



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en géologie

Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnement

(RMGE)

Thème :

Valorisation de sable siliceux pour la fabrication du verre

Cas les gisements d'El Aricha- Ras El Ma

Présenté et soutenu publiquement le 29 juin 2026, par :

MARNI SONDID Dounia

Devant le jury composé de :

M. TABELIOUNA Mohamed	Président	Professeur, Université d'Oran 2
M. CHAABANI Nour Eddine	Examineur	MCA, Université d'Oran 2
M. BENRAMDANE Hocine	Rapporteur	M.A.A. Université d'Oran 2

Année universitaire 2025-2026

Remerciements

On remercie Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement

De M. BENRAMDANE Hocine. Je le remercie pour les conseils, son soutien, sa patience et la qualité exceptionnelle de l'encadrement.

Mes sincères remerciements vont également à M. TABELIOUNA Mohammed, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

J'adresse mes remerciements aussi à M. CHAABANI Nourddine pour son aide pratique et sa disponibilité, et qui m'a fait grand honneur d'avoir accepté d'évaluer et d'examiner ce travail.

À tout le staff du département de science de la Terre et de l'Univers d'Oran 2 .

J'exprime ma profonde gratitude aux responsables des carrières Santa Cruz et Algerian Quartz .

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail de mémoire :

À moi-même, quand je n'avais plus d'énergie ou que je me sentais épuisée... et malgré tout, j'ai poursuivi mon chemin.

À mes très chers parents : Ma mère qui a tout sacrifié pour moi, qui m'a comblé de son amour, qui m'a appris que les bonnes choses dans la vie n'arrivent pas facilement. Mon père, qui a toujours été et restera toujours mon exemple et mon idole, est mon super-héros qui a sacrifié tout ce qu'il pouvait pour nous voir heureux

À mes chères sœurs : Radjae, Faridha, Israe, qui sont mes sources de joie et de bonheur.

À toute ma grande famille et à mes grands-parents, même si vous n'êtes plus là, vous vivez à jamais dans mon cœur. Que Dieu vous couvre de sa tendre miséricorde.

À mes cousines : Fatima et Amina.

À ma copine : Aya, qui est toujours avec moi.

À mes amies : Keltoum, Fatima et mes collègues de la promo Zakiaria, Manssourah

ملخص

تتوفر الجزائر على تراث منجمي هائل، لا تزال موارده من السيليكا مستغلّة جزئياً رغم الطلب الصناعي المتنامي عليها. وفي هذا السياق يندرج عملنا هذا، الذي يتمحور حول التكوينات الرملية بجنوب غرب وهران، وتحديداً في منطقة العريشة - رأس الماء. وتقع هذه المنطقة، التابعة للهضاب العليا الوهرانية، على بعد نحو ثمانين كيلومتراً جنوب تلمسان، وتزخر بترسبات من الحجر الرملي السيليسي.

اعتمدت منهجيتنا على التعرف، انطلاقاً من الخريطة والميدان، على التاريخ الجيولوجي لهذه الرواسب قبل تقييم إمكاناتها الاقتصادية. وقد قمنا بزيارة موقعين للاستغلال، ورصدنا التشكيلات القائمة، وأخذنا عينات ممثلة أخضعت لتحليل مخبرية. قد كشفت الدراسة البتروغرافية بالشرائح الرقيقة عن حجر رملي كوارتزي في معظمه، يبلغ نقاؤه في بعض الأحيان قرابة 99% من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2). أما التحليل الحبيبي، المنجز بواسطة الغربلة الميكانيكية على خمس عشرة عينة، فقد أظهر مجموعة رسوبية جيدة الفرز، تتكون في غالبيتها من رمال ناعمة إلى متوسطة الحجم، وهي المطلوبة خصيصاً في صناعة الزجاج. وتؤكد التحاليل الجيو الكيميائية أن الغسل البسيط كافٍ لرفع نسبة السيليكا إلى ما فوق 99%، مع نسب قليلة من الحديد والألومينا متوافقة مع أكثر الاستخدامات الزجاجية شيوعاً.

وفضلاً عن التوصيف وحده، قمنا بتقدير حجم الموارد بأكثر من سبعة ملايين طن في كل موقع، مما يُصنّف هذا الراسب ضمن الرواسب ذات الأهمية الصناعية الكبرى. وأخيراً، اقترحنا مخططاً شاملاً للثمين، ابتداءً من الاستخراج المكشوف وصولاً إلى معالجات الإنشاء (الحتّ الاحتكاكي، الفصل المغناطيسي، التعويم)، مروراً بالمراحل الوسيطة من غسل وغربلة وتصنيف.

الكلمات المفتاحية: الرمال السيليسية، الحجر الرملي الكوارتزي، الهضاب العليا الوهرانية، العريشة، التحليل الحبيبي، النقاء الكيميائي، صناعة الزجاج، سلسلة الثمين.

Résumé

L'Algérie dispose d'un patrimoine minier considérable, dont les ressources en silice demeurent encore partiellement sous-exploitées malgré une demande industrielle croissante. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail, centré sur les formations sableuses du sud-ouest oranais, plus précisément dans la région d'El Aricha – Ras El Ma. Il située à une quatre-vingtaine de kilomètres au sud de Tlemcen, cette zone des Hautes Plaines Oranaises recèle des affleures de grès siliceux.

Notre démarche a consisté à reconnaître, à partir de la carte et du terrain, l'histoire géologique de ces dépôts avant d'en évaluer les potentialités économiques. Nous avons ainsi parcouru deux sites d'exploitation, observé les faciès en place, prélevé des échantillons représentatifs et soumis ceux-ci à des analyses en laboratoire. L'étude pétrographique en lames minces nous a révélé des grès essentiellement quartziques, parfois si purs qu'ils frôlent 99 % de SiO_2 . La granulométrie, établie par tamisage mécanique sur quinze échantillons, montre une population sédimentaire bien triée, majoritairement constituée de sables fins à moyens particulièrement recherchés par les verriers. Les profils chimiques confirment que le simple lavage suffit à élever la teneur en silice au-delà de 99 %, avec des teneurs résiduelles en fer et en alumine compatibles avec les usages verriers les plus courants.

Au-delà de la simple caractérisation, nous avons chiffré les ressources à plus de sept millions de tonnes par site, ce qui place ce gisement dans la catégorie des gisements d'intérêt industriel majeur. Enfin, nous avons proposé un schéma de valorisation complet, depuis l'extraction à ciel ouvert jusqu'aux traitements d'enrichissement (attrition, séparation magnétique, flottation), en passant par les phases intermédiaires de lavage, criblage et classification.

Mots-clés : sable siliceux, grès quartzeux, Hautes Plaines Oranaises, El Aricha, granulométrie, pureté chimique, industrie verrière, chaîne de valorisation.

Abstract

Algeria has considerable mining resources, including silica deposits that remain partially underutilized despite growing industrial demand. Our work fits into this context, focusing on the sandy formations in southwestern Oran, more specifically in the El Aricha–Ras El Ma region. Located about eighty kilometers south of Tlemcen, this area of the Oran High Plains contains outcrops of siliceous sandstone.

Our approach involved using maps and fieldwork to determine the geological history of these deposits before assessing their economic potential. We therefore surveyed two mining sites, observed the in-situ facies, collected representative samples, and submitted them for

laboratory analysis. Petrographic examination using thin sections revealed sandstones that are predominantly quartzite, sometimes so pure that they approach 99% SiO_2 . The grain size distribution, determined by mechanical sieving of fifteen samples, shows a well-sorted sedimentary population, consisting mainly of fine to medium-grained sands that are particularly sought after by glassmakers. The chemical profiles confirm that simple washing is sufficient to raise the silica content to over 99%, with residual iron and alumina levels compatible with the most common glassmaking applications. Beyond simple characterization, we have estimated the resources at more than seven million metric tons per site, which places this deposit in the category of deposits of major industrial interest.

Finally, we proposed a comprehensive processing plan, ranging from open-pit mining to enrichment processes (attrition, magnetic separation, flotation), including the intermediate stages of washing, screening, and classification.

Keywords: silica sand, quartz sandstone, Oranian High Plains, El Aricha, granulometry, chemical purity, glass industry, valorization chain.

Liste des tableaux

Tableau 1: Pourcentages pondéraux retenus (%) sur chaque maille de tamis pour les 15 échantillons.	37
Tableau 2: Tableau d'interprétation d'environnements de dépôt associés en fonction du coefficient de tri de Trask (S0)	42
Tableau 3: Tableau synthétique les paramètres de Trask, les quartiles D_{10} , D_{25} , D_{50} , D_{75} , D_{90} et coefficient de tri S_0 pour les 15 échantillons.....	43
Tableau 4: Synthèse de la classification granulométrique (Wentworth, 1922) appliquée aux 15 échantillons.	43
Tableau 5: Résultats des analyses brutes des oxydes majeurs et traces (sable brut vs sable lavé).	45
Tableau 6: Synthèse des teneurs moyennes en oxydes majeurs (sable brut vs sable lavé).....	46
Tableau 7: Exigences chimiques et granulométriques des sables siliceux pour le verre	51

Liste des photos

Photo 1: vue générale, terrain aplati avec faible relief.....	11
Photo 2: relief aplati avec un sol rocailleux et une végétation de type Alfa , très éparées.....	11
Photo 3: Vue panoramique de la carrière montrant les gradins	24
Photo 4: Borne de délimitation	24
Photo 5: sable ocre facies friable	25
Photo 6: (A-B) : alternances des couches sableuses-argileuses	25
Photo 7: lame mince de l'échantillon SQ3' en LPNA (à droite) et LPA (à gauche)	30
Photo 8: lame mince de l'échantillon STZ en LPNA X 10 (à droite) et LPA X 10 (à gauche Qtz : Quartz.....	31
Photo 9: lame mince de l'échantillon STZ *en LPNA (à gauche) et LPA (à droite)	32
Photo 10: échantillon 01 les grains du sable au loupe binoculaire (x 2 et x 4)	33
Photo 11: échantillon de sable à la binoculaire	34
Photo 12 : Produit semi-final (sable siliceux) après le traitement	59
Photo 13: Station du traitement le sable siliceux	60

Photo E-F : Tranchée d'exploration avec conglomérats (E) ; direction des couches sableuses (F).....30

Liste des figures

Figure 1: Position géographique de Méséta-Oranaise (Piqué et al. 1998).....	5
Figure 2: Position des monts de Tlemcen selon (BENESET, BENSALAH, et al ,1999) l’encadré pour situer le secteur d’étude	5
Figure 3: Colonne Lithologique simplifiée et synthétique des Monts de Tlemcen-Daïa (Hautes Plaines Oranaises) (BENEST & BENSALAH et al, 1999).....	8
Figure 4: Situation générale du secteur d'étude (Google earth 2025).....	10
Figure 5 : carte géologique de Daia Mekaidou - Ras El Ma (extrait carte géologique Algérie 1/500 000 ,1952)	14
Figure 6: modèle structural proposé entre Mont de Tlemcen au nord et la partie nord des Hauts Plateaux sud Oranaise (d’après Bensalah,1999, modifié)	16
Figure 7 : Principaux gîtes de sable quartzeux du Nord-Ouest de l’Algérie au 1/1.250.000 ; (extrait de la carte des gîtes de sable quartzeux du Nord de l’Algérie, ASGA, 2020).....	19
Figure 08 : coupe géologique de la partie Nord-Est de djebel En-Nechchab (MANSOURI, 2022)	25
Figure 09: schéma montre la surface des grains de quartz selon Cailleux, (1942).....	33
Figure 10: Histogrammes des fréquences granulométriques (% retenus) pour les 15 échantillons	38
Figure 11: Courbes cumulatives des passants (%) de l’ensemble des 15 échantillons sur échelle logarithmique. Les lignes en pointillés indiquent les niveaux D_{25} , D_{50} et D_{75}	39
Figure 12: Valeurs des quartiles D_{25} , D_{50} et D_{75} (mm) pour les 15 échantillons. La progression croissante de D_{25} à D_{75} illustre l’étalement de la distribution.	40
Figure 13: coefficient de tri de Trask (So) pour les 15 échantillons. Les seuils $So = 1,5$ et $So = 2,0$ délimitent les classes de classement.	41
Figure 14: Profils géochimiques des oxydes majeurs (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , L.O.I) : sable brut vs sable lavé. Le trait en pointillés indique les normes verrières de référence.	46
Figure 15: Schéma de station de lavage (comm. Pers Chabaani).....	56
Figure 16: Schéma montre le principe de séparation magnétique	57
Figure 17: séparateur magnétique à tambour.....	57

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I.....	3
Le contexte géographique et géologique régional	3
I.1. Aperçu géographique	4
I.2. Aperçu géologique régional	6
I.2.1. Lithostratigraphie des Monts de Tlemcen et de Daia	6
Chapitre II	9
Le contexte géographique et géologique du secteur d'étude (El Aricha, Ras El Ma).....	9
II.1. Aperçu géographique	10
II.2. APERÇU GÉOLOGIQUE.....	12
II.2.1. Lithostratigraphie	12
Chapitre III	17
Aperçu géologique et caractérisation des gisements du sable siliceux.....	17
(Terrain et analyses de laboratoire)	17
III.1.1. Site 01	23
III.1.1.1. Station 1 : Faciès sableux ocre et clair	24
III.1.1.2. Station 2 : Grès fracturés	25
III.1.2. Site 02 :	27
III.1.2.1. Station 01 :	27
III.2. Étude pétrographique en lames minces.....	28
III.2.1. La lame SQ3'	28
III.2.1.1. Au microscope	29
III.2.2. Lame STZ.....	30
III.2.2.1. Observation générale	30
III.2.2.2. Au microscope	30
III.2.3. La Lame STZ *	31

III.2.3.1. Macroscopique et au microscope	31
III.3. Étude morphoscopique des grains du quartz	32
III.3.1. Échantillon 01 sable blanc ST	33
III.3.1.1. Interprétation selon Cailleux.....	34
III.3.2. Échantillon 02 sable jaune SAQ.....	34
III.3.3. Échantillon 03 sable blanc AQ	35
III.3.3.1. Interprétation	35
III.3.3.2. Conclusion d'étude morphoscopique.....	35
III.4. Analyse granulométrique par tamisage	36
III.4.1. Introduction	36
III.4.2. Définition analyse Trask (1930, 1932)	36
III.4.2.1. Les paramètres clés de Trask	36
III.4.3. Méthode et Dispositif Expérimental	37
III.4.4. Résultats expérimentaux.....	37
III.4.5. Histogrammes Granulométriques.....	38
III.4.6. Courbes Cumulatives des Passants	39
III.4.7. Quartiles Granulométriques D_{25} , D_{50} et D_{75}	40
III.4.8. Indices de Trask et Classement Granulométrique	41
III.4.8.1. Coefficient de tri (S_o)	41
III.4.9. Classification de Wentworth (1922).....	43
III.4.10. Conclusion de l'étude granulométrique	44
III.5. Analyse chimique.....	44
III.5.1. Résultats chimiques	46
III.5.2. Profil géochimique.....	46
III.5.3. Conclusion géochimique	47
Chapitre IV	48
Valorisation du sable siliceux.....	48
IV.1. Exploration et la recherche.....	51
IV.1.1. Site 01 STC	51
IV.1.2. Site 02 AQ.....	51
IV.2. Estimation des ressources	51
IV.2.1. Site 01.....	52
IV.2.2. Site 02.....	52

IV.3. Choix des méthodes d'extraction	53
IV.3.1. Site 01.....	53
IV.3.2. Site 02.....	53
IV.4. Choix des technologies et des procédés de traitement.....	53
IV.4.1. Phase 1 Extraction et homogénéisation	53
IV.4.1.1. Homogénéisation.....	53
IV.4.2. Phase 2 Prétraitement : débouillage, lavage et criblage	54
IV.4.2.1. Débouillage et lavage primaire	54
IV.4.2.2. Criblage	54
IV.4.3. Phase 3 Attrition	54
IV.4.4. Phase 4 Lavage secondaire et classification granulométrique.....	55
IV.4.5. Phase 5 Séparation magnétique.....	57
IV.4.5.1. Principe.....	57
IV.4.5.2. Types d'équipements	58
IV.4.5.3. Résultats attendus.....	58
IV.4.6. Phase 6 Flottation	58
IV.4.6.1. Principe général	58
IV.4.7. Phase 7 Lixiviation acide (purification à haute pureté)	58
IV.4.7.1. Objectif	58
IV.4.8. Séchage, conditionnement et contrôle qualité	59
Conclusion générale	62
Références bibliographiques	64

Introduction générale

La silice industrielle est l'une des matières premières minérales non métalliques les plus utilisées dans le monde. Elle est essentielle pour la production de verre, la fonderie, l'électronique et les énergies renouvelables. En Algérie, malgré les richesses géologiques du pays, le sable siliceux est sous-exploité.

Les Hautes Plaines Oranaïses sont une région de transition entre le domaine tellien et l'Atlas saharien. Cette région contient des couches sédimentaires épaisses allant du Jurassique au Quaternaire. Les formations détritiques du Paléocène à l'Éocène continental affleurent dans cette région. Elles sont composées principalement de grès et de sables quartzeux.

Le secteur d'El Aricha - Ras El Ma est situé à environ quatre-vingts kilomètres au sud de Tlemcen, possède une vingtaine de carrières qui exploitent ces formations de manière artisanale et industrielle depuis 2001.

Notre objectif est de caractériser complètement les gisements de sable siliceux de la région. Nous avons mené une investigation de terrain sur deux sites distincts et nous avons réalisé des analyses pétrographiques, granulométriques, morphoscopiques et chimiques. Les résultats de ces analyses nous permettent de réfléchir à la meilleure façon de valoriser ces ressources, de l'estimation des réserves à la conception du processus de traitement.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Les deux premiers chapitres présentent le contexte géologique régional et local. Le troisième chapitre décrit notre approche et les résultats des analyses de laboratoire. Le quatrième chapitre propose une estimation des ressources et explore les voies technico-économiques pour une valorisation industrielle.

À travers ce parcours, nous avons cherché à démontrer que ces formations, longtemps considérées comme de simples grès, recèlent en réalité un potentiel considérable pour l'industrie verrière.

