les essais de flottation sont décrits dans le tableau suivant :

| Type du réactif | Nom du réactif |
|----------------------|---------------------------|
| Régulateur du milieu | La chaux(CaO) |
| Dispersant | Na_2SiO_3 |
| Déprimant | KCN |
| Collecteur | Acide oléique |
| Moussant | Huile de pin |

Tableau 6: les réactifs utilisés lors de l'essai de flottation.

2.5.5. Consommation en réactifs :

Pour la variante 1 : dans cette étape nous avons fixé tous les paramètres et nous avons varié seulement la quantité du collecteur (acide oléique).

| Réactif | Concentration | Quantité (g/t) |
|---------------------------|---------------|------------------------------|
| La chaux | 5% | Selon le pH |
| Na_2SiO_3 | 2% | 50 |
| KCN | 2% | 60 |
| Acide oléique | 6% | Variable (voir tableau 9) |

Tableau 7: Consommation en réactifs variante1.

Pour la variante 2 : dans cette étape on fixe tous les paramètres et on change seulement la classe granulométrique.

| Réactif | concentration | Quantité (g/t) |
|----------------------------------|---------------|----------------|
| La chaux | 5% | - |
| Na ₂ SiO ₃ | 2% | 50 |
| KCN | 2% | 60 |
| Acide oléique | 6% | 400 |

Tableau 8: consommation en réactifs variante 2.

2.5.6. Mode opératoire :

- ✓ On pèse une quantité de 750g du minerai brut broyé que nous avons déposé dans un récipient contenant de l'eau et on place ce dernier dans la cellule de flottation et on laisse le mélange sous agitation.
- ✓ Environ 10 minutes d'agitation sont nécessaires pour une bonne répartition du solide dans la pulpe.
- ✓ On ajoute graduellement la chaux (CaO) comme étant un régulateur du milieu jusqu'à l'obtention d'un PH =10.5. le temps de conditionnement est de 1 min.
- ✓ Une fois le Ph du milieu atteint une valeur de 10.5, on ajoute le Na₂SiO₃, on laisse le mélange toujours sous agitation pendant 15 minutes.
- ✓ On ajoute KCN et on laisse agiter toujours à 5 min.
- ✓ On ajoute comme collecteur, de l'acide oléique. Ce réactif adhère à la surface des oxydes et flotte avec la gangue à la surface après l'injection de l'air (il les rend hydrophobes). La durée d'agitation est 10 minutes.
- ✓ On laisse agiter encore pendant 2 min et on ajoute la moussante huile de pin (1goutte)
- ✓ Après l'ajout de tous les réactifs chimique, on ouvre le bouton responsable de l'injection de l'air. En insufflant de l'air dans le mélange, nous provoquons la formation d'une mousse à la surface qui a la propriété de se mélanger aux oxydes (hématite Fe₂O₃).
- ✓ Le produit de mousse est automatiquement récupérer par raclage.

Les différentes étapes sont représentées sur le flowsheet ci-après :

