



École Nationale Polytechnique

Département de Génie Minier

Laboratoire de Génie Minier

Mémoire de Magister
En : Génie Minier
Option : Génie Minier

Présenté par

BENKACI Djamel

Ingénieur d'état en Génie Minier de l'ENP

Intitulé

**Caractérisation et valorisation de la
diatomite de Sig (contribution à
l'évaluation du potentiel industriel)**

Soutenu publiquement le **05/11/2015** devant le jury composé de :

Président :	M. SEBAI Amar	Professeur	ENP
Rapporteur :	M. OULDHAMOU Malek	M.C.A	ENP
Examineurs :	Mme DERAMCHI Karima	M.C.A	ENP
	M. BACHAR ASSED Mohammed Aguid	M.C.A	ENP

ENP 2015

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Mr Ouldhamou qui m'a initié au monde de la minéralurgie à travers son enseignement. Je le remercie pour sa disponibilité et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je remercie les membres du jury Mr Sebai, Mme Deramchi et Mr Bachar Assed d'avoir accepté de juger mon travail.

Une pensée particulière à Mr Saada qui n'a jamais cessé de partager avec nous ses expériences et ses aventures.

Une pensée et un remerciement également à Mr Tahrat ex. PDG de l'ENOF. C'est lui qui m'a initié au monde de l'entreprise en me donnant la chance de faire partie de son équipe.

Je remercie Mr Aouane Directeur de l'unité de Sig qui m'a ouvert les portes lorsqu'il le fallait, il a toujours été disponible pour moi.

Je remercie H'mida et Fatiha Ingénieurs géologues à l'unité de Sig qui m'ont été d'une grande aide lors de la campagne d'échantillonnage.

Mr Hasbellaoui et Mr Salhi avec qui je travail depuis le début de l'année au sein de leur bureau d'études la Générale des Mines. Je les remercie pour leur soutien, leurs encouragements et l'intérêt qu'ils ont à mon égard.

Je remercie mes amis M'hamed pour son franc parlé Omar pour son esprit entreprenant Brahim parce que c'est Brahim Billel pour ses encouragements Abbas pour sa bravoure Amine pour son courage et Fouad pour sa simplicité.

Mes parents je les remercie de m'avoir mit dans le pétrin de la vie.
Et mes petits frères qui sont la source de mon inspiration.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو تحديد الإمكانية الصناعية لدياتوميت سيق (معسكر). في بداية الأمر قمنا بدراسة المراجع الخاصة بأعمال التنقيب المنجمي لتقدير المكن. ثانياً حددنا الخواص الفيزيوكيميائية للمعدن باستعمال التحاليل الفيزيائية و الكيميائية. في الأخير قمنا بتثمين المعدن بكلسنته لهدف إستعماله في ميادين صناعية مختلفة.

الكلمات المفتاحية : دياتوميت , مكن سيق , تخصيص , كلسنة , تثمين.

Résumé :

L'objectif de ce travail est de déterminer le potentiel industriel du minerai de diatomite du gisement de Sig (Mascara).

Dans un premier temps en faisant une synthèse bibliographique sur les différents travaux de prospection entrepris pour l'évaluation du gisement.

Dans un second temps en caractérisant le minerai afin de déterminer ses propriétés physico-chimiques en appliquant les méthodes d'analyses chimiques et physiques, notamment la masse volumique, la densité, le taux d'humidité, la PAF et particulièrement la teneur en carbonate CaCO_3 par calcimétrie.

Et enfin en procédant aux essais de calcination afin de valoriser le minerai jusqu'à la limite lui permettant d'être utilisé dans les différents domaines d'application, notamment la filtration des produits agro-alimentaires qui exige des taux d'impuretés très réduits.

Mots clés : diatomite, gisement de Sig, caractérisation, calcimétrie, traitement des minerais, valorisation, calcination, filtration.

Abstract :

The objective of this work is to determine the industrial potential of diatomite ore deposit Sig (Mascara).

Initially making a literature review on the various exploration work undertaken for the evaluation of the deposit.

Secondly characterizing the ore to determine its Physicochemical properties by doing chemical and physical analysis, including bulk density, specific gravity, moisture content, and the LOI and particularly carbonate CaCO_3 content by calcimetry.

And finally performing tests in order to value the ore by calcination into the limit allowing it to be used in different application areas, including the filtration of food products requiring very low impurity levels.

Keywords: diatomite, Sig deposit, characterization, calcimetry, mineral processing, recovery, calcination, filtration.

Liste des figures

FIG. 1 : Photo d'un échantillon de diatomite de la mine de Sig.

FIG. 2 : Photo d'un échantillon de diatomite de la mine de Sig vu sous microscope électronique, grossissement 1500x. SIDAM

FIG. 3 : Utilisations de la diatomite dans les différentes industries.

FIG. 4 : Carte des principaux pays producteurs de diatomite dans le monde (1995).

FIG. 5 : Evolution de la production mondiale de diatomite en million de tonnes.

FIG. 6 : Localisation du gisement de diatomite de Sig sur la carte touristique de l'Algérie. (*Echelle : 1/2 300 000^e*). *Institut nationale de cartographie et de télédétection.*

FIG. 7 : Carte du réseau routier montrant l'infrastructure routière entourant le gisement.

FIG. 8 : Image satellite montrant le périmètre minier et l'unité de Sig. (*Google Earth*)

FIG. 9 : Cadre géologique de la zone d'étude. *Extrait de la carte géologique S^T DENIS-DU-SIG, Echelle 1/50 000^e.*

FIG. 10 : Travaux de recherche de la SONAREM.

FIG. 11 : Analyse par DRX de l'échantillon de diatomite.

FIG. 12 : Analyse par DRX de la fraction blanche de diatomite.

FIG. 13 : Analyse par DRX de la fraction beige de diatomite.

FIG. 14 : Réseau souterrain du bloc 1.

FIG. 15 : Réseau souterrain du bloc 2.

FIG. 16 : Réseau souterrain du bloc 3 (partie nord).

FIG. 17 : Réseau souterrain du bloc 3 (partie sud).

FIG. 18 : Réseau souterrain du bloc 4 (partie nord).

FIG. 19 : Réseau souterrain du bloc 4 (partie sud).

FIG. 20 : Réseau souterrain du bloc 6.

FIG. 21 : Réseau souterrain du bloc 6/couche 5.

FIG. 22 : Schéma de production de la diatomite de charge, Unité de Sig.

FIG. 23 : Schéma de production de la diatomite de filtration, Unité de Sig.

FIG. 24 : Schéma représentatif d'une table à secousses.

FIG. 25 : Schéma représentatif de l'action du collecteur.

FIG. 26 : Schéma type de traitement des matériaux diatomitiques.

FIG. 27 : photo d'une saignée prélevée sur l'éponte d'une galerie.

FIG. 28 : Plan d'échantillonnage dans la mine.

FIG. 29 : Photo du concasseur à percussions.

FIG. 30 : Broyeur à mortier.

FIG. 31 : photo de l'échantillonneuse rotative.

FIG. 32 : Schéma de la préparation mécanique.

FIG. 33 : Eprouvette graduée.

FIG. 34 : Pycnomètre.

FIG. 35 : Montage d'un calcimètre suivant la norme NF P 94-048.

FIG. 36 : Montage d'un calcimètre de Bernard avec eau salée à saturation.

FIG. 37 : Tableur Excel des conversions des teneurs.

FIG. 38 : photo d'un creuset en porcelaine.

FIG. 39 : photo d'une balance de haute précision.

FIG. 40 : photo d'un four à moufle de laboratoire.

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Production mondiale de diatomite, (USGS).

Tableau N° 2 : Coordonnées UTM Nord-Sahara (fuseau 30) des bornes du périmètre minier du gisement.

Tableau N° 3 : Stratigraphie schématique (SONAREM, SIDAM).

Tableau N° 4 : Tableau récapitulatif des documents et recherches effectuées.

Tableau N° 5 : Volume des travaux réalisés par SONAREM entre 1977 et 1979.

Tableau N° 6 : Réserves totales du gisement du Djebel Tallait calculé par SONAREM.

Tableau N° 7 : Composition moyenne de chaque bloc du gisement (données SONAREM).

Tableau N° 8 : Composition chimique moyenne des échantillons provenant des 8 sondages de SIDAM.

Tableau N° 9 : Composition chimique moyenne des échantillons provenant des 4 sondages SIDAM 1979.

Tableau N° 10 : Comparaison des catégories classifiée par SONAREM et ISDAM dans les années 1977-1978.

Tableau N° 11 : Composition chimique de l'échantillon de diatomite.

Tableau N° 12 : Composition de l'échantillon de diatomite en espèces minérales.

Tableau N° 13 : Composition chimique de la diatomite avant et après traitement acide, comparé à d'autres produits marchands de diatomite dans le monde.

Tableau N° 14 : Tableau récapitulatif des réseaux souterrains des blocs.

Tableau N° 15 : Saignés et échantillons prélevés selon leur provenance.

Tableau N° 16 : Masse volumique des échantillons.

Tableau N° 17 : Densité (SG) des échantillons.

Tableau N° 18 : Taux d'humidité des échantillons.

Tableau N° 19 : Teneur en CaCO_3 des échantillons.

Tableau N° 20 : Teneur convertie en CaO des échantillons.

Tableau N° 21 : Comparaison des teneurs en CaO avec ceux de la SONAREM.

Tableau N° 22 : Tableau récapitulatif des résultats des essais de caractérisation.

Tableau N° 23 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des masses volumiques.

Tableau N° 24 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des densités.

Tableau N° 25 : Résultats classés suivant l'ordre décroissant des taux d'humidité.

Tableau N° 26 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des teneurs en CaCO_3 (ou CaO).

Tableau N° 27 : PAF des échantillons.

Tableau N° 28 : résultats classés suivant l'ordre croissant de la PAF et des teneurs en CaCO_3 .

Tableau N° 29 : Teneur en CaCO_3 après calcination avec leur conversion en teneur en CaO .

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I : LA DIATOMITE	3
I.1. Définitions	3
I.1.1. Terres diatomées	3
I.1.2. Diatomées	4
I.2. Propriétés physico-chimiques et applications industrielles	5
I.2.1. Filtration	6
I.2.2. Charges	8
I.2.3. Absorbants	9
I.2.4. Produits isolants et réfractaires	10
I.2.5. Autres secteurs d'utilisation	11
I.3. Origine et formation des gisements	11
I.4. Production mondiale	12
CHAPITRE II : LE GISEMENT DE DIATOMITE DE SIG	16
II.1. Localisation et accès au gisement	16
II.2. Cadre géologique	18
II.2.1. Stratigraphie régionale	18
II.2.2. Aménagement structural	20
II.2.3. Géologie détaillée du gisement et de ses environs	22
II.3. Présentation de l'entreprise exploitante	24

II.4. Travaux antérieurs	25
II.4.1. Travaux de la SONAREM 77-79.....	26
II.4.2. Travaux de SIDAM.....	30
II.4.2. Travaux de Geofield srl.....	32
II.5. Exploitation	38
II.5.1. Description des réseaux souterrains	38
II.5.2. Problèmes liés à l'exploitation	42
II.6. Usine de traitement	43
CHAPITRE III : LE TRAITEMENT DES MINERAIS	45
III.1. Généralités sur les méthodes de traitement	45
III.1.1 Méthodes gravimétriques	45
III.1.2 Méthode de la flottation	49
III.1.3. Traitement thermique, la calcination	55
III.2. Traitement de la diatomite	57
PARTIE EXPÉRIMENTALE	
CHAPITRE IV : ECHANTILLONNAGE & PRÉPARATION MÉCANIQUE	61
IV.1. Compagne d'échantillonnage	61
IV.2. Préparation mécanique	64
CHAPITRE V : ESSAIS DE CARACTÉRISATION	67
V.1. Mesure de la masse volumique	67
V.2. Mesure de la densité	69
V.3. Mesure du taux d'humidité	71
V.4. Mesure de la teneur en carbonate de calcium	73
V.5. Analyse des résultats	81
V.5.1. Analyse suivant la masse volumique	82
V.5.2. Analyse suivant la densité	83
V.5.3. Analyse suivant le taux d'humidité	84
V.5.4. Analyse suivant la teneur en carbonate	85

CHAPITRE VI : ESSAIS DE TRAITEMENT	87
VI.1. Préparation des échantillons pour la calcination	87
VI.2. Essais de calcination	88
VI.3. Perte au feu et Evolution des teneurs en carbonates	89
VI.3.1. Perte au feu (PAF)	89
VI.3.2. Teneur en carbonate	91
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	93
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le territoire algérien renferme un grand potentiel en matière de ressources minérales, la diversité de ses faciès géologiques lui assure une richesse en tous types de minéralisations. Toutefois, l'exploitation de ces richesses et l'élaboration d'un projet minier n'est pas une mince affaire. Plusieurs paramètres, ayant trait aux méthodes d'évaluation, aux modes d'exploitation, aux procédés de traitement, à l'environnement ainsi qu'à l'économie et aux marchés, doivent être pris en considération.

Dans le présent travail, on s'intéressera à un minerai particulier tant par rapport à ses propriétés physico-chimiques uniques qu'à ses diverses utilisations dans de multiples industries, la diatomite.

En effet la diatomite ou terres à diatomées (appelée aussi kieselguhr) est une roche sédimentaire formée par l'accumulation en milieu aquatique de carapaces siliceuses finement structurés de micro-organismes : les diatomées. Les propriétés physico-chimiques de la diatomite lui confèrent la possibilité d'être utilisée dans différentes applications industrielles comme produit de filtration, produit de charge, matière première dans la fabrication de briques, agrégats légers dans la fabrication du ciment Portland et des applications spéciales dans le biomédical et la cosmétique.

On trouve sur le marché de la diatomite naturelle qui reçoit un traitement mécanique (broyage et classification), de la diatomite calciné (broyage, classification et calcination à 850-950°C) qui permet de purifier la diatomite en éliminant d'une part la matière organique et d'autre part les très fines particules d'argiles par frittage puis classification, on trouve aussi de la diatomite fluxée (activée) (broyage, classification et calcination à 900-1100°C) qui permet l'agglomération contrôlée des diatomites élémentaires par frittage avec ajout de fondant tel que le carbonate de soude Na_2CO_3 à 2-8 % pour obtenir un produit plus perméable.

L'objet de la présente thèse est d'étudier le minerai du gisement de diatomite de Sig (Mascara) géré par l'entreprise nationale des produits miniers non-ferreux et des substances utiles (ENOF). C'est un gisement assez important renfermant des réserves géologiques de l'ordre de 6,5 millions de tonnes avec un taux de silice SiO_2 de 60 % en moyenne, l'impureté la plus prépondérante étant les carbonates avec un taux de CaO de 13 % en moyenne. On s'intéressera donc dans un premier temps à la caractérisation du minerai issus des différents secteurs du gisement, puis à son traitement par calcination pour réduire de ses impuretés et de déterminer le potentiel industriel du produit fini.

Pour ce faire, le présent travail sera structuré de la façon suivante :

- Le premier chapitre sera consacré à la diatomite en général ;
- Le second chapitre portera sur le gisement de diatomite de Sig ;
- Les notions essentielles de base du traitement des minerais seront exposées dans le troisième chapitre ;
- Dans le quatrième chapitre seront présentés la méthode de prélèvement des échantillons et de leur préparation mécanique.
- Les essais de caractérisation du minerai feront l'objet du cinquième chapitre.
- Le sixième et dernier chapitre portera sur les essais de traitement.

CHAPITRE I : LA DIATOMITE

[2] [5] [7] [11] [12]

Utilisées dès l'Antiquité comme adjuvant dans certaines poteries ou dans la fabrication de briques légères, les terres à diatomées vont connaître à partir de la seconde moitié du XIXe siècle un développement économique remarquable lié à leurs propriétés naturelles.

A cette époque, les progrès des techniques d'observation vont largement contribuer à l'analyse des formations d'origine biologiques et faciliter de la sorte la prospection et l'identification de leurs gisements.

L'apparition de nouvelles applications et l'évolution des procédés industriels dans les domaines de la calcination et du broyage sont les autres facteurs qui ont favorisé leur développement économique.

I.1. Définitions

I.1.1. Terres diatomées

Reconnues comme des roches sédimentaires, les terres à diatomées sont formées par l'accumulation en milieu aquatique de carapaces siliceuses finement structurées de micro-organismes : les diatomées. D'autres termes comme « diatomite » ou « kieselguhr » désignent ces roches légères, peu consolidées et de couleur claire principalement constituées de fins débris de diatomées.



FIG. 1 : Photo d'un échantillon de diatomite de la mine de Sig.

I.1.2. Diatomées

Les diatomées sont des algues unicellulaires de la famille des bacillariophycées se développant en milieux aquatiques, lacustres ou marins sous des formes qui peuvent être fixées au substrat « benthiques » ou flottantes « planctoniques ».

Leur anatomie se compose d'une membrane externe, d'une carapace siliceuse ou « frustule » et d'une cellule membraneuse. D'un point de vue morphologique, on distingue les formes penniques à symétrie axiale et les formes centriques à symétrie radiale. Plus de 12 000 espèces sont actuellement recensées avec une taille pouvant varier de 5 μm à 1 mm mais le plus souvent comprise entre 50 et 150 μm .

Page | 4

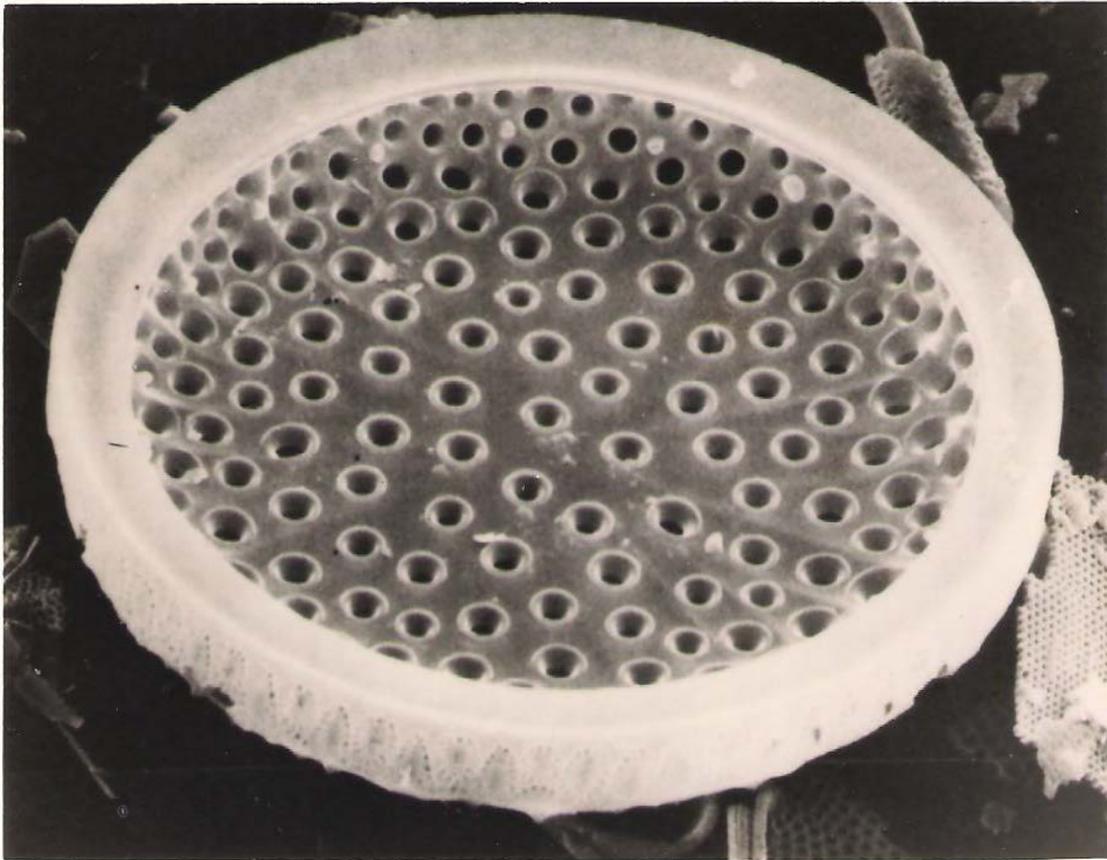


FIG. 2 : Photo d'un échantillon de diatomite de la mine de Sig vu sous microscope électronique, grossissement 1500x. SIDAM

I.2. Propriétés physico-chimiques et applications industrielles

La diatomite possède une combinaison de propriétés physiques et chimiques qui la rend unique, elle a :

- Une faible densité ;
- Une porosité élevée ;
- Une perméabilité élevée ;
- Une fine distribution granulométrique ;
- Une surface spécifique importante ;
- Une faible conductivité thermique ;
- Une capacité d'absorption élevée ;
- Une dureté variable ;
- Et une inertie chimique.

Page | 5

Ce qui rend la diatomite un minéral particulier qui possède une large gamme d'utilisations industrielles. D'après la littérature, les utilisations des diatomites se font dans diverses industries et applications comme :

- la pharmacologie et la cosmétique
- la métallurgie
- la fabrication des peintures (augmentation du volume de peinture);
- la fabrication du papier (aspect brillant des feuilles de papier)
- l'agriculture (dilution de certains produits toxiques)
- la fabrication de pâte pour empreintes dentaires
- la fabrication des allumettes
- la fabrication de pneumatiques et matières en caoutchouc
- la fabrication de containers à acétylène
- la confection des asphaltes, vernis et mastics
- la fabrication de produit d'isolation chaux-silice
- l'élimination du fluor
- la fabrication d'éléments isolants de sécurité (Célite + ciment Portland absorbe l'eau et permet de constituer des matériaux de faible poids, qui flottent).
- les agents abrasifs: silice = bon agent de polissage
- la stabilisation d'explosifs
- la fabrication de briques
- l'utilisation dans des filtres, notamment en agro-alimentaire (brasseries, vinification...)
- dans les bétons où elles apporteraient
 - augmentation de l'homogénéité du produit;
 - augmentation de sa maniabilité ;
 - diminution du nombre de grumeaux;
 - béton plus durable ;
 - béton plus imperméable et s'effritant moins ;
 - propriétés pouzzolaniques de la diatomite susceptible d'améliorer la qualité du durcissement.

Les premières utilisations des blocs et des poudres de diatomite ont concerné les produits absorbants, abrasifs et isolants. L'emploi de la diatomite, pour ses propriétés absorbantes, en tant que stabilisant de la dynamite, a été historiquement le plus important au début du siècle.

L'évolution très rapide des technologies de transformation de la diatomite, dans les années 1920, avec le développement des moyens de traitement par calcination (avec ou sans fondant) et classification dynamique, a permis une diversification des utilisations. C'est ainsi qu'ont pu être élaborés, à partir des diatomites les plus pures, des produits techniques de haute qualité de type adjuvants de filtration et charge minérales actives. Ces deux derniers secteurs d'utilisation sont actuellement les plus importants à l'échelle mondiale, la filtration étant de loin la première.