But du travail

Notre travail poursuivait plusieurs objectifs complémentaires :

- Dresser un état des lieux géologique détaillé de la région d'El Aricha – Ras El Ma, en croisant des données bibliographiques et des observations de terrain.
- Caractériser minéralogiquement les différents faciès sableux (ocre, clair, grès fracturés) à travers l'étude pétrographique en lames minces.
- Évaluer la qualité granulométrique des sables par tamisage mécanique, en s'appuyant sur les méthodes de Trask.
- Quantifier la pureté chimique des échantillons (bruts et lavés) et la comparer aux seuils requis par l'industrie verrière.
- Estimer les ressources exploitables des deux sites étudiés et esquisser une chaîne de valorisation technico-économique.

Méthodologie

Notre démarche méthodologique s'est construite en plusieurs étapes successives, de la reconnaissance terrain aux analyses de laboratoire :

- Phase de terrain : visites de deux sites (Djebel Ouazzene et Sidi Yahia), relevés structuraux, description des faciès et des prélèvements.
- Préparation des lames minces : réalisation de six lames au laboratoire de géologie de l'Université Oran 2, observation au microscope optique polarisant Euromex (grossissements $\times 5$ et $\times 10$), interprétation selon la classification de Folk (1969).
- Analyse morphoscopique : examen à la loupe binoculaire des grains de quartz (fraction $> 0,5$ mm) selon Cailleux (1942).
- Analyse granulométrique.
- Analyses chimiques.
- Étude de faisabilité : calcul des tonnages, conception d'une chaîne de traitement en huit phases .

J'ai utilisé l'IA Claude pour réaliser les histogrammes et les courbes de l'analyse granulométrique et pour les analyses de chimie aussi.

Chapitre I

Le contexte géographique et géologique régional

I.1. Aperçu géographique

Les Hautes Plaines Oranaïses, parfois désignées de manière moins précise par le terme de Méséta Oranaïse, forment une vaste région naturelle de l'Ouest de l'Algérie. Elles s'étendent sur environ 650 km d'est en ouest, depuis la vallée de la Moulaya (Maroc) jusqu'aux limites sud-ouest de la wilaya de Tiaret (Ciszak, 1993). Cet ensemble géographique est de forme losange et il est limité au nord par les reliefs des Monts de Tlemcen et du Tell Oranaïse, au sud par les premiers chaînons de l'Atlas saharien (figure 01) . Elle représente une zone de transition morpho-structurale entre le domaine Tlemcénien au nord et le domaine atlasique au sud (Guardia 1975 et Fenet 1975). Notre région d'étude fait partie des Hautes Plaines Oranaïses, qui constituent l'ensemble plat qui s'étend depuis la frontière marocaine jusqu'aux monts de Daïa et de Saïda à l'est (figure 02).

Les altitudes sont comprises entre 1050 et 1218 m. Le relief adopte une morphologie relativement tabulaire ou modérément montagneuse. On cite Djebel Mekaidou à l'ouest et Djebel Ouazzene à l'est.

Cette région steppique, avec un climat évoluant entre le semi-aride et l'aride, avec un été chaud et sec (+ 40 °C en août) et un hiver froid et humide parfois (-3 °C en hiver) selon l'altitude. Les précipitations moyennes dépassent 600-700 mm/an.

Le réseau hydrographique est peu développé par les oueds intermittents qui coulent vers le nord et vers le sud, ils sont secs pendant les saisons chaudes.

La végétation est steppique avec des touffes de l'Alfa surtout et quelques zones herbacées qui servent de pâturage, l'agriculture et agro-pastorale.

Concernant la faune est représentée par plusieurs espèces ; qui ont pu s'adapter à ce climat semi-aride.

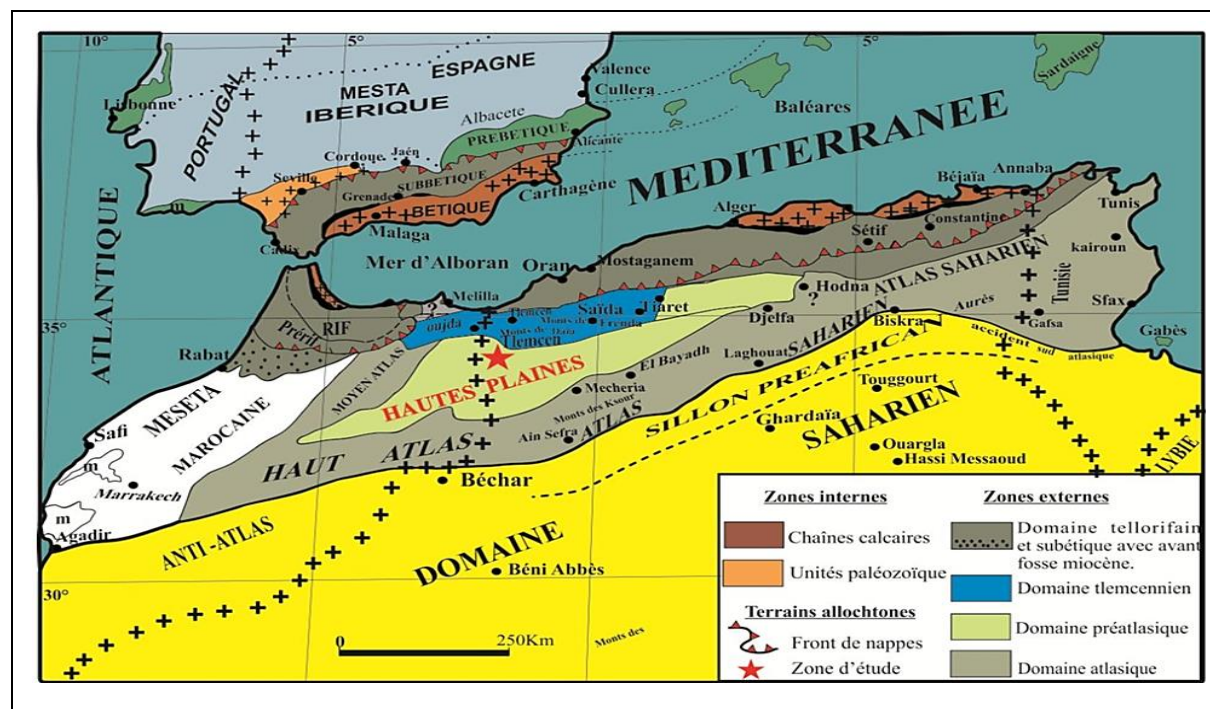


Figure 1: Position géographique de Méséta-Oranaise (Piqué et al. 1998)

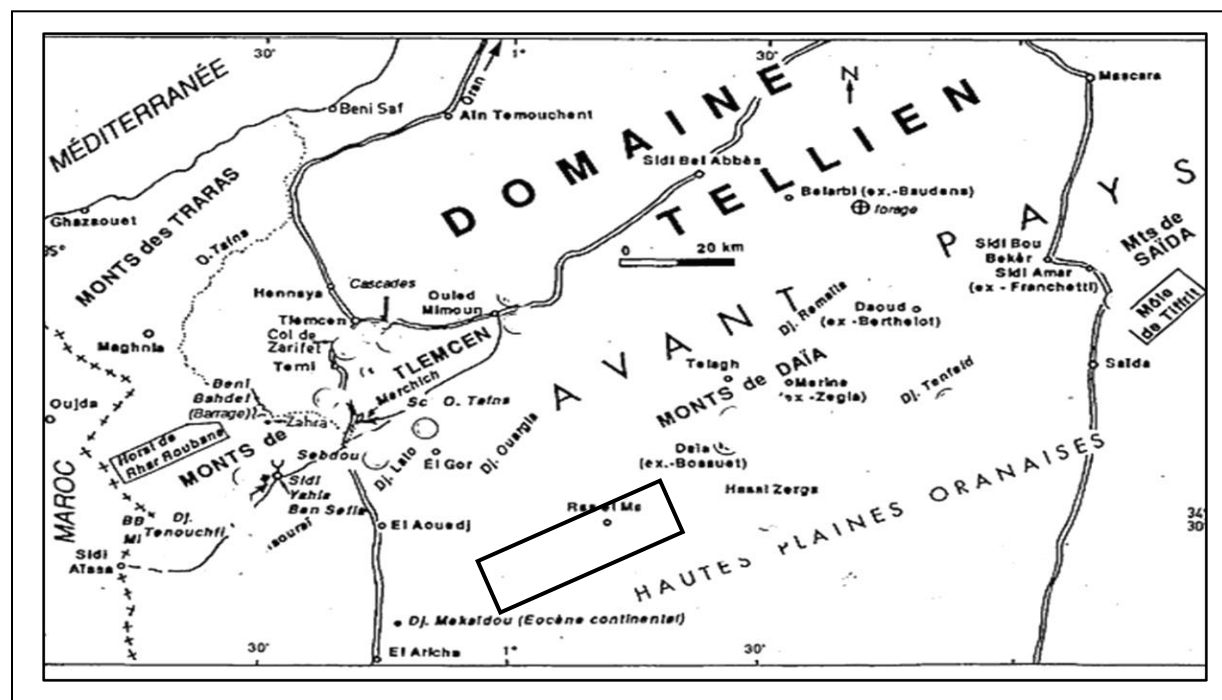


Figure 2: Position des monts de Tlemcen selon (BENESET, BENSALAH, et al, 1999) l'encadré pour situer le secteur d'étude

I.2. Aperçu géologique régional

La géologie des Hautes Plaines Oranaises représente la continuité des séries lithologiques des Monts de Tlemcen, qui affleurent plus au Nord. Elle est dominée par une série carbonatée, principalement constituée de calcaires et de dolomies attribués au Jurassique supérieur, surmontée par des formations détritiques essentiellement gréseuses datées du Crétacé inférieur. D'un point de vue structural, la région est structurée en un horst et graben orienté ENE-WSW limités par les accidents verticaux.

I.2.1. Lithostratigraphie des Monts de Tlemcen et de Daia

La litho stratigraphie a été largement documentée par Benest (1985), Benest et al. (1999) ainsi que Benest & Bensalah (1995). Elle se résume à une série sédimentaire allant du Jurassique supérieur au Quaternaire, avec un substratum paléozoïque non affleurant. Le paysage est dominé par des dépôts discordantes au Paléocène à Éocène marquant le retour de la sédimentation dans un environnement continental.

Dans le détail, la série est représentée de bas en haut par (figure 03) :

➤ *Paléozoïque (socle paléozoïque) :*

Aucun affleurement paléozoïque n'est connu dans les Monts de Tlemcen. Il est recoupé par des sondages, les nombreux forages hydrauliques réalisés dans la région jusqu'à plus de 500 mètres de profondeur, n'ont pas pu atteindre le paléozoïque sous-jacent [Benest et al., 1999 ; Bensaoula, 2007]. La connaissance du Paléozoïque repose uniquement sur des corrélations, ou il est constitué de roches métamorphiques et magmatiques héritées de l'orogénèse hercynienne.

➤ *Jurassique supérieur (Malm) :* Il est constitué de :

- Grès de Boumediene (200 m à 400 m), d'âge Oxfordien supérieur à Kimméridgien supérieur surmontés par :
- Les calcaires de Zarifet (1000 m) d'âge kimméridgien supérieur, de nature bioclastique, parfois dolomitiques. Ils sont surmontés par :
- Les dolomies de Tlemcen (200 m), Kimméridgien terminal : des dolomies massives, parfois grossièrement cristallines, mais très poreuses.

Chapitre I Le contexte géographique et géologique régional

Le passage Jurassique – Crétacé : est représenté par des faciès plus marin avec des :

- Marno-calcaires de Raourai (Tithonien basal), à la base surmontée par les calcaires de Lato (Tithonien inférieur) puis les dolomies de Terni (Tithonien inférieur) et enfin les marno-calcaires de Hariga (Tithonien supérieur).

➤ *Le Crétacé inférieur* : est constitué de bas en haut par :

- Marno-calcaires d'Ouled Mimoune 250 à 300 m (Tithonien supérieur à Berriasien basal).
- Argiles de Lamoricière 150 m (Berriasien moyen à supérieur) .
- Grès de Berthelot 150 m (Berriasien terminal à Valanginien inférieur) :.

➤ *Paléocène* :

Le paléocène est absente, en raison d'une phase compressive majeure (phase éoalpine ou pyrénéenne) qui a provoqué le soulèvement et l'érosion dans la région.

➤ *L'Éocène* : est de nature continental avec :

- (1) des dépôts fluviaux proximaux (conglomérats grossiers et chenaux gréseux) formant des cônes alluviaux.
- (2) des dépôts de plaine d'inondation (argiles silteuses) caractéristiques des zones d'épandage distal.
- (3) des niveaux pédogénétiques matérialisés par d'importants encroûtements carbonatés

➤ *Miocène* :

Est de nature marine discordant, représenté par des dépôts argilo-gréseux ; témoins de la transgression miocène sur un substratum déjà structuré par les phases tectoniques antérieures.

➤ *Quaternaire* :

Les formations quaternaires sont bien développées, elles consistent principalement sur des alluvions, des éboulis de piémont, des croûtes calcaires ainsi que des dépôts éoliens.

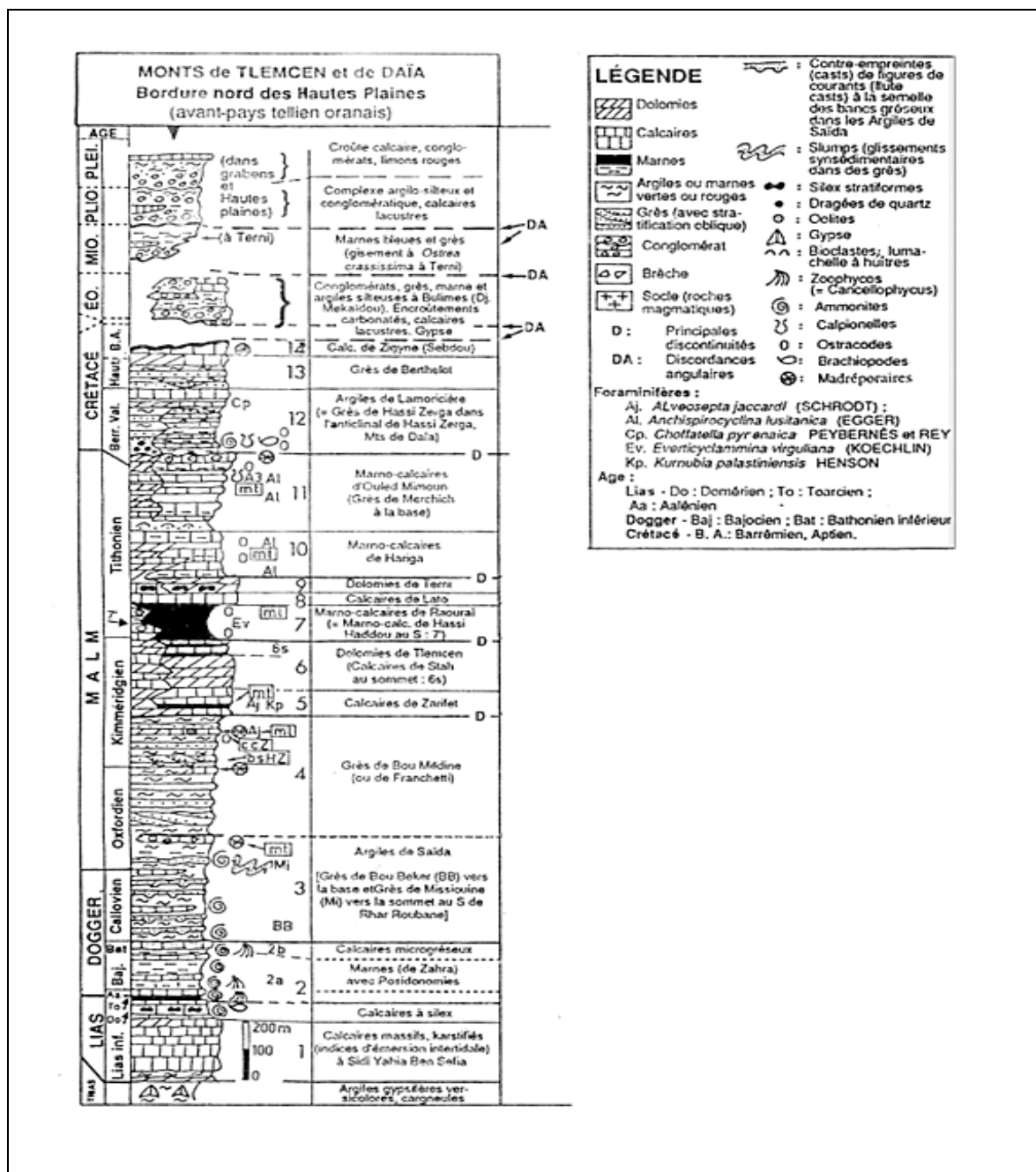


Figure 3: Colonne Lithologique simplifiée et synthétique des Monts de Tlemcen-Daïa (Hautes Plaines Oraïses) (BENEST & BENSALAH et al, 1999)

Chapitre II

**Le contexte géographique et géologique
du secteur d'étude (El Aricha, Ras El Ma)**

II.1. Aperçu géographique

Le secteur d'étude, situé sur les Hautes Plaines Oranais. Il est localisé entre El Aricha – Ras El Ma, exactement à Djebel Taerziza et Djebel Ouazzene.

Il se situe à environ 80 km au sud de Tlemcen, accessible par la route de Sebdou RN 22 et à 10 km à l'est d'El Aricha. Son accès est facilité par sa proximité immédiate (environ 2 km) de la route nationale 13 (RN 13), qui relie El Aricha à Ras El Ma (figure 04).

La région est à relief très plat 1218 m, avec quelques chaînons de faibles altitudes orientés NE-SO (photos 1 & 2). Le point le plus haut se trouve sur Djebel Mekaidou à 1430 m environ. Les autres reliefs de la région sont :

- Sidi El Abed à l'ouest.
- Djebel Ennechab.
- Djebel Taerziza.
- Djebel Ouazzene.