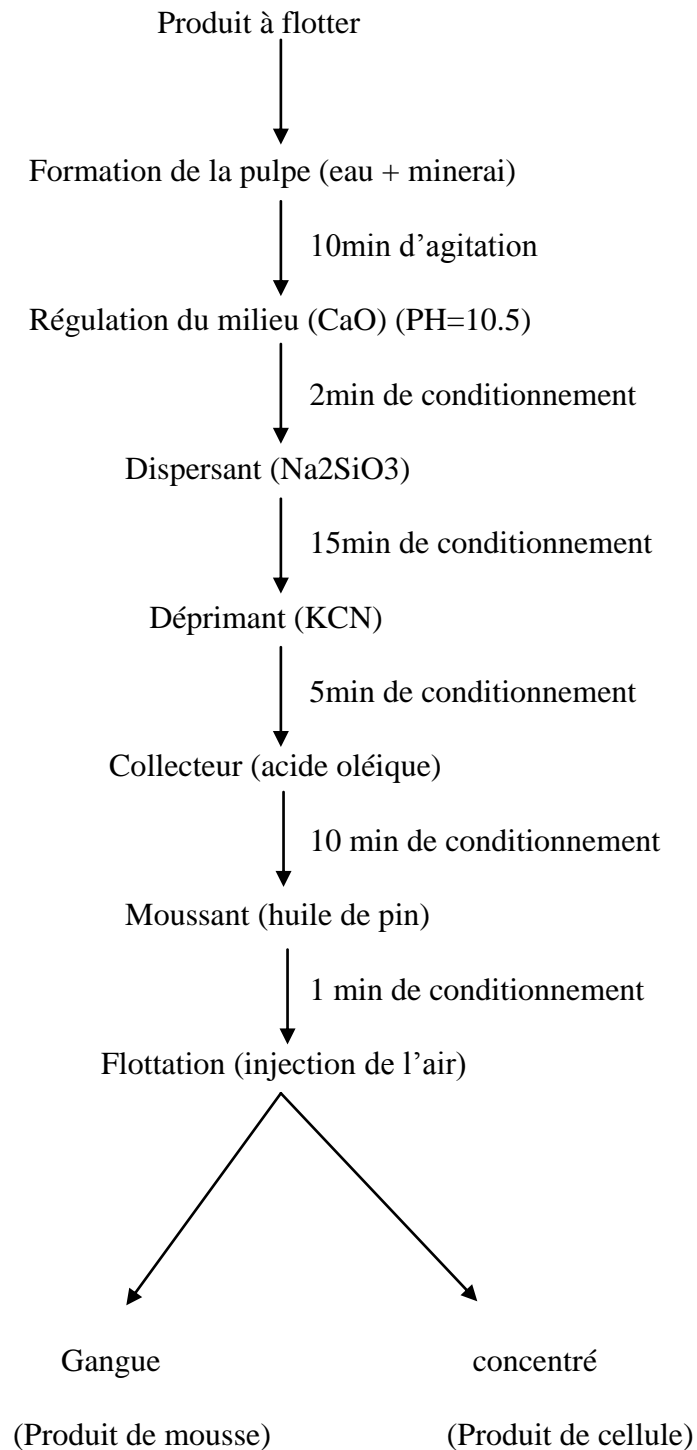


Figure 45 : Schéma de flottation.



Figure 46 : cellule de flottation (type soviétique).

En premier lieu, on a effectué quatre essais de flottation sur le minerai brut broyé selon la première variante (quantité du collecteur), c'est-à-dire on fait varier la quantité du collecteur afin d'atteindre sa quantité optimale. Une fois cette dernière est atteinte, on fixe la quantité du collecteur (optimale) et on fait varier cette fois les classes granulométriques respectivement du minerai (deuxième variante) : [400-315] μm ; [315-250] μm ; [250-40] μm .

2.5.7. Influence de la quantité du collecteur :

L'acide oléique est le collecteur des oxydes de fer, les concentrations de l'acide ont été variées de la manière suivante :

| Réactif | Quantité (g/t) | | | |
|---------------|----------------|-----|-----|-----|
| Acide oléique | 100 | 200 | 300 | 400 |

Le concentré (produit de cellule) ainsi que le produit de mousse qui constituent le rejet, sont filtrés puis séchés dans une étuve à 105°C après séchage ils sont pesés pour les besoins d'analyse des résultats par le critère du rendement poids les résultats sont présenter dans le tableau 9.

2.5.8. Résultats :

| Essai | Poids initial (g) | quantité du collecteur (g/t) | Poids du quartz récupéré (g) | Poids des oxydes de fer récupéré (g) | Pourcentage du quartz récupéré (%) | Pourcentage des oxydes de fer récupéré (%) |
|-------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|
| 01 | 750 | 100 | 741.81 | 4.12 | 98.91 | 0.55 |
| 02 | 750 | 200 | 740.9 | 5.24 | 98.79 | 0.70 |
| 03 | 750 | 300 | 736 | 15.15 | 98.13 | 2.02 |
| 04 | 750 | 400 | 726.39 | 17.35 | 96.85 | 2.31 |

Tableau 9 : Résultats de la Flottation.