I.2.1. Filtration

Le secteur de la filtration est de loin le premier utilisateur de diatomite.

La filtration est, par définition, un procédé destiné à séparer mécaniquement les particules solides en suspension dans une phase liquide au moyen de tamis de différentes dimensions. Mais cette séparation peut se révéler difficile à réaliser, par exemple dans le cas de liquides visqueux ou lorsque le colmatage du tamis intervient très rapidement. On a alors recours à des produits spécifiques dénommés adjuvants de filtration (un adjuvant est une substance qui, ajoutée à un milieu, en favorise une fonction ou en améliore une propriété), ou agents filtrants.

Un adjuvant de filtration est un produit pulvérulent finement qui, placé dans le liquide à filtrer, aide à contrôler sa vitesse d'écoulement et la rétention des particules indésirables. Son intervention se fait en deux étapes successives. Le liquide, très chargé en adjuvant, est tout d'abord envoyé sur un tamis (toile métallique, textile ou synthétique; matériaux minéraux poreux) à la surface duquel se forme, par sédimentation forcée, une mince couche d'adjuvant de filtration, appelée pré-couche. Puis des quantités moindres d'adjuvant sont ajoutées en continu dans le liquide à filtrer : c'est l'étape de l'alluvionnage, ou nourrissage.

Au cours de la filtration proprement dite, le mélange adjuvant de filtration-impuretés du liquide se dépose sur la pré-couche (qui repose elle-même sur le tamis qui ne joue plus qu'un rôle de support), créant ainsi continuellement de nouvelles couches filtrantes qui constituent le gâteau de filtration.

Ce dernier joue le rôle de média filtrant : les particules de diatomite piègent les impuretés tout en évitant le colmatage et en permettant l'écoulement du liquide.

Compte tenu de ses propriétés spécifiques (taille et forme de ses composants, densité, porosité), l'adjuvant de filtration à base de diatomite retient les particules les plus fines (0,1 nm) avant qu'elles n'atteignent le média filtrant, permettant ainsi d'atteindre à la fois un niveau de limpidité des filtrats acceptable et une vitesse de filtration élevée, pour une longueur maximale de cycle de filtration.

La perméabilité et la vitesse de filtration du gâteau, et le degré de limpidité des filtrats dépendent de la granulométrie et de la porosité du gâteau de filtration.

L'utilisation d'adjuvants de filtration à base de diatomite présente également, par rapport aux filtres fixes classiques, les avantages suivants :

- changement du milieu filtrant par simple inversion du courant liquide, sans démontage de l'appareil ;
- récupération aisée de la totalité des produits à coût élevé (antibiotiques par exemple), par simple lavage du gâteau de filtration avec un liquide bon marché qui se substitue aux précédents.

Page | 7

En général, les produits naturels, qui se caractérisent par des vitesses d'écoulement très faibles et une limpidité des filtrats optimale, sont très peu utilisés en filtration, contrairement aux produits calcinés et activés qui sont habituellement classés en trois principales familles selon leurs perméabilités: élevées (5 à 15 darcy), moyennes (0,9 à 3,8 darcy) et faibles (0,03 à 0,2 darcy). Les deux premières familles sont classiquement utilisées en pré-couche et en alluvionnage, la troisième servant à la filtration de finition en fin de cycle.

L'industrie sucrière a été la première à développer l'emploi des adjuvants de filtration à base de diatomite. Ceux-ci sont utilisés aujourd'hui pour épurer et principalement pour le dégrossissage et la clarification, de très nombreux produits :

- vin, bière, cidre, whisky, liqueurs et autres spiritueux, jus de fruits et de légumes, sirops de sucre bruts, pectines, gélatines, vinaigre ;
- graisses et huiles alimentaires (végétales et animales), alginates et autres dérivés des algues, glucose et dextrose ;
- eaux de piscine, potables et industrielles et effluents divers ;
- solvants pour le nettoyage à sec, alcools ;
- sang humain ;
- produits chimiques organiques et inorganiques (dont phénates, silicates et acides sulfurique et phosphorique) et pharmaceutiques (dont paracétamol, antibiotiques, édulcorants) ;
- vernis, laques, résines diverses, polymères, soufre, colles;
- en galvanoplastie;
- huiles industrielles, lubrifiantes et de coupe.

Dans quelques cas, cependant, les adjuvants de filtration sont destinés à la récupération et à la concentration de solides finement divisés et très compressibles.

La diatomite peut être également utilisée :

- sous forme d'une paroi poreuse très perméable, à seuil de filtration déterminé, qui présentera la caractéristique de pouvoir être rabotée mécaniquement par couches ultra-minces; l'élimination du gâteau en est facilitée, notamment dans le cas de filtres rotatifs ;

- pour la fabrication de plaques filtrantes employées en fin de cycle, pour affiner la filtration (élimination des impuretés les plus fines, de l'ordre de 1 μm) de liquides tels que l'eau, le vin et la bière, la diatomite naturelle pouvant être associée à d'autres produits (fines diverses, perlite, cellulose) dans des systèmes multicouches.

La quantité d'adjuvant de filtration nécessaire pour un alluvionnage varie en moyenne de 40 à 150 g/hl, et dépend, avec sa qualité, du type et de la quantité de matières solides à éliminer, du débit de filtration et du degré de limpidité des filtrats désirés.

Page | 8

L'élaboration de la bière requiert habituellement, en moyenne, 100 g/hl (quantité variant de 20 à 120 g/hl) d'adjuvants de filtration à base de diatomite, employés également en pré-couches et en alluvionnage. La technique de filtration par alluvionnage est appliquée à la très grande majorité des liquides alimentaires.

D'une manière générale, le choix de l'adjuvant le mieux adapté au type de filtration doit également prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du produit à filtrer, qui sont notamment les suivantes: variable température-viscosité ; concentration en particules solides; dimension moyenne, répartition granulométrique et structure de ces particules; pH; oxydabilité.

Les principaux producteurs d'adjuvants de filtration à base de diatomite élaborent généralement une gamme de produits correspondant à des vitesses de filtration croissantes, mais possédant également des caractéristiques différentes du point de vue de la densité, de la granulométrie, de la couleur, du pH et de la capacité d'absorption.

I.2.2. Charges

Dans ce secteur, qui est le deuxième consommateur de diatomite après celui de la filtration, la diatomite intervient en tant que charge active, c'est-à-dire comme un additif fonctionnel qui modifie et améliore les propriétés du produit final.

Les propriétés physiques et chimiques des charges actives sont adaptées aux besoins particuliers de chacune des applications, et de ce fait sont étroitement contrôlées pour répondre à des spécifications rigoureuses, ce qui se traduit par des prix de vente généralement élevés.

Bien que de nombreux minéraux puissent être broyés et calibrés pour fournir des charges, les caractéristiques intrinsèques de la diatomite sont bien adaptées, ou peuvent être aisément modifiées, pour cette application.

D'une manière générale, les produits de qualité "charges" sont insolubles et inertes dans la plupart des procédés chimiques ; ils ont à la fois une faible densité en vrac et une granulométrie fine (variant généralement de 1 à 50 μm) et sont constitués de particules de forme et de taille appropriées.

De nombreuses autres propriétés peuvent intervenir pour des applications spécifiques dans le secteur des charges: couleur, surface spécifique, capacité d'absorption de liquide, abrasivité, rigidité des particules, température de fusion et porosité par exemple.

Historiquement, les produits de charges diatomitiques ont été développés à partir des fines produites lors de l'élaboration des adjuvants de filtration, qui pouvaient ainsi être valorisées. C'est encore le cas aujourd'hui où la plupart des producteurs de diatomite élaborent des charges issues de différents stades de traitement (séparation des fines en suspension dans l'air à l'aide de filtres à manches, granulométrie variant de 1 à 50 μm en général).

Les charges diatomitiques (diatomite naturelle, calcinée et activée) entrent dans la composition de nombreux produits: peintures, cires, vernis, laques, résines, polymères, matières plastiques, caoutchoucs et latex, pigments, papiers et cartons, encres d'imprimerie, engrais, insecticides, pesticides, ciments, bétons, enduits, mortiers, plâtres, crépis, allumettes, produits asphaltés et bitumineux, aliments du bétail, produits à polir et nettoyeurs divers, pâtes dentifrices et produits pour empreintes dentaires, produits pharmaceutiques, explosifs, produits chimiques et catalyseurs.

I.2.3. Absorbants

Compte tenu de leur capacité d'absorption et de leur porosité élevées, et de leur faible densité, les produits diatomitiques constituent des absorbants qui sont utilisés dans différentes applications domestiques et industrielles: litières pour animaux domestiques, absorbants industriels d'huiles et de graisses, nettoyeurs divers, traitement de déchets toxiques, d'eaux et de sols pollués.

Leur emploi en tant que litières pour animaux domestiques requiert une capacité d'absorption des liquides et des odeurs élevées, une granulométrie uniforme et une absence de poussières, et une bonne cohésion à l'état humide.

L'utilisation des produits diatomitiques naturels pour le traitement de déchets toxiques et de sols pollués est relativement nouvelle. Des recherches ont récemment été menées en Grande-Bretagne sur le traitement in-situ de sols contaminés, et en Allemagne et aux États-Unis sur l'épaississement de produits liquides toxiques (boues de stations d'épuration par exemple) par adjonction de diatomite, ce qui a pour effet de les transformer en matières sub-solides et ainsi de faciliter leur manipulation et leur élimination.

En Grande-Bretagne, la diatomite est utilisée pour la réhabilitation de sites miniers du fait de son aptitude à "contrôler" les métaux contenus dans les sols contaminés. Les métaux résiduels initialement solides sont solubilisés par des processus d'oxydation et/ou de lessivage, et l'acide qui est produit accentue la libération des métaux. Le rôle principal de la diatomite est de tamponner l'acidité et d'éliminer les métaux en solution afin de réduire la contamination des sols et des eaux de surface et d'abaisser la toxicité.

I.2.4. Produits isolants et réfractaires

La diatomite naturelle et calcinée est employée pour la fabrication de différents types de produits d'isolation thermique et phonique et réfractaires :

- briques isolantes réfractaires ;
- panneaux de construction isolants et ignifuges (élaborés par simple cuisson) ;
- ciments réfractaires de jointoiment et bétons isolants réfractaires ;
- blocs moulés, enduits et poudres de bourrage ;
- briques de diatomite brute crue (obtenues par simple sciage).

Page | 10

Une des utilisations les plus importantes des matériaux diatomitiques de type « moler » est réalisée dans ce secteur pour la production de briques isolantes réfractaires, particulièrement développée au Danemark. Des mélanges artificiels composés de diatomite et d'argile peuvent également être utilisés.

Ces briques sont fabriquées par cuisson de diatomite argileuse dans un four rotatif, sans additif, et présentent les caractéristiques générales suivantes :

- densité comprise entre 500 et 880 kg/m³ ;
- résistance à des températures de 900 à 950°C, voire 1 100°C ;
- résistance élevée aux chocs thermiques ;
- faible perméabilité aux gaz ;
- bonne résistance à l'attaque acide ;
- non adhérence vis-à-vis de l'aluminium et d'autres métaux.

Le retrait à la cuisson peut être diminué par ajout de diatomite pré-calcinée, qui joue le rôle de dégraissant.

Ces briques sont utilisées dans de nombreuses industries: sidérurgie, métallurgie, verreries, cimenteries, industrie céramique, industrie pétrolière, installations de chauffage, incinérateurs, etc.

Par ailleurs, les produits diatomitiques naturels en vrac sont utilisés :

- en fonderie, à la surface du bain d'acier en fusion, pour son isolation thermique et son refroidissement régulier, et pour le piégeage des impuretés qui y surnagent ;
- dans l'industrie céramique, pour le refroidissement dirigé et progressif des pièces moulées à haute température (pièces plongées dans un bac rempli de diatomite), qui ne subissent ainsi pas de choc thermique.

I.2.5. Autres secteurs d'utilisation

La diatomite est utilisée de plus :

- comme matière première (source de silice réactive) pour la fabrication, dans des conditions hydrothermales et en association avec la chaux, de silicates de calcium synthétiques qui sont utilisés comme produits isolants et absorbants ;
- en agriculture et horticulture, pour améliorer les caractéristiques des sols (allègement physique, rétention d'eau), et pour des travaux de revégétalisation.

I.3. Origine et formation des gisements

Les diatomées peuvent vivre en eaux douces, saumâtres et salées, on les trouve même dans les sols ou les mousses en présence d'humidité. Mais ce n'est que sous certaines conditions environnementales qu'elles prolifèrent. Les facteurs les plus favorables sont :

- La limpidité des eaux et une faible profondeur pour l'éclairage nécessaire à leur activité photosynthétique ;
- Un milieu de sédimentation à faible énergie avec de très faibles apports détritiques ;
- Une température basse, l'altitude ou les refroidissements climatiques leur conviennent parfaitement ;
- La présence de dioxyde de carbone, d'éléments nutritifs mais surtout l'abondance de silice soluble indispensable pour la formation des frustules ;
- L'absence de substances inhibitrices de croissance comme certains sels solubles ...

Lorsque toutes ces conditions sont réunies, les frustules siliceux peuvent sédimenter à des rythmes pouvant varier de quelques millimètres à plus de 2 centimètres par an.

Une fois formée, l'accumulation de diatomées doit être épargnée voire protégée d'événements géologiques postérieurs susceptibles de la détruire. Certains gisements subissent malgré tout d'importantes modifications d'ordre structural (plissements, fracturation...).

Deux grands types de gisements ont été recensés :

- Les gisements marins liés à des zones côtières en relation avec des mécanismes de remontées de courants froids (upwelling) ;
- Les gisements continentaux associés à des dépressions lacustres plus ou moins étendues souvent en contexte volcanique.

Exemple de gisements marins : le gisement de Lompoc en Californie, USA ;
Situé à une vingtaine de kilomètres de la côte actuelle du pacifique, et à 70 km au nord-ouest de Santa Barbara dans l'état de Californie, le gisement de Lompoc est le plus important au monde.

Les couches à diatomées sont présentes au sein d'une série sédimentaire marine qui s'étend du Miocène moyen au pliocène ayant pour substratum des formations du Jurassique supérieur (grès, schistes, basaltes ...). La séquence la plus productive est constituée par près de 300 m de diatomite stratifiée représentant la base de la formation de Sisquoc dont les termes supérieurs sont constitués par des argilites à diatomées. L'ensemble est engagé dans une succession d'anticlinaux et de synclinaux ouverts d'orientation générale N-S. Dans le détail, plus d'une vingtaine d'unités dont l'épaisseur varie de 1 à 10 m, séparées par des niveaux plus ou moins argileux sont extraites sélectivement au sein d'une structure synclinale où ces dépôts ont été préservés de l'érosion.

Exemple de gisements continentaux : le gisement du lac Myvatn, Islande ;
Le gisement du Lac Myvatn au nord de l'Islande s'il n'est pas exceptionnel par la taille n'en est pas moins un exemple remarquable de gisement lacustre en milieu continental. Situé au cœur des structures volcaniques dont sont issues les terres islandaises, il offre la possibilité d'analyser en détail les circonstances à l'origine de tels gisements. Les dépôts les plus anciens datés de l'Holocène se poursuivent actuellement (quelques millimètres par an) favorisés par la faible profondeur du lac, des conditions climatiques assez sévères, le chimisme des eaux entretenu par une intense activité fumerollienne et des apports détritiques limités avec comme avec comme principale composante des cendres plus ou moins fines liées à l'activité sporadique des appareils volcaniques environnants. L'extraction est réalisée par dragage du fond du lac.

I.4. Production mondiale

En 2013, 2,15 millions de tonnes de diatomites ont été produits dans le monde (United States Geological Survey, février 2014). Les Etats Unis sont les plus gros producteur et consommateur avec une production de 770 000 tonnes (220 millions de \$). Les états unis sont suivi par la Chine, le Danemark et le Japon (voir tableau n°1).

Tableau N° 1 : Production mondiale de diatomite, (United States Geological Survey).

	Production minière	
	2012	2013
Etats Unis	735	770
Chine	420	420
Danemark	338	325
Japon	100	100
Mexique	85	85
Pérou	81	80
France	75	75
Argentine	55	60
Espagne	50	50
Autres pays	181	180
Total mondial	2 120	2 150

La diatomite est fréquemment utilisée pour la filtration, 56% ; dans les ciments, 15% ; comme produit de charge, 14% ; comme absorbant, 13% ; et moins de 2% pour les autres applications, dont les utilisations spéciales dans les domaines pharmaceutiques et biomédicales. Le prix unitaire varie largement suivant les différentes applications, de approximativement 7.00 \$ la tonne comme agrégats légers dans le ciment portland jusqu'à 400 \$ la tonne dans des marchés spéciaux limités, dont l'art, la cosmétique et l'extraction de l'ADN.

Utilisations de la diatomite

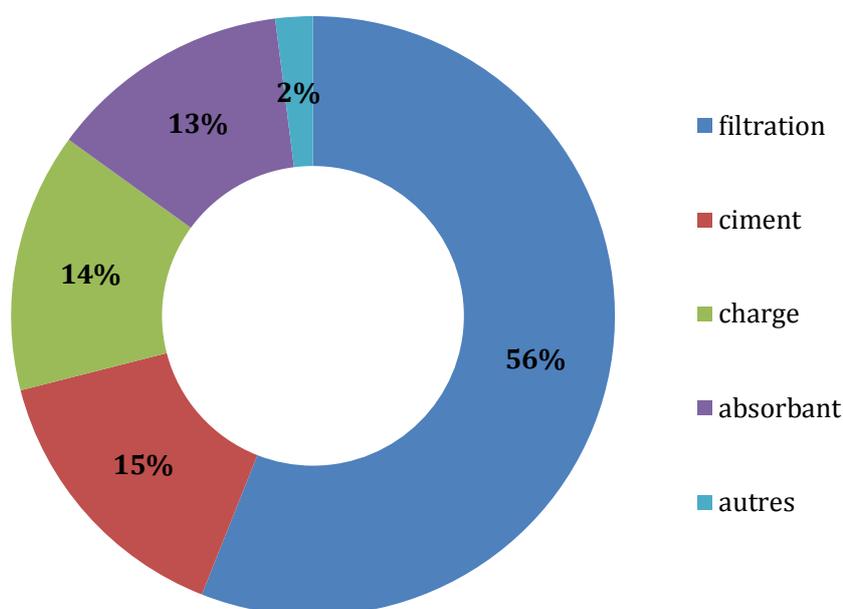
**FIG. 3** : Utilisations de la diatomite dans les différentes industries.



FIG. 4 : Carte des principaux pays producteurs de diatomite dans le monde (1995).

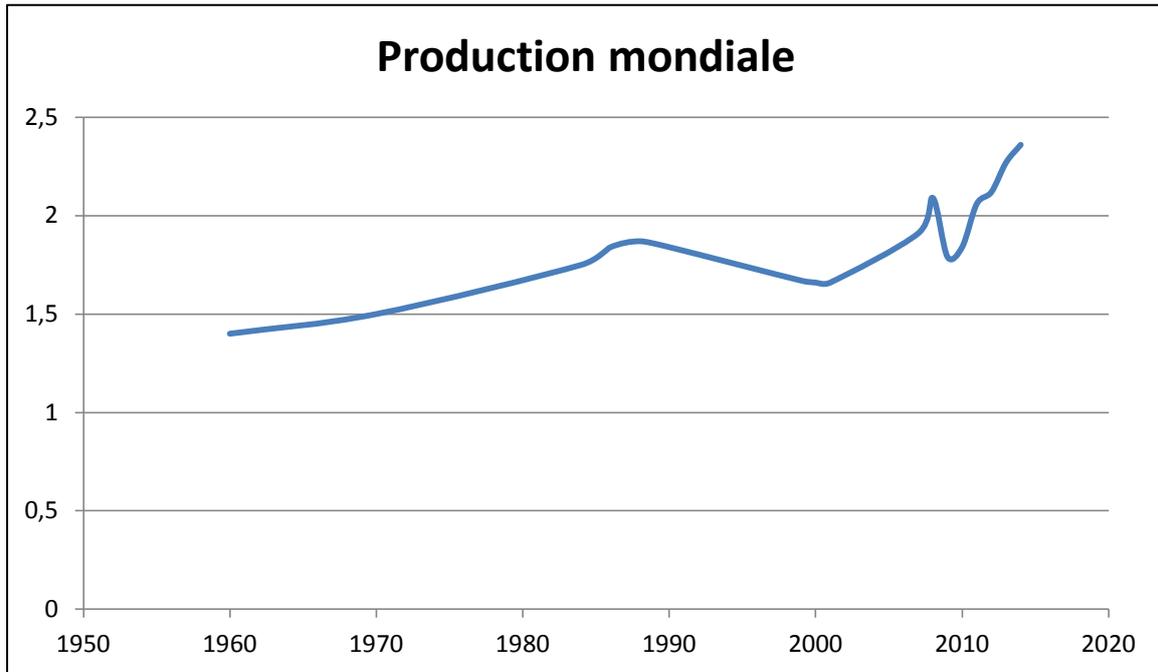


FIG. 5 : Evolution de la production mondiale de diatomite en million de tonnes BRGM et USGS.

CHAPITRE II : LE GISEMENT DE DIATOMITE DE SIG

[3] [8] [9]

II.1. Localisation et accès au gisement

Le gisement de diatomite de Sig est situé au nord-ouest de l'Algérie, au nord-ouest de la wilaya de Mascara.