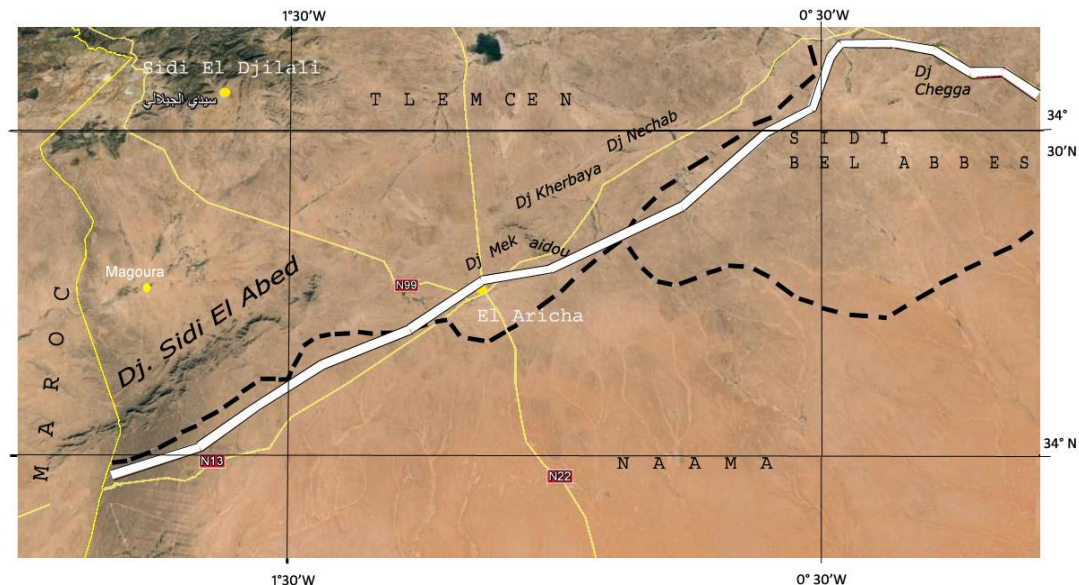


Fig. : situation générale du secteur d'étude (extrait de l'Image Landsat 2015 Google Earth)

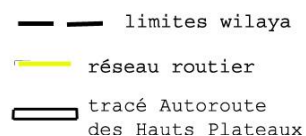


Figure 4: Situation générale du secteur d'étude (Google earth 2025)



Photo 1: vue générale, un terrain plat avec faible relief.

Photo 2: relief aplatit avec un sol rocailleux et une végétation de type Alfa, très éparse



II.2. APERÇU GÉOLOGIQUE

II.2.1. Lithostratigraphie

La lithostratigraphie de la région d'El Aricha repose principalement sur les travaux pionniers de Lucas G. (1962) et plus récemment, sur les études détaillées menées par Terletsky A. et al. (1992) dans le cadre de la cartographie au 1/50 000. Ces chercheurs, grâce à des investigations de terrain approfondies et à des coupes précises, ont progressivement révélé l'architecture sédimentaire de cette région des Hautes Plaines Oranaïses.

Comme c'est souvent le cas des Hautes plateaux occidentales, l'affleurement est fragmentaire (moins de 20 % pour le Jurassique) et les fossiles demeurent rares, ce qui impose une certaine prudence dans les attributions chronostratigraphiques. La synthèse qui suit est ordonnée du Trias au Quaternaire (figure 05) :

✓ Le Trias :

Le Trias moyen ladinien (T2) est absent en affleurement, il est révélé par les sondages et composé d'une série volcano-sédimentaire associant basaltes amygdalaires, micro-dolérites, des calcaires micritiques et des niveaux gypseux, et une épaisseur partielle dépassant 210 m. La présence d'*Avicula cf. condata* indique la datation au Trias moyen.

➤ MÉSOZOÏQUE :

Le Mésozoïque est représenté, sur le territoire d'étude, par les formations du Jurassique.

Le Jurassique :

Le jurassique débute par le Sinémurien (J1s), terme le plus ancien, correspond à des calcaires massifs sombres de 58 m d'épaisseur, datés du Lotharingien grâce à *Rhynchonella moghrobiensis* et *Zeilleria polymorpha*.

Les dépôts jurassiques, bien que largement présents dans la région, n'affleurent que de manière dispersée et ils ne couvrent que moins de 20 % de la surface étudiée. Ils se concentrent principalement dans le massif d'El Abed et son piémont nord-est, et se subdivisent en deux grands ensembles : le Jurassique moyen (Dogger) et le Jurassique inférieur (Lias).

Le Dogger (J2d) est dominé par des faciès carbonatés marins-calcaires et dolomies en buttes-témoins, dont la coupe type au massif d'El Hairech montre une succession de dolomies poreuses à cavernueuses avec interlits de calcaires oolithiques, pour une épaisseur totale de 150 à 240 m.

Le Toarcien (J1t) est-il rare en affleurement, représente une alternance de dolomies et calcaires organogènes, marnes rouges et poudingues sur 120 à 170 m, dans un contexte de plateforme mixte.

Le Pliensbachien (J1p), épais de 180 à 250 m, est caractérisé par des calcaires bioclastiques à nodules ferrugineux et des dolomies bréchiques, dont la microfaune (*Cypricardia porrecta*, *Rhynchonella quadrata*) confirme cet âge.

➤ **CÉNOZOÏQUE KZ :**

Le Cénozoïque est représenté par les dépôts éocènes et plio-quadernaires :

✓ **L'Éocène (e) :**

Il est de nature détritique continentale rougeâtre, composée de méga-brèches, conglomérats brunâtres, marnes rougeâtres, argiles verdâtres à jaunâtres, et passées d'encroûtements calcaires. La base montre des lentilles conglomératiques à ciment calcaire. La faune à Romanella et Vicentinia (Bensalah. M et Benest .M 1987) confirme l'âge éocène. Épaisseur totale atteignant ~150 m.

✓ **Pliocène – Quaternaire supérieur (Pc – Q3) :**

C'est une molasse continentale d'origine alluvio-torrentielle à lacustre, occupant des dépressions et des hauts topographiques. Alternance de brèches, conglomérats hétérométriques, graviers, argiles sablonneuses à limoneuses grisâtres à brunâtres, et calcaires friables à crayeux. Épaisseur estimée >300 m. Dépôt en transgression sur tous les termes antérieurs.

➤ **Quaternaire (Q4) – Holocène à Pléistocène supérieur :**

Les dépôts sont meubles, diversifiés et peu consolidés, d'origine périglaciaire, colluviale, torrentielle et éolienne. Ils se répartissent en trois types principaux : éluvio-colluviaux (limons sableux à anguleux, ép. 1–2 m), formations torrentielles (cônes de déjection, ép. <1 à 15 m), et formations éoliennes (sables fins à limons brun-rougeâtre, ép. 0,2–2 m). Ils sont localement classés sous « Quaternaire indifférencié ».

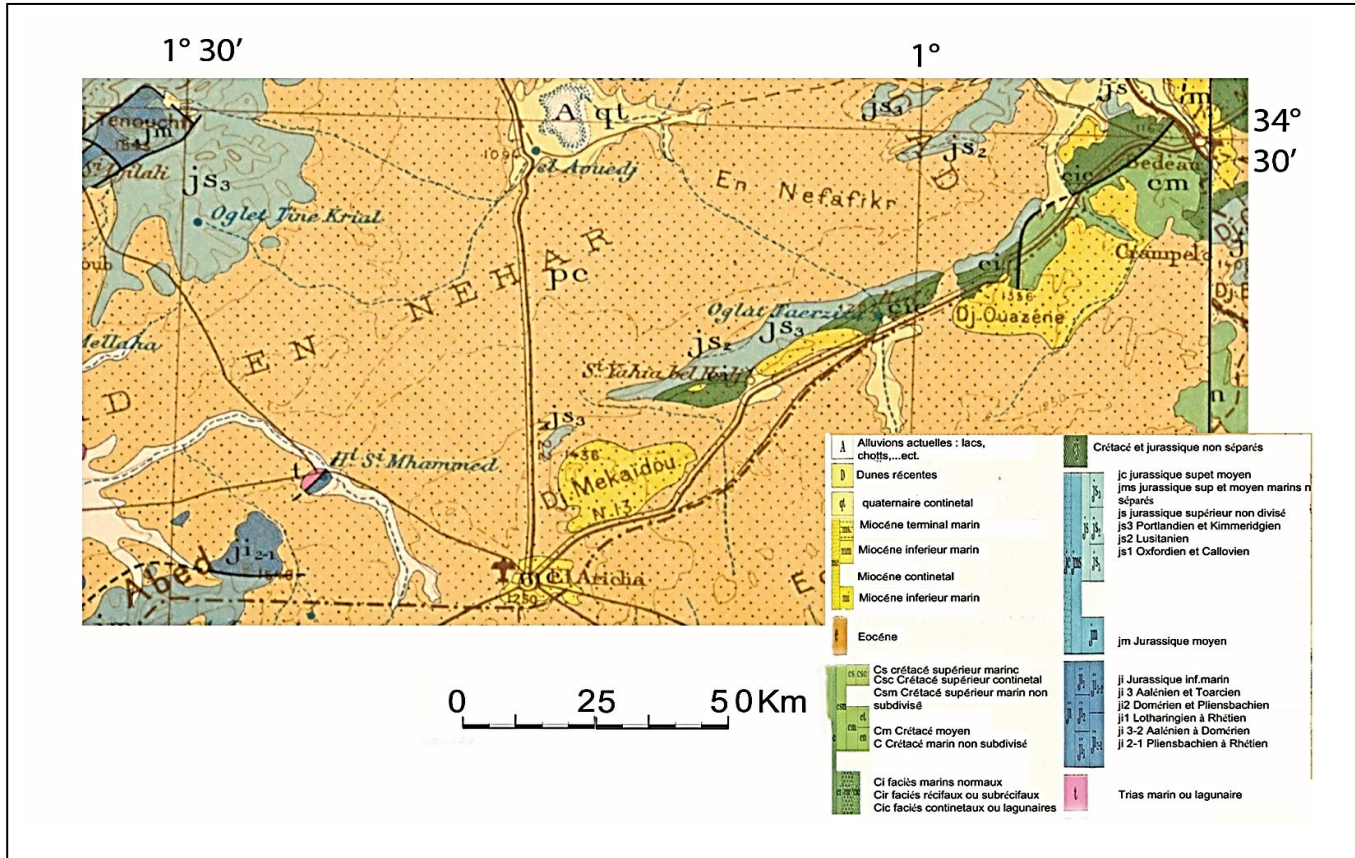


Figure 5 : carte géologique de Daia Mekaidou - Ras El Ma (extrait carte géologique Algérie 1/500 000 ,1952)

II.2.2. Tectonique

Cadre structural de la région de Monts de Tlemcen et de Daia

La structuration de la région a été réalisée par 04 phases tectoniques (BENEST et al., 1999) :

1. Phase compressive éoalpine (fin Crétacé – Éocène) .
2. Phase distensive (fin Éocène – Oligocène) .
3. Phase compressive (Miocène S I)
4. Dernièrement, une phase quaternaire.

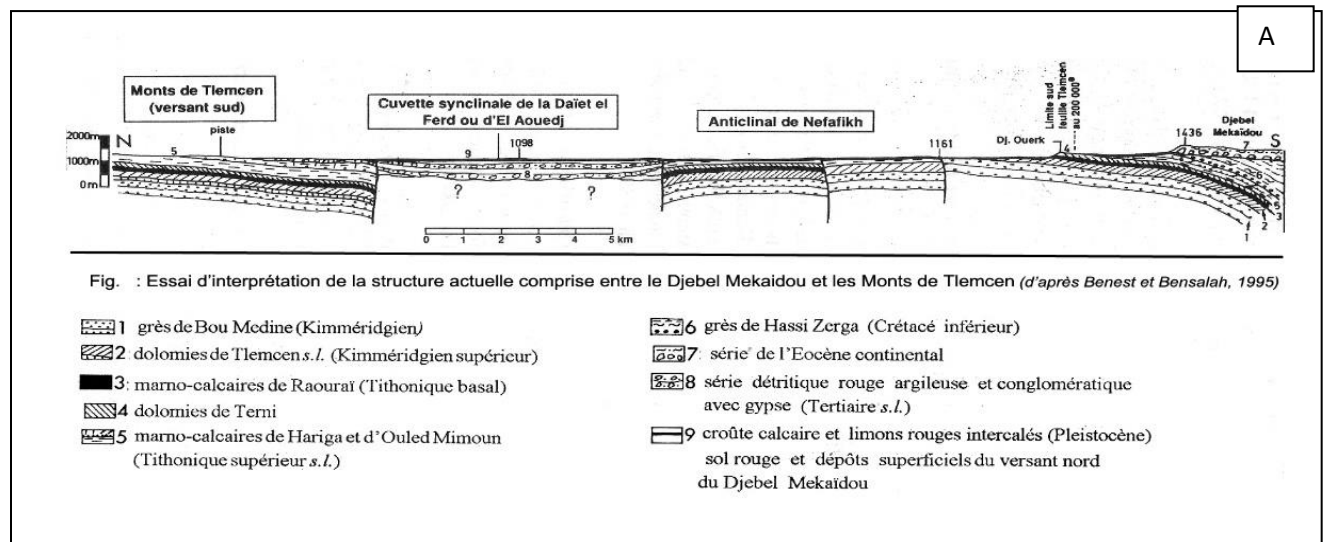
Sur le plan structurel, il s'agit d'un ensemble tabulaire, monoclinale et subhorizontal. Il est orienté SW-NE et WSW-ENE, découpé par des accidents orientés NNE-SSW hérités du socle hercynien

(figure A). Cette structuration attribuée à une phase compressive éoalpine (Fin Crétacé à Éocène). Des failles tardives ont entraîné un découpage en horsts et grabens.

À ces structures (en horsts et grabens) s'ajoute une tectonique plicative, avec des structures plissées et chevauchantes par endroits, par exemple, l'anticlinal de Nefafikh, considéré comme la plus grande structure plissée, est localement renversé vers le sud-est. Il constitue le cadre structural pour les couches argileux-gréseuses de Djebels En Nechhab, Taerziza et Ouazzène. Les couches sont orientées N20°-N25°E avec des pentes subverticales de (75° à 85°) NW, représentent probablement seulement le flanc sud (Benest et al., 1999 ; Mansouri, 2022). La formation du Mekaidou, datée de l'Éocène moyen à supérieur, repose en discordance angulaire sur ce paléo-relief érodé de Nefafikh, marquant ainsi cette première phase de déformation.

Les phases tectoniques suivantes ont progressivement compliqué ce schéma. La distension fin-éocène à Oligocène a réactivé les accidents du socle selon des directions N55-80 et N140, accentuant le découpage en blocs de la couverture. La compression miocène a ensuite renforcé les plis existants, générant des chevauchements vers le sud et le sud-ouest.

Dans le Daia, on observe trois familles de failles orientées N40°E, N150°E et N00°. Ces failles reconnues auraient de nouvelles fissures ouvertes et diaclases à remplissage de calcite (Benest et al., 1999).



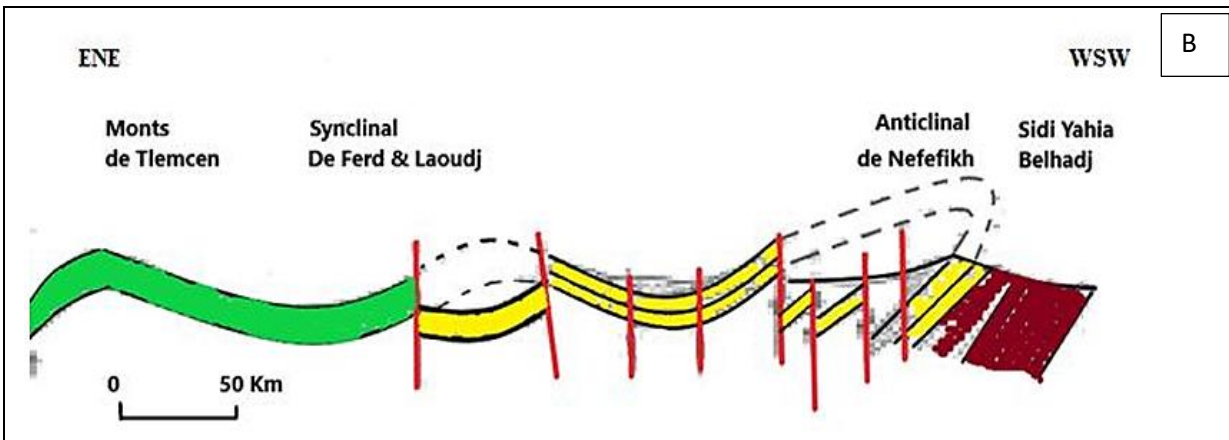


Figure 6(A-B): modèle structural proposé entre Mont de Tlemcen au nord et la partie nord des Hauts Plateaux sud Oranaise (d'après Bensalah, 1999, modifié)

Chapitre III

**Aperçu géologique et caractérisation des
gisements du sable siliceux
(Terrain et analyses de laboratoire)**

Ce chapitre est composé de deux sous-chapitres :

1. Sous-chapitre : géologie du gisement.
2. Sous-chapitre : caractérisation du gisement (analyse de la granulométrie et analyses géochimiques).

III.1. Géologie de gisement

Les gisements de sables quartzeux et sables siliceux destinés au verre se concentrent dans les wilayas du Nord (Chlef, Mostaganem, Tébessa, Tlemcen, Skikda et Saïda). À ceux-là, d'autres gisements sont exploités pour la fonderie ou l'ajout au ciment. Des indices sont peu étudiés et les utilisations sont encore mal définies (W. Naama, Djelfa, Tiaret, Tizi Ouzou, Annaba, Tipaza) et au sud (El Oued, Illizi, Biskra, Beni Abbes, El Mneaa, Djanet), mais qui peuvent être exploités pour le verre après études détaillées (figure 07).

La production nationale de sables dits industriels (siliceux ou quartzeux) a nettement progressé ces dernières années, avec un total de production annuelle dépassant 72145 t/an en 2019. Alors que la production mondiale de la même année a dépassé les 330 millions de t/an (ASGA, 2020).

L'étude géologique constitue le fondement géologique de tout projet d'exploitation minière. Dans ce cadre, nous avons mené une recherche qui s'attache à reprendre la démarche, de la reconnaissance sur le terrain à l'analyse en laboratoire.