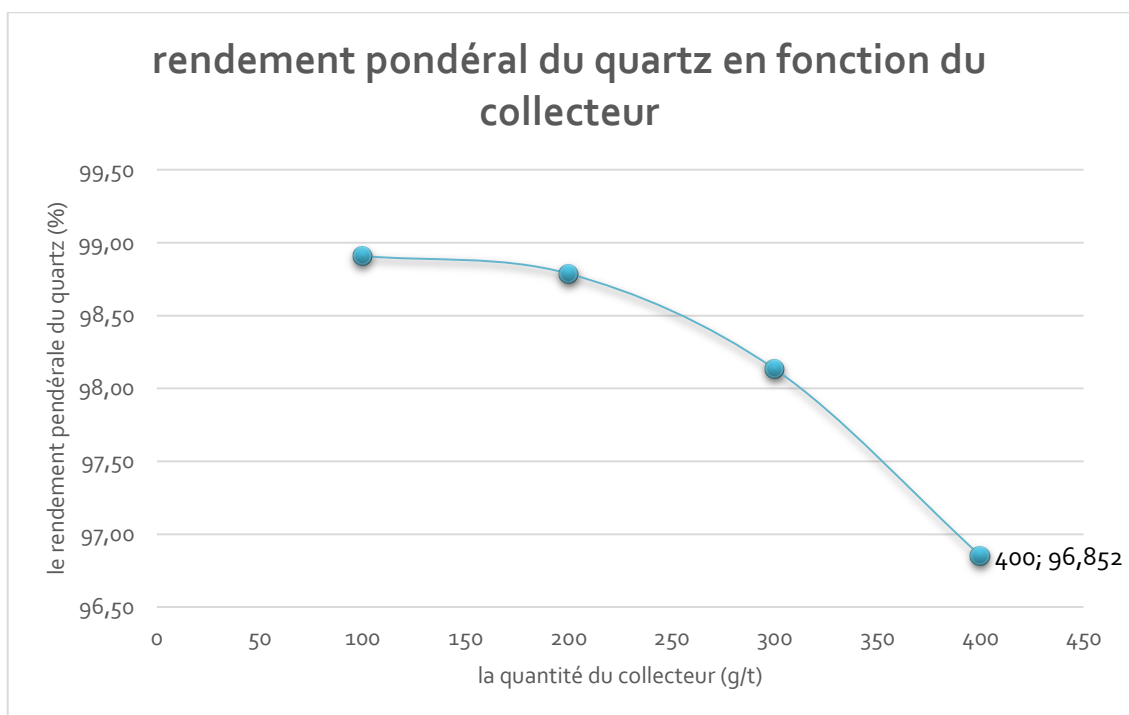


Figure 47: rendement pondéral du quartz en fonction des quantités du collecteur.