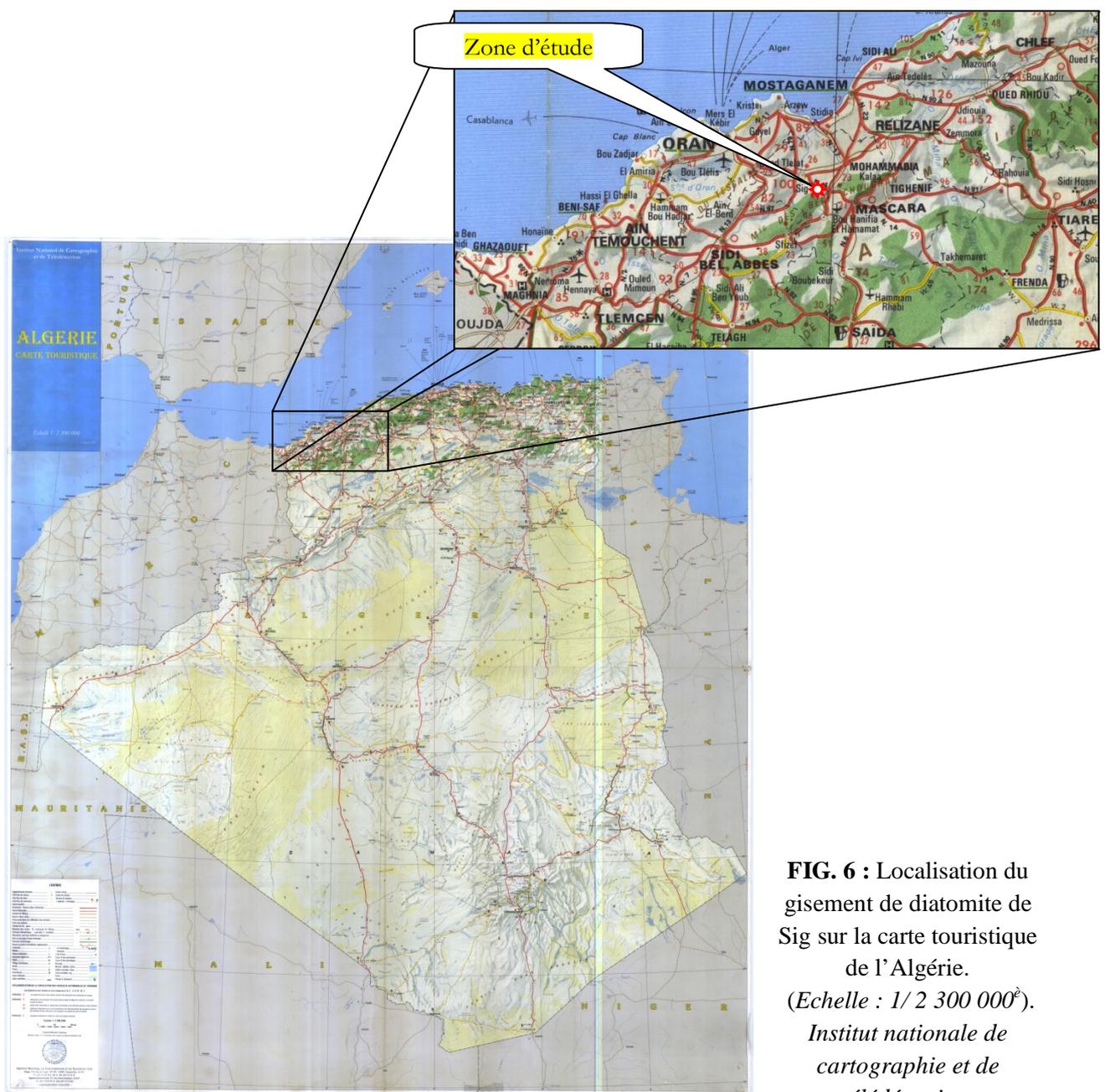


FIG. 6 : Localisation du gisement de diatomite de Sig sur la carte touristique de l'Algérie. (Echelle : 1/2 300 000^e). Institut nationale de cartographie et de télédétection.

Le gisement de kieselguhr (diatomite) fait partie du Massif de Grimez. Ce massif, dont le centre est situé à environ 5 km au sud-est de la ville de Sig à laquelle il est relié par une route goudronnée d'une longueur de 15 Km.

Du point de vue orographique le gisement de Tallait est associé à une hauteur accidentée de ravins et de vallées aux pentes assez raides. Les hauteurs absolues du gisement varient de 320 à 424 m pour une dénivellation maximale qui ne dépasse pas une centaine de mètres.

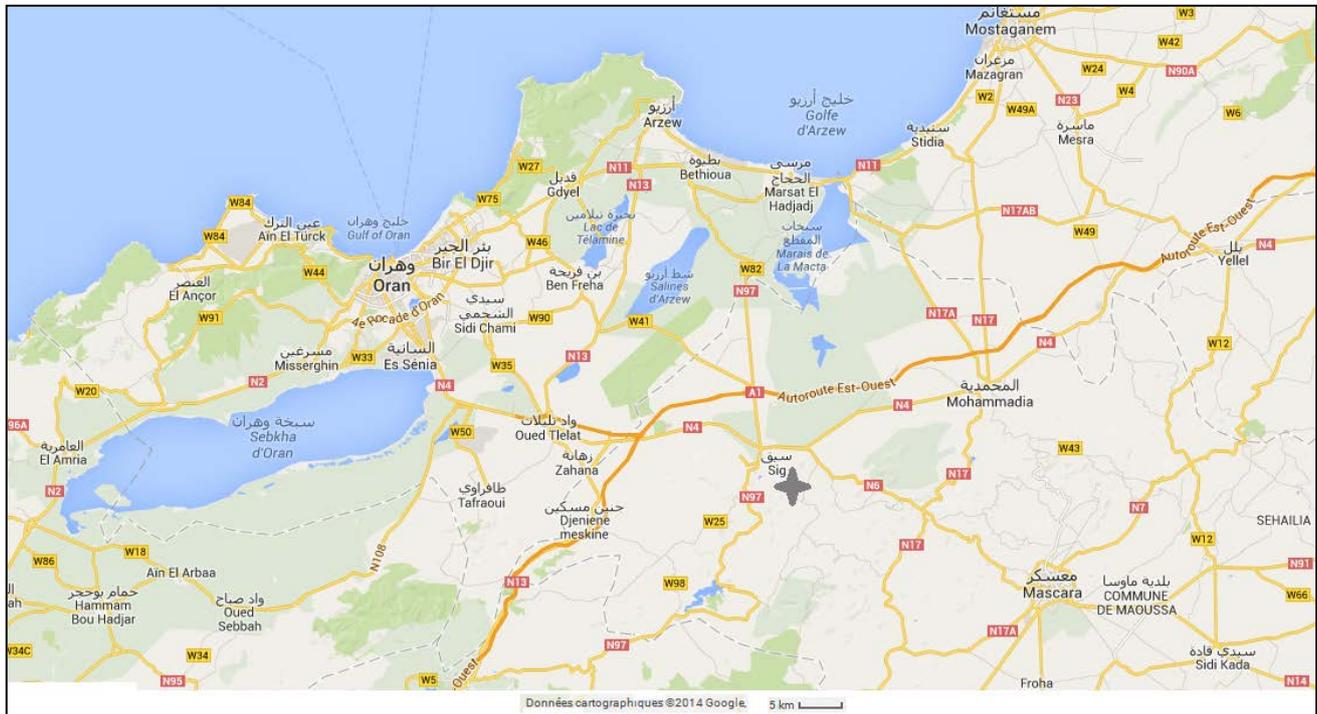


FIG. 7 : Carte du réseau routier montrant l'infrastructure routière entourant le gisement.

Tableau N° 2 : Coordonnées UTM Nord-Sahara (fuseau 30) des bornes du périmètre minier du gisement. (Superficie : 209 ha).

N° de borne	X	Y	N° de borne	X	Y
01	758 400	3 930 500	15	756 500	3 929 500
02	758 400	3 929 800	16	756 500	3 930 100
03	757 800	3 929 800	17	757 000	3 930 100
04	757 800	3 929 500	18	757 000	3 930 200
05	758 000	3 929 500	19	757 600	3 930 200
06	758 000	3 929 100	20	757 600	3 931 100
07	757 300	3 929 100	21	758 000	3 931 100
08	757 300	3 929 200	22	758 000	3 930 900

09	757 000	3 929 200	23	758 100	3 930 900
10	757 000	3 929 300	24	758 100	3 930 800
11	756 800	3 929 300	25	758 200	3 930 800
12	756 800	3 929 400	26	758 200	3 930 700
13	756 700	3 929 400	27	758 300	3 930 700
14	756 700	3 929 500	28	758 300	3 930 500

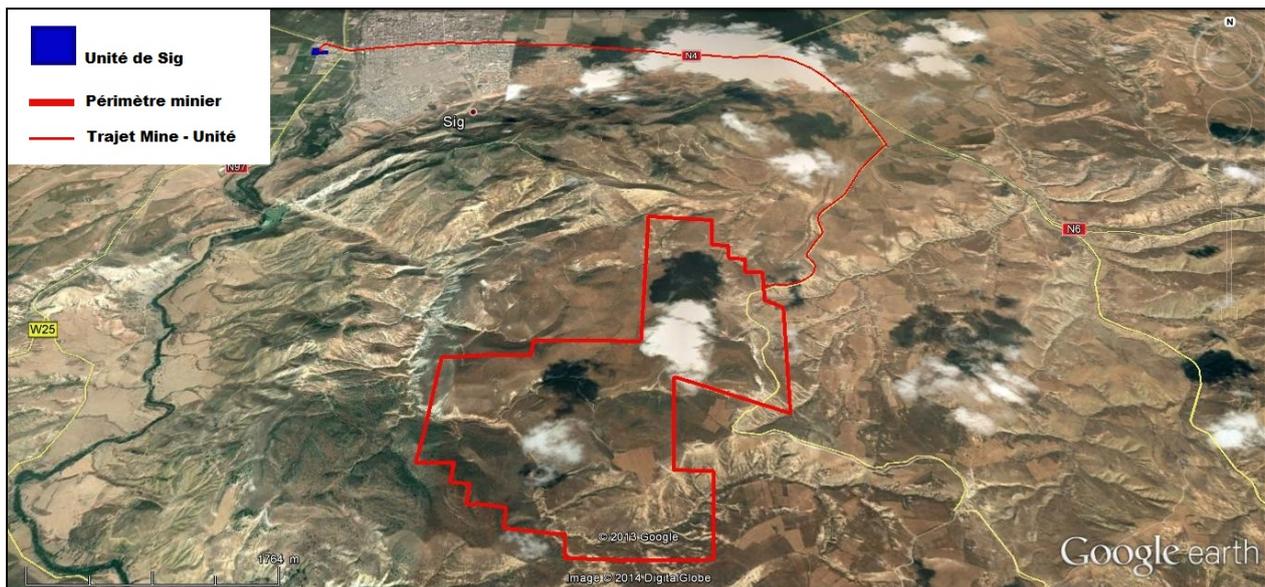


FIG. 8 : Image satellite montrant le périmètre minier et l'unité de Sig. (Google Earth)

II.2. Cadre géologique

Le massif de Grimez est un relief collinaire en général monoclinale avec des escarpements latéraux et falaises rocheuses qui continuent vers les cotés inférieures avec des pentes qui deviennent moins abrupts sur les sols argileux-marneux. Le réseau hydrographique est composé de cours d'eau ou incisions superficielles de cours d'eau de type éphémère, réglés par des précipitations généralement plus présentes pendant la saison d'hiver, au cours des mois de janvier et février.

II.2.1. Stratigraphie régionale

Le gisement de kieselguhr est composé des formations sédimentaires d'âge Miocène supérieur, surmontées de dépôts meubles d'âge Pliocène et quaternaire.

La structure Géologique de la région des travaux est présentée suivant les données du levé géologique au 1/50.000, effectué par MM. Z. Boulaine et A. Perrodon, ainsi que les résultats des travaux de prospection, réalisés en 1969-1970 et en 1977-1978 par l'unité SO.NA.R.E.M. de Sidi Bel Abbes.

Miocène Supérieur

Les sédiments du Miocène sont largement répandus et représentés par des complexes de sédiments continentaux et marins du miocènes supérieur.

Miocène continental

Est représenté par une assise de formations détritiques rouges, des limons sableux, des grès et des conglomérats.

La puissance des sédiments du miocène continentale est variable et atteint 200 m.

Miocène marin

Est composée de formations différenciées par les assises décrites ci-dessous.

Miocène marneux (m^m)

Ces roches sont développés sur presque toute la superficie de la région, et bordent le gisement de tous les cotés. Celles-ci sont représentées par des marnes bleues qui contiennent une faune caractéristique du miocène supérieur. La puissance du niveau atteint 500 m.

Miocène Calcaire (m^s , m^d , m^l)

Les calcaires avec Lithothamniées caractéristiques sont en général sur toute l'assise. Ce sont des roches massives, blanches parfois à teinte jaunâtre. A la base celles-ci deviennent plus friables, gréseuses et se transforment graduellement en calcaires tendres gréseux et argileux.

Dans la partie Sud ces formations deviennent plus détritiques, forment des marnes gréseuses et des grés faiblement cimentés.

Ces formations sont développées en petite quantité dans la partie Sud-Est du territoire. La puissance de l'assise atteint 200 m.

Tripolis Miocènes (m^t)

Se développent dans la partie centrale de la superficie et représentent l'objet de notre étude. Les tripolis (kieselguhr) sont blancs et gris-blancs avec des bancs de roches siliceuses, marneuses et calcaires. Les calcaires reposent sur le kieselguhr, contiennent une faune du Miocène supérieur. La puissance de cette assise atteint 150 m.

Miocène gypseux (m^b , m^a)

Ces roches sont développées au Nord du gisement de Kieselguhr en une bande étroite s'étirant du sud-ouest au nord-est.

Ce sont les derniers dépôts du Miocène supérieur, qui forment une suite compliquées de différents faciès. Ceux-ci sont représentés par des sables (m^b) à grains fins blanc-jaunâtres ou blancs, par des marnes et des argilites grises avec des passées de gypses (m^a). La puissance de cette série atteint 200 m.

Pliocene et Quaternaire

Dans la région les dépôts du Pliocène sont représentés par des formations marines et continentales qui reposent en discordance sur les dépôts du Miocène.

Pliocène marin (p)

Page | 20

Est représenté par une stratification de sables marneux de grès à stratification oblique, de calcaires dolomités et de sables quartzeux. La puissance maximale des dépôts du Pliocène marin atteint 400 m.

Le pliocène marin affleure en une bande étroite au sud-est de la ville de Sig, où il est représenté par des sables blancs, gris-blancs, à grains fins et micro-granules. Leurs puissance atteint 40 m.

Pliocène continentale (pc)

Est composé d'une assise de marnes, de limons sableux, d'argiles de couleur rouge-brique et de conglomérats. Cette assise atteint une puissance considérable et se développe en une large bande au sud-est de Sig.

Dépôts quaternaires (q)

Les dépôts quaternaires ont dans la région un large développement. Ceux-ci sont représentés par des dépôts diluviaux et alluviaux graveleux et sableux, sableux et argileux avec des inclusions de gros blocs de roches mères. Sur une partie considérable de la superficie les formations quaternaires sont recouvertes d'une carapace calcaire.

II.2.2. Aménagement structural

La région étudiée se trouve dans la partie littorale de l'Atlas Tellien.

L'Atlas Tellien où Méditerranéen s'étirent en direction sub-latitudinale, a une structure très compliquée, provoquée par une série de déplacements tectonique.

Dans la région du gisement, les roches du Miocène et du Pliocène sont plissés et de faibles pendage, et forment des structures anticlinales et synclinales dont les axes ont en général une direction NE.

A part les dislocations en plis dans la région, on rencontre des accidents disjonctifs tectoniques. Au sud de la ville de Sig l'anticlinal de direction nord-est est coupé en longueur par une faille avec rejet.

Des conglomérats et des grés de teinte rouge du Miocène affleurent dans le noyau de l'anticlinal.

Les flancs des plis ont une pente douce jusqu'à 50°.

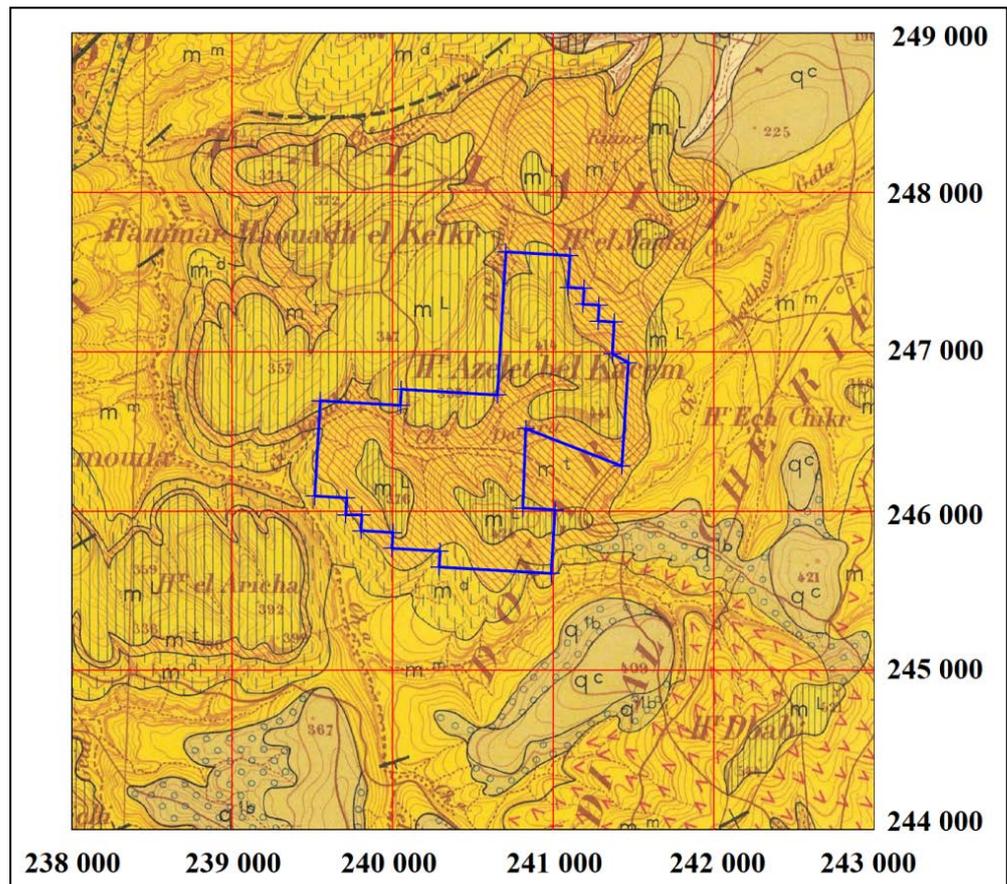
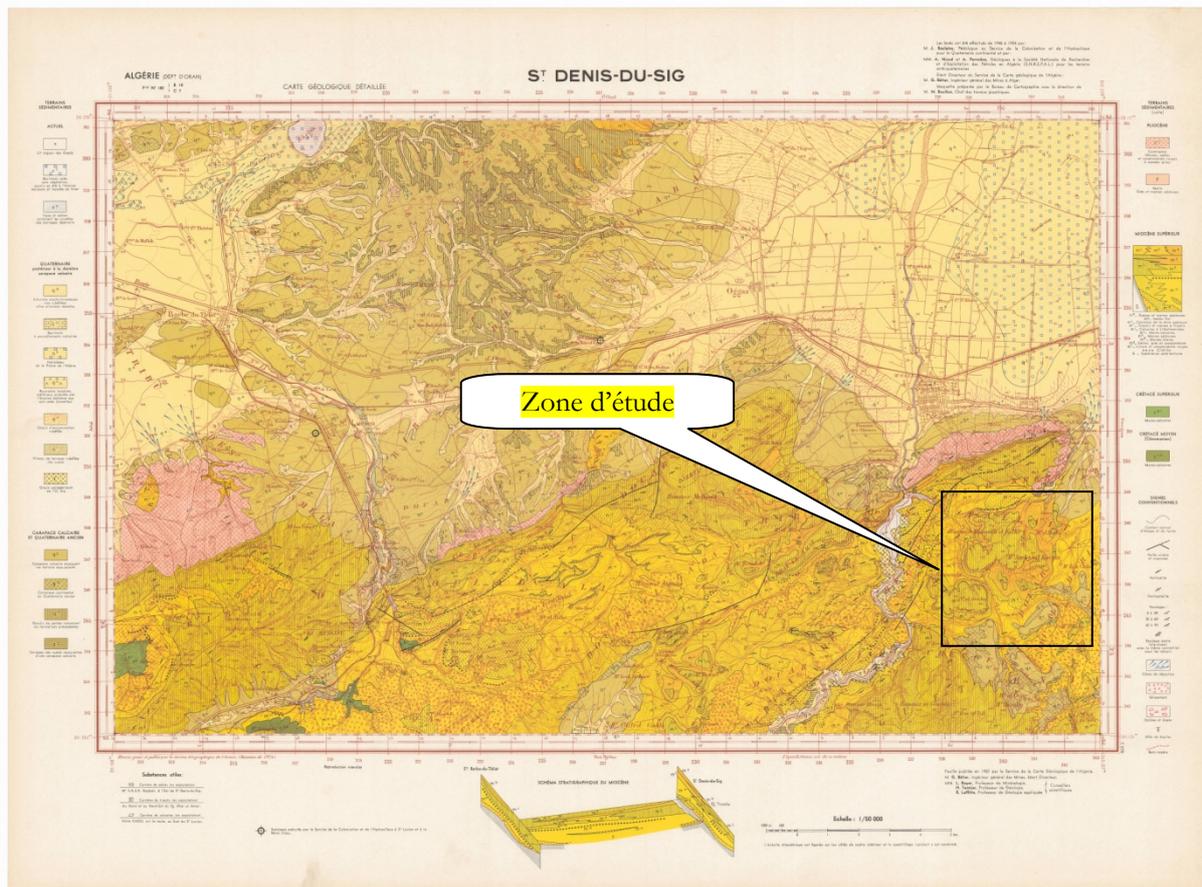


FIG. 9 : Cadre géologique de la zone d'étude.
Extrait de la carte géologique ST DENIS-DU-SIG, Echelle 1/50 000^e.

II.2.3. Géologie détaillée du gisement et de ses environs

Stratigraphie

La séquence stratigraphique aux environs du massif de Grimez où se trouve le gisement de kieselguhr de Sig, est constituée par une couche quaternaire que surmontent des couches sédimentaire du Miocène supérieur composées de calcaire à lithothamniées, des argiles marneuses jaune pâle, du kieselguhr avec inter-lits de marnes, des quartzites à ciment calcaire et un niveau calcaire. Toutes ces séries reposent sur des argiles marneuses vertes foncées.

Normalement les niveaux de kieselguhr sont repérables à flanc des falaises, soit par leurs traces blanchâtres ou par la localisation qu'on en fait à l'aide de tranchées.

Les niveaux diatomiques sont présents dans la séquence stratigraphique qui est formée de 7 couches d'épaisseurs différentes et de puissance globale jusqu'à 15 m.

Le niveau réputé intéressant pour l'exploitation a une épaisseur de 1 à 5 m, et correspond à la «3° couche» qui montre une puissance moyenne de 1.2m.

La couleur des niveaux marneux présents au-dessus et en dessous de la couche utile, selon l'humidité et le contenu en fossiles, varie du gris au gris verdâtre.

D'une manière schématique un résumé de la stratigraphie du Djebel Tallait dans la zone du gisement est représenté dans le tableau ci-après.

Tableau N° 3 : Stratigraphie schématique (SONAREM, SIDAM).