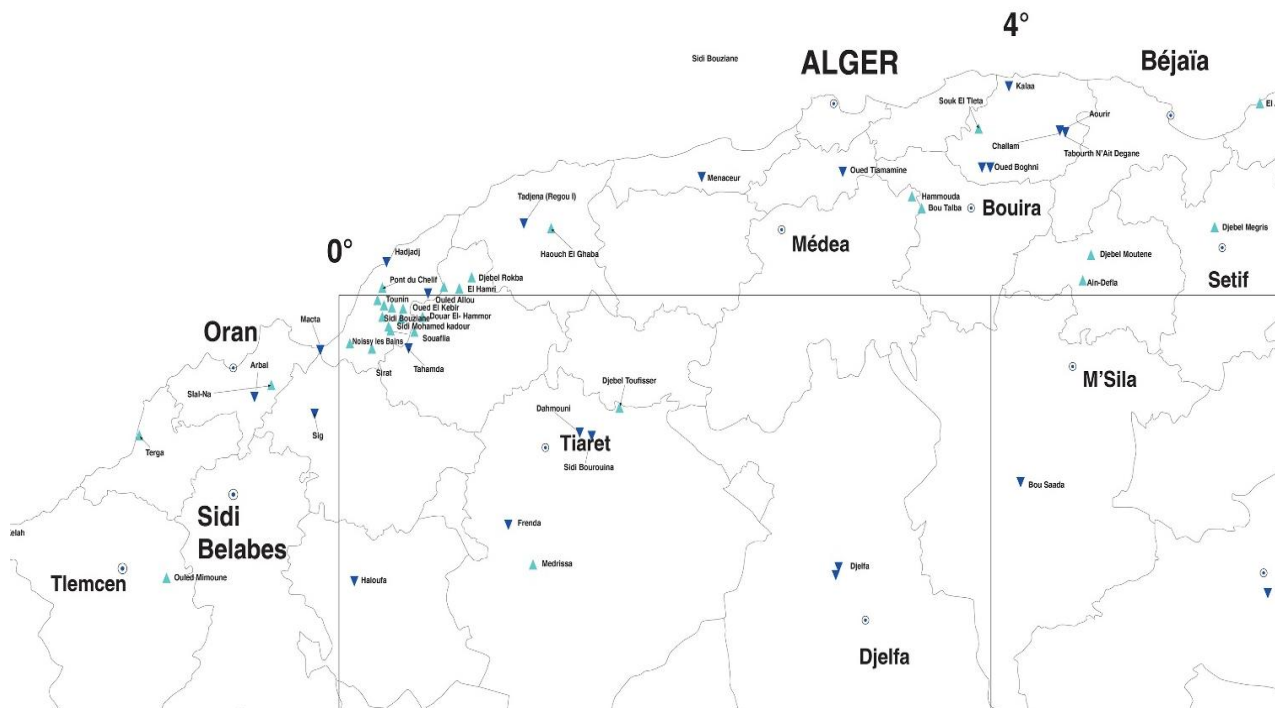


Figure 07 : Principaux gîtes de sable quartzeux du Nord-Ouest de l'Algérie au 1/1.250.000 ; (extrait de la carte des gîtes de sable quartzeux du Nord de l'Algérie, ASGA, 2020).

Les gisements de la région El Aricha – Ras El Ma

Les études des formations détritiques du sud de Tlemcen montrent que l'on ne parle pas initialement de sable ou de silice, mais de grès siliceux et de grès argileux, appartenant principalement aux couvertures sédimentaires du Paléocène (Benest et Bensalah, 1999).

Bien que la région soit explorée depuis les premières expéditions des services coloniaux au XIX^e siècle, **les travaux historiques et miniers** n'ont mis en évidence aucun indice ou gîte de sable siliceux, malgré que la population autochtone ait creusé des poches d'extraction artisanale de sable destiné à la construction

En effet, G-B-M. Flamand (1911), pionnier dans l'étude globale des plateaux du Sud-Oranais, n'en fait aucune mention.

De même, l'inventaire minéral régional établi suite aux campagnes de prospection systématique de la SONAREM et de l'ORGM (entre 1970 et 2000), ciblant pourtant les substances métalliques et non-métalliques, ne signale aucun indice de ce type.

Plus récemment, M. Bensalah (1989), dans ses travaux sur l'Éocène et le Paléocène continental du domaine des Hautes Plaines, a confirmé l'existence de séries sédimentaires de grès siliceux et argilo-gréseux dans le secteur exact d'El Aricha - Ras El Ma, sans pour autant identifier de sables.

Si l'exploitation artisanale du sable par la population locale est ancienne, la mise en valeur industrielle officielle de cette ressource débute véritablement avec l'application de la loi minière n°01-10 du 3 juillet 2001. Actuellement une vingtaine de carrières sont en activité dans la région.

Notre contribution est de reprendre la démarche depuis la reconnaissance sur le terrain jusqu'à l'analyse en laboratoire de ces formations sableuses de quelques sites de la région.

Le sable siliceux :

En sédimentologie, le sable se caractérise par deux critères essentiels : sa granulométrie (taille des particules) et sa nature minéralogique. À l'échelle élémentaire, chaque particule est appelée « grain de sable ».

Le sable siliceux est un sable de quartz, donc principalement composé de dioxyde de silicium (SiO_2). Il s'agit d'un matériau granulaire dont la dimension est comprise entre 0,062 et 2 mm. Le sable peut avoir une origine naturelle : issue de la désintégration de roches riches en quartz (SiO_2) au cours de leur érosion, ou bien une origine artificielle : il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, comme on l'appelle aussi sable de carrière, et il se caractérise par des grains aux aspérités marquées.

On distingue plusieurs types de sable siliceux tous dépend de :

- La pureté.
- La granulométrie.
- L'origine.

Le tableau ci-dessous résume les applications et exigences selon la norme algérienne et la norme internationale ;

Domaine d'application		Type de sable	Exigences	Norme algérienne (NA)	Référentiel international (ISO)
GÉNIE CIVIL	Béton de structure, mortier, routes	Sable ordinaire : sable de rivière, d'oued, calcaire concassé.	Sable propre, les argiles et les fines < 5%.	NA 16002 (Béton - Spécification, performances, production et conformité)	ISO 9279 (Granulats) ; ISO 19595 (Granulats pour béton harmonisation méthodes d'essai)
		Sable siliceux :	Spécifications : sable naturel siliceux, grains arrondis, propre, sec.	NA 523 : (Sable normal pour essais de liants hydrauliques)	ISO 679 (Méthodes d'essai des ciments — sable de référence)
		Sable ordinaire	L'équivalent de sables pour béton	NA 455 : déterminant les valeurs limites de l'Équivalent de Sables (ES)	ISO 9279
INDUSTRIEL	Verrerie	Sable siliceux	Verre : Taille des particules (100-600 µm) Composition chimique (SiO ₂ 98,5 à 99%, Al ₂ O ₃ 0,2 à 1,6%, Fe ₂ O ₃ < 0,04%) - Verre optique Fe ₂ O ₃ < 10 ppm - Fibres optiques Fe ₂ O ₃ < 1 ppm	NA 8214 : Essais des matières premières utilisées dans l'industrie du verre et de la céramique - Dosage du silicium	NE 3.02.144
	Céramique	Sable siliceux	Céramique : Taille des particules (< 75 µm) - Composition chimique (SiO ₂ 97,5%, Al ₂ O ₃ < 0,55%, Fe ₂ O ₃ < 0,2%)	NA 8214 : Essais des matières premières utilisées dans l'industrie du verre et de la céramique - Dosage du silicium	NE 3.02.144
	Réfractaires	Sable siliceux	Réfractaires : Taille des particules (>600 µm) - Composition chimique (SiO ₂ > 97%, Al ₂ O ₃ < 0,1%, Fe ₂ O ₃ < 0,2%, alcalis < 0,3%)	NA 2375 : Produits réfractaires isolants façonnés - Classification	ISO 2245:2006

	Fonderie,	Sable siliceux	Fonderie : Taille des particules ($>600 \mu\text{m}$) - Composition chimique ($\text{SiO}_2 > 97\%$, Al_2O_3 0,08 à 0,5%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,03\%$)	NA 13287 : Outillage de moulage - Composants des moulages par compression, moules d'injection et moules pour fonderie sous pression - Termes et symboles	ISO 12165 :2000
	Pétrole	Sable siliceux	Pétrole : propreté, résistance mécanique, forme des grains, faible teneur en fines	NA 21497 : Industries du pétrole et du gaz naturel - Fluides de complétion et matériaux - Partie 2: Mesurage des propriétés des matériaux de soutènement utilisés dans les opérations de fracturation hydraulique et de remplissage de gravier	ISO 13503-2 :2006
	Filtration	Sable ordinaire ou siliceux	Filtration : granulométrie, indice d'uniformité, propreté, faible teneur en matière organique	Pas de norme NA dédiée ; pratiques locales de drainage et d'amendement	ISO 3310-1
AGRICOLE	AGRICOLE	Sable ordinaire et siliceux	Drainage, amendement, cultures, lits filtrants ; perméabilité et propriétés hydrauliques des sols sableux	Pas de norme NA dédiée ; pratiques locales de drainage et d'amendement	ISO 14688-1 ; ISO 11276 ; ISO 11277

On le trouve soit :

- a) Dans des gîtes primaires (filons) : mis en place par des solutions hydrothermales (stériles de minéralisations polymétalliques)
- b) dans des gîtes d'altération : Il s'agit des gisements de kaolin provenant de l'altération in situ de granites, le quartz est alors un sous-produit
- c) dans des gîtes détritiques : (sables et quartzites) où la richesse en quartz des roches constitue une véritable concentration résiduelle à l'issue de l'altération.

III.1.1. SITE 01

Sur les deux sites d'exploitation, on a prélevé des dizaines d'échantillons entre 01 et 02 kg : du sable friable et des roches. Ainsi, on a échantillonné dans les grès fracturés ; la quantité varie entre 500 g et 1 kg.

La première reconnaissance de terrain a été menée sur le site 01 , localisée au niveau du Djebel Ouazzen (El Gour). L'accès au site s'effectue par la route nationale N13 reliant Ras El Ma à El Aricha. Ses données géographiques sont :

UTM 30 Nord Sahara		Géographique	
X	Y	Latitude	Longitude
687607	3809270	34° 24'38''N	0° 57'27''O
687607	3809855	34° 24'57''N	0° 57'27''O

Altitude : 1 219 m.

Observation de terrain

L'exploitation en carrière se développe en gradins de 5 à 7 m, avec une pente suffisamment douce pour prévenir tout risque d'éboulement (photo 03), conformément aux normes en vigueur. Elle est par ailleurs délimitée par les bornes de concession (photo 04), et sa progression est conditionnée par la proximité d'un cours d'eau (oued)



Photo 3: Vue panoramique de la carrière montrant les gradins



Photo 4: Borne de délimitation

III.1.1.1. Station 1 : Faciès sableux ocre et clair

On a observé dans la première station : deux faciès ; l'un correspond à un niveau de sable quartzeux friable ; son niveau est superficiel à un faciès ocre (photo 05), et l'autre est clair. La séquence lithostratigraphique montre une série d'alternances d'argile gréseuse ou de la couche utile en occurrence, constituée de grès siliceux, de grès dur, d'argile gréseuse et d'argile de niveaux grisâtres friables et de niveaux verdâtres à rougeâtres (photo 06) (figure 08).

Les mesures structurales indiquent une orientation des couches à N 70°, avec un pendage de 60°. Elles sont recoupées par une fracturation orientée N 30° qui est subvertical.



Photo 6: (A-B) : alternances des couches sableuses-argileuses



Photo 5: sable ocre facies friable

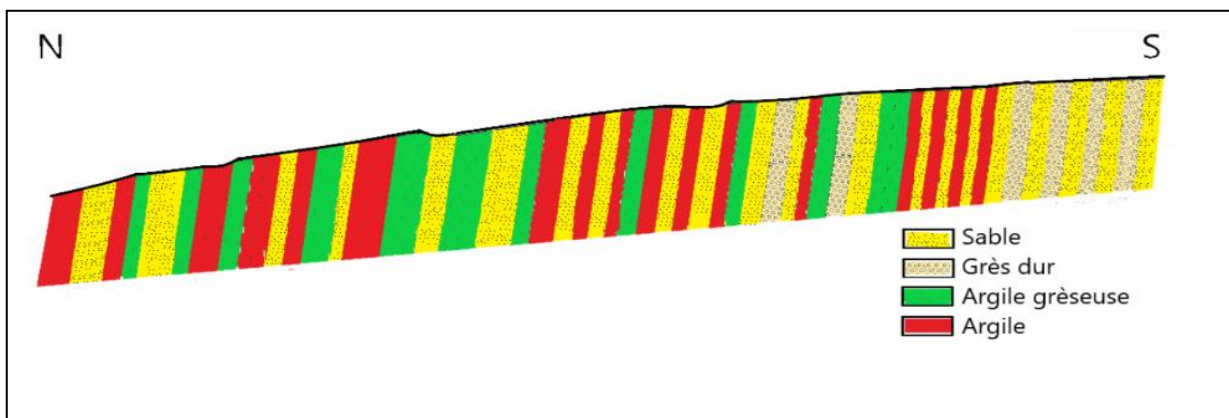


Figure 8: coupe géologique typique de la partie Nord-Est de djebel En-Nechhab (MANSOURI, 2022)

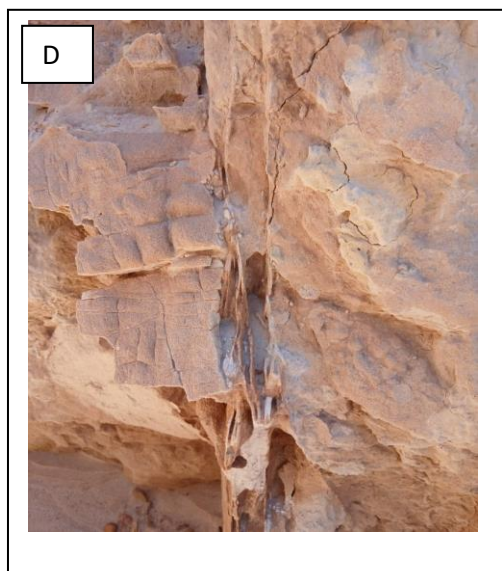
III.1.1.2. Station 2 : Grès fracturés

Les échantillons ont été prélevés dans les faciès clairs, ce sont : des grès et des argiles bicolores (rouge et vert) et des grès fracturés d'épaisseur métrique à décimétrique (les photos ci-dessous C-D)

. Sur le plan structural, les couches présentent une orientation générale N 70°, et la fracturation affectant ce secteur est orientée N 130° à caractère subvertical. L'exploitation est sélective sur ce site uniquement de la couche sable blanc.



Phtoto C: Argiles bicolores (rouge, vert) ; Photo D: grès fracturé avec un filon de remplissage de calcite postérieur.



III.1.2. Site 02 :**III.1.2.1. Station 01 :**

Il se situe à proximité du village de Sidi Yahia, El Aricha. L'accès est possible depuis le village par une piste de 2 km. Ses coordonnées géographiques sont :

UTM 30 Nord Sahara		Géographique	
X	Y	Latitude	Longitude
676653	3885712	34° 22' 0,7" N	1° 6' 21,7" O

Altitude : 1 218 m.

Ce secteur représente la continuité lithostratigraphique du site 1, plus à l'est. La découverte est constituée de conglomérats et de tufs calcaires d'âge quaternaire. Les variations de teinte observées dans les faciès sableux sont imputables à la nature minéralogique des impuretés : la couleur jaune résulte de la présence d'hématite. Tandis que la teinte verdâtre traduit un enrichissement en argile.

L'observation de la tranchée, orientée NNW–SSE, avec pendage $> 70^\circ$ et mesurant 3 m de long sous une couverture d'environ 1 m, confirme que le site 02 présente la même structure tectonique que le site 01 (Figures E–F).



Photo E : Tranché d'exploration avec la découverte (conglomérats) ; Photo F :
direction des couches sableuses

III.2. Étude pétrographique en lames minces

L'étude pétrographique est une méthode d'analyse géologique qui consiste à observer la roche amincie, collée sur une lame de verre appelée lame mince (d'une épaisseur standard de 30 μm), au microscope polarisant (Euromex : Gx10 – x5). Cette technique rend la roche transparente pour identifier les minéraux, analyser leur agencement et reconstituer l'histoire géologique.

L'étude microscopique est faite sur 6 lames minces qui ont été réalisées au niveau de notre laboratoire de géologie de l'Université Oran 2 à partir de différents échantillons.

III.2.1. La lame SQ3'

On observe à l'échelle macroscopique que la roche est de couleur brune à rougeâtre, très friable. La taille des grains est particulièrement homogène dans un champ : elle ne dépasse pas 2 mm, représentée par des grains moyens (0,2 mm) à grossiers (0,6 mm), ce qui correspond à des sables.

III.2.1.1. Au microscope

Le quartz est reconnu par un relief faible, ayant une forme subarrondie à arrondie. Les grains sont incolores et limpides, avec une teinte de polarisation allant du gris, du jaune et du blanc du premier ordre et une extinction roulante. Ils sont presque tous craquelés. (Photo 7).

La composition Minéralogique

- a) Quartz (dominant > 95%) : C'est le minéral principal.
- b) Minéraux felsiques: On ne distingue pas clairement de feldspaths (absence de macles caractéristiques) mais l'existence des débris fins de couleurs plus vives (bleu, jaune, vert), suggère la présence même minime des minéraux felsiques.
- c) Certains grains avec couleurs plus vives (bleu, jaune, vert), possibles feldspaths ou fragments lithiques
- d) Minéraux accessoires : On distingue quelques petits points opaques (noirs) qui pourraient être des minéraux lourds ou des oxydes de fer.
- e) Absence notable: Pas de micas visibles.
 - **Granulométrie** : Les grains sont de taille relativement homogène (bien classés), correspondant à la taille des sables .
 - **Texture** : La roche possède une texture clastique (formée de débris) et jointive (les grains se touchent).
 - **Le ciment** : est carbonaté car les grains sont jointifs
 - **Nom de la roche** : Au vu de la dominance absolue des grains de quartz supérieurs à 95 % et de la maturité textural (grains arrondis et bien triés), avec une quasi-totalité de l'absence de fer et de minéraux carbonatés. D'après la classification de Folk (QFR, 1969), la roche correspond à une roche sédimentaire siliceuse : grès quartzeux super-mûre.
 - **Environnement** : Cette roche affirme un environnement de dépôt de haute énergie (comme une plage ou un milieu fluvial important) où les minéraux les moins stables ont été éliminés par l'érosion et l'altération chimique, ne laissant que le quartz, très résistant.