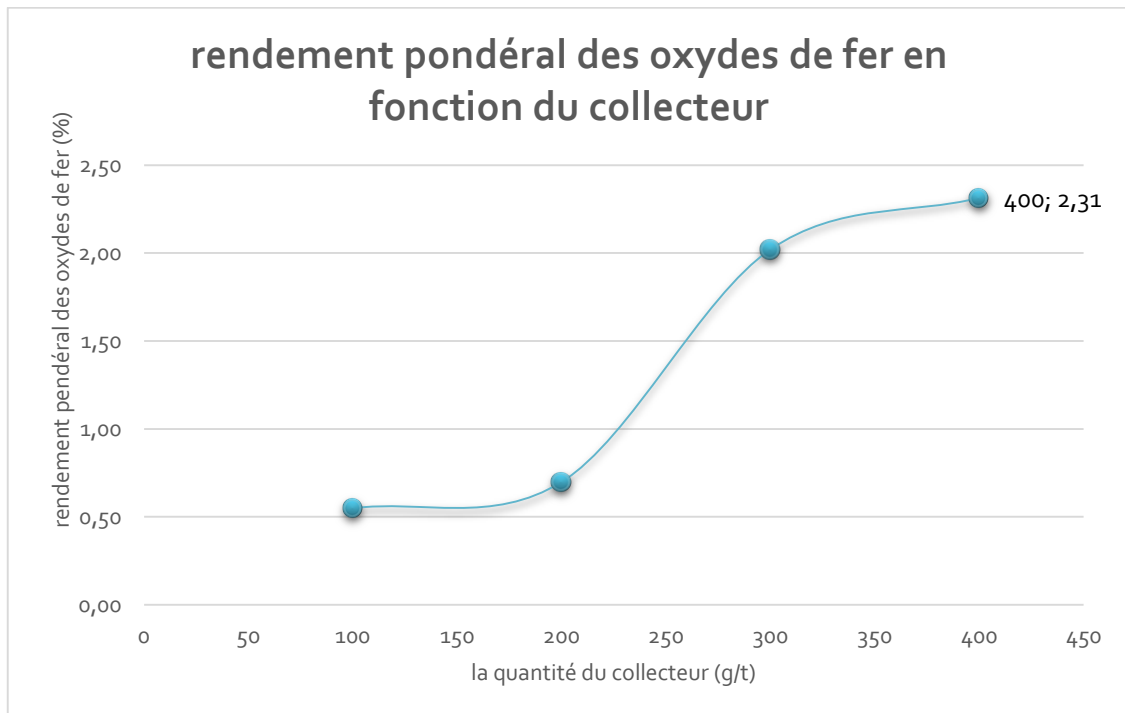


Figure 48 : rendement pondéral des oxydes de fer en fonction des quantités du collecteur.

2.5.9. Interprétation des résultats

D'après la figure 50 : on remarque que la récupération des oxydes de fer augmente lorsqu'on augmente la quantité de collecteur de 100 à 400g/t. C'est à dire qu'il y a une relation proportionnelle entre la récupération et la quantité du collecteur, néanmoins nous avons trouvé que la récupération atteint le maximum à 400 g/t du collecteur donc on conclut que la quantité optimale du collecteur est de 400g/t.

2.5.10. Influence de la classe granulométrique

A partir des résultats obtenus après les essais effectués dans le cas de variation de la quantité du collecteur, on a conclu que la valeur optimale du collecteur correspond à 400g/t. donc pour que l'opération de flottation se déroule dans les meilleures conditions on doit fixer la quantité du collecteur à 400g/t, puis on passe au deuxième paramètre qui est la variation de la classe granulométrique.

Les résultats obtenus après avoir récupéré le concentré et la mousse de l'étuve (après séchage) puis l'étape de la pesée, ces deux étapes seront répétées à chaque fois et cette procédure sera répétée pour les classes granulométriques : [400-315] μm ; [315-250] μm ; [250-40] μm . Afin de trouver la classe granulométrique optimale.

2.5.11. Résultats

Les résultats de flottation sont marqués dans le tableau ci-dessous :

| Essai | Poids initial(g) | La classe granulométrique (μm) | Poids du quartz récupéré (g) | Poids de Fe_2O_3 récupéré (g) | Pourcentage du quartz récupéré (%) | Pourcentage de Fe_2O_3 récupéré (%) |
|-------|------------------|---|------------------------------|---|------------------------------------|---|
| 01 | 750 | -400 +315 | 740.21 | 8.21 | 98.69 | 1.09 |
| 02 | 750 | -315 +250 | 736.27 | 13.23 | 98.17 | 1.76 |
| 03 | 750 | -250 +40 | 733,69 | 15.26 | 97.83 | 2.03 |

Tableau 10: Résultats de la flottation.