Couches	Epaisseur moyenne (m)		Stratigraphie schématique SONAREM ('77-'78)	Stratigraphie schématique SIDAM
			Quaternaire non consolidée/mort-terrain	Mort-terrain
			Calcaire à lithothamniées (et quartzite)	Quartzite
			Marne jaune pâle	Argile jaune pâle (carbonatée)
			Couche de marne	
1° et 2°		max 15	Kieselguhr et marne	Kieselguhr marneux
3°	0.4 - 1.5		Niveau interstratifiés et horizons marneux	
	1.3 - 2.2		Kieselguhr homogène	
	0.4 - 1.5		Niveau de Kieselguhr et horizons marneux interstratifiés	
4° à 7°		Kieselguhr marneux		
			Marnes bleu verdâtres	Argile marneuse foncée

Le calcaire sommital, plus compétent, a contribué à la préservation des couches inférieures marneuses et à diatomées, plus sujet à la désintégration météorique.

Des photographies bondies au scanning électron microscope, SEM, et insérées dans la documentation rédigée par SIDAM, ils permettent de prendre vision des types d'organismes constituant les dépôts sédimentaires de diatomite de Sig et les comparer avec le type de référence U.S.A. John Manville. La reconnaissance des types des diatomites donne des informations utiles concernant la surface spécifique réalisable par le minerai utile.

La formation à Kieselguhr de la région de Sig et dans d'autres régions de l'ouest algérien, est composée de dépôts et de tas de squelettes de diatomées déposés dans un environnement de fonds marins caractérisé par relativement une faible profondeur et par une forte contribution de SiO₂ dans de nombreux cas, comme conséquence de phénomènes volcaniques.

Aménagement structural

Les couches de diatomite dans les zones où elles affleurent, montrent généralement une disposition subhorizontale, avec une inclinaison variable de 2 à 10° de manière radiale vers le centre du gisement.

SIDAM a décrit les phénomènes de failles verticales qui ont déplacé la couche de kieselguhr dans certaines parties de l'amas, avec un rejet de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, clairement visible actuellement dans les galeries d'extraction existantes, comme vérifié durant la visite de Geofield en janvier 2012.

Hydrogéologie

Dans les environs du massif de Grimez où se trouve le gisement de Kieselguhr de Sig, les couches du Miocène supérieur montrent une faible inclinaison (de 2 à 10°, plus rarement 20°) plongeant vers le centre du gisement en imitant une structure de "bol" ou "cuillère".

Une caractéristique importante du gisement est la présence de la surface piézométrique dans la partie centrale du relief. La géométrie du gisement rend important le phénomène de concentration des eaux de pluie dans la partie centrale de l'amas. En effet, dans ces zones, les couches de diatomite peuvent être partiellement immergées dans l'eau en raison de l'effet des infiltrations des eaux souterraines qui les rendent humides, avec la possibilité de percolation et d'infiltrations des eaux riches en carbonate par dissolution des couches calcaires supérieurs.

II.3. Présentation de l'entreprise exploitante

Issue de la restructuration organique de la SONAREM, l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles (ENOF) a été créée par décret N°83-442 du 16/07/83 avec un patrimoine minier de 18 unités produisant une gamme variée de minerais.

Page | 24

Il s'agit d'une société par actions, au capital social de 4,5 milliards de DA, avec un effectif de 2026 agents, dont le siège social est à El Harrach, Alger.

Devant la diversification des produits miniers et dans un objectif de développement de la société, ENOF a subi une deuxième restructuration en 2001 avec la création de 6 filiales :

- SOMIBAR avec 3 unités de Baryte ;
- ALGRAN avec 10 unités d'agrégats ;
- BENTAL avec 2 unités de bentonite et de terres décolorantes ;
- DIATAL avec une seule unité de Kieselguhr (diatomite) ;
- SOALKA avec deux unités de Kaolin avec 30% d'actions ;
- SOFELD (société d'étude Du Feldspath de Ain Barbar) ;
- Groupe de Non ferreux : constitué aujourd'hui par la mine de Kherzet Youcef ;

L'ENOF fait parti du nouveau groupe industriel minier dénommé "Manadjim El Djazaïr" (créé suite au Décret n° 11-85 du 16/02/2011). Destiné à remplacer l'ex. SGP SOMINES.

Ce groupe industriel doté d'un capital social de 5 milliards de dinars détenu par l'état imprescriptible et inaliénable, se verra transférer les actifs des cinq entreprises publiques activant actuellement dans le domaine minier, il s'agit des actifs des groupes publics FERPHOS, L'ENOF, L'ENASEL, L'ENAMARBRE, L'ENG, relevant du portefeuille de l'ex. SGP SOMINES. Les entreprises AGENOR et ORGM ont par la suite intégré le Groupe Industriel.

II.4. Travaux antérieurs

Le gisement de kieselguhr est exploité depuis 1958 par la méthode des chambres et piliers foudroyés. L'ensemble des travaux de recherche entrepris sur le site sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau N° 4 : Tableau récapitulatif des documents et recherches effectuées.

Année	Auteur	Titre
De 1970 à 1979	SONAREM	<p>1970 : Rapport sur les travaux géologiques de prospection effectués par la division de recherches avec l'assistance des spécialistes soviétiques en 1968 – Contrat n.1675.</p> <p>1973 : Rapport concernant les possibilités d'exploitation à ciel ouvert du gisement de Grimez, suite à la mission de M.Vincenzo Coccolo, géologue de la société AMI, France. Auteur K.Kostov.</p> <p>1977 : Projet de recherches et de prospection sur les substances utiles dans les régions situées au nord-ouest de l'Algérie en 1978. Auteurs : Litovtchenko N.I., Eret V.V., Sanakoev O.A., Karpov L.V.</p> <p>1977-1978 : Rapport sur les travaux de prospection détaillée effectuées sur le gisement de kieselguhr de Tallait dans la région de Sig – tome I.</p> <p>1977-1979 : Rapport sur les travaux de prospection détaillée effectuées sur le gisement de kieselguhr de Tallait dans la région de Sig – tome II – calcul et état des réserves du gisement de kieselguhr de Tallait dans la région de Sig.</p>
AOUT 1979	SIDAM	Etude de développement de l'industrie algérienne de bentonite, kieselguhr, argile activées et perlite expansée – phase I – vol. 2 : kieselguhr.
FEVRIER 1994		Etude de développement du kieselguhr de la région de Sig.
De 2012 à 2013	Geofield srl	<p>Études de Faisabilité Technique et Economique pour la valorisation des gisements de Feldspath de Ain Barbar, Diatomée de Sig, Baryte de Draissa, Dolomie de Teiouelt, Carbonate de calcium de Béni Saf et de Oggaz.</p> <p>Avril 2012 : volet 1, recueil et expertise des données de bases existantes sur le gisement de kieselguhr de Sig.</p> <p>Septembre 2013 : volet 2, Travaux de reconnaissance complémentaires.</p> <p>Octobre 2013 : volet 3, essais technologiques de traitement.</p>

II.4.1. Travaux de la SONAREM 77-79.

Les travaux de recherches sur le gisement de TALLAIT ont été effectués par l'Unité de SIDI BEL-ABBES relevant de la Division Recherches de la SONAREM.

Page | 26

L'exécution des travaux avait pour base les projets de travaux de recherches et de prospection sur les substances utiles des régions du Nord de l'Ouest Algérien.

Les travaux de prospection géologique sur le gisement de TALLAIT ont été entamés au mois de juillet 1977 et achevés au mois de septembre 1978.

Un ensemble d'ouvrages de recherche (sondages carottant, fouilles, tranchées et galeries) ont été réalisés pendant cette campagne de prospection. Les distances pratiques utilisées entre les ouvrages ont été les suivantes : 100x100 ~ 100x160 ~ 150x250 ~ 180x300. Un total de 78 ouvrages a été réalisé : 38 sondages, 32 tranchées et 8 galeries.

Le volume de travaux réalisés est présenté dans le tableau suivant :

Tableau N° 5 : Volume des travaux réalisés par SONAREM entre 1977 et 1979.

Type des travaux	Unité	Quantité
Etude de reconnaissance	Eq/j	10
Itinéraires de recherches	Km	32,5
Forages mécaniques	MI	1908,3
Tranchées	m ³	1538,6
Puits	MI	29,5
Echantillonnage	Ech	641
Analyses et essais	Anal	657
Levé topographique au 1/ 2 000	Km ²	2,65

Le calcul des réserves a été effectué suivant la méthode des blocs géologique. Toute la superficie du gisement a été divisée en 8 blocs géologiques tout en tenant compte des particularités géologiques et géomorphologiques du chantier.

Le volume de chaque bloc a été calculé en multipliant la puissance moyenne de l'assise utile par la surface du bloc. Les surfaces des blocs ont été mesurées à l'aide d'un planimètre.

Pour le calcul des réserves, seules les couches de puissance supérieure à 1,2 m ont été prises en compte.

Le plan montrant le chantier de la SONAREM, les contours des blocs géologiques et l'implantation des sondages est représenté dans la page suivante.

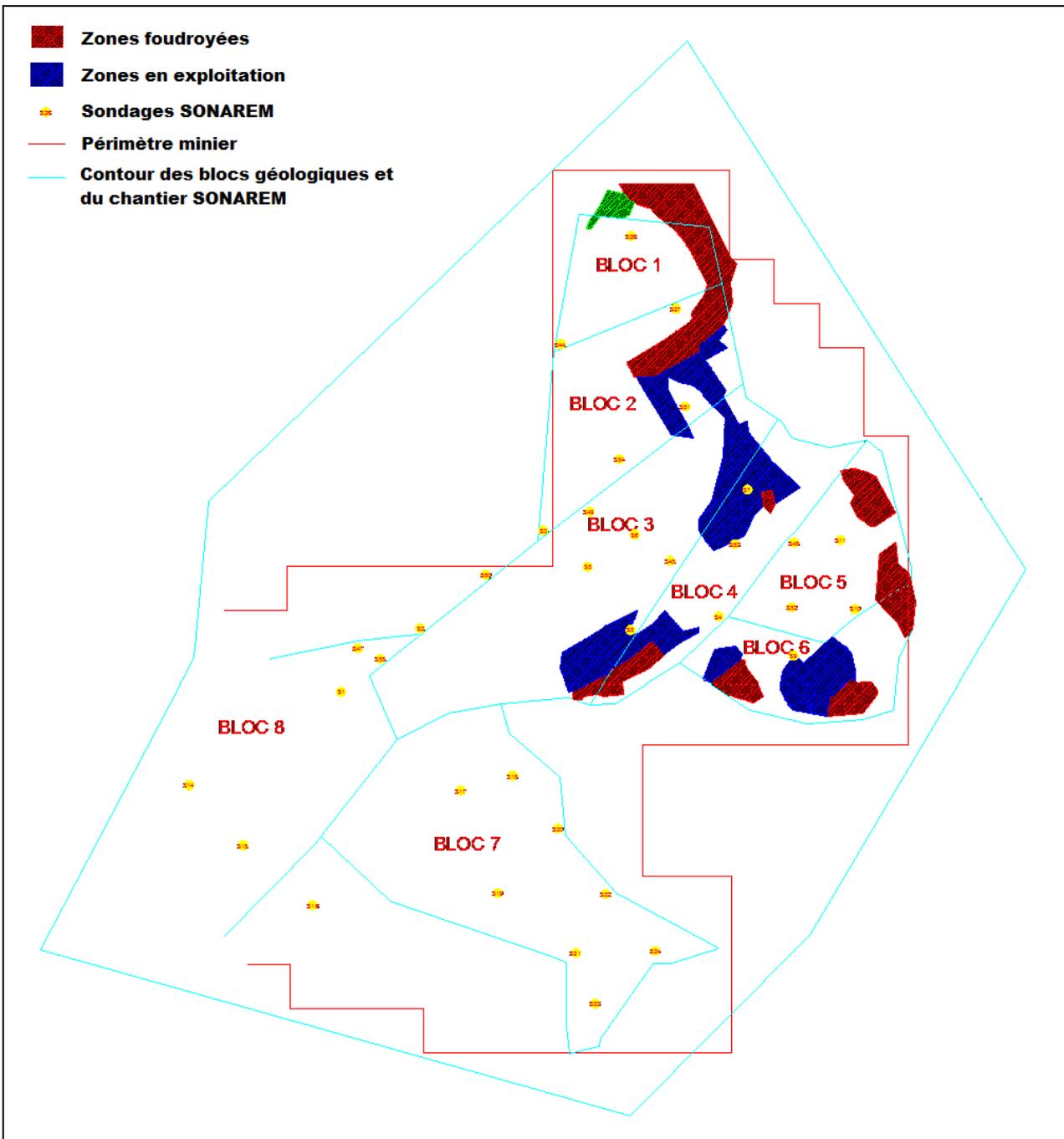


FIG. 10 : Travaux de recherche de la SONAREM.

En utilisant le système de classification russe, deux catégories de réserves ont été considérées : C1 et C2, les résultats du calcul sont portés dans le tableau ci-dessous :

Tableau N° 6 : Réserves totales du gisement du Djebel Tallait calculé par SONAREM.

Bloc	N° sondage	N° tranchées	catég	Dimension du bloc		Masse Vol (T/m ³)	Réserves en Tonnes
				Epais moy (m)	Volume (m ³)		
I	44, 27, 26	9, 25, 52	C2	4,8	363 514	0,95	345 338
II	3, 49, 54, 51, 44	52	C2	3,9	544 959	0,95	517 711
III	1, 55, 2, 50, 47, 9, 49, 54, 51, 53, 56, 8, 45, 7	53, 19, 28, 13, 58, 47, 57, galerie V et affleurement 335	C1	4,9	1 447 960	0,95	1 375 562
IV	8, 45, 7, 4, 48, 53	12, 19	C1	3,9	406 637	0,95	386 306
V	52, 11, 10, 4, 48	10, 54, 45, 55	C1	5,0	458 090	0,95	435 186
VI	9, 10	55, 30, 56 et carrière 1	C1	5,2	213 148	0,95	202 491
VII	17, 18, 19, 30, 21, 22, 23, 24	17, 14, 61, 21, 59	C2	7,0	1 762 922	0,95	1 674 776
VIII	14, 15	62, 26 et affleurements 335, 369, 370, 240	C2	6,8	1 725 500	0,95	1 639 225
TOTAL en C1						2 399 500	
TOTAL en C2						4 177 000	
TOTAL						6 575 500	

Les analyses effectuées par la SONAREM ont permis de définir pour chaque bloc (de I à VIII) la composition moyenne en éléments chimiques, le tableau ci-après résume les résultats obtenus :

Tableau N° 7 : Composition moyenne de chaque bloc du gisement (données SONAREM).

N° bloc	N° sondage	N° tranchées	Composition chimique moyenne					Puissance moy.
			SiO ₂ %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	H ₂ O %	
I	44, 27, 26	9, 25, 52	59.05	14.35	1.41	4.84	-	4.8
II	3, 49, 54, 51, 44	52	58.70	14.28	1.29	2.94	5.05	3.9
III	1, 55, 2, 50, 47, 9, 49, 54, 51, 53, 56, 8, 45, 7	53, 19, 28, 13, 58, 47, 57, galerie V et affleurement 335	57.00	13.85	1.41	3.38	4.41	4.9
IV	8, 45, 7, 4, 48, 53	12, 19	58.63	14.01	1.41	3.14	3.90	3.9
V	52, 11, 10, 4, 48	10, 54, 45, 55	58.99	13.32	2.08	3.32	4.65	5
VI	9, 10	55, 30, 56 et carrière 1	64.49	11.11	1.54	3.14	5	5.2
VII	17, 18, 19, 30, 21, 22, 23, 24	17, 14, 61, 21, 59	62.60	11.39	1.67	3.71	4.90	7.1
VIII	14, 15	62, 26 et affleurements 335, 369, 370, 240	59.57	12.08	1.44	3.02	4.94	6.8
TOTAL	33 sondages	24 tranchées, 1 galerie, 2 carrières et 4 affleurements	59.36	12.8	1.5	3.32	4.73	5.2
	290 Echantillons							

Observations :

Le volume et la qualité des travaux de recherche (sondages carottant, fouilles, tranchées et galeries) et les travaux d'analyse entrepris durant la campagne de prospection entreprise par la SONAREM permettent de caractériser le gisement et de calculer les réserves avec un degré de certitude acceptable. Donc la connaissance du gisement sur le plan quantitatif et qualitatif est bonne.

Un recalcul de réserves a été effectué sur la base du plan de surface et souterrain du gisement de kieselguhr en utilisant la même méthode de calcul que celle utilisée par la SONAREM (méthode des blocs géologiques), un résultat de 6 310 000 tonnes, toutes catégories confondues, a été obtenu. Une légère différence d'environ 270 000 tonnes a été trouvée, elle est due au fait que le plan de surface utilisé soit incomplet.

II.4.2. Travaux de SIDAM.

Les investigations exécutées par SIDAM avaient pour objectif d'identifier les réserves au niveau quantitatif et de définir les paramètres qualitatifs pour cerner le gisement de kieselguhr par l'exécution d'échantillonnages sur sondages, tranchées, saignées et en paroi des galeries. Au total 9 sondages ont été réalisés (689.5m au total) pendant la mission de juillet et août 1977, les résultats n'étant pas concluants, une deuxième campagne de forage fut effectuée en décembre 1977 au sud immédiat de l'exploitation où 4 sondages, totalisant 308m furent exécutés.

En octobre 1977, 22 échantillons en vrac ont été prélevés sur les sites d'exploitation qui étaient actifs, sur les fronts d'avancement de plusieurs galeries.

Les principaux éléments analysés sont : SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , Na_2O , K_2O , PAF. La solubilité dans l'eau et l'acide HCl a été également étudiée.

La composition moyenne des chantiers étudiés par SIDAM a donné les teneurs en éléments chimiques suivantes (analysés par la SONAREM) :

Tableau N° 8 : Composition chimique moyenne des échantillons provenant des 8 sondages de SIDAM.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PAF	Solubilité H_2O	Solubilité HCl
54.09	1.99	1.56	0.29	16.58	1.54	0.13	0.56	19.57	1.13	51.86

Les analyses indiquent que le kieselguhr est calcique, en générale plus de 10% en CaO .

La composition chimique moyenne de la deuxième campagne de 4 sondages (1a-c, 2a-c, 3a-c, 4-a-c), dérivantes des analyses complétées au Canada sur 22 échantillons, a révélé les résultats moyens suivants :

Tableau N° 9 : Composition chimique moyenne des échantillons provenant des 4 sondages SIDAM 1979.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	H ₂ O	PAF
50,18	1,26	3,33	15,52	2,86	0,23	0,70	23,71

SIDAM a aussi effectué des tests technologiques dans le but d'identifier le potentiel d'utilisation de la diatomite.

Le test de lavage à l'acide chlorhydrique (HCl) a permis de réduire le teneur en CaO jusqu'à la valeur de 1.94%. L'échantillon soumis au test de filtration en eau distillée, après un réchauffement final a donné une teneur en CaO de 0.44%.

Pour classifier les réserves, la SONAREM et SIDAM ont définies deux classifications des types de kieselguhr selon la composition chimique et en comparaison aux possibles applications technologiques. La classification proposée est synthétisée dans le tableau ci-après:

Tableau N° 10 : Comparaison des catégories classifiées par SONAREM et ISDAM dans les années 1977-1978.

Classification	Catégorie	SiO ₂ %	CaO%	Domaine d'utilisation
SONAREM	Première (Q1)	>75	<7	Filtration
	deuxième (Q2)	60-75	7-14	Matériaux de charge, agrégats 1e qualité
	Troisième (Q3)	<60	>14	Matériaux de charge, agrégats 2e qualité
SIDAM	Première (Q1)	>75	<7	Filtration standard international
	deuxième (Q2)	70-75	7-8	Filtration –seconde qualité
	Troisième (Q3)	65-70	<10	Matériaux de charge, absorbant, agrégats
	Quatrième (Q4)	60-65	>10	

Observations :

Les travaux effectués par SIDAM viennent renforcer ce qui a été fait par la SONAREM.

Une plus grande connaissance du gisement quantitativement et qualitativement vu le nombre de sondages et d'analyses chimiques complémentaires.

Une méthode de traitement (attaque à l'HCl et lavage à l'eau distillée) a été proposée et testée par SIDAM. Elle a donné de bons résultats en termes de diminution de la teneur en CaO, une valeur de 0.44% a été atteinte.

Une classification des types de kieselguhr a été définie pour les différentes utilisations du produit.

II.4.2. Travaux de Geofield srl.

Phase 1 : Recueil et expertise des données de base existantes.

Dans cette phase, Geofield a réalisé une synthèse des données antérieures : travaux de la SONAREM et travaux de SIDAM. Geofield a par la suite conclu que :

- L'area a été investigué avec une quantité et qualité d'enquêtes suffisantes qui permettent de reconnaître les particularités de la minéralisation.
- La vérification de l'efficacité de l'attaque à acide a été conseillée précédemment dans les conclusions fournis par SIDAM. Geofield partage le même avis et pense que les tests de l'attaque à l'acide sont très importants pour définir les autres utilisations possibles du minerai naturel en plus des utilisations déjà connues.
- En ce qui concerne l'exploitation du gisement du Dj. Tallait, il est fondamental d'intervenir sur les modalités d'extraction du minerai, pas concernant la méthode des chambres set piliers, mais plutôt dans le sens d'une modernisation des opérations de base qui limitent le développement des travaux en terme de production et de sécurité.
- En outre, il est opportun de considérer que la gamme d'applications de la diatomite est très vaste et, comme il est connu, aujourd'hui il existe de multiples utilisations qui demandent l'exclusivité du minéral pure et d'autres qui en précisent les concentrations.

Vu ces conclusions, afin de valider les informations et les méthodes utilisées pour la caractérisation du kieselguhr et de valoriser le minerai à l'aide de nouvelles données possibles, Geofield a recommandé un ensemble de travaux complémentaires qui comprennent :

- les travaux topographiques (plan au 1 :1000^{ème}),
- saignées en galeries sur 10 points de prélèvement,
- échantillonnage : quartage et broyage à 0-3 mm d'un échantillon d'environ 300 kg destiné aux laboratoires spécialisés pour les tests technologiques (essais de traitement – test pilote).
- Analyses chimiques : SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, P.A.F. Pour l'analyse XRF, se référer aux standards de l'UNIEN 15309:2007.

Phase 2 : Travaux de reconnaissance complémentaires.

L'objectif du rapport est de décrire toutes les indications techniques, relatives aux travaux d'enquête supplémentaires, fournies par les techniciens de Geofield pendant les visites en Algérie et les travaux effectués en Italie.

Page | 33

- Description des travaux : La méthodologie d'échantillonnage du minéral dans les différentes galeries existantes proposé par Geofield pour évaluer la qualité du minéral et estimer les réserves du gisement de Diatomite de Sig a été considérablement réduite, il a donc été convenu qu'un certain nombre de "travaux de reconnaissance préliminaires" soient entrepris à travers la réalisation d'un échantillonnage dans une des galeries actives en prenant tant la portion de qualité supérieure que celle contaminée par les marnes étant donné que l'un des tests de laboratoire devrait indiquer la possibilité de diminuer la teneur en carbonate de calcium qui se trouve en excès.