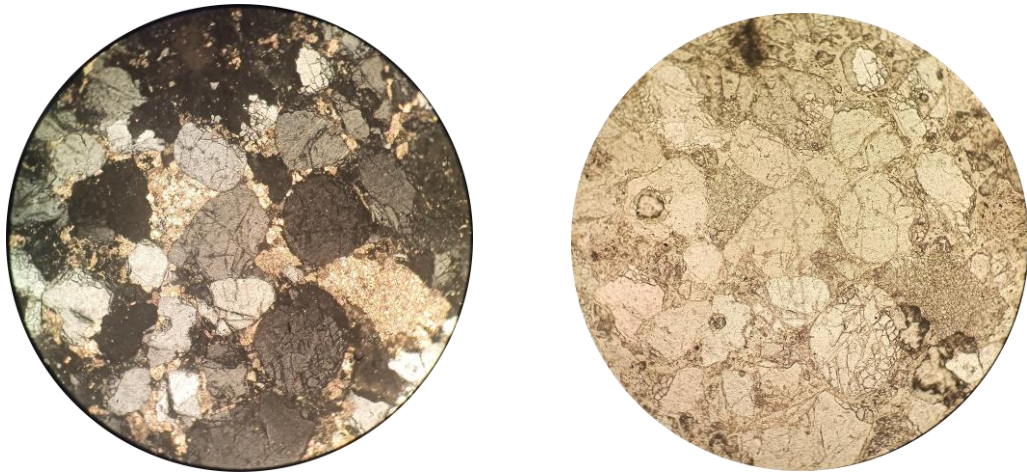


Photo 7: Lame mince de l'échantillon SQ3' en LPNA (à droite) et LPA (à gauche)

III.2.2. Lame STZ

III.2.2.1. Observation générale

La roche est de couleur claire, d'une texture un peu dure, la taille des grains est hétérogranulaire de 0,2 mm à inférieur 1 mm.

III.2.2.2. Au microscope

Le quartz présente des teintes de biréfringence du premier ordre (gris-blanc) avec un relief très faible mais parfaitement visible, de forme arrondie à sub-arrondie (photo 8)

Composition minéralogique

- a) Le quartz est le minéral dominant $\geq 95 \%$
 - b) Minéraux felsiques ou fragments de roche : une absence quasi totale, mais on distingue quelques grains de roche de type quartzite.
 - c) Minéraux opaques : présence de pyrites et d'autres d'oxydes de fer.
1. **Granulométrie** Les grains sont de taille relativement homogène (bien classés), correspondant à la taille des sables fin
 2. **Texture** : jointifs.
 3. **Le ciment** : siliceux à grain de silice fin.

4. **Nom de la roche** : la composition quasi monominérale en quartz combinée à un tri optimal des grains et un fond matriciel quasi inexistant. Cette roche est classée selon la nomenclature de Folk comme un grès quartzeux mature.
5. **Environnement** : Cette roche indique un environnement de dépôt de faible énergie (un milieu fluvial important) où seuls les grains de quartz (les plus résistants) ont survécu au transport et à l'altération chimique.



Photo 8: Lame mince de l'échantillon STZ en LPNA X 10 (à droite) et LPA X 10 (à gauche
Qtz : Quartz

III.2.3. La Lame STZ *

III.2.3.1. Macroscopique et au microscope

À l'échelle macroscopique, la roche est très consolidée ; et, à l'échelle microscopique, on distingue, pour la composition minéralogique et les caractéristiques des grains de quartz, celles des lames STZ et SQ3'. La différence consiste en la taille granulométrique et la morphologie des grains : ils sont plus petits, inférieurs à 0,2 mm, de forme anguleuse à sub-anguleuse (photo 09).

Donc, selon les critères de classification de Folk, cette roche est définie comme une quartz-arénite fine ou un grès quartzitique.

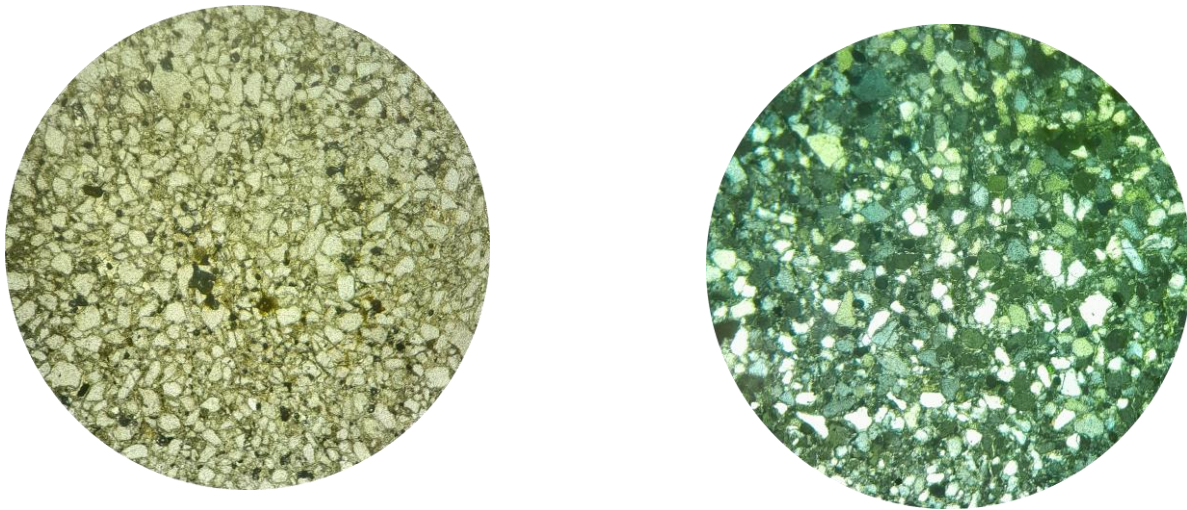


Photo 9: lame mince de l'échantillon STZ *en LPNA (à gauche) et LPA (à droite)

III.3. Étude morphoscopique des grains du quartz

La morphoscopie est définie par Cailleux (1942) comme l'étude de l'aspect de surface des grains de quartz. Elle repose sur les caractéristiques d'usure observables à la loupe binoculaire de chaque grain afin de déterminer le mode et l'agent de transport dominants et la paléogéographie du milieu.

Cailleux (1942) distingue trois catégories principales utilisées dans la présente étude (figure 09):

- **Les grains Non Usés (NU)** : grains à contours anguleux dont les arêtes ne portent aucune trace d'arrondi ni de polissage, indiquant une absence de transport ou un remaniement négligeable.
- **Les grains Émousés Luisants (EL)** : grains aux arêtes arrondies et à surface brillante, résultant d'une usure par friction en milieu aquatique, caractéristiques d'un transport fluvial ou littoral.
- **Les grains Ronds Mats (RM)** : grains bien arrondis à surface terne et granuleuse, dont l'aspect résulte d'une abrasion éolienne en milieu sec, typique des environnements dunaires ou désertiques.

On note que :

- *Les cailloux marins* : subissent une forte usure mécanique et ont un aspect **émoussé-luisant (EL)**.
- *Les cailloux fluviatiles* : ont une dynamique de transport différente (chocs modérés), donnant des grains **non usés (NU)** et parfois **EL** (en aval).

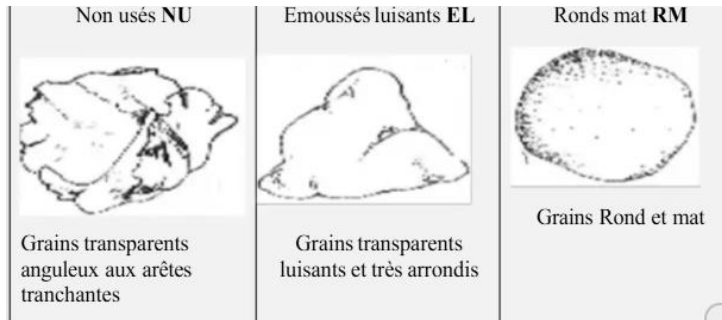


Figure 09: Schéma montre la surface des grains de quartz selon Cailleux, (1942)

L'analyse est basée sur l'examen à la loupe binoculaire (de marque Euromex) de l'usure des grains de quartz (fraction $> 0,5$ mm en général) sur trois échantillons de sable secs.

III.3.1. Échantillon 01 sable blanc ST

On voit que les grains de quartz sont hétérogènes, avec une distribution granulométrique allant de moyenne à grossière, d'un classement ou d'un tri moyen. Ils ont une forme arrondie à sub-anguleuse.

La majorité des grains sont émoussés luisants. (Photo 10)

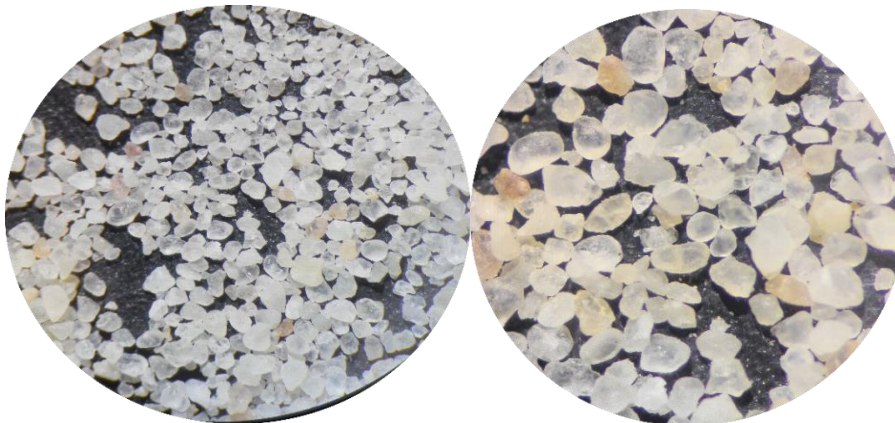


Photo 10: échantillon 01 les grains du sable au loupe binoculaire (x 2 et x 4) .

III.3.1.1. Interprétation selon Cailleux

La prédominance des grains émoussés-lissants (EL) indique un transport aquatique prolongé, l'action continue de l'eau (frottement et usure mécanique en milieu liquide). Cela a poli les angles des grains et leur a donné un aspect luisant. Le mélange de tailles et la présence de grains grossiers confirment un milieu à haute ou moyenne énergie capable de transporter divers matériaux.

III.3.2. Échantillon 02 sable jaune SAQ

On note que sa granulométrie est assez homogène, de taille moyenne ; les grains apparaissent globalement luisants, translucides à transparents, comme il y a des grains à arêtes anguleuses ; ce sont des non-usés (NU) ayant un transport d'une courte durée (modérée) (photo 11).

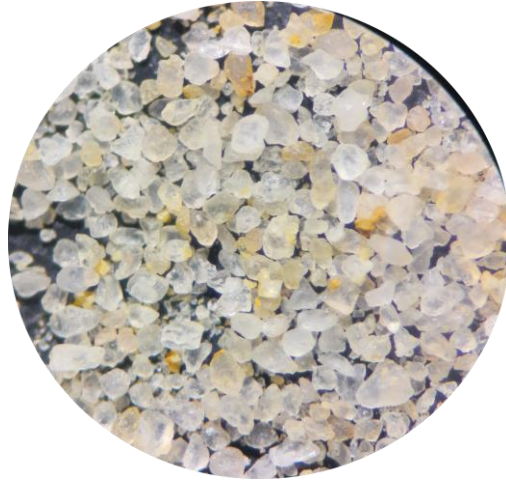


Photo 11: échantillon de sable à la binoculaire

Interprétation

La dominance des grains Non-Usés (NU), translucides et anguleux, indique que le quartz a gardé ses formes de cassure d'origine. Selon Cailleux, cela montre qu'il n'y a pas eu d'usure mécanique importante, liée à un transport de courte durée ou sur une courte distance. Le quartz est proche de sa roche mère (source).

III.3.3. Échantillon 03 sable blanc AQ

Les grains sont sub-arrondis à sub-anguleux, de taille petite à moyenne, mais semblent majoritairement avoir une granulométrie homogène, correspondant à un sable moyen à fin, d'un classement assez bon. Les émoussés luisants sont la morphologie dominante, comme on distingue encore des grains plus petits, aux formes plus anguleuses et aux arêtes vives, qui sont les non usés.

III.3.3.1. Interprétation

L'échantillon 03 présente une histoire sédimentaire mixte, probablement polycyclique. La dominance des grains émoussés-luisants (EL), fins à moyens, témoigne d'un transport aquatique prolongé et d'un tri hydrodynamique efficace.

Toutefois, la présence conjointe de sédiments plus fins et anguleux, de type non-usés (NU), indique un apport local et récent. Ce matériel "récent", qui a échappé à l'usure, s'explique soit par la confluence d'un affluent secondaire, soit par l'érosion directe des berges à proximité du point de prélèvement.

III.3.3.2. Conclusion d'étude morphoscopique

Ces trois sables nous racontent l'histoire d'un même réseau hydrographique, ou plus précisément de systèmes fluviaux, mais à différents stades de développement. On observe ainsi une évolution qui va d'un état "immature" et anguleux, comme on le voit dans l'Échantillon 02 situé en amont, à un état "mixte" en cours de transformation, représenté par l'Échantillon 03, pour aboutir à un état "mature", où les particules sont usées et émoussées par l'eau, comme c'est le cas pour l'Échantillon 01 situé en aval.

III.4. Analyse granulométrique par tamisage

III.4.1. Introduction

L'analyse granulométrique par tamisage mécanique constitue une approche fondamentale en géologie sédimentaire et en ingénierie des matériaux pour caractériser les formations meubles et évaluer leur potentiel de valorisation industrielle. Elle permet de déterminer précisément la distribution tridimensionnelle des tailles de grains au sein d'une population sédimentaire et d'extraire des indices statistiques indispensables à la compréhension des dynamiques de dépôt.

On note qu'il y a plusieurs méthodes en recherche fondamentale différentes par rapport aux méthodes utilisées par l'exploitant comme indice de finesse IF, mais on a utilisé la méthode de Trask

III.4.2. Définition analyse Trask (1930, 1932)

C'est une méthode statistique et graphique utilisée en sédimentologie pour caractériser la distribution de la taille des grains (la granulométrie) d'un sédiment meuble (sable, gravier, limon).

Elle repose sur l'utilisation de **percentiles** spécifiques extraits de la courbe granulométrique cumulée pour calculer des indices texturaux.

III.4.2.1. Les paramètres clés de Trask

Pour appliquer la méthode de Trask, on trace d'abord la courbe cumulative des composants du sédiment et on repère trois valeurs fondamentales :

- $Q1$ (ou $P75$) : Le premier quartile, qui correspond à la taille des grains à **75 %** des refus cumulés.
- Md (ou $Q2 / P50$) : La **médiane**, soit la taille du grain à **50 %** (la moitié de l'échantillon est plus fine, l'autre moitié est plus grossière).
- $Q3$ (ou $P25$) : Le troisième quartile, qui correspond à la taille des grains à **25 %** des refus cumulés.

III.4.3. Méthode et Dispositif Expérimental

Des résultats d'analyse granulométrique mis à notre disposition

Le programme expérimental a porté sur un échantillonnage systématique de 15 stations distinctes (notées S1 à S15). Chaque échantillon a été soumis à une technique de tamisage par voie sèche au moyen d'une colonne de tamis superposés à mailles carrées, calibrés selon les normes rigoureuses AFNOR. La série d'ouvertures géométriques décroissantes comprend les mailles suivantes : 2,000 mm, 1,000 mm, 0,600 mm, 0,500 mm, 0,400 mm, 0,355 mm, 0,250 mm, 0,200 mm, 0,160 mm, 0,106 mm, complétée par un fond collecteur étanche pour le recueil de la fraction inframillimétrique (< 0,053 mm). Les refus massiques retenus sur chaque niveau ont été pesés avec précision afin de calculer les pourcentages pondéraux simples et cumulés correspondants.

III.4.4. Résultats expérimentaux

Le tableau suivant présente les pourcentages pondéraux retenus sur chaque tamis pour les 15 échantillons :

N°	2.000	1.000	0.600	0.500	0.400	0.355	0.250	0.200	0.160	0.106	Fond
S1	6.3%	3.6%	3.3%	4.1%	8.0%	7.4%	27.0%	18.4%	7.3%	10.0%	4.7%
S2	6.0%	4.1%	3.5%	4.8%	9.8%	8.2%	26.5%	16.6%	6.7%	9.0%	5.0%
S3	6.2%	3.5%	3.1%	4.4%	8.1%	8.2%	26.4%	17.7%	8.0%	9.1%	5.4%
S4	6.5%	3.4%	4.5%	4.9%	9.7%	7.7%	25.9%	15.9%	6.4%	9.6%	5.4%
S5	4.8%	2.7%	3.4%	4.3%	8.5%	8.6%	26.1%	22.1%	5.2%	8.6%	5.6%
S6	6.5%	1.7%	1.4%	3.2%	3.8%	4.5%	23.1%	29.4%	11.4%	10.4%	4.5%
S7	7.5%	2.7%	1.5%	3.6%	5.4%	5.2%	25.0%	22.0%	10.5%	12.6%	4.1%
S8	4.8%	1.9%	1.4%	2.3%	5.7%	5.7%	26.9%	22.5%	11.5%	13.0%	4.4%
S9	4.2%	2.0%	3.4%	2.8%	9.3%	5.9%	28.4%	24.6%	10.0%	6.4%	3.0%
S10	0.0%	0.2%	1.1%	2.6%	8.2%	10.3%	50.9%	18.8%	3.8%	2.7%	1.5%
S11	7.1%	4.8%	6.3%	6.5%	9.3%	8.6%	21.1%	17.1%	4.2%	10.7%	4.3%
S12	6.1%	3.2%	3.9%	4.7%	8.0%	7.8%	26.1%	22.1%	5.3%	8.8%	4.0%
S13	6.4%	3.6%	3.8%	4.4%	9.2%	7.4%	26.4%	16.8%	7.3%	9.9%	4.9%
S14	4.9%	2.2%	3.4%	4.6%	8.5%	7.0%	26.3%	23.1%	5.6%	8.7%	5.6%
S15	4.0%	1.4%	3.7%	4.0%	9.0%	6.0%	27.9%	23.1%	10.4%	7.2%	3.4%

Tableau 1: Pourcentages pondéraux retenus (%) sur chaque maille de tamis pour les 15 échantillons.