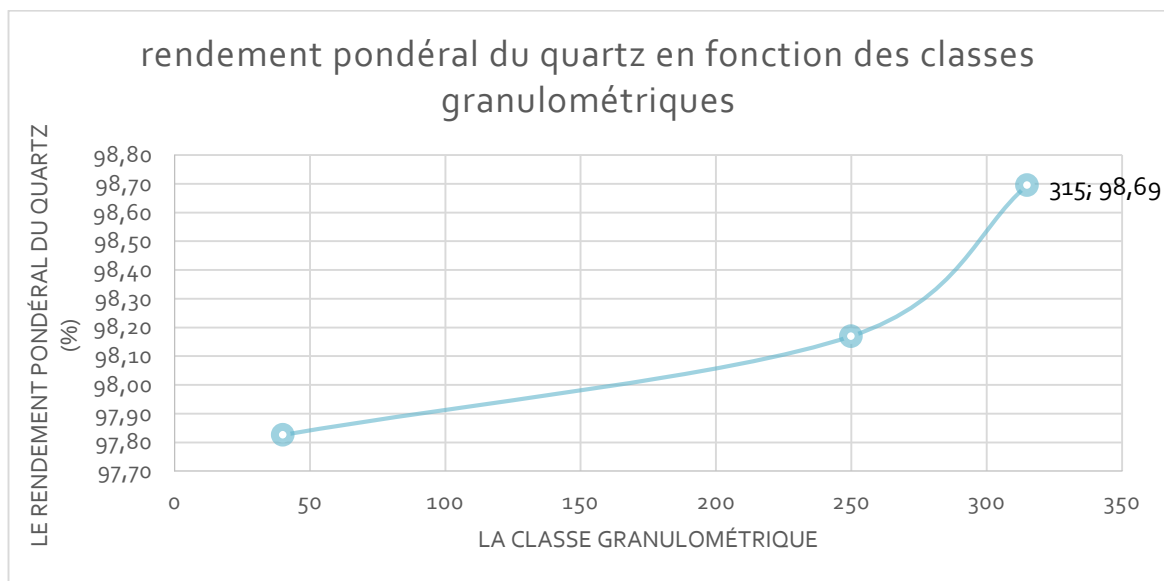


Figure 49 : rendement pondéral du quartz en fonction de la classe granulométrique.

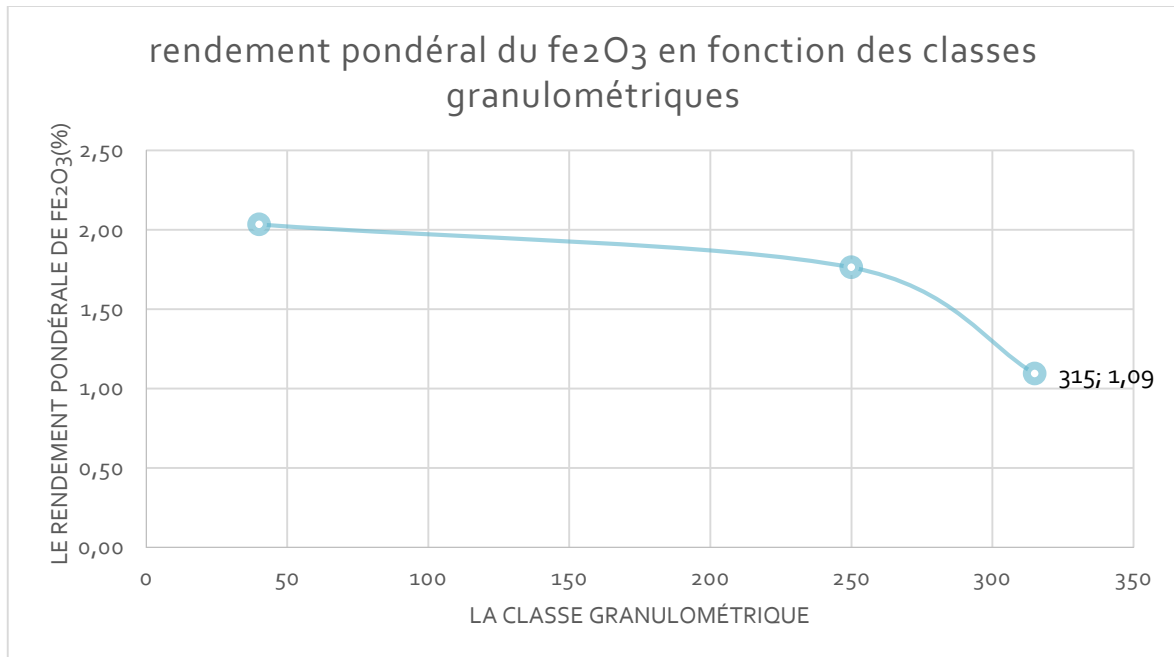


Figure 50 : rendement pondéral des oxydes de fer en fonction de la classe granulométrique.

2.5.12. Interprétation des résultats :

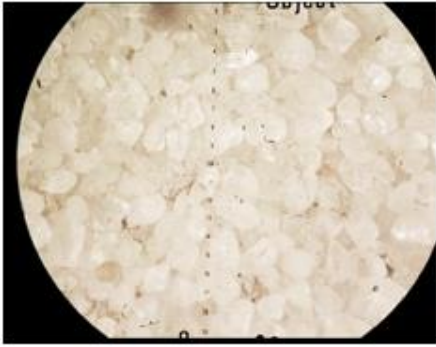
D'après les résultats de rendement pondéral obtenus sous l'influence de changement des classes granulométriques on constate qu'il y a une relation proportionnelle entre le rendement pondéral et la classe granulométrique.