Les matériaux de l'échantillon ont été collectés hors de la galerie du bloc V, dans la zone d'accumulation et sans aucune sorte de sélection, et a été emballé dans des sacs en plastique et envoyé au laboratoire pour les opérations de quartage et de broyage.

- Résultats des travaux : Pour ce gisement, sur la base des résultats des tests de traitabilité, il est possible de fournir une évaluation des réserves par la méthode JORC, et une évaluation des réserves / ressources calculées sur la base des études précédentes après la disponibilité des levés topographiques nécessaires, comme prévu dans la liste des travaux supplémentaires prévus sur la base du Volet 1 et 1a proposé par Geofield à ENOF.
- Préparation de l'échantillon : un échantillon d'environ 60 Kg de la diatomite de Sig prélevée d'un bidon de 200 litres a envoyés au **Dr. Project Development / Dorfner Anzaplan / Analyzenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH / Scharhof 1 / D-92242 Hirschau, Germany.**

Les principaux résultats des analyses effectués par le laboratoire Allemand sont les suivants :

- Composition chimique de l'échantillon de diatomite :

Tableau N° 11 : Composition chimique de l'échantillon de diatomite.

Sampel ID :	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
Raw Diatomite [wt.-%]	77,9	3,25	1,27	0,20	0,61	0,25	5,82	1,09
	PbO	BaO	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	LOI 1000° C	
	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,13	0,02	9,34	

- Composition minéralogique de l'échantillon de diatomite :

La matière première de diatomite montre des alternances de fins lits de couleur blanche et beige. Par conséquent, une petite quantité de la fraction blanche et de la fraction beige ont été séparés et une analyse par DRX (figures 12 et 13) a été faite pour chacune d'elles.

Les résultats des analyses montrent que les lits de couleur blanche sont constitués principalement de silice amorphe avec quelques traces de calcite, tandis que les lits de couleur beige sont constitués de calcite et de quartz qui contribuent à l'augmentation du taux d'impuretés. Toutefois, en raison de la superposition très mince des lits, les fractions de couleur blanches et beiges ne peuvent pas être séparés et traités séparément.

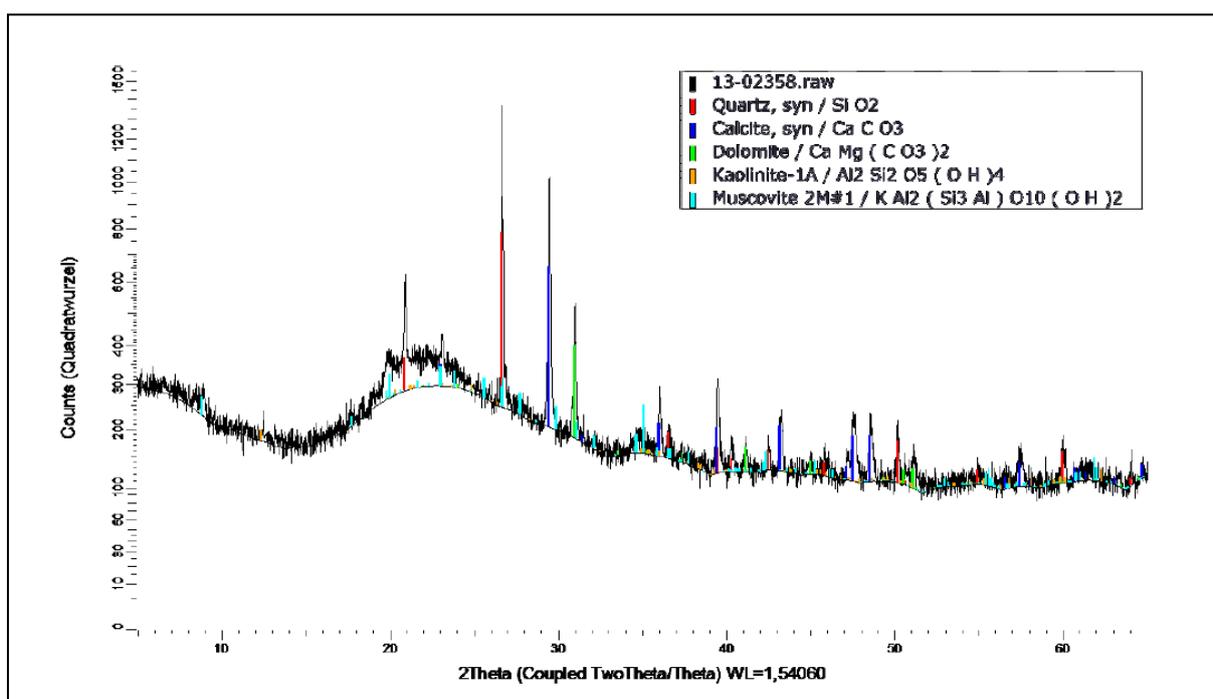


FIG. 11 : Analyse par DRX de l'échantillon de diatomite.

Tableau N° 12 : Composition de l'échantillon de diatomite en espèces minérales.

Espèce minérale	% en poids
Silice Amorphe	73
Quartz	4
Calcite	8
Dolomite	5
Autres minérales Matière organique incluse	10

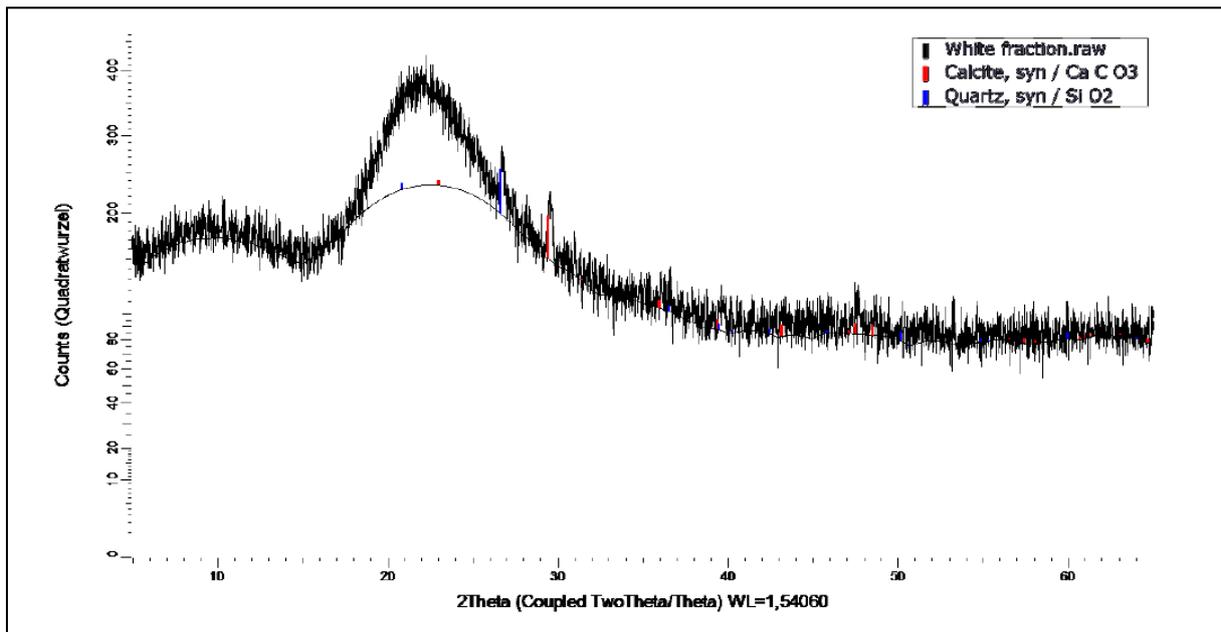


FIG. 12 : Analyse par DRX de la fraction blanche de diatomite.

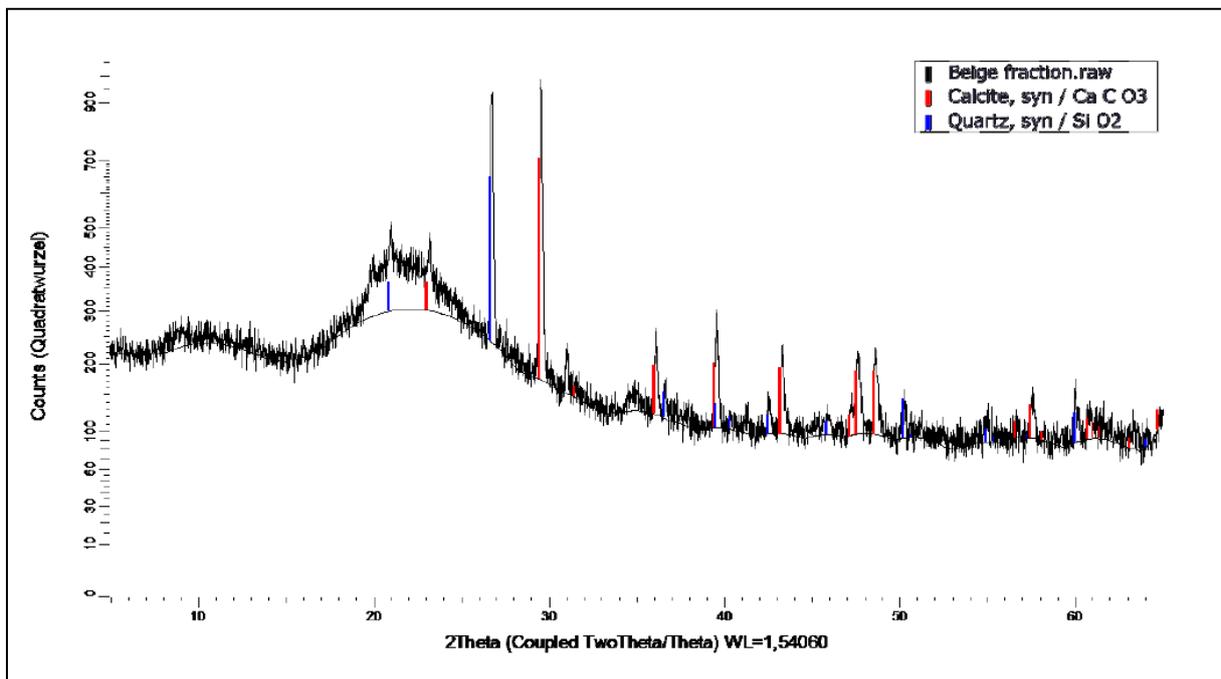


FIG. 13 : Analyse par DRX de la fraction beige de diatomite.

Le tableau qui vient ci-après montre les résultats des analyses chimiques sur :

- La matière première du Kieselguhr de Sig,
- Les fractions fine, moyenne et grossière de la matière première du Kieselguhr de Sig après classification à l'air,
- Le Kieselguhr de Sig après attaque à l'acide HCl,
- Trois produits étrangers : Celite 209, Mexico (Natural) / Celite Std. Super Cell, USA (Straight calcined, filtration) / Celite 281, USA (flux calcined, filler).

Tableau N° 13 : Composition chimique de la diatomite avant et après traitement acide, comparé à d'autres produits marchands de diatomite dans le monde.

Sample ID :	Raw Diatomite	Fine fract	Middle fract	Coarse fract	Acide traitement (HCl)	Celite 209, Mexico (Natural)	Celite Std. Super Cell, USA (Straight calcined, filtration)	Celite 281, USA (flux calcined, filler)
SiO ₂	77,9	81,1	69,2	61,4	88,4	81,6	89,0	89,6
Al ₂ O ₃	3,25	2,01	3,63	3,99	3,4	4,41	5,58	4,0
Fe ₂ O ₃	1,27	0,9	1,51	1,54	1,56	1,80	1,97	1,3
TiO ₂	0,20	0,07	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,2
K ₂ O	0,61	0,24	0,69	0,89	0,78	0,19	0,83	3,3
Na ₂ O	0,25	0,53	0,6	1,68	0,55	0,10	0,19	(Na ₂ O + K ₂ O)
CaO	5,82	4,32	8,42	11,1	0,2	0,39	0,71	0,5
MgO	1,09	0,67	2,13	2,9	0,75	0,26	0,97	0,6
PbO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	0,02	-
BaO	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	-
SO ₃	<0,01	0,01	0,04	0,17	<0,01	<0,01	0,01	-
MnO	0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01	0,02	0,01	-
P ₂ O ₅	0,13	0,07	0,14	0,17	<0,01	0,01	0,18	-
ZrO ₂	0,02	0,01	0,02	0,03	<0,01	0,03	0,02	-
LOI 1000°C	9,34	10,06	13,38	15,79	4,02	10,8	0,34	4,0

Phase 3 : Essais technologiques de traitement

Un ensemble d'analyses et d'essais de traitement ont été effectués sur un échantillon de 60 Kg dans le laboratoire **Dorfner Anzaplan**, un laboratoire allemand spécialisé dans les essais de traitement sur les minerais industriels stratégiques et de hautes valeurs comme la diatomite et les terres rares.

Page | 37

Les résultats des essais de traitement sont prometteurs en ce qui concerne la production de produits commercialisables pour l'industrie de la peinture et de la filtration. Geofield suggère des travaux d'essais supplémentaires pour le lavage à l'acide, la fusion des fines particules à l'aide d'une meilleure calcination et inclure la filtration dans les champs d'application de la diatomite de Sig. Une description des principaux équipements de la chaîne de traitement a été faite.

Observations :

Geofield a d'abord fait une synthèse des données existantes puis un échantillon de kieselguhr a été prélevé sur le stock d'accumulation du produit issue d'une galerie du bloc V qui était en activité lors du prélèvement, ce qui ne peut être représentatif du gisement, (le protocole d'échantillonnage élaboré n'a pas été respecté).

Geofield a par la suite confié un échantillon de 60 Kg à un laboratoire allemand spécialisé dans les essais de traitement pour les tests d'analyse et de traitabilité. Les résultats obtenus sont satisfaisants, ils ont montré l'efficacité du traitement à l'acide en réduisant la teneur en CaO à une valeur de 0,2 %. La représentativité de l'échantillon reçu reste discutable vu que l'analyse chimique effectuée sur l'échantillon donne des teneurs en SiO₂ et en CaO de 77,9% et 5,82% respectivement tandis que la composition chimique moyenne du gisement d'après les analyses effectuées par la SONAREM donne des teneurs en SiO₂ et en CaO de 59,36% et 12,8% respectivement.

II.5. Exploitation

II.5.1. Description des réseaux souterrains

Le **bloc 1** est constitué d'un réseau de galeries souterraines pas très bien développé sur 70 mètres de profondeur et sur 100 mètres d'extension avec une superficie de 4 250 m². Il y'a 6 galeries au jour dans ce bloc.

Page | 38

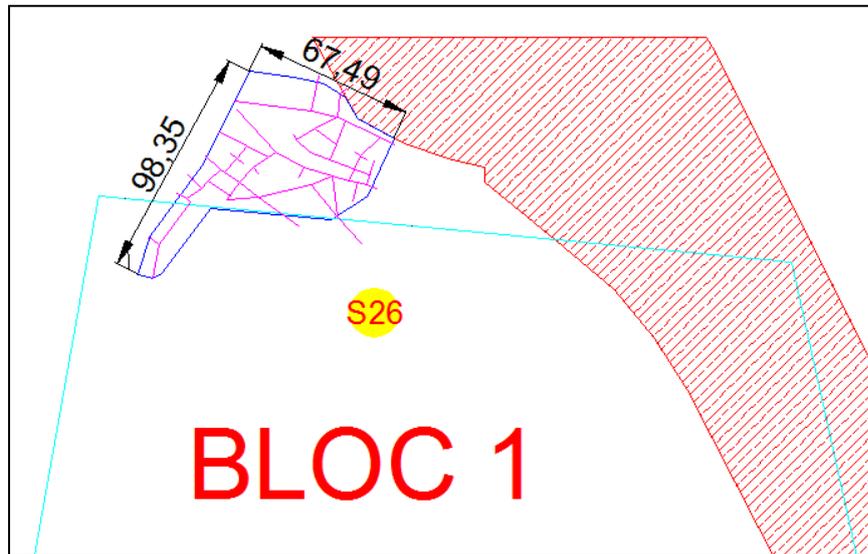


FIG. 14 : Réseau souterrain du bloc 1.

Le **bloc 2** est constitué d'un réseau de galeries souterraines bien développé sur 230 mètres de profondeur et sur 150 mètres d'extension avec une superficie de 17 200 m². Il y'a 3 galeries au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est connecté à celui du bloc 3 (partie Nord) au sud.

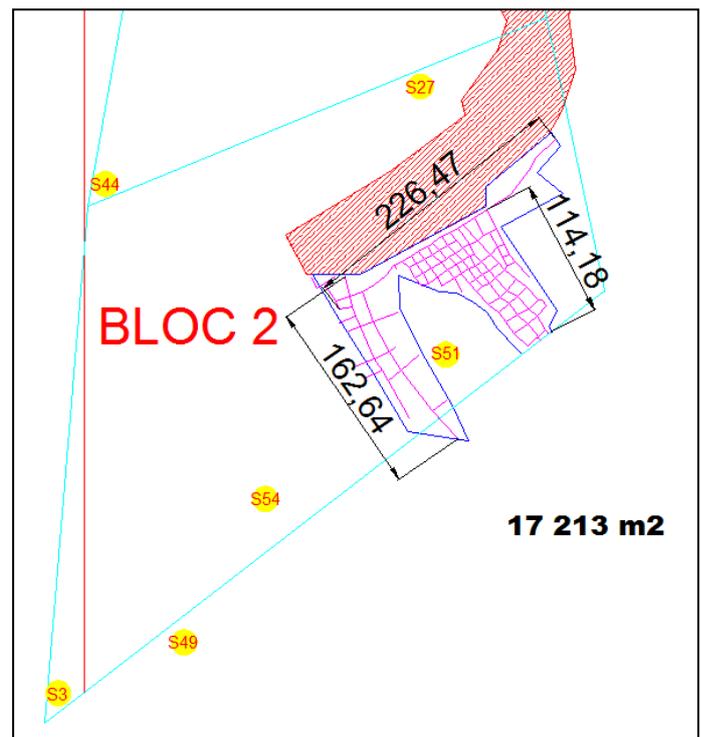


FIG. 15 : Réseau souterrain du bloc 2.

Le bloc 3 (partie nord) est constitué d'un réseau de galeries souterraines pas très bien développé sur 240 mètres de profondeur et sur 130 mètres d'extension avec une superficie de 12 600 m². Il y'a 2 galeries au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est connecté à celui du bloc 2 au nord et à celui du bloc 4 (partie nord) au sud.

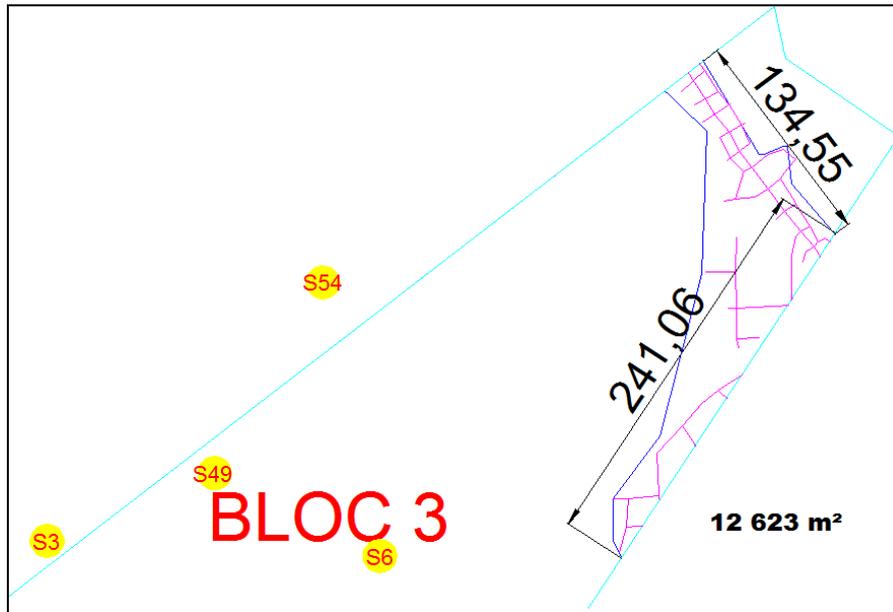


FIG. 16 : Réseau souterrain du bloc 3 (partie nord).

Le bloc 3 (partie sud) est constitué d'un réseau de galeries souterraines bien développé sur 200 mètres de profondeur et sur 75 mètres d'extension avec une superficie de 16 200 m². Il y'a 5 galeries au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est connecté à celui du bloc 4 (partie sud) à l'est.

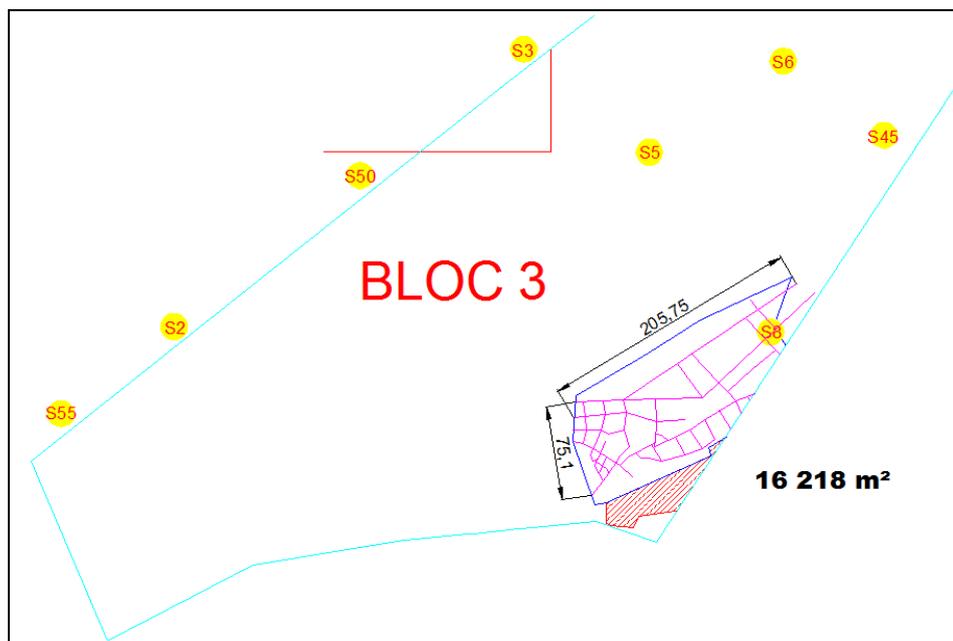


FIG. 17 : Réseau souterrain du bloc 3 (partie sud).

Le bloc 4 (partie nord) est constitué d'un réseau de galeries souterraines bien développé sur 240 mètres de profondeur et sur 130 mètres d'extension avec une superficie de 19 600 m². Il y'a 4 galeries au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est connecté à celui du bloc 3 (partie nord) au nord.