III.4.5. Histogrammes Granulométriques

L'analyse des histogrammes de fréquences (Figure 10) permet de visualiser la distribution des refus pondéraux sur l'ensemble de la colonne de tamisage pour les 15 échantillons étudiés.

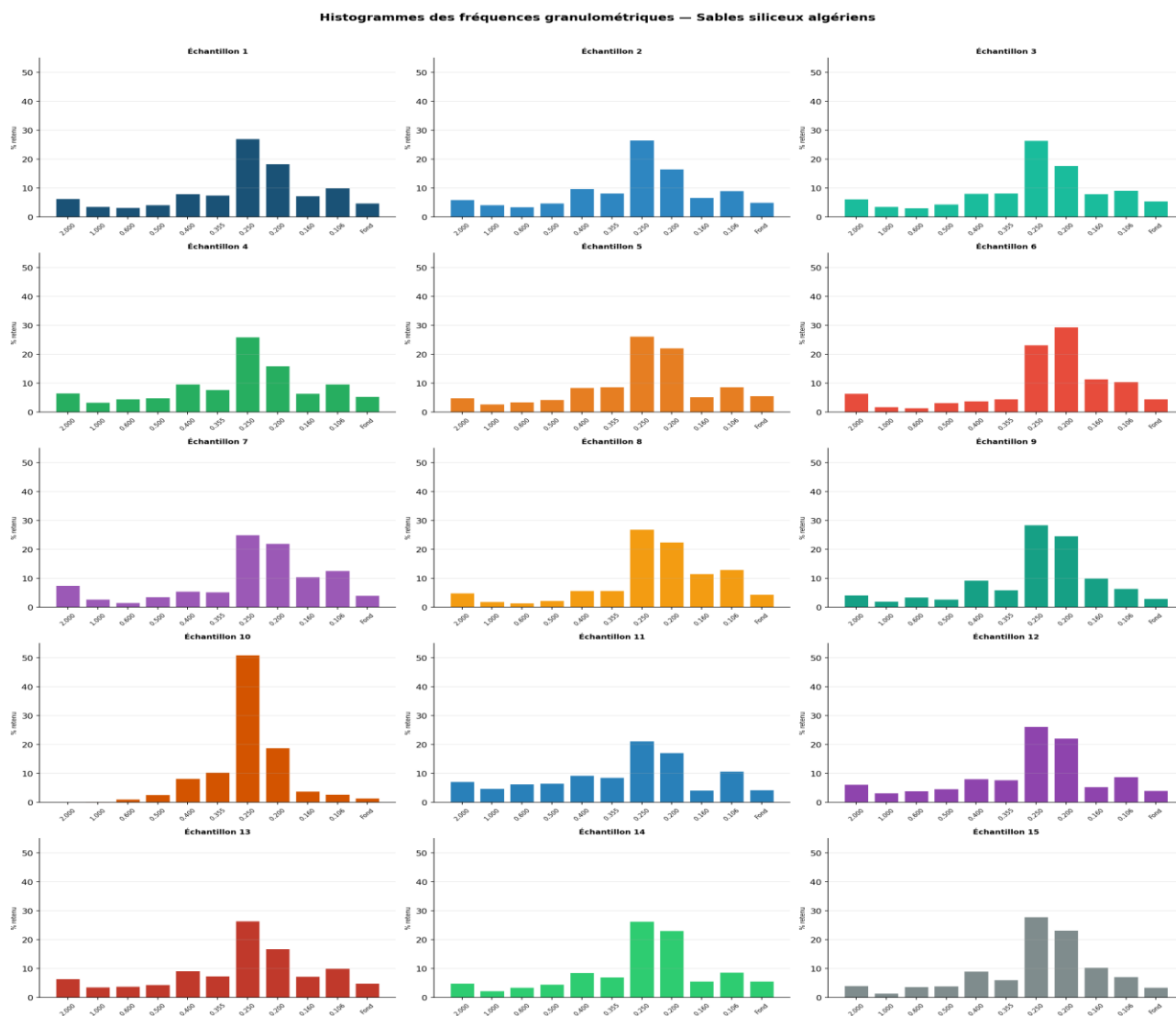


Figure 10: Histogrammes des fréquences granulométriques (% retenus) pour les 15 échantillons

Il ressort de ces graphiques que la fraction modale de la classe granulométrique prédominante se situe majoritairement dans l'intervalle 0,200–0,355 mm. Cette tendance met en évidence une nette dominance des sables fins à moyens à l'échelle globale du gisement.

III.4.6. Courbes Cumulatives des Passants

Les courbes granulométriques cumulatives des passants (Figure 11) sont construites en reportant les pourcentages cumulés de sédiments traversant chaque maille en fonction du logarithme de l'ouverture des tamis. Cette représentation graphique permet l'extraction directe des diamètres percentiles D25, D50 (médiane) et D75,

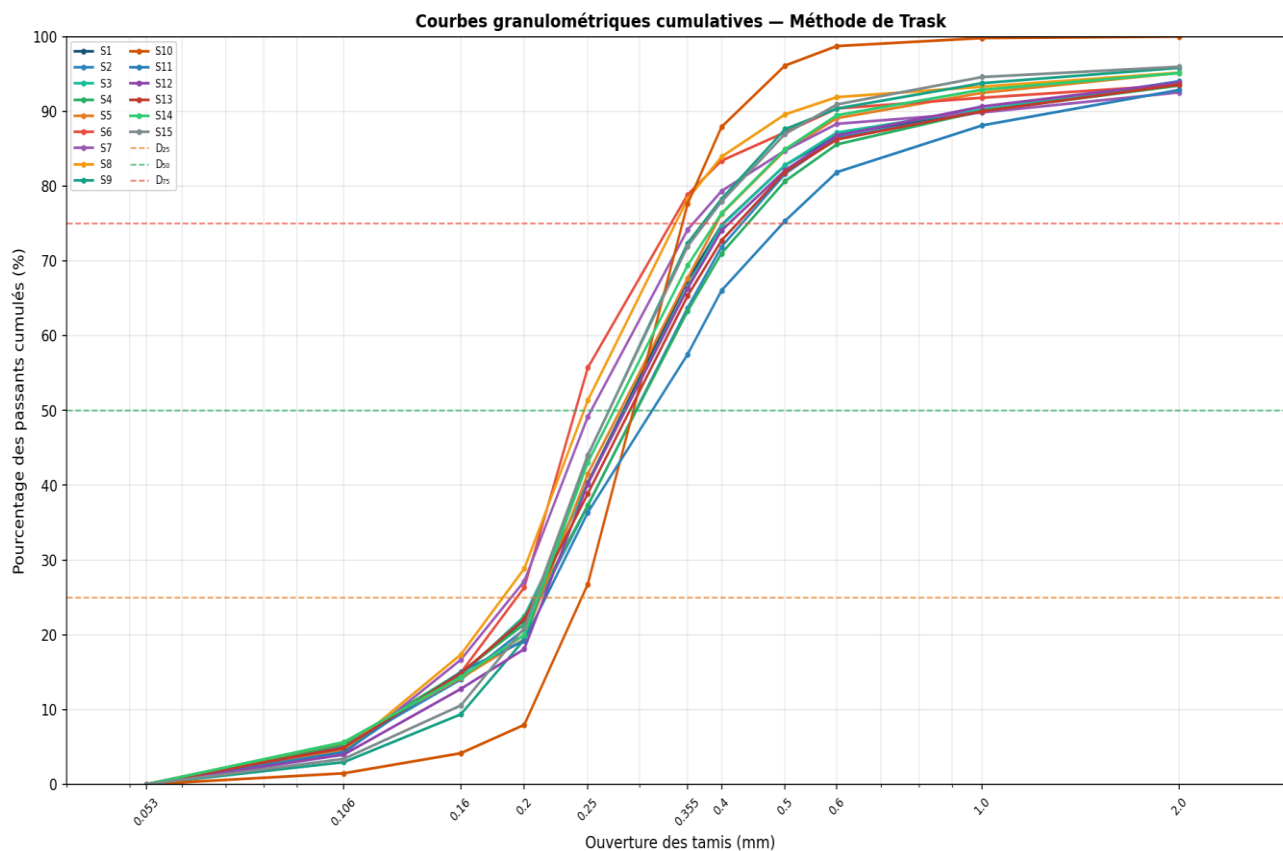


Figure 11: Courbes cumulatives des passants (%) de l'ensemble des 15 échantillons sur échelle logarithmique. Les lignes en pointillés indiquent les niveaux D₂₅, D₅₀ et D₇₅.

L'allure sigmoïde régulière manifestée par la majorité des courbes témoigne d'un tri sédimentaire homogène. Néanmoins, l'échantillon S10 se distingue par une rupture de pente particulièrement abrupte ; cette forte verticalité traduit une concentration massique des grains au sein de la classe [0,200 – 0,355 mm], laquelle englobe plus de 75 % de la population particulaire. Un tel profil met en évidence un excellent classement granulométrique, caractéristique d'un tri hydrodynamique (ou éolien) très sélectif. À l'inverse, les échantillons S6 et S8 affichent une traîne discrète vers les sables fins à très fins [0,16 – 0,20 mm], révélant un léger enrichissement en fractions fines.

III.4.7. Quartiles Granulométriques D_{25} , D_{50} et D_{75}

La détermination des trois diamètres quartiles s'effectue par interpolation linéaire directement à partir des courbes cumulatives (figure 12). Cette approche offre l'avantage de caractériser précisément la position centrale et l'étalement de la distribution granulométrique, sans requérir une analyse exhaustive de l'ensemble de la courbe.

D_{25} : diamètre au-dessous duquel se trouve 25 % du poids total du sédiment (premier quartile).

D_{50} : diamètre médian, séparant la distribution en deux moitiés égales.

D_{75} : diamètre en dessous duquel se trouve 75 % du poids total (troisième quartile).

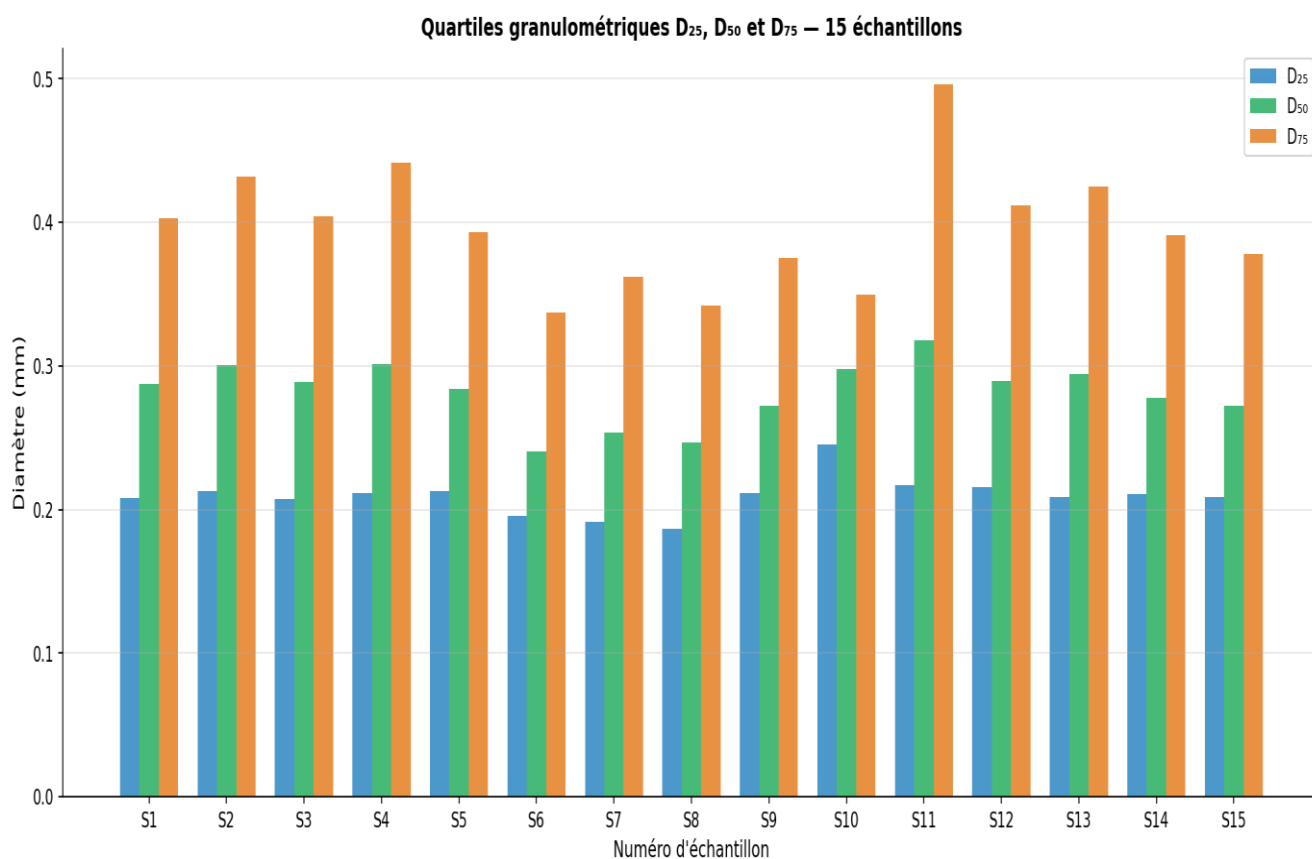


Figure 12: Valeurs des quartiles D_{25} , D_{50} et D_{75} (mm) pour les 15 échantillons. La progression croissante de D_{25} à D_{75} illustre l'étalement de la distribution.

Les valeurs présentent une progression régulière et cohérente pour l'ensemble des 15 échantillons, avec des médianes (D_{50}) comprises entre 0,24 et 0,32 mm, confirmant une dominance de la fraction sable fin à moyen. L'écart modéré entre D_{25} et D_{75} traduit un étalement granulométrique limité,

révéléateur d'un tri sédimentaire satisfaisant, à l'exception de S11 qui affiche le D_{75} le plus élevé ($\approx 0,50$ mm), signe d'une légère hétérogénéité texturale.

III.4.8. Indices de Trask et Classement Granulométrique

III.4.8.1. Coefficient de tri (So)

Le coefficient de tri de Trask, défini par l'expression $So = \sqrt{(D_{75} / D_{25})}$, permet de quantifier l'homogénéité granulométrique du sédiment. (Figure 13) .

1. Si la valeur $SO \approx 1$, cela traduit une distribution unimodale parfaitement triée.
2. À l'inverse, l'élévation progressive de cet indice au-delà de 1, met en évidence un mélange textural hétérogène, témoignant d'un tri sédimentaire de plus en plus médiocre.

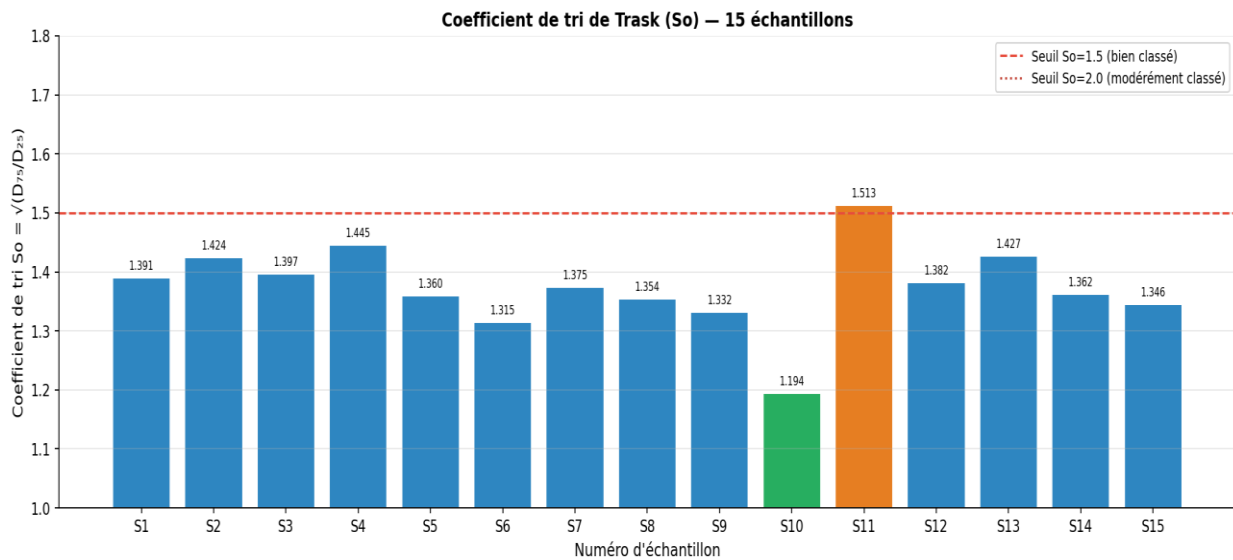


Figure 13: coefficient de tri de Trask (So) pour les 15 échantillons. Les seuils $So = 1,5$ et $So = 2,0$ délimitent les classes de classement.

Les valeurs de So comprises entre 1,194 et 1,513 indiquent que 93 % des échantillons sont bien à très bien classés (Trask, 1932), à l'exception de S11 ($So = 1,513$) qui présente une légère hétérogénéité texturale.

➤ Interprétation du tri S_0 :

Valeur du coefficient (S_0)	Qualification du tri	Signification sédimentologique et exemples de dépôts
$S_0 < 1,23$	Très bien classé	Distribution hautement uniforme. Grains de tailles quasi identiques. <i>Ex : Sables de plages ou de dunes éoliennes.</i>
$1,23 \leq S_0 < 1,41$	Bien classé	Bon classement granulométrique. <i>Ex : Sables fluviaux matures ou côtiers.</i>
$1,41 \leq S_0 \leq 1,74$	Moyennement classé	Tri modéré, présence de plusieurs fractions granulométriques secondaires.
$S_0 > 1,74$	Mal classé	Mélange textural très hétérogène. Énergie de transport irrégulière ou dépôt brutal. <i>Ex : Dépôts glaciaires (tills) ou cônes de déjection torrentiels.</i>

Tableau 2: Tableau d'interprétation d'environnements de dépôt associés en fonction du coefficient de tri de Trask (S_0)

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des paramètres granulométriques calculés selon la méthode de Trask pour les 15 échantillons.