A partir du graphe (figure 50) on remarque que la récupération maximale des oxydes de fer a été enregistrée dans la classe granulométrique [250-40] μm . Donc notre conclusion concerne la granulométrie qui a donné le meilleur résultat en fonction de produit de mousse ainsi que son rendement poids. Suite à nos mesures, la meilleure maille de libération des oxydes de fer est la classe des grains [250-40] μm , et plus on augmente la maille de libération, plus la récupération diminue, ce qui est normal car la densité (eau + solide) < densité de l'eau.

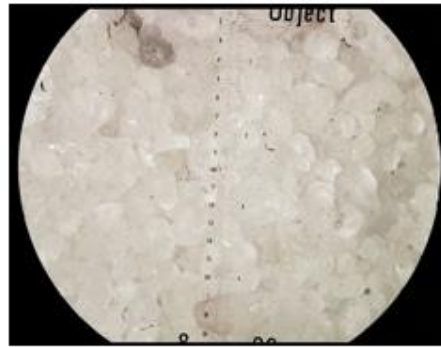
2.5.13. Analyse microscopique après flottation :

Des observations au microscope ont été réalisées sur le sable siliceux après flottation afin de déterminer l'efficacité de cette méthode.

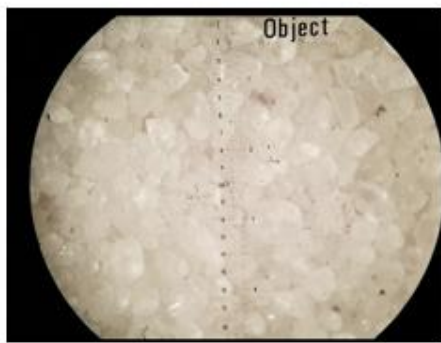
Les photos caractéristiques de ce sable présentées sur la figure ci-contre :



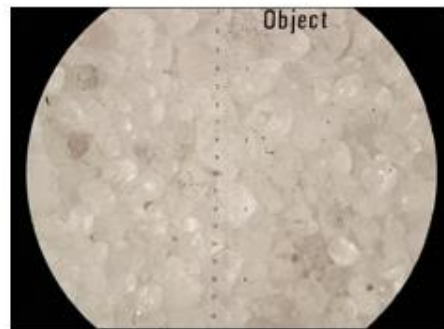
Essai flottation 01
(Quantité du collecteur=100g/t)



Essai flottation 02 :
(Quantité du collecteur=200g/t)

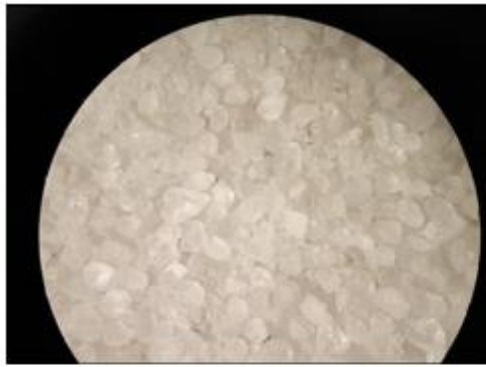


Essai flottation 03
(Quantité du collecteur=300 g/t)



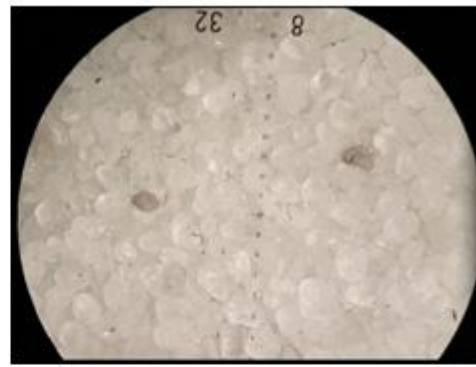
Essai flottation 04
(Quantité du collecteur=400g/t)

Figure 51 : analyse microscopique des résultats de flottation variante1.



Essai flottation 05

(La classe [40-250] μm)



Essai flottation 06

(La classe [250-315] μm)



Essai de flottation 07

(La classe [315-400] μm)

Figure 52: analyse microscopique des résultats de flottation variante 2.

2.5.14. Observation :

L'observation au microscope, nous a permis d'identifier les grains de quartz et des oxydes de fer.