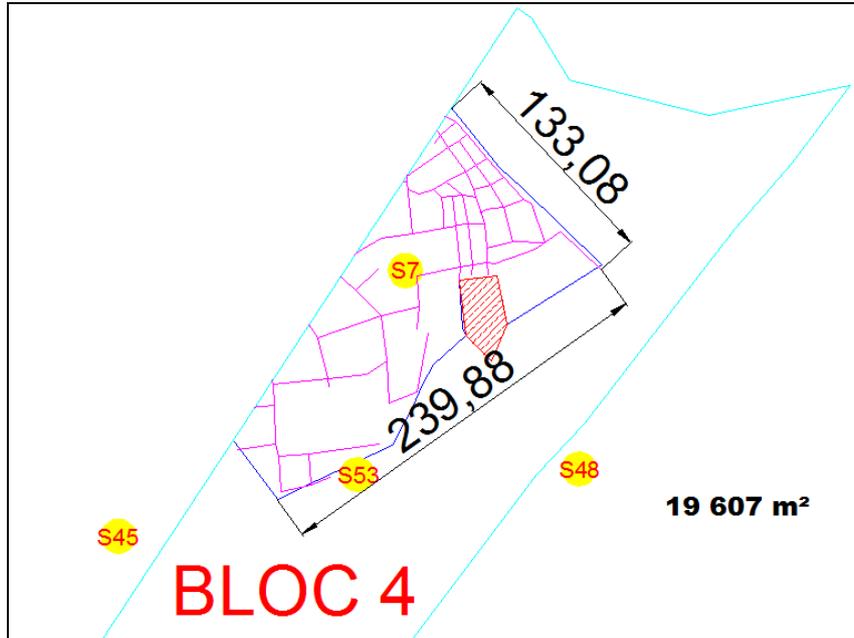


FIG. 18 : Réseau souterrain du bloc 4 (partie nord).

Le bloc 4 (partie sud) est constitué d'un réseau de galeries souterraines pas très bien développé sur 125 mètres de profondeur et sur 50 mètres d'extension avec une superficie de 7 500 m². Il y'a une galerie au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est connecté à celui du bloc 3 (partie sud) à l'ouest.

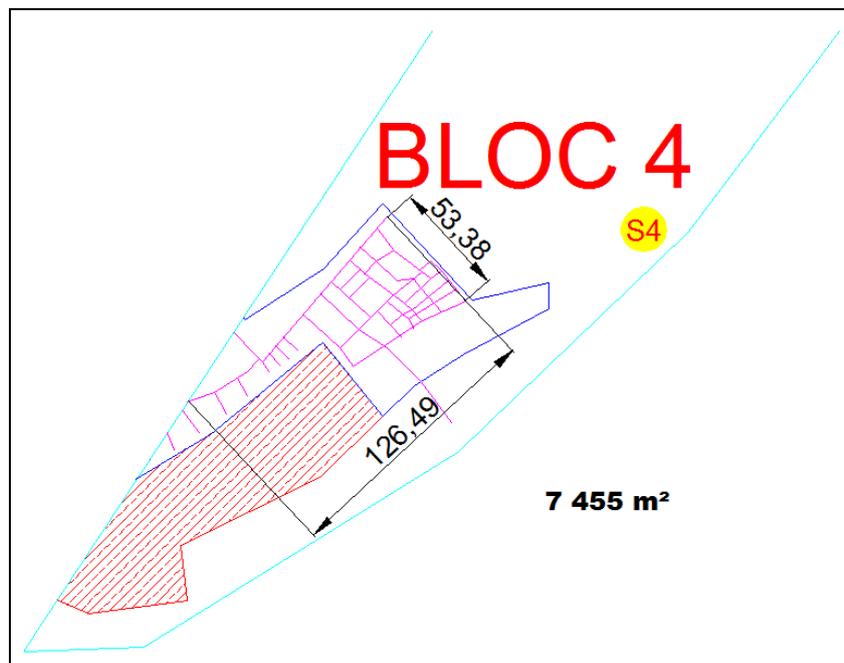


FIG. 19 : Réseau souterrain du bloc 4 (partie sud).

Le bloc 6 est constitué de deux réseaux de galeries souterrains distincts **6a** et **6b** qui ne sont connectés avec aucun autre réseau souterrain.

Le Bloc 6a (à l'est) est constitué d'un réseau de galeries souterraines bien développé sur 180 mètres de profondeur et sur 100 mètres d'extension avec une superficie de 18 400 m².

Il y'a 3 galeries au jour dans ce bloc.

Le Bloc 6b (à l'ouest) est constitué d'un réseau de galeries souterraines pas très bien développé sur 90 mètres de profondeur et sur 50 mètres d'extension avec une superficie de 3 800 m². Il y'a 2 galeries au jour dans ce bloc.

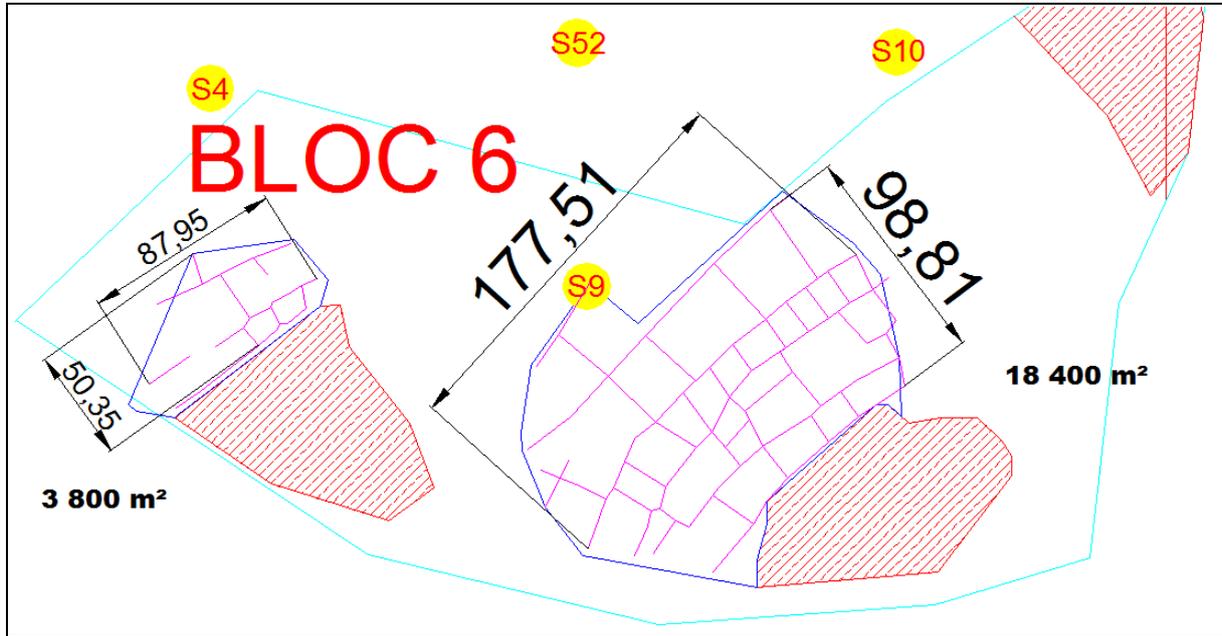


FIG. 20 : Réseau souterrain du bloc 6.

Le bloc 6/couche 5 est constitué d'un réseau de galeries souterraines pas très bien développé sur 30 mètres de profondeur et sur 65 mètres d'extension avec une superficie de 1 625 m². Il y'a 5 galeries au jour dans ce bloc. Le réseau souterrain de ce bloc est creusé en dessous de la couche 3 déjà foudroyée à l'est du bloc 6a.

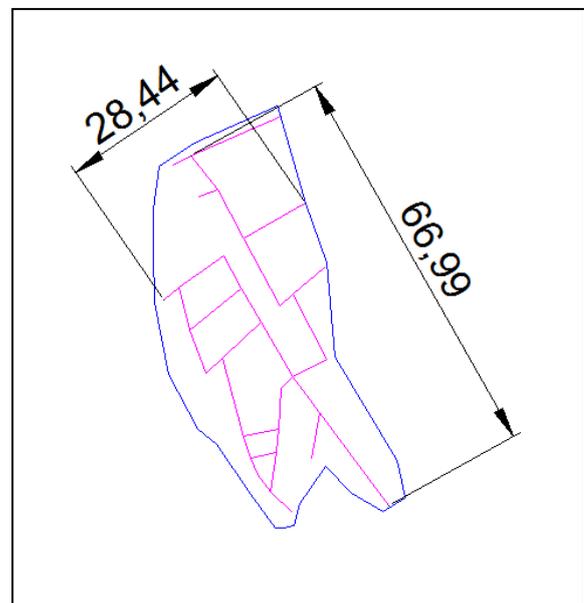


FIG. 21 : Réseau souterrain du bloc 6/couche 5.

Le bloc 5 ne contient plus de réseau de galeries souterraines vu qu'il est majoritairement foudroyé.

Les blocs 7 et 8 ne contiennent pas de réseau de galeries souterraines vu qu'ils n'ont pas encore fait l'objet d'une exploitation.

Tableau N° 14 : Tableau récapitulatif des réseaux souterrains des blocs.

BLOC	Profondeur (m)	Extension (m)	Aire (m ²)	Galerie au jour
Bloc 1	70	100	4 250	6
Bloc 2	230	150	17 200	3
Bloc 3 (partie nord)	240	130	12 600	2
Bloc 3 (partie sud)	200	75	16 200	5
Bloc 4 (partie nord)	240	130	19 600	4
Bloc 4 (partie sud)	125	50	7 500	1
Bloc 6a	180	100	18 400	3
Bloc 6b	90	50	3 800	2
Bloc 6/couche 5	30	65	1 625	5
Bloc 5	Pas de travaux d'exploitation			-
Bloc 7				2
Bloc 8				-

II.5.2. Problèmes liés à l'exploitation

Les principaux problèmes rencontrés lors de l'exploitation du gisement de kieselguhr de Sig sont les suivants :

- Difficultés de transport des wagons à l'intérieur des galeries dès que la couche de diatomite prend une pente (le transport se fait par les ouvriers en poussant les wagons jusqu'au jour) ;
- Extractions faibles vu que l'abattage se fait par les ouvriers à l'aide de pioches ;
- Aucun système d'aération n'est mis en place ;
- La source d'énergie nécessaire pour l'éclairage à l'intérieur des galeries est générée par un petit groupe à essence ;

Avec des conditions telles, l'extraction annuelle tourne autour de 15 000 tonnes.

II.6. Usine de traitement

A l'usine de traitement de l'unité de production de diatomite de Sig, on produit de la diatomite de charge.

Le minerai passe par une trémie d'alimentation du broyeur,

Page | 43

Une fois le minerai broyé, il est transporté par bandes transporteuses vers le four sécheur rotatif (équipé d'un système de dépoussiérage) qui élimine l'excès d'eau présent dans le minerai,

A la sortie du four sécheur, on achemine le produit vers un silo de stockage du produit fini,

La diatomite de charge produite est ensachée dans des sacs de 25 Kg.

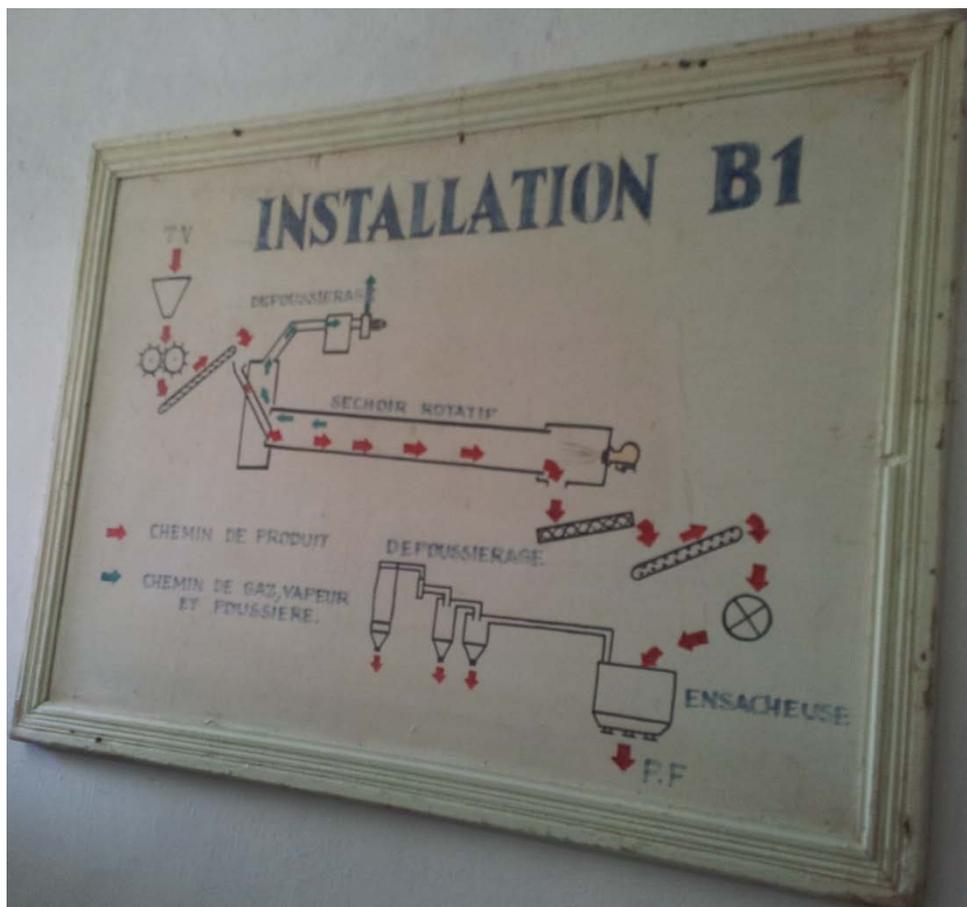


FIG. 22 : Schéma de production de la diatomite de charge, Unité de Sig.

Dans les années 1980, on produisait à l'unité de Sig de la diatomite de filtration suivant le schéma de production suivant :

- Broyage ;
- Séchage ;
- Ajout du fondant Na_2CO_3 ;
- Calcination ;
- Classification ;
- Ensachage ;

L'installation permettant la production de la diatomite de filtration est détériorée.

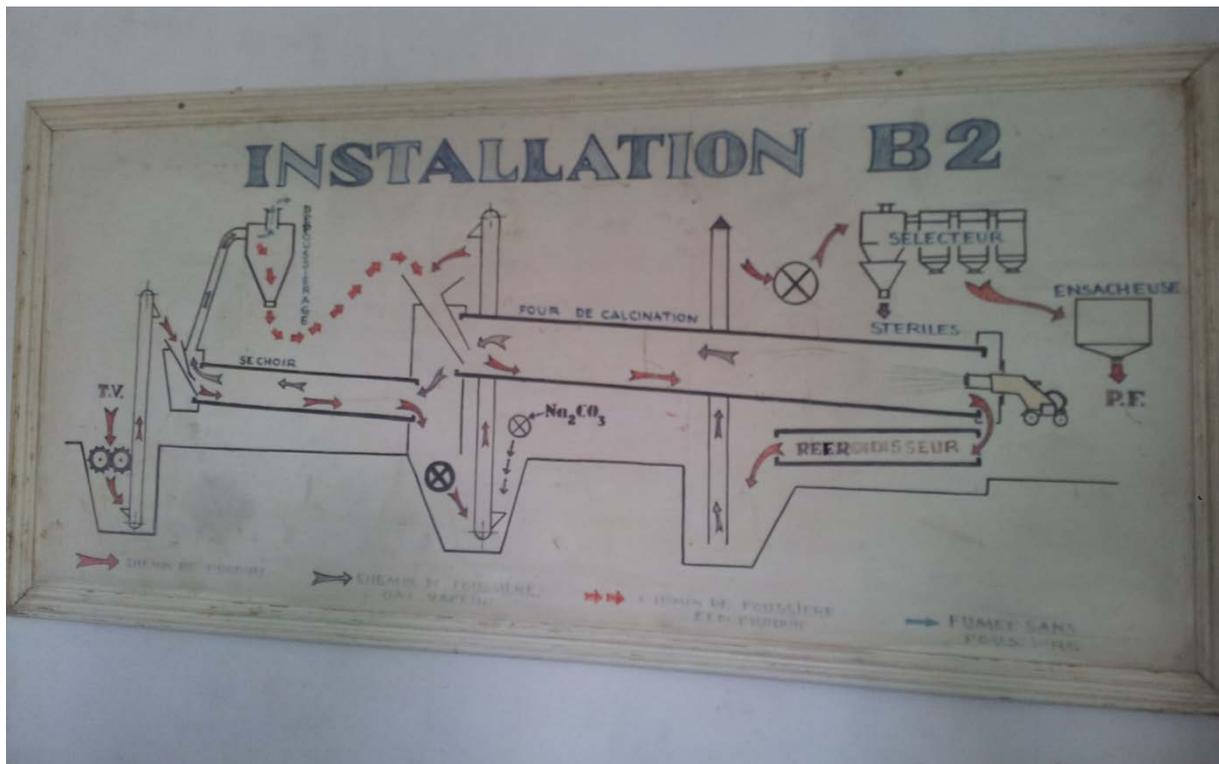


FIG. 23 : Schéma de production de la diatomite de filtration, Unité de Sig.

CHAPITRE III : LE TRAITEMENT DES MINERAIS

[5] [7] [8] [11]

III.1. Généralités sur les méthodes de traitement

III.1.1 Méthodes gravimétriques

Les méthodes de concentration gravimétrique sont parmi les plus anciennes et les plus utilisées encore de nos jours. Ce fait résulte d'un ensemble de raisons parmi lesquelles on trouve la simplicité de fonctionnement, la capacité élevée pour des particules assez grosses et les coûts de fonctionnement moindres que par d'autres méthodes. Ces méthodes comportent donc des avantages mais aussi des facteurs d'application.

Parmi les facteurs d'application de ces méthodes, il y a le fait que les minerais doivent être de teneur élevée, que la libération se fasse par détachement ou pour le moins à une maille grossière, que les concentrateurs soient éloignés des grands centres, que les technologies plus poussées soient inexistantes sur le site, ou enfin que les méthodes servent à la pré concentration ou au triage.

Par ailleurs, les conditions suivantes font en sorte qu'on ne peut appliquer la concentration gravimétrique : une faible teneur ou des grains de minéraux trop petits, une libération du minerai par fractionnement, lorsqu'un rendement métal élevé est nécessaire, lorsque les minerais sont polymétalliques avec des minéraux de masse volumiques semblables.

Les minerais visés par ces méthodes sont ceux de charbon, de fer, d'étain, de titane, de chrome, de barytine, de mica et d'or.

Ces procédés de concentrations utilisent l'effet combiné de la masse, du volume et de la forme des particules pour obtenir des trajectoires de particules différentes dans un milieu liquide, statique ou en mouvement. On distingue trois méthodes :

- méthode des milieux denses,
- méthodes de la nappe pelliculaire fluente,
- accélération différentielle (jigage).

Méthodes en milieux denses

Les méthodes de concentration en milieux denses sont les méthodes gravimétriques dont le principe de fonctionnement est le plus simple. Selon ce principe, toute particule située dans un fluide quelconque se positionne selon sa masse volumique ; si sa masse volumique est inférieure à celle du milieu, la particule monte à la surface de celui-ci, c'est-à-dire qu'elle flotte et fait partie du produit appelé flottant. Si au contraire sa masse volumique est supérieure à celle du milieu, la particule descend jusqu'au fond de celui-ci, c'est-à-dire qu'elle plonge et fait partie du produit appelé plongeant. Le milieu a une masse volumique ou densité supérieure à l'unité (généralement entre 1,3 et 3,8).

Ces méthodes sont parmi les méthodes gravimétriques les plus efficaces. Elles sont utilisées pour enrichir entre autres les minerais de charbon, de fer, de titane, de chrome, de manganèse, d'étain, de tungstène.

Parmi les principaux milieux denses utilisés, on cite :

- les liquides denses qui sont la plupart du temps des liquides organiques d'une large gamme de masse volumique (bromure de méthylène par exemple de masse volumique égale à 2,49g/cm³) mais qui ne sont à peu près pas utilisés à l'échelle industrielle, étant coûteux, volatils et souvent toxiques, inflammables et instables ce qui nécessitent un nettoyage des produits obtenus pour éliminer les dangers pour l'environnement.
- Les solutions de sels qui sont des solutions aqueuses de chlorures de calcium, de baryum, de zinc..., parmi lesquels seul le chlorure de calcium est utilisé à l'échelle industrielle, pour la valorisation du charbon.
- Les pseudo-liquides sont les milieux denses les plus utilisés. Ce sont les pulpes préparées avec un composé chimique presque pur, d'une masse volumique élevée, d'une granulométrie déterminée. Plusieurs solides peuvent être utilisés, comme la galène, la barytine et la magnétite, trois minéraux naturels, et le ferrosilicium préparé artificiellement. De nos jours on utilise ce dernier ainsi que la magnétite qu'on peut récupérer ensuite par la méthode magnétique à basse intensité par voie humide.

Cette méthode de séparation se montre très efficace pour des différences de densité allant jusqu'à $\Delta\rho = 0.1$, voire 0.05 pour certains types de minerais et/ou d'appareillages. Concernant le médium utilisé, certaines conditions sont néanmoins exigées, notamment sur sa viscosité, qui ne doit pas être trop élevée sous peine de gêner l'évolution des particules qui s'y déplacent, ni trop faible car elle risquerait d'influer sur sa stabilité et transformerait la solution en un simple fluide newtonien.

Méthodes par jig (accélération différentielle)

Le procédé consiste à soumettre pendant des cycles très brefs les particules minérales à des courants ascendants et descendants assurés par un piston ou un diaphragme (jig à piston) ou par le mouvement alternatif d'un crible dans un fluide (jig à crible mobile). La séparation des grains lourds et légers s'obtient en trois phases par l'action combinée des courants ascendants et descendants :

- l'accélération différentielle : dans cette phase, les grains acquièrent une accélération ne dépendant que de leurs densités, à condition que le temps de chute soit très bref. En conséquence, un mélange binaire de particules lourdes et légères se comporte de telle sorte que les distances parcourues par les particules sont fonction de leurs accélérations initiales, et partant de leur densité et donc possible d'obtenir théoriquement une stratification des particules lourdes et des particules légères.
- la sédimentation gênée : le courant ascendant de liquide permet de réaliser un rapport de sédimentation élevé et d'augmenter le critère de TAGGART. En fait, le rôle principal du courant ascendant est d'écarter au maximum les particules, les unes des autres.
- le tassement : lorsque les particules sont soumises à un courant descendant, les particules subissent un phénomène de succion et elles se resserrent.

Les jigs sont des appareils très anciens, particulièrement utiles pour effectuer du triage, donc idéal pour les particules assez grosses. Ils servent aussi pour effectuer l'écumage comme dans le cas des minerais d'or.