N°	D_{10} (mm)	D_{25} (mm)	D_{50} (mm)	D_{75} (mm)	D_{90} (mm)	$S_0 = \sqrt{D_{75}/D_{25}}$	Classement
S1	0.176	0.208	0.288	0.403	0.580	1.391	Bien classe
S2	0.177	0.213	0.301	0.432	0.614	1.424	Bien classe
S3	0.174	0.207	0.289	0.404	0.580	1.397	Bien classe
S4	0.174	0.211	0.301	0.441	0.630	1.445	Bien classe
S5	0.175	0.213	0.284	0.393	0.550	1.360	Bien classe
S6	0.148	0.195	0.240	0.338	0.500	1.315	Bien classe
S7	0.149	0.192	0.254	0.362	0.540	1.375	Bien classe
S8	0.143	0.187	0.247	0.342	0.510	1.354	Bien classe
S9	0.168	0.211	0.272	0.375	0.490	1.332	Bien classe
S10	0.225	0.245	0.298	0.350	0.370	1.194	Tres bien classe
S11	0.178	0.217	0.318	0.496	0.680	1.513	Moderement classe

N°	D ₁₀ (mm)	D ₂₅ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₇₅ (mm)	D ₉₀ (mm)	So = $\sqrt{D_{75}/D_{25}}$	Classement
S12	0.174	0.216	0.290	0.412	0.580	1.382	Bien classe
S13	0.175	0.209	0.294	0.425	0.610	1.427	Bien classe
S14	0.171	0.211	0.278	0.391	0.540	1.362	Bien classe
S15	0.163	0.209	0.272	0.378	0.510	1.346	Bien classe

Tableau 3: Tableau synthétique des paramètres de Trask, les quartiles D₁₀, D₂₅, D₅₀, D₇₅, D₉₀ et coefficient de tri So pour les 15 échantillons.

L'application de cet indice pour nos échantillons permet de déduire l'environnement de dépôt. Il ressort :

- Que ces sables présentent un bon classement granulométrique, ce qui correspond à un milieu fluviatile ou côtier.

III.4.9. Classification de Wentworth (1922)

La classification de Wentworth est une échelle granulométrique de référence en sédimentologie, proposée par Chester K. Wentworth en 1922, qui subdivise les sédiments détritiques en classes de taille définies selon une progression géométrique de raison 2. Elle distingue, du plus grossier au plus fin : les blocs, galets, graviers, sables (grossiers, moyens, fins et très fins), silts et argiles.

Pour les sables, les limites retenues sont les suivantes : sable grossier (0,5–1,0 mm), sable moyen (0,25–0,5 mm), sable fin (0,125–0,25 mm) et sable très fin (0,063–0,125 mm). Cette classification, universellement adoptée en géologie sédimentaire, permet de caractériser la texture d'un matériau meuble.

Classe granulométrique	Diamètre (mm)	Échantillons concernés
Sable grossier	0,5 – 1,0 mm	Fractions mineures dans tous les échantillons (< 15 %)
Sable moyen	0,25 – 0,5 mm	Fraction dominante : S1–S5, S10–S15
Sable fin	0,125 – 0,25 mm	Fraction dominante : S6, S7, S8, S9
Sable très fin	0,063 – 0,125 mm	Fraction résiduelle, tous échantillons (< 13 %)

Tableau 4: Synthèse de la classification granulométrique (Wentworth, 1922) appliquée aux 15 échantillons.

III.4.10. Conclusion de l'étude granulométrique

L'étude granulométrique menée sur nos échantillons met en évidence une matière première texturalement mature, à dominante de sables fins à moyens, caractérisée par un bon à très bon classement granulométrique selon la méthode de Trask (1932). L'homogénéité des distributions, attestée par des valeurs de S_o comprises entre 1,19 et 1,51, reflète un tri sédimentaire efficace, vraisemblablement d'origine éolienne ou fluvatile. Ces résultats sont favorables à une valorisation industrielle dans les filières verrières ou de fonderie, sous réserve d'un classement hydraulique complémentaire visant à éliminer les fines résiduelles ($< 0,063$ mm) susceptibles d'affecter la qualité du produit fini.

III.5. Analyse chimique

Il s'agit d'une analyse chimique par voie humide réalisée sur des échantillons bruts et lavés (fraction 0,2–0,5 mm). Elle quantifie les oxydes majeurs (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Na_2O , CuO , Cr_2O_7) exprimés en pourcentage massique (wt%) ou en parties par million (ppm), ainsi que la perte au feu (L.O.I.).

(Tableau 07)

ech nbre %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
CaO	0.06	0.10	0.06	0.06	0.09	#DIV/0!	0.06	#DIV/0!	0.06	0.10	#DIV/0!	0.06	#DIV/0!	0.06	0.07	0.10	0.08	0.06	#DIV/0!
SiO2				99.21	98.40	98.14	99.26	99.20	99.24	98.10	98.54	99.29	98.14	99.30		98.18	98.25	99.21	98.11
Na2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!
Fe2O3	0.06	0.17	0.06	0.05	0.17	#DIV/0!	0.06	#DIV/0!	0.06	0.17	#DIV/0!	0.06	#DIV/0!	0.06	0.06	0.16	0.17	0.06	#DIV/0!
MgO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.01	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	#DIV/0!
TiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.04	0.04	0.09	0.08	0.04	#DIV/0!
Al2O3	0.27	0.55	0.25	0.24	0.52	#DIV/0!	0.24	#DIV/0!	0.26	0.57	#DIV/0!	0.25	#DIV/0!	0.26	0.27	0.63	0.59	0.27	#DIV/0!
L.O.I			0.23	0.22	0.73	0.74	0.23	0.28	0.25	0.82	0.55	0.23	0.80		0.24	0.76	0.73	0.22	0.77
TOTAL MAJEURS	0.45	0.93	0.66	99.85	100.01	#DIV/0!	99.91	#DIV/0!	99.94	99.87	#DIV/0!	99.95	#DIV/0!	99.79	0.75	100.03	99.99	99.93	#DIV/0!
Cr ppm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr2O7 % wt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	#DIV/0!	0.00	#DIV/0!	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!

Tableau 5: résultats des analyses brutes des oxydes majeurs et traces (sable brut vs sable lavé).

III.5.1. Résultats chimiques

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des principaux oxydes pour les sables bruts et lavés.

Paramètre	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	L.O.I (%)	Observations
Sable lavé	99.21–99.30	0.053–0.064	0.240–0.268	0.058–0.062	0.22–0.28	Haute pureté — conforme usage verrier
Sable brut	98.10–98.54	0.161–0.169	0.515–0.627	0.082–0.099	0.55–0.82	Impuretés résiduelles — nécessite traitement

Tableau 6: Synthèse des teneurs moyennes en oxydes majeurs (sable brut vs sable lavé).

III.5.2. Profil géochimique

Les profils géochimiques ont été construits avec **Python**.

La figure 14 présente les profils des trois principaux oxydes (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃,) et perte au feu (L.O.I.) pour les échantillons bruts et lavés.

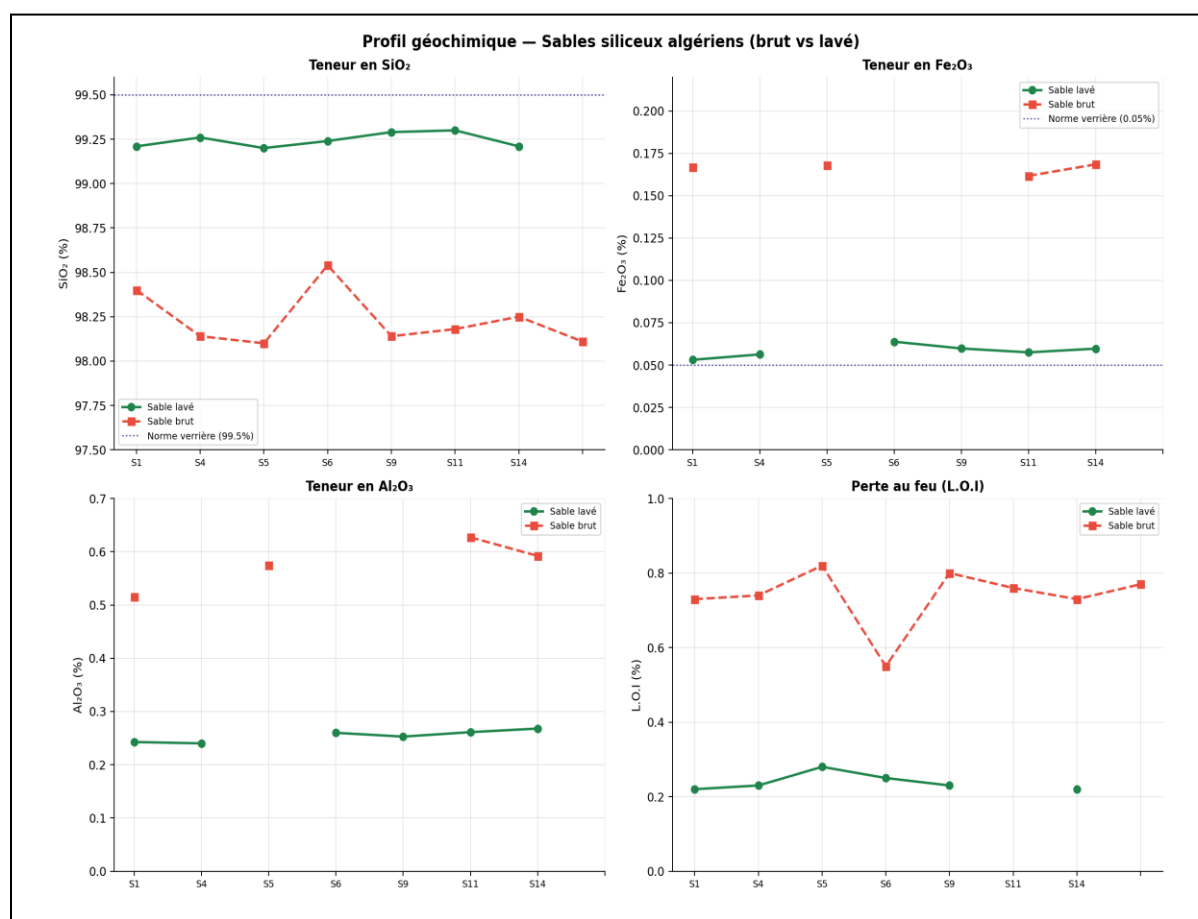


Figure 14: Profils géochimiques des oxydes majeurs (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃,) (L.O.I.) : sable brut vs sable lavé. Le trait en pointillés indique les normes verrières de référence.

1. **Graphes SiO_2 (1) :** les teneurs passant de 98,00–98,55 % (brut) à 99,20–99,30 % (lavé), valeurs qui s'approchent de la norme verrière fixée à 99,5 % (Harben, 2002), attestant de l'efficacité du traitement mécanique. le lavage induit un enrichissement notable en silice.
2. **Graphes Fe_2O_3 (2) :** La teneur en oxyde de fer est réduite de 0,165–0,170 % à 0,055–0,070 % après lavage ; bien que cette réduction soit significative, certains échantillons demeurent légèrement au-dessus du seuil admissible (0,05 %) requis pour la fabrication du verre plat .
3. **Graphes Al_2O_3 (3) :** Les teneurs en alumine passent de 0,52–0,63 % à 0,24–0,27 % après traitement, soit une réduction de l'ordre de 55 %, traduisant une élimination efficace des phases argileuses et feldspathiques par l'attrition et le lavage.
4. **Perte au feu (L.O.I) (4) :** La perte au feu chute de 0,58–0,83 % (brut) à 0,21–0,30 % (lavé), indiquant une élimination substantielle des matières organiques et des minéraux hydratés, ce qui est compatible avec les exigences de pureté des filières verrières et de fonderie.

III.5.3. Conclusion géochimique

L'analyse chimique confirme une matière première de haute pureté : la teneur en SiO_2 atteint 99,21 à 99,30 % après lavage, avec des impuretés résiduelles maintenues à des niveaux très bas. Les faibles teneurs en chrome et en fer constituent des atouts majeurs pour une valorisation dans les industries exigeantes telles que la verrerie, la fonderie ou l'électronique.

Ces résultats confirment le bon potentiel du gisement, et des traitements complémentaires (attrition, séparation magnétique à haute intensité HGMS, classification hydraulique) permettraient d'atteindre les spécifications des grades les plus sélectifs.

Chapitre IV

Valorisation du sable siliceux

Introduction

L'industrie du verre repose fondamentalement sur la disponibilité et la qualité de sa principale matière première : la silice. En tant qu'agent vitrifiant majeur, le dioxyde de silicium (SiO_2) détermine la structure, la transparence et les propriétés physico-chimiques du produit fini. Cependant, l'intégration d'un gisement sableux dans la chaîne de fabrication verrière exige une adéquation stricte avec des spécifications industrielles très sélectives. À la suite d'analyses granulométriques, minéralogiques et chimiques menées sur nos deux sites d'étude, les résultats obtenus se révèlent particulièrement favorables. Les caractéristiques de ces matériaux démontrent un potentiel de valorisation optimal, répondant positivement aux exigences de pureté et de régularité requises par les transformateurs.

Dans ce contexte, la valorisation d'une substance minérale ne peut plus être pensée uniquement au stade de l'exploitation. Elle doit être anticipée et optimisée en mobilisant des compétences pluridisciplinaires allant de la géologie et de la modélisation spatiale à l'ingénierie de traitement des minerais et à l'automatisme et à l'économie minière et aux exigences sociales (S.M. GANDHI et al., 2016) ; afin d'assurer à la fois la viabilité économique des projets et leur conformité croissante aux exigences environnementales, sociales et de gouvernance (Zaman et al., 2024).

Ainsi, même si la valorisation d'un gisement ou d'une substance minérale n'est qu'une approche purement économique, basée soit sur les ventes, soit sur le revenu, soit sur le coût de production, les trois approches d'évaluation sont généralement acceptées. Cette approche repose sur l'interdépendance des axes suivants :

1. Exploration et recherche (géologie, cartographie, géophysique ...)
2. Estimation des ressources : on parle de ressources géologiques (ou présumées), de ressources non exploitables, de ressources exploitables indiquées et de ressources exploitables (mesurées)
3. Choix des méthodes d'extraction : dicté par les objectifs économiques et les contraintes de gisement (la profondeur, la géométrie, la morphologie, la distribution des teneurs, la compétence géomécanique du massif rocheux et de sécurité).
4. Choix des technologies et des procédés de traitement
5. Règles de mise en marché : financement du projet minier, exigences du client

6. Faisabilité économique et financière : La faisabilité économique et financière transforme un terrain géologique en un terrain d'investissement. Elle est l'outil ultime de réduction des risques techniques, financiers et légaux, elle ne se limite donc plus à un calcul statique de cash-flow, mais elle repose sur une intégration progressive des incertitudes géologiques, techniques et opérationnelles
7. Gestion environnementale et sociale : gestion des problèmes sociaux , et la remise en état des lieux.

De ce qui précède, nous proposons une étude de valorisation basée sur les données fournies par les géologues des deux sites. Son but est de quantifier, par la même procédure, l'impact direct de l'extraction sélective du sable siliceux sur la performance économique des deux sites. Cela porte sur l'exploration, l'estimation, l'exploitation et le traitement. Pour les autres marchés, la faisabilité et l'environnement ne seront pas traités ici.

spécifications	utilisations
Composition chimique : $\text{SiO}_2 \geq 98\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,01$ pour le verre blanc et $\leq 0,3$ pour le verre coloré. Pour les verres optiques spéciaux : $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10 \text{ ppm}$, TiO_2 , CuO , Cr_2O_3 , NiO , CaO , $\text{MnO} < 10 \text{ ppm}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 < 200 \text{ ppm}$.	Verrerie, verre blanc, verre coloré, verres optiques spéciaux
Granularité : Taille des grains entre 100 – 150 μm et 400–600 μm Absence de grains > 0,85 mm Coefficient de variation du passant à D50 < 15 %	

Tableau 7: exigences chimiques et granulométriques des sables siliceux pour le verre

IV.1. Exploration et la recherche

IV.1.1. Site 01 STC

- ✓ La surface du gisement est dans les alentours de 50 ha, avec un titre minier
- ✓ La substance recherchée est : grès siliceux ou sable siliceux

Il est ouvert depuis 2010. Les recherches ont été faites en 2010 et 2011. Le nombre de tranchées est supérieur à 5. Pas de sondage.

Les couches sont friables et sub-verticales avec une épaisseur d'ordre décimétrique à métrique (2 M max).

IV.1.2. Site 02 AQ

- ✓ La surface du gisement est dans les alentours de 50 ha, avec un titre minier
- ✓ La substance recherchée est : grès siliceux ou sable siliceux

Il est ouvert depuis 2023. Les recherches ont été faites en 2023. Le nombre de tranchées est supérieur à 7. Pas de sondage.

IV.2. Estimation des ressources

Les conditions d'épaisseur minimale exploitable et de recouvrement admissible sont analogues à celles qui ont cours pour les granulats, à savoir :

- épaisseur minimale exploitable : 2 m, généralement davantage :
- rapport D/E (découverte sur exploitable) < 1/2 à 1/3.

Ce produit est destiné à alimenter des consommateurs industriels ; il faut orienter la prospection vers des gisements contenant des réserves importantes, d'au moins 1 à 2 millions de tonnes.

Habituellement, les couches exploitables ont une épaisseur largement supérieure à 2 m et le ratio D/E est faible $\leq 1/3$ à $1/4$.

Les méthodes classiques d'estimation des réserves sont : les méthodes géométriques/polygonales , les méthodes géostatistiques (krigeage) et les méthodes des inverses de distance (**IDW**). Le choix dépend de la régularité du gisement, de la densité des sondages et du degré de continuité spatiale de la minéralisation.

On a choisi une méthode de calcul géométrique simple pour les 02 sites .