- Le quartz : il apparait dans une couleur blanche arrondis et majoritaires.
- Les oxydes de fer : ils se présentent sous formes de grains indépendants de couleur grise ou noire en proportion faible.

Conclusion :

D'après les résultats obtenus durant les essais de flottation du minerai de sable siliceux afin de valoriser ce dernier on peut dire qu'en fixant les valeurs optimales des paramètres à varier, on s'approche des normes du marché pour commercialiser le minerai de sable quartzeux avec les paramètres suivants :

- ✓ Le collecteur est fixé à 400 g/t.
- ✓ La classe granulométrique est de [250-40] μm

Conclusion générale

Conclusion générale

Suite au travail effectué durant les deux derniers mois au niveau du laboratoire du département génie minier à l'Ecole Nationale Polytechnique, les conclusions pour l'enrichissement du minerai de sable siliceux du gisement sidi Bou-Ali (Chélif) sont les suivantes :

- Les méthodes de valorisation des minéraux par les procédés minéralurgiques ont toujours besoin d'un haut degré d'efficacité et de performance de point de vu équipements, de valorisation et caractérisation des produits obtenues.
- La préparation mécanique du minerai de sable siliceux nécessite un simple broyage pour atteindre les dimensions souhaitées dans l'industrie du verre.
- L'analyse granulométrique est une étape essentielle pour le traitement et la caractérisation des minerais.
- L'enrichissement du sable siliceux a besoin d'un lavage, mené dans une cellule d'attrition pour éliminer les impuretés inter faciales (argiles, fer...).
- Le processus d'attrition sert de prétraitement de la séparation du sable, dans lequel les impuretés d'argile seront éliminées.
- La séparation magnétique par voie humides n'a donné aucun résultat positif pour le sable siliceux du gisement sidi Bou Ali (Chélif).
- La séparation magnétique à haute intensité est très importante pour l'enrichissement des sables siliceux et l'élimination des impuretés surtout le fer Fe_2O_3 .
- L'application d'une séparation magnétique par voie sèche à haute intensité sur les sables siliceux permet de diminuer la teneur en oxyde de fer de l'ordre de 0.4 %.
- La séparation magnétique à basse intensité ne donne aucun résultat à cause de la faible teneur en minéraux ferreux.
- Selon les résultats obtenus par la séparation magnétique il y a une amélioration de la teneur de la silice et une diminution des impuretés de fer mais reste élevée vis-à-vis les normes imposées par le photovoltaïque.
- La séparation par flottation inverse donne des résultats très efficaces de point de vu d'élimination des impuretés telles que les oxydes de fer et diminution de la teneur en poids de l'ordre de 2%.

Conclusion générale

- Le lavage de minerai et la séparation magnétique seule ne donne pas des résultats suffisants pour la fabrication du verre de haute qualité, même la séparation par flottation seule. Il faut faire une combinaison avec ces deux méthodes de séparations.
- Les produits obtenus après séparation magnétique à haute intensité donne un résultat plus au moins acceptable pour la fabrication de certains types de verre comme les verres colorés.
- Généralement la qualité de silice obtenue après cet essai reste insuffisante, donc nous avons proposé de continuer la valorisation du minerai par la méthode de flottation. Afin d'augmenter la teneur en silice, les produits obtenus suite à la séparation magnétique feront donc l'objet d'une flottation.
- Après le processus de lavage, séparation magnétique et flottation, nous avons presque nettoyé toutes les impuretés minérales, avec une proportion importante dans le sable de quartz. La teneur en SiO_2 dans le sable de quartz peut atteindre 99.5% à 99.9%, répondant à la demande de la plupart des secteurs pour le sable de quartz.