Méthodes par nappes pelliculaire fluente

Les méthodes basées sur le principe de la nappe pelliculaire fluente s'appliquent à des appareils très nombreux et variés, elles comprennent tout autant des appareils anciens que récents, tout autant simples que complexes. Parmi ces appareils on peut citer les tables dormantes, les spirales, les tables basculantes, les bandes sans fin et les tables à secousses.

Lorsqu'on utilise un appareil conçu sur le principe de la nappe pelliculaire fluente, le résultat est l'obtention d'un lit de particules stratifié selon la masse volumique. Le lit de particules est alors séparé en trois strates assez distinctes, soit une strate supérieure constituée des particules de faible masse volumique, une strate inférieure composée des particules de plus grande masse volumique et, enfin, une strate intermédiaire formée d'un mélange de particules de haute et de basse masse volumique.

Les tables à secousses (figure 24) sont l'un des principaux appareillages utilisés pour la séparation gravimétrique, et plus précisément pour la séparation par nappe pelliculaire fluente, avec soutirage continu. Cette méthode est basée sur la longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule, par gravité, un film liquide. Les tables comprennent une alimentation et un système de récupération des particules classifiées (compartiments séparés).

La table à secousses est une table autour de l'axe longitudinal, à laquelle on communique un mouvement de secousses périodiques selon le même axe. Cette table est garnie d'obstructions ou de riffles parallèles à sa longueur ; alimentée par une pulpe à un de ses coins, elle fournit un concentré à l'extrémité étroite, opposée à celle de l'alimentation, au bout des riffles, et un rejet à l'extrémité large, également opposée à celle de l'alimentation. Généralement aussi, on alimente de l'eau de lavage perpendiculairement aux riffles.

Les tables de secousses servent notamment pour les minerais de charbon, les minerais d'oxydes de fer, de chrome, de manganèse, de niobium et d'étain et pour d'autres minerais comportant des minéraux lourds de valeur comme la barytine, le zircon, la wolframite, la monazite ainsi que pour les micas. Par ailleurs, on les utilise pour récupérer des alliages ou des métaux, tel que le laiton, l'acier, l'or et l'argent, à partir des rejets d'usines pyrométallurgiques. Rappelons que les tables peuvent être employées pour faire de l'écumage sur les minerais d'or et d'argent, avant de les lixivier.

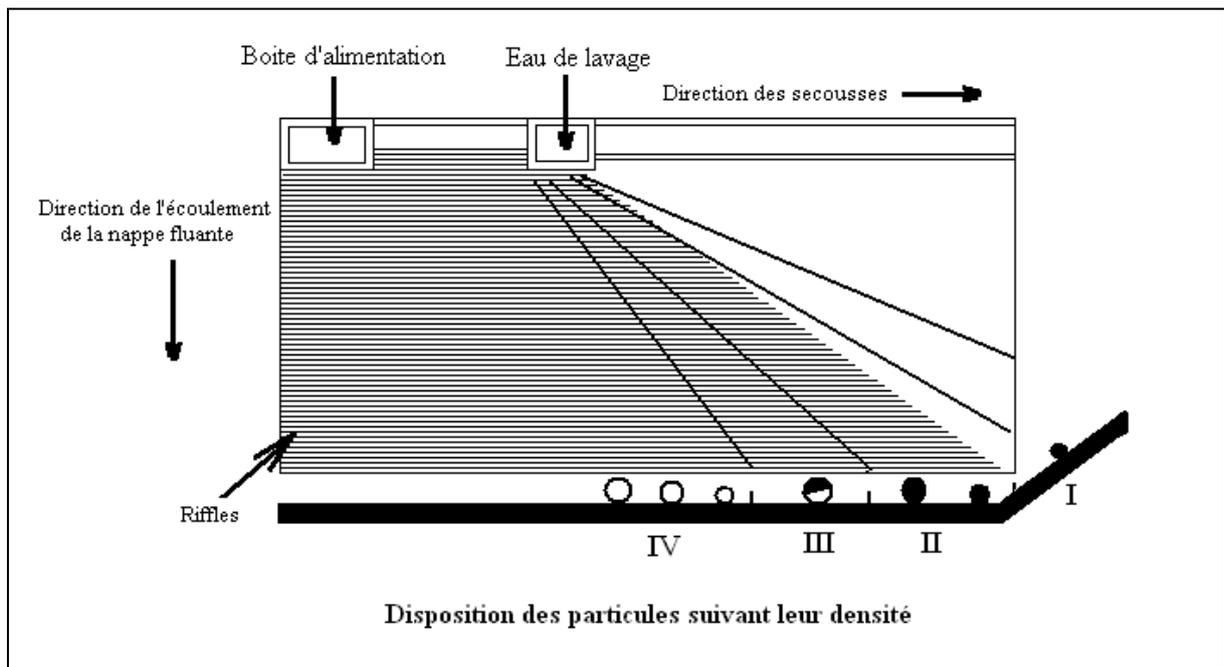


FIG. 24 : Schéma représentatif d'une table à secousses.

La table est alimentée à sa partie supérieure par une boîte d'alimentation. L'eau de lavage est distribuée sur toute sa longueur fournissant une nappe qui s'écoule suivant une pente transversale. Les réglettes ou riffles forment autant de barrages et de pièges aux grains lourds alors que les grains légers ont tendance à sauter chaque obstacle. Les grains lourds disposés entre les riffles avancent latéralement par suite de secousses asymétriques imprimées au plateau.

On trouve donc en commençant par la partie extérieure au rifflage, plusieurs zones :

- Zone 1 : c'est la zone des concentrés où se trouvent les particules fines et denses.
- Zone 2 : c'est la zone qui appartient encore à la zone des concentrés ; on y trouve des particules denses et grossières avec quelques particules mixtes.
- Zone 3 : c'est la zone des particules mixtes mélangées à quelques particules légères.
- Zone 4 : c'est la zone de particules légères.

Le rifflage a, avant tout, un rôle de stratification des grains par l'action conjuguée :

- De la secousse qui provoque un amollissement de la couche des grains dans l'espace entre les riffles et la descente des grains denses jusqu'à la surface de la table ;
- De l'eau de lavage qui entraîne les grains légers formant la couche supérieure des grains déposés.

Les secousses ont un double rôle :

- Elles permettent d'une part, la stratification ;
- D'autre part, l'évacuation des particules stratifiées entre les riffles.

Dès que celles-ci sortent des riffles, elles sont soumises à l'effet de la nappe pelliculaire fluente et à l'effet des secousses dont la résultante provoque du triage par taille et par densité. Enfin, il est indispensable de déschlamer l'alimentation ; les fines particules en suspension augmentent la densité de la pulpe ayant pour résultat l'augmentation des temps de sédimentation des solides.

III.1.2 Méthode de la flottation

Lorsqu'on concentre les minéraux par les méthodes physiques, leur formule chimique a peu d'importance. Les propriétés d'intérêts sont plutôt macroscopiques, telle la masse volumique. En revanche, quand on concentre les minéraux par flottation, la formule chimique revêt une importance majeure, surtout si l'on désire comprendre ce qui se produit réellement.

De façon générale, les minéraux sont classés en fonction de leur degré de polarité. Un minéral est dit polaire s'il comporte, éparpillés sur sa surface, des sites dont la charge électrique résiduelle est majoritairement positive, adjacents à des sites dont la charge électrique résiduelle est plutôt négative, il en résulte des dipôles électriques, d'où l'existence de la polarité. Tandis que les minéraux polaires contiennent un grand nombre de sites positifs et négatifs, les minéraux non polaires n'en possèdent pas, ou très peu.

Les surfaces des minéraux polaires réagissent fortement avec les molécules d'eau, avec les ions. Ces surfaces sont dites hydrophiles, en ce sens qu'elles aiment la présence de l'eau, ou aérophobes. C'est-à-dire qu'elles fuient la présence de l'air.

Au contraire, les surfaces des minéraux non polaires n'attirent pas les molécules d'eau, ni les ions et ne sont pas très actives. Ces surfaces sont donc qualifiées d'hydrophobes, c'est-à-dire qu'elles fuient la présence de l'eau. Elles sont aussi qualifiées d'aérophiles : elles attirent l'air.

En flottation, lorsqu'une particule de minéral utile en suspension dans une solution aqueuse, est naturellement hydrophobe ou est rendue hydrophobe par l'adsorption d'un collecteur, elle peut adhérer à une bulle d'air provenant de l'injection d'air dans la pulpe ; dans le système obtenu, il y a trois phases en présence, et au contact entre ces différentes phases, on trouve trois interfaces.

Les interfaces de la flottation

- l'interface solide-liquide

L'interface solide-liquide est l'interface la plus importante en flottation. Elle est caractérisée à la fois par des phénomènes électriques et par des phénomènes d'adsorption. Le phénomène probablement le plus important qui se produit à l'interface solide-liquide est celui de l'adsorption. Ce phénomène est à l'origine des mécanismes par lesquels tous les réactifs chimiques sélectifs se produisent sur les surfaces en flottation, lorsque agissent les collecteurs, les activant et les déprimants.

- l'interface liquide-gaz

En flottation, l'interface liquide-gaz met en relation la solution aqueuse avec les bulles d'air utilisées pour entraîner les particules hydrophobes au concentré. Les propriétés de cette interface sont influencées majoritairement par un composé appelé moussant. L'ajout de ce dernier à l'eau fait baisser sa tension inter faciale liquide-gaz et donc abaisser l'énergie potentielle d'une bulle d'air dans l'eau. En conclusion, la bulle d'air se sent nettement plus à l'aise dans la phase aqueuse.

- Système solide-liquide-gaz

Les interfaces telles qu'elles ont été décrites n'existent pas en soi, mais plutôt en relation étroite l'une avec l'autre. Les propriétés du système délimité par les trois phases de l'eau, la particule minérale et la bulle d'air, soit l'angle de contact et l'adhésion, sont très importantes en flottation ; en fait, le comportement de ce système permet de déterminer la flottabilité d'une espèce minérale.

Paramètres influençant le système solide-liquide-gaz

- Angle de contact

L'angle de contact est l'angle mesuré dans la phase aqueuse entre l'interface solide-liquide et l'interface liquide-gaz.

On comprend que l'expression angle de contact est bien choisie puisqu'elle désigne à quel point un contact donné est réussi entre une bulle d'air et un minéral. Ainsi, un angle de contact nul ou très petit caractérise un minéral non hydrophobe mais hydrophile. On dit alors que la solution mouille le solide. Un angle de contact élevé, par contre, signifie qu'une particule est hydrophobe, donc qu'elle est apte à être attachée solidement à la bulle d'air, donc flottable.

- Adhésion

L'adhésion est un état stable d'attachement découlant d'un contact, d'une collision entre une bulle d'air et une particule. Cet état stable est caractérisé par un angle de contact favorable (>80° généralement).

Enfaite, il faut noter que le comportement de l'interface solide-liquide est conditionné, en flottation, par l'action des collecteurs, des activants et des déprimants. Quant aux caractéristiques de l'interface liquide-gaz, elles dépendent principalement de l'action du moussant. Par ailleurs, ce sont presque tous les réactifs qui caractérisent l'interface solide-gaz.

Réactifs de flottation

- *Les collecteurs*

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

Les collecteurs sont divisés en trois grandes catégories :

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

✓ Les collecteurs anioniques : ce sont des collecteurs lors de la dissociation desquels le radical hydrocarbure entre dans la composition de l'anion. On distingue les carboxyles et les tiocarboxyles. On peut citer les xanthates et les aérofloats...

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

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

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

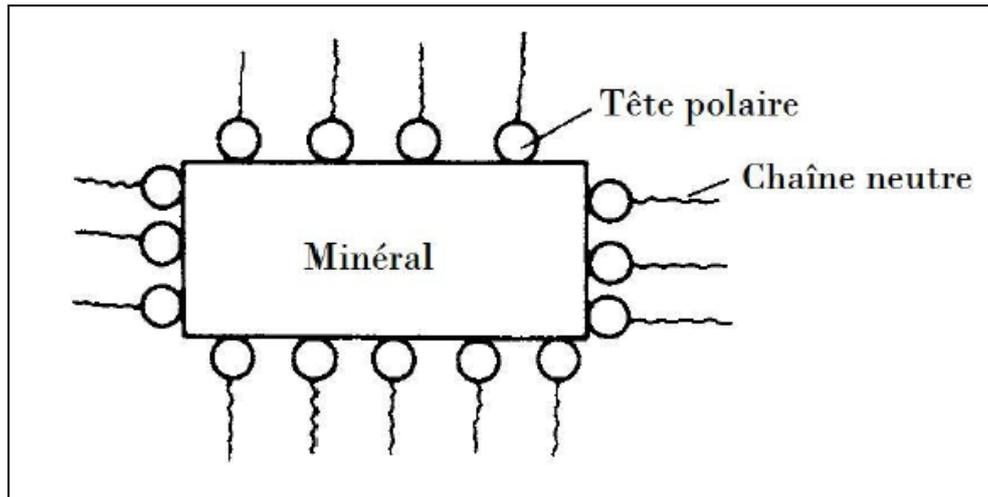


FIG. 25 : Schéma représentatif de l'action du collecteur.

- *Les déprimants*

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

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

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

- *Les moussants*

Un agent moussant est un réactif organique hétéro-polaire, c'est-à-dire qu'une extrémité de la molécule est polaire et hydrophile, et l'autre est non polaire et hydrophobe. Cette molécule est tensioactive : elle permet pour de faibles concentrations en solution d'abaisser la tension interfaciale liquide-gaz à une valeur minimale.

Page | 53

Les moussants contribuent à la formation d'une mousse stable et solide et cela est assuré en jouant sur la dimension des bulles d'air et la solidité de la mousse comme suit :

– Diminution de la dimension moyenne des bulles d'air ainsi que leur vitesse : En réduisant la taille des bulles et régularisant leur forme ; plus sphériques et plus petites, les bulles remontent plus facilement et plus lentement à la surface, et leur finesse augmente la surface de l'interface liquide-gaz.

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

- *Les activants*

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

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

- *Les régulateurs du milieu*

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

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

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

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

En pratique, on utilise comme régulateur de milieu les produits suivants : NaOH, H₂SO₄, Na₂CO₃.

Paramètres influant sur l'opération de flottation

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

- *La grandeur du minerai à flotter*

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

- *La densité de la pulpe de flottation*

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

La densité optimale de la pulpe augmente avec l'augmentation de la grosseur et de la densité du minéral à flotter.

Pour diminuer les pertes du minéral utile dans un rejet on utilise les pulpes plus denses. Alors que pour augmenter la qualité du produit de mousse, on utilise les pulpes plus diluées.

- *La gamme des réactifs de flottation utilisés*

Il s'agit de :

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

- *L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe*

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

- *La température de la pulpe*

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

- *Influence du pH*

De même que pour le broyage, le pH possède une influence certaine et non-négligeable sur le rendement d'une opération de flottation. De fait, le pH du milieu agit directement sur le potentiel surfacique des particules. Ainsi, on définit le Point de Charge Nulle (PCN ou PZC, Point of Zero Charge), pour lequel le potentiel zêta d'une particule minérale est nul, et qui est atteint à un pH déterminé. On comprendra aisément l'intérêt présenté par le PCN lors de la flottation, car il facilite l'action du collecteur, ce qui conduit à une réduction de sa consommation ; dans certains cas, on peut même se passer de l'utilisation du collecteur.

- *La durée de flottation, le schéma de flottation, le débit de la pulpe*

Toutes ces conditions ont une approche beaucoup plus pratique et on les détermine à partir de plusieurs essais.

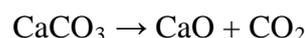
III.1.3. Traitement thermique, la calcination

La calcination, dans son acception moderne du terme, est une opération consistant à chauffer intensément dans une enceinte fermée un corps inerte, afin de le décomposer ou d'obtenir des réactions chimiques.

Étymologiquement, la calcination est la transformation du calcaire en chaux par chauffage dans un four à chaux (réaction de décarbonatation).

Lors du chauffage, il se produit diverses réactions qui modifient l'échantillon :

- à 100 °C : l'eau libre se vaporise ;
- au-dessus, l'eau liée se libère (par exemple molécules d'eau liées dans le gypse, l'argile) (voir adsorption et désorption) ;
- vers 550 °C : sous air ou atmosphère oxydante, la matière organique brûle donnant du dioxyde de carbone (CO₂) ou du graphite (C) ;
- le carbone s'oxyde lentement pour former du dioxyde de carbone ou du monoxyde de carbone ;
- les carbonates se décomposent, par exemple :



Cette opération est conduite généralement dans des fours tournants.

Principe globale de fonctionnement des fours tournants

Les fours tournants constituent une technologie de choix dans de nombreux procédés chimiques mais aussi métallurgiques, tels que le séchage dans l'industrie agroalimentaire, la calcination dans les cimenteries, la calcination de coke de pétrole, ...

La plupart des fours tournants sont conçus sur une base technologique très simple : un cylindre allongé, faiblement incliné par rapport à l'horizontale et entraîné dans un mouvement de rotation à l'aide d'un moteur.

Le solide à traiter est introduit par un système d'alimentation, puis sous l'action combinée de la rotation et de l'inclinaison, il s'écoule à travers l'intérieure du tube cylindrique.

Différents systèmes de chauffage permettent d'amener le produit à la température où débiteront les processus physico-chimiques correspondant à l'application recherchée (réactions chimiques, séchage, pyrolyse,...).

Page | 56

Le résidu solide est ensuite récupéré à la sortie du tube cylindrique et peut être dirigé vers divers systèmes de post-traitement. Les fumées sont également récupérées en sortie du four et sont traitées pour répondre aux normes d'émissions en espèces polluantes.

Les différents types de tube tournant

Les dimensions et la géométrie du tube rotatif sont des caractéristiques techniques particulièrement importantes pour le dimensionnement des installations industrielles. Ils conditionnent, avec les valeurs des paramètres opératoires, les temps de séjour, les taux de remplissage mais aussi la gamme de débit que va pouvoir traiter l'installation.

La majorité des fours industriels sont constitués d'un tube cylindrique revêtu sur sa paroi interne d'un matériau réfractaire.

La géométrie du tube rotatif est généralement cylindrique, toutefois, dans l'industrie, on trouve parfois des tubes coniques, ils favorisent l'écoulement du produit dans le sens axial et de ce fait diminuent le temps de séjour. Il existe également des fours de conception encore plus spécifique, certains tubes sont par exemple conçus de manière à permettre l'injection de gaz sur toute la longueur.

Les différents systèmes de chauffage des fours tournants

On distingue principalement deux modes de chauffage, le chauffage direct et le chauffage indirect.

Le chauffage direct consiste à envoyer des gaz chauds à co-courant ou à contre-courant du sens de la progression du solide. Un ou plusieurs brûleurs sont donc placés à l'entrée ou à la sortie du four et les gaz chauds qu'ils produisent parcourent l'intérieur du tube afin de chauffer le solide. Sur des fours de très grandes longueurs, une série de brûleurs est disposée tout au long du tube rotatif.

Le chauffage indirect consiste à chauffer les parois du tube rotatif. Dans l'industrie, plusieurs moyens sont utilisés : des rampes de brûleurs pour chauffer la paroi externe du tube, de l'air chaud qui circule au sein d'une double enveloppe, des résistances électriques boudinées autour de la paroi. Cette dernière technologie est particulièrement adaptée aux fours de petites dimensions. Le chauffage indirect a l'avantage de permettre un meilleur contrôle du profil de température au sein du four.

III.2. Traitement de la diatomite

Le traitement des matériaux bruts de diatomite est réalisé dans des usines qui comprennent les principales phases suivantes :

- élimination des plus gros blocs de roches massives (roches magmatiques par exemple), en partie par un tri manuel ;
- concassage primaire (concasseurs à cylindres dentés) pour préserver la structure des frustules de diatomées et éviter le broyage des impuretés ;
- séchage à 300-400°C, voire jusqu'à 800°C (fours rotatifs, séchoirs rotatifs), et broyage simultanés pour réduire le taux d'humidité (de 60 à 4-5 % par exemple) et éliminer une partie (40 à 50 %) de la matière organique, et obtenir des éléments de taille < 13 mm ; cette opération peut être réalisée en deux phases successives ;
- sélection par émottage, épuration et calibrage (séparateurs magnétiques, sélecteurs dynamiques : cyclones à air, filtres à manche) pour éliminer les impuretés les plus denses et plus grossières (qui peuvent être reprises dans un circuit secondaire d'épuration), expulser l'eau restée absorbée et procéder à des coupures granulométriques des produits pulvérulents.

A ce stade du traitement sont ainsi élaborés des produits qualifiés de « naturels » (séchés, broyés et épurés) qui sont utilisés pour différentes applications : filtration (très faible perméabilité et vitesse de filtration extrêmement basse) pour les fractions grossières, charges pour les particules fines, et autres applications. Le résidu issu du circuit secondaire d'épuration, correspondant aux particules les plus grossières, composé des impuretés et, majoritairement, de diatomite naturelle, peut également être valorisé pour certaines applications sous l'appellation de « coproduit de fabrication ».

- traitements thermiques : calcination avec (activation) ou sans ajout d'agents fondants (opérations détaillées ci-après), suivie d'un refroidissement (refroidisseurs cylindriques à eau) ;
- émottage, broyage et sélection granulométrique (séparateurs et cyclones à air, tamis vibrants, filtres à manche) pour séparer les particules les plus fines (qui entraînent des problèmes de colmatage pour les applications de filtration), ayant un diamètre moyen de 10 à 15 µm, qui seront utilisées comme produit de charges, les fraction les plus grossières étant destinées à la filtration (diamètre moyen de 30 µm pour les moins perméables, de 50 à 80 µm pour les plus perméables). A ce stade du traitement sont donc les produits dits « calcinés » et « activés » ;
- ensachage, palettisation, expédition : développement des transferts de produits en vrac par voie pneumatique (à l'usine et chez l'utilisateur), en liaison avec les transports par conteneurs, camions et wagons-citernes.