IV.2.1. Site 01

La surface du gisement est dans les alentours de 50 ha, avec un titre minier

D'après les formations sédimentaires, les ressources géologiques en grès siliceux existent et méritent d'être calculées, ce qui a mené les exploitants à mener des travaux de recherche où on a creusé des tranchées, ce qui a augmenté le degré de connaissance et diminué le degré d'incertitude.

Ainsi pour calculer le volume des réserves géologiques, on a demandé la profondeur des couches, et d'après les explications des géologues des deux sites la profondeur peut dépasser 20 m

Par calcul simple on peut déduire à raison de 20 m que les réserves sont :

- Surface 50ha = 500 000 m²
- Volume = 500 000 X 20 = 10 000 000 m³

Si on prend que le volume de sable représente 1/3 par rapport à l'argile, le volume de sable est :

Volume de sable = 10 000 000 / 3 = 3 333 333 m³

- La densité du sable est 2.2 (données géologiques des deux sites)
- **Le tonnage est = 3 333 333 X 2.2 = 7 333 333 tonnes**

IV.2.2. Site 02

On reprend la même procédure de calcul puisqu'on a le même contexte

Les réserves sont : 7 333 333 tonnes

IV.3. Choix des méthodes d'extraction

Pour les deux sites, la méthode d'exploitation adoptée : c'est à ciel ouvert.

IV.3.1. Site 01

La carrière est en pleine exploitation par la méthode des gradins.

Moyen matériel : excavateur, bulldozer, camions de transport

Dans la pratique, l'extraction est sélective : le grès siliceux est extrait seul et mis dans les zones pour passer au traitement, et les argiles passent au teruil et sont stockées comme stériles.

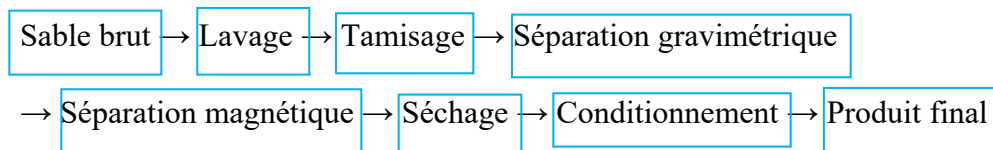
IV.3.2. Site 02

Le site n'est pas encore en phase d'exploitation, seules quelques tranchées d'exploration ont été creusées.

IV.4. Choix des technologies et des procédés de traitement

Les deux sites sont en cours de construction de stations de traitement. Nous proposons une chaîne de valorisation du sable siliceux qui repose sur un traitement mécanique et physico-chimique pour atteindre les spécifications du verre.

Le sable brut a subi une chaîne de transformation pour augmenter la teneur en SiO_2 et éliminer les impuretés avant d'être commercialisé en tant que produit final, conformément aux exigences industrielles du verrier. Voici un schéma général :



IV.4.1. Phase 1 Extraction et homogénéisation

IV.4.1.1. Homogénéisation

Une fois le sable extrait, il est acheminé vers une aire de stockage où une homogénéisation est réalisée. Elle consiste à mélanger les lots de sable provenant de différents fronts de taille afin

d'obtenir une matière première aussi uniforme que possible, avec une teneur en SiO_2 et une granulométrie stable.

IV.4.2. Phase 2 Prétraitement : débourbage, lavage et criblage

IV.4.2.1. Débourbage et lavage primaire

Le prétraitement comprend le débourbage et le lavage primaire, dont l'objectif est d'éliminer la fraction argileuse. Le sable brut contient en effet des quantités variables d'argiles, de limons et de matières organiques qui enrobent les grains de quartz et masquent leur surface. Le débourbage s'effectue dans des cylindres rotatifs ou des malaxeurs à eau, où la masse de sable est agitée vigoureusement pour disperser et mettre en suspension les particules fines.

La teneur en SiO_2 du sable quartzeux diminue à mesure que la taille des grains diminue, tandis que la teneur en minéraux impurs augmente.

IV.4.2.2. Criblage

Le criblage est un triage mécanique du sable par la grosseur des grains. Il s'opère sur des tamis vibrants ou des trommels rotatifs, qui séparent le sable en plusieurs fractions granulométriques. Les refus de tamis (grains trop grossiers) sont généralement orientés vers un concasseur ou éliminés comme déchet, tandis que la fraction utile est orientée vers les étapes suivantes. Le crible vibrant à haute fréquence permet par exemple de séparer le sable siliceux de 0 à 2 mm et de l'envoyer vers les équipements d'enrichissement.

IV.4.3. Phase 3 Attrition

L'attrition est l'étape la plus déterminante du prétraitement physique. Elle se fait par voie humide et permet de séparer toutes les incrustations ferreuses ou argileuses des grains de quartz. Concrètement, les grains de sable frottent les uns contre les autres à l'intérieur d'une cellule d'attrition, une sorte de cuve agitée à forte concentration en solides (généralement 70–75 % en masse). Ce frottement intense érode et détache les pellicules d'oxydes de fer, d'argile ou de matières organiques qui adhèrent à la surface des grains, sans pour autant les broyer.

L'efficacité de cette opération est directement liée à la durée et à l'intensité de l'agitation. Des tests en laboratoire, notamment sur les sables algériens et tunisiens, ont montré qu'une attrition bien

conduite peut faire passer la teneur en SiO_2 de 86 à plus de 90 % avant même d'engager les étapes chimiques d'enrichissement. Des techniques de traitement telles que le débouillage, l'attrition, la flottation, la séparation magnétique et la lixiviation permettent de réduire les impuretés comme Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , K_2O et CaO afin d'améliorer le pourcentage en silice.

IV.4.4. Phase 4 Lavage secondaire et classification granulométrique

Cette phase permet d'éliminer toutes les impuretés restantes issues de la phase précédente. Le sable, après attrition, est dilué dans de l'eau et soumis à un classement hydraulique (hydrocyclones ou classificateurs à spirale (figure 15)). Les particules fines mises en suspension lors de l'attrition sont entraînées par le flux d'eau et évacuées. On obtient ainsi un sable à la fois chimiquement plus pur et granulométriquement mieux sélectionné.

Cette étape garantit également la cohérence granulométrique du produit fini

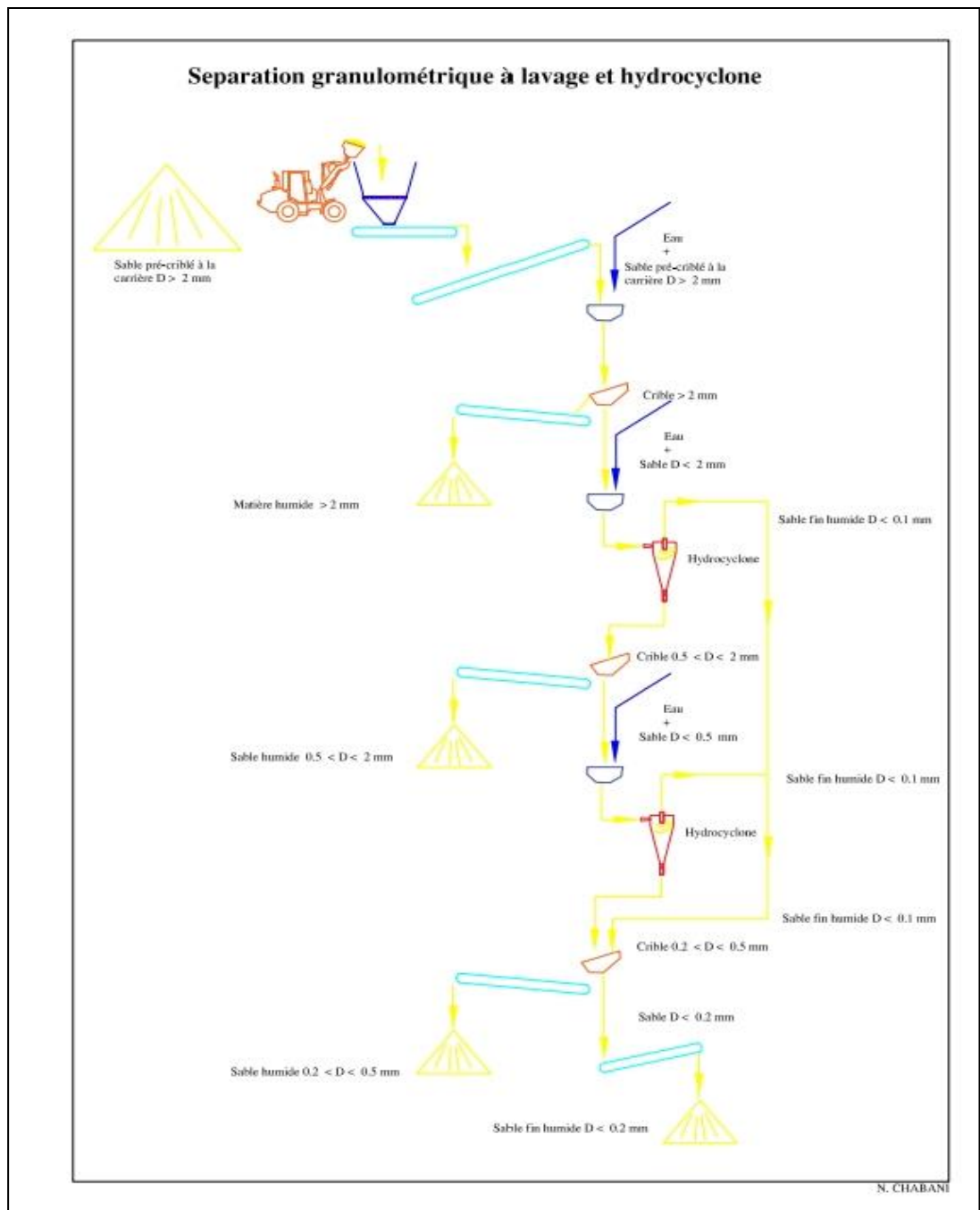


Figure 15: Schéma de station de lavage (comm. Pers Chabaani)

IV.4.5. Phase 5 Séparation magnétique

IV.4.5.1. Principe

La séparation magnétique est une technique d'enrichissement qui exploite les différences de susceptibilité magnétique entre les minéraux. Les oxydes de fer (Fe_2O_3 , magnétite, ilménite) présentent une susceptibilité magnétique bien plus élevée que le quartz, ce qui permet de les extraire sélectivement par passage du pulpe de sable sur des rouleaux ou entre des électroaimants de haute intensité.

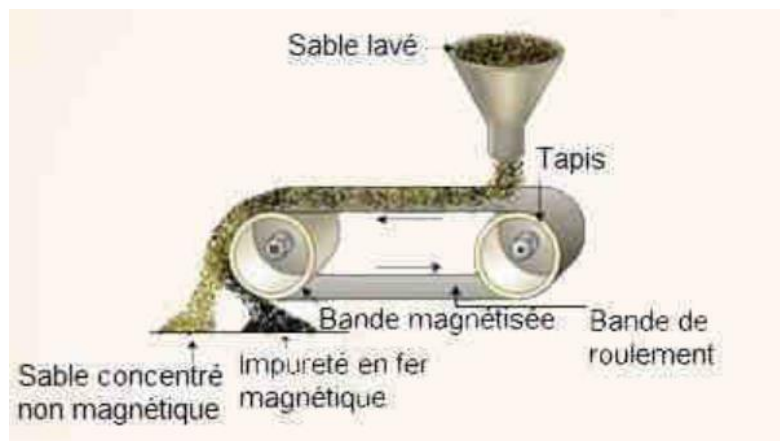


Figure 16: Schéma montre le principe de séparation magnétique



Figure 17: séparateur magnétique à tambour

IV.4.5.2. Types d'équipements

On distingue deux grandes familles :

- Les séparateurs à champ faible, efficaces pour les minéraux fortement magnétiques comme la magnétite.
- Les séparateurs à champ intense (HGMS, *High Gradient Magnetic Separation*), indispensables pour capturer les minéraux faiblement magnétiques comme l'hématite ou les limonites.

IV.4.5.3. Résultats attendus

En général, la pureté du sable de quartz peut atteindre de 99,3 % à 99,9 %, ce qui répond essentiellement à la demande du sable industriel. La teneur en Fe_2O_3 est réduite à des valeurs inférieures à 0,1 %, voire 0,02 % pour les grades les plus exigeants.

IV.4.6. Phase 6 Flottation

IV.4.6.1. Principe général

La flottation par mousse est une technique de séparation physico-chimique qui s'appuie sur les différences de mouillabilité de surface entre les minéraux. Un collecteur (agent tensioactif) est ajouté à la pulpe : il se fixe sélectivement à la surface des minéraux à éliminer (feldspaths, micas, rutile, zircon), les rendant hydrophobes. Des bulles d'air finement dispersées dans la cellule de flottation s'attachent alors à ces particules traitées et les transportent vers la surface sous forme de mousse qui est ensuite écrémée.

IV.4.7. Phase 7 Lixiviation acide (purification à haute pureté)

IV.4.7.1. Objectif

La lixiviation est une étape réservée aux applications nécessitant une pureté extrême, comme la fabrication de verre optique, de semi-conducteurs ou de panneaux photovoltaïques. Elle consiste à traiter le sable par des acides minéraux (acide chlorhydrique, acide sulfurique dilué, acide oxalique) afin de dissoudre les impuretés résiduelles encore présentes sous forme de films ou d'inclusions dans la structure cristalline des grains.

IV.4.8. Séchage, conditionnement et contrôle qualité

À l'issue des étapes de purification, le sable humide est déshydraté par essorage mécanique puis séché dans des fours rotatifs ou des sècheurs à lit fluidisé.

Une analyse chimique et granulométrique finale valide la conformité du lot aux spécifications industrielles. Le produit est ensuite conditionné (vrac ou big-bags) selon la destination (la photo 12).



Photo 12: produit semi-final (sable siliceux) après le traitement

Conclusion du chapitre

Le processus de valorisation est un enchaînement rigoureux de phases physiques, mécaniques et chimiques, dont l'intensité est calibrée en fonction de l'application finale visée. De l'extraction brute à la purification à l'acide, chaque étape répond à un objectif précis : réduire les impuretés, affiner la granulométrie et hisser la teneur en SiO_2 à des niveaux compatibles avec les exigences industrielles. La maîtrise de ce processus conditionne directement la qualité du produit final.



Photo 13: Station du traitement le sable siliceux

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur la caractérisation et la valorisation des gisements de sable siliceux du secteur d'El Aricha – Ras El Ma, situés sur les Hautes Plaines Oranaises au sud-ouest de l'Algérie. L'étude a établi que ce secteur présente des formations gréseuses et sableuses du Paléocène à l'Éocène continental exploitables à ciel ouvert par gradins.

- ❖ Les analyses pétrographiques ont révélé une composition quasi-monominérale en quartz, classant ces sables parmi les grès quartzeux super-mûrs à mûrs.
- ❖ L'étude morphoscopique a confirmé un transport fluvial prolongé.
- ❖ La granulométrie a montré un bon à très bon classement avec une fraction modale dominante en sables fins à moyens.
- ❖ L'analyse chimique a enregistré des teneurs en SiO_2 de 99,21 à 99,30 % après lavage, avec des impuretés résiduelles maintenues à des niveaux très bas.
- ❖ Ces caractéristiques rendent ces sables particulièrement favorables à la fabrication du verre, répondant aux spécifications des filières verrières nationales et internationales.

Les ressources sont estimées à environ 7,3 millions de tonnes par site. Une chaîne de traitement progressive permet d'envisager l'accès aux marchés du verre d'emballage, du verre plat après enrichissement complémentaire et de la fibre optique et du photovoltaïque.

Des travaux complémentaires restent nécessaires pour transformer ce potentiel géologique en projet minier viable et contribuer à la diversification économique de l'Algérie.

Les sables siliceux du secteur d'El Aricha – Ras El Ma sont donc très favorables à la fabrication du verre .

:

Références bibliographiques

Références bibliographiques et Internet

- ASGA (2020). *Les sables siliceux et quartz industriels, synthèse sur les minéralisations en Algérie*. Edit. Serv. Géol. de l'Algérie, 72 p.
- Benest M., Bensalah M., Bouabdallah H. & Ouardas T. (1999). *La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemcénien*. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie.
- Bonnet, C. (s.d.). *La silice industrielle — Fiches détaillées*. LASIM. <https://lasim.org>
- BRGM (2016). *Mémento Silice industrielle — Rapport final BRGM/RP-66167-FR*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, mars 2016. <https://mineralinfo.fr>
- CDE Group (s.d.). *Traitement durable des sables siliceux*. <https://www.cdegroupe.com/fr/applications/sables-agregats/sables-siliceux>
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957). *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27(1), 3–26.
- Guehaiz, B. (s.d.). *Valorisation de sable siliceux pour les besoins de l'industrie*. Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger. <https://repository.enp.edu.dz>
- HAKEM (2024). *Laboratory Chemicals Analysis Novembre 2024*. Rapport interne, Algerian Quartz CIE Algeria.
- Janoušek, V., Farrow, C.M. & Erban, V. (2006). *Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit)*. Journal of Petrology, 47(6), 1255–1259.
- JXSC Machine (2019). *Quartz Processing — Equipment, Process Flow*. <https://www.jxscmachine.com>
- JXSC Machine (2022). *Processus de récupération de sable de silice 100TPH*. <https://www.jxscmachine.com>
- Mansouri Larbi (2022). *Analyse Structurale de la formation Paléocène d'El Aricha, Wilaya de Tlemcen*. Mémoire de Master, Université d'Oran 2.

Références

- Rivière, A. (1977). *Méthodes granulométriques : Techniques et interprétations*. Masson, Paris, 170 p.
- Traitement et valorisation des sables extra-siliceux de la formation Boudinar à Jebel Boujeniba et Jebel Bouhedma dans le domaine des matériaux avancés. ResearchGate, juin 2018. <https://www.researchgate.net/publication/330343421>
- Trask, P.D. (1932). *Origin and Environment of Source Sediments of Petroleum*. Gulf Publishing Company, Houston, 323 p.
- Université Frère Mentouri – Constantine 1 (s.d.). *Le sable siliceux en Algérie : exploitation, traitement et valorisation*. <https://www.umc.edu.dz>
- Wentworth, C.K. (1922). *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, 30(5), 377–392.