D'après cette étude on peut proposer le schéma de traitement et de valorisation du sable siliceux « cas de gisement de Sidi Bou-Ali » présenté sur la figure ci-dessous :

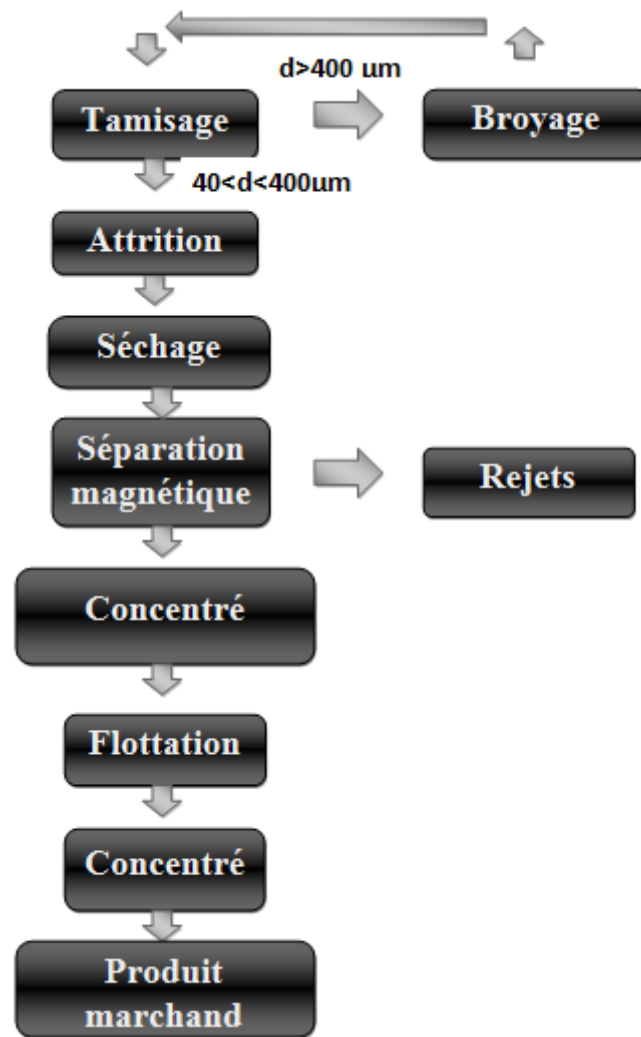


Figure 53: schéma de traitement proposé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I

[1], [2] : KERPITCH L.N. “ projet pour la prospection détaillée des sables quartzeux du gisement de Sidi Bou-Ali. Fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbas.

[3] : LITOVTCHEKOV N.J “sable quartzeux des wilayas nord-ouest algériens “. Fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbas.

[4] : “classification des réserves des gisements et ressources prévisionnelles des substances utiles dures». Commission d'état aux réserves des minéraux utiles.

[5] : <https://fr.climate-data.org/location>

[6], [7] : “études pour l'évaluation des gisements de sables quartzeux de Sidi Bou-Ali de Tadjna“. ENOF. fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbas

Chapitre II

[1] : <https://portail.cder.dz/spip.php?article1720>

[2] : www.ima-eu.org/eurosil.html

[3] : Etude de l'enrichissement du grès par séparation magnétique et attaque chimique : cas du gisement d'El Aouana.

[4] : le recyclage de verre par MARTIN benjamin et SAJE Stéphane, 2001-2004 p 5, 6, 11,12 et13 : [www. Pagesperso orange.fr](http://www.pagesperso-orange.fr)

[5], [6] : Verre, L'élaboration du verre par Gérard Pajean, VOL.13 N°5. Octobre 2007.

[7] : cellule solaire-module solaire pdf www.Halou.com

[8] : <http://blog.alma-solarshop.fr/du-silicium-aux-panneaux-solaires-quel-processus-de-transformation/>

Chapitre III

[1] : mémoire PFE « valorisation des stériles des tout-venants de carrières » KRAOUCHE Ismail ; 2007.

[2] [3] : mémoire PFE « utilisation sélective des sables de carrières dans l'industrie du bâtiment » OUAISSA Sofiane ; 2009.

[4] [6] : Pierre Blazy « la valorisation des minerais » ; 1970.

[5] : HORACE HAVER « préparation mécanique et concentration des minerais par flottation et sur liqueurs denses » ; 1952.

[7] : mémoire PFE « essais de valorisation de la pegmatite d'AboudaBouada et du kaolin d'Adjarda » ABABOU MAISSA ; 2011.

[8] : mémoire PFE « essai de valorisation par flottation de minerais polymétallique de chaabet EL-Hamra » BANKA Aissa ; 2014.

[9], [10] :mémoire PFE « essai de valorisation de la barytine du gisement de Bou-Caid par flottation »BOURBALA BRAHIM ; 2013.