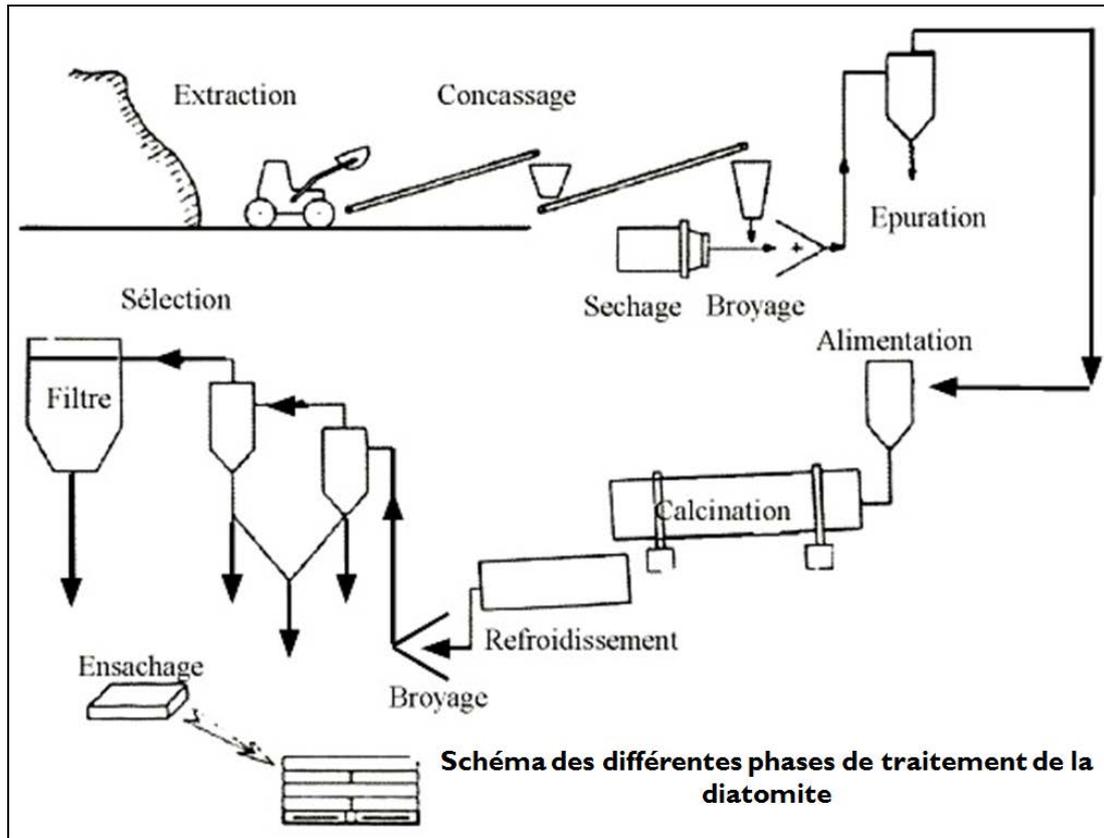


FIG. 26 : Schéma type de traitement des matériaux diatomitiques.

Afin de modifier les propriétés fondamentales de la diatomite (notamment la granulométrie et la perméabilité) pour satisfaire aux exigences des utilisateurs d'adjuvants de filtration, les produits naturels peuvent faire l'objet de traitements thermiques qui sont de deux types.

La **calcination simple** est réalisée dans un four rotatif de 30 à 35 m de longueur, à une température variant de 800 à 1300 °C (température moyenne de l'ordre de 1050°C). D'un point de vue technologique, ce traitement thermique correspond au frittage, c'est-à-dire à un début de fusion, et a pour conséquences :

- d'éliminer la matière organique ;
- d'agglomérer les particules et d'augmenter ainsi les diamètres, la taille des pores et la perméabilité ;
- de transformer l'état de surface des frustules (qui deviennent lisses) et de diminuer ainsi leur surface spécifique (de 10-30 m²/g à 0,5-5 m²/g) ;
- d'augmenter la densité réelle (de 2,0 à 2,3), le pH, la dureté (de 4,5-5,0 à 5,0-6,0 sur l'échelle de Mohs), l'indice de réfraction (de 1,40 à 1,49) et la brillance (de 59-75 à 85-95 %) ;
- de déshydrater la silice amorphe et d'initier la transformation de l'opale en cristobalite ;
- de faire varier la couleur du produit qui, de gris, devient rose, voire blanc cassé ou beige, du fait de l'oxydation du fer.

La **calcination en présence d'un fondant**, également appelée **activation**, est réalisée à une température moyenne de l'ordre de 1000°C. L'agent fondant (carbonate de sodium ou chlorure de sodium) est ajouté en amont du four rotatif (mélange avec la diatomite dans des conditions dynamiques, au cours du transport, ou dans les silos), à raison de 2 à 10 % de la masse.

Ce traitement thermique accentue encore plus les modifications apportées par la calcination simple :

- début de vitrification (abaissement de la température de fusion) : agglomération des particules plus importante, d'où une augmentation de la granulométrie et de la perméabilité ; incorporation des oxydes de fer dans une phase vitreuse silicatée, d'où l'obtention de produits blancs ;
- formation de silice cristalline aux dépens de la silice amorphe : teneur en cristobalite pouvant varier de quelques % à 40 ou 60 % ;
- transformation des impuretés minérales (carbonates, sulfates, sulfures, ...) en composés insolubles (oxydes).

Ces différentes phases de traitement permettent d'orienter la production en fonction des besoins du marché de la filtration. En effet, l'adaptation de paramètres tels que le type de la matière première, la température de calcination, la quantité de fondant et sa composition, le temps de séjour dans le four (variant habituellement de 30 à 45 minutes), les coupures granulométriques, permet de contrôler les propriétés (granulométrie, perméabilité, vitesse de filtration, ...) des produits finis recherchés.

D'une manière générale, les agents filtrants à faible vitesse de filtration (perméabilité généralement inférieure à 0,3 darcy) sont obtenus par calcination simple, et ceux à vitesse de filtration élevée (perméabilité généralement comprise entre 0,3 et 15 darcy) par activation.

Chaque usine dispose d'un laboratoire de contrôle de la qualité des produits dits « nobles » élaborés. Les paramètres suivants sont périodiquement mesurés (un échantillon par palette par exemple) :

- perméabilité et densité humide du gâteau de filtration, voire odeur, pour les adjuvants de filtration ;
- granulométrie (refus sur tamis) et blancheur pour les charges.

Compte tenu des exigences sanitaires, le taux de silice libre cristalline est souvent déterminé en routine.

Le schéma type des opérations nécessaires à l'élaboration des produits finis, qui vient d'être présenté, correspond à un traitement des matériaux par voie sèche, selon une circulation pneumatique.

On peut dans certains cas avoir recours à une épuration des matériaux par voie humide, qui comprend les principales phases suivantes :

- broyage et attrition ;
- classification par tamisage (élimination de la matière organique et des autres impuretés les plus grossières), sédimentation et centrifugation (séparation des particules argileuses les plus fines, inférieures à 2-3 μm) ;
- flottation éventuellement ;
- séparation magnétique à haut gradient, filtration.

Par ailleurs, certaines applications spécifiques requièrent des traitements particuliers, combinés avec la calcination et l'activation :

- traitement acide des produits naturels (broyés, séchés et épurés) pour la production d'adjuvants de filtration destinés à des usages spéciaux ;
- traitement spécial de surface (aux silanes et aux silicones) pour désactiver la surface des supports utilisés en chromatographie.

Les produits diatomitiques commercialisés sont de quatre types :

- la diatomite naturelle (séchée, broyée et épurée) ;
- la diatomite calcinée, dite « rose » ;
- la diatomite calcinée en présence d'un fondant, ou activée, dite « blanche » ;
- coproduit de fabrication (mélange de diatomite naturelle et d'impuretés).

CHAPITRE IV : ECHANTILLONNAGE & PRÉPARATION MÉCANIQUE

[6] [9]

IV.1. Campagne d'échantillonnage

L'échantillonnage est une étape cruciale pour la caractérisation du minerai de la façon la plus fiable possible, l'échantillon doit donc être le plus représentatif possible afin de pouvoir tirer des conclusions plausibles et se projeter par la suite dans la faisabilité d'un projet minier.

Le but de l'échantillonnage est de permettre l'estimation la plus fiable de la valeur inconnue et inaccessible d'une propriété d'un lot à partir d'un essai effectué sur un échantillon représentatif. Parallèlement, le nombre et le volume des échantillons doivent être restreints au minimum pour des raisons économiques. Il est donc important de parvenir à un compromis acceptable entre la représentativité et le budget disponible.

La campagne d'échantillonnage a été menée sur les épontes des galeries dans les blocs ouverts (du bloc 1 jusqu'au bloc 6) et sur les affleurements dans les blocs qui n'ont pas encore été ouverts (bloc 7 et 8).

La méthodologie de l'échantillonnage opéré consiste en le prélèvement de saignés perpendiculairement aux couches de kieselguhr sur les épontes des galeries dans les différents secteurs préparés pour l'exploitation dans le cas des blocs 1, 2, 3, 4, 5 et 6 tandis que pour les blocs 7 et 8 les saignés ont été prélevés perpendiculairement aux couches de kieselguhr qui affleurent vu qu'il n'y a pas encore eu de travaux de préparation dans ces deux blocs (pas de galeries ouvertes).

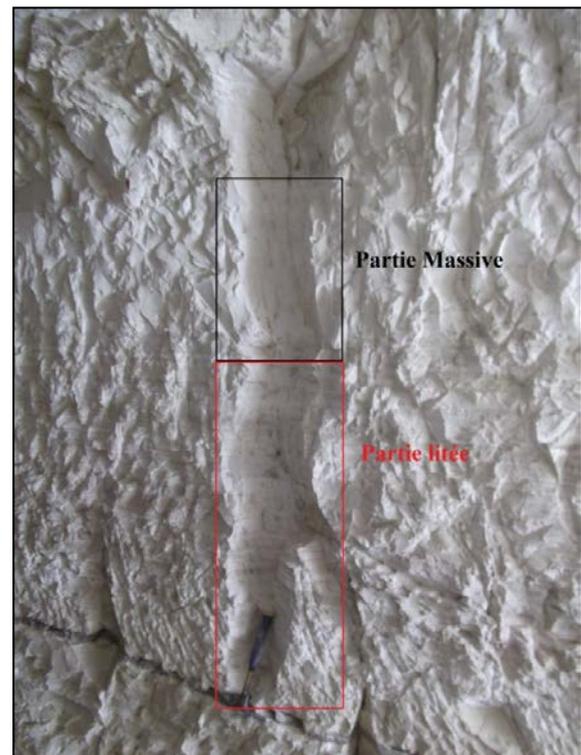


FIG. 27 : photo d'une saignée prélevée sur l'éponte d'une galerie.

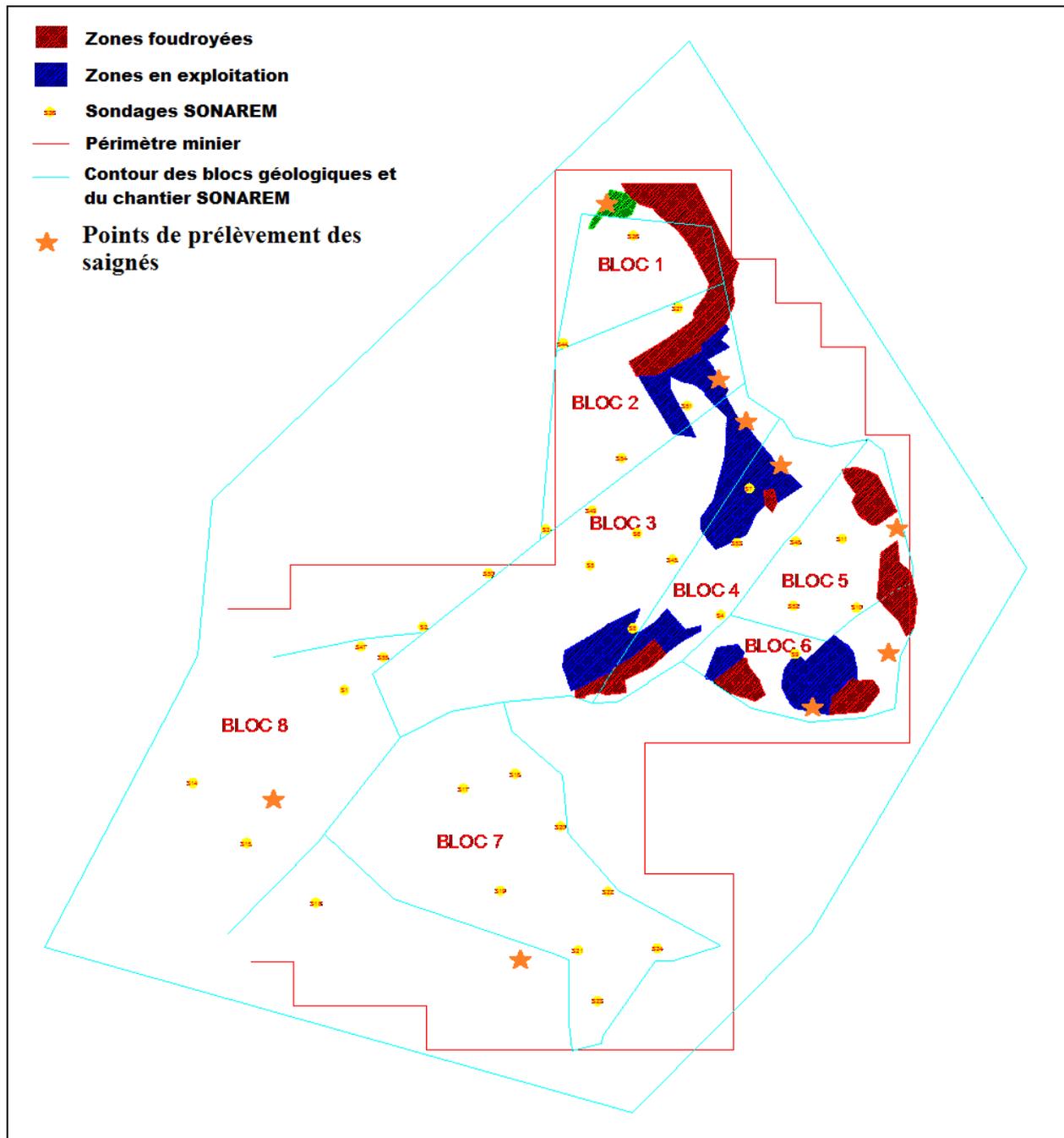


FIG. 28 : Plan d'échantillonnage dans la mine.

La procédure de prélèvement d'une saigné a été faite en suivant les étapes suivantes :

- Nettoyer la surface à échantillonner, dans notre cas une pellicule de 2 à 5 centimètres sur la surface à échantillonner est suffisante ;
- Etendre par terre un canevas propre pour recueillir les fragments ;
- Délimitation des dimensions de la saigné sur la surface de la galerie à l'aide d'une pioche ;
- Prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une pioche tout en s'assurant que les dimensions de la saigné restent constantes ;
- Mettre l'échantillon dans un sac et étiquetage.

La séparation entre les échantillons des couches de kieselguhr massives et les échantillons des couches de kieselguhr litées a été faite sur place pendant le prélèvement.

Les dimensions des saignés prélevés sont de l'ordre de 1 à 2 mètres de longueur, 10 à 20 centimètre de largeur et 10 à 20 centimètres de profondeur avec une masse allant de 5,9 à 33,6 kg.

Neuf (09) saignés ont été prélevés au total, seize (16) échantillons ont été constitués pour une masse totale de 177,2 Kg.

Tableau N° 15 : Saignés et échantillons prélevés selon leur provenance.

N° saigné	Provenance	Qualité du minerai	N° Echantillon	Code Echantillon	Masse Ech
01	Bloc 1 Couche 3	Massif	01	B1C3M	15,2
		Lité	02	B1C3L	18,4
02	Bloc 2 Couche 3	Massif	03	B2C3M	8,6
		Lité	04	B2C3L	13,3
03	Bloc 3 Couche 3	Massif	05	B3C3M	6,8
		Lité	06	B3C3L	9,6
04	Bloc 4 Couche 3	Massif	07	B4C3M	8,9
		Lité	08	B4C3L	8,8
05	Bloc 5 Couche 3	Massif	09	B5C3M	9,2
		Lité	10	B5C3L	10,6
06	Bloc 6 Couche 3	Massif	11	B6C3M	9,8
		Lité	12	B6C3L	17,1
07	Bloc 6 Couche 5	Lité	13	B6C5L	11,3
08	Bloc 7 Couche 5	Lité	14	B7C5L	5,9
09	Bloc 8 Couche 3	Massif	15	B8C3M	6,2
		Lité	16	B8C3L	17,5

La codification des échantillons a été faite de telle sorte à pouvoir savoir la provenance et la qualité de l'échantillon à travers son code.

En effet la première partie du code indique le numéro du bloc (ex : B3 pour Bloc 3) ; la seconde partie indique le numéro de la couche (ex : C5 pour Couche 5) et la dernière partie indique la qualité du minerai (M pour Massif et L pour Lité).

IV.2. Préparation mécanique

La plupart des minéraux étant finement disséminé et intimement associés avec la gangue dans un minerai, ils doivent être initialement « libérés » avant d'entreprendre une quelconque séparation. Ceci est réalisé grâce à la préparation mécanique qui progressivement réduit de la taille des grains jusqu'à la libération physique de la particule minérale que l'on pourra séparer de la gangue par la suite.

Cela-dit, après l'acheminement des échantillons de la mine vers le laboratoire du département de Génie Minier (Ecole Nationale Polytechnique), la première étape de la préparation pour les différents essais de caractérisation est le concassage qui consiste en la réduction de la taille des blocs jusqu'à une dimension permettant de passer au broyage.

Le concassage a été effectué sur un seule étage, vu la friabilité du minerai de diatomite, il a été réalisé à l'aide d'un concasseur à percussions, une réduction de la taille des grains de $d \approx 20-200$ mm à $d < 10$ mm.



FIG. 29 : Photo du concasseur à percussions.

Une homogénéisation s'est imposé par la suite pour chacun des 16 échantillons afin de répartir les grains suivant un disque d'une épaisseur constante avant de prélever par des opérations de quartages successives 1 à 2 kg de chaque échantillon (voir figure 32).

Chaque échantillon a ensuite subi un broyage manuel au mortier jusqu'à la réduction de la taille des particules de $d < 10 \text{ mm}$ à $d < 63 \mu\text{m}$.



FIG. 30 : Broyeur à mortier.

Le prélèvement de petites quantités (5 à 50 g) à partir de ces échantillons pour les différents essais a été réalisé à l'aide d'une échantillonneuse rotative.



FIG. 31 : photo de l'échantillonneuse rotative.

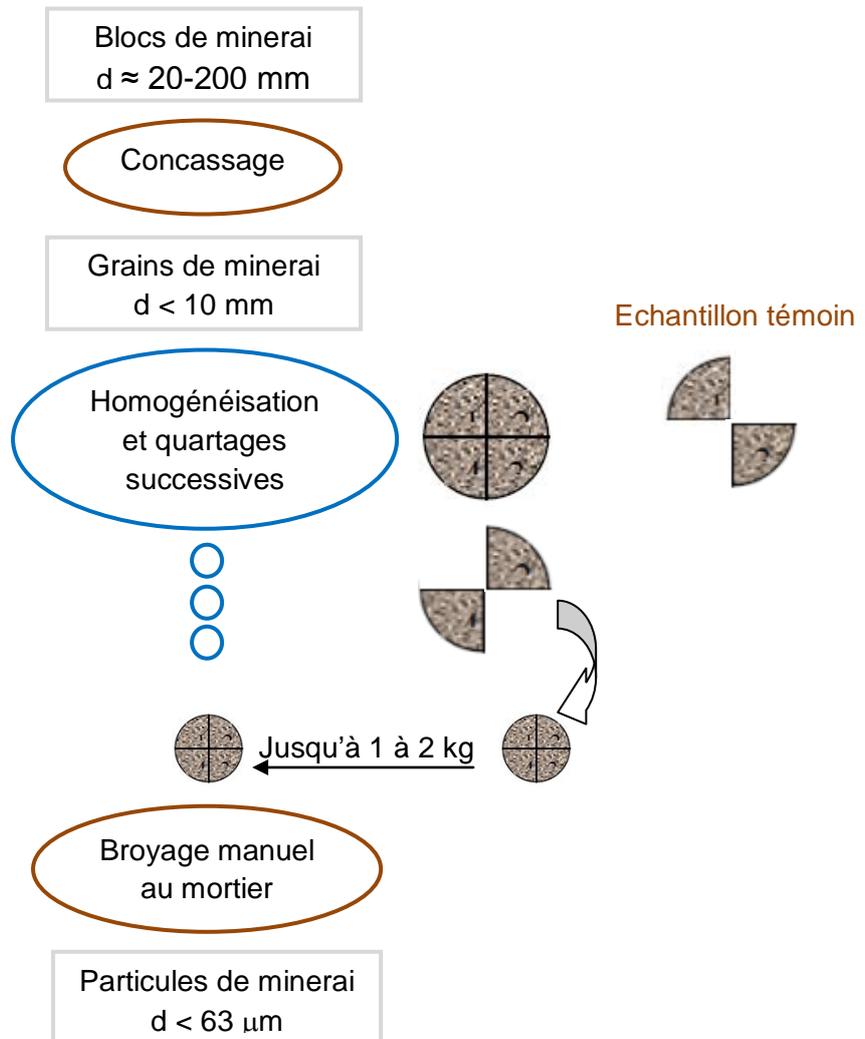


FIG. 32 : Schéma de la préparation mécanique.

CHAPITRE V : ESSAIS DE CARACTÉRISATION

[1] [2] [6] [9]

Page | 67

Les essais de caractérisation ont été réalisés dans le but de quantifier les paramètres physico-chimiques du minerai afin de pouvoir mesurer l'efficacité des méthodes de traitement qui seront testé après et d'estimer le potentiel industriel de la diatomite.

Quatre paramètres ont été mesurés : la masse volumique, la densité, le taux d'humidité et la teneur en carbonate de calcium.

Les mesures ont été effectuées sur tous les échantillons séparément.

V.1. Mesure de la masse volumique

La masse volumique représente la masse d'un minerai par unité de volume.

La méthode utilisée pour la détermination de la masse volumique des échantillons permet de déterminer la masse volumique nominale d'une quelconque poudre minérale.

Méthode :

- 1- Peser 5 à 10 g de l'échantillon dans contenant en aluminium et le placer au four à 105 °C et laisser sécher toute la nuit durant
- 2- Placer le verre de montre sur la balance puis tarer, peser 5.00 à 10.00 (+/- 0.01 g) de l'échantillon séché.
- 3- Transférer l'échantillon pesé du verre de montre à une éprouvette graduée (10, 20 ou 50 ml selon l'échantillon)
- 4- Taper délicatement la base de l'éprouvette graduée sur une surface plate (répéter une dizaine de fois jusqu'à tassement de l'échantillon à l'intérieur de l'éprouvette). Lire le volume sur l'éprouvette
V = ... mL.
- 5- Calculer la masse volumique avec la formule suivante

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$



FIG. 33 : Epreuve graduée.

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 16 : Masse volumique des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	Masse volumique
01	B1C3M	0.388
02	B1C3L	0.441
03	B2C3M	0.426
04	B2C3L	0.506
05	B3C3M	0.350
06	B3C3L	0.440
07	B4C3M	0.394
08	B4C3L	0.504
09	B5C3M	0.391
10	B5C3L	0.610
11	B6C3M	0.372
12	B6C3L	0.438
13	B6C5L	0.450
14	B7C5L	0.433
15	B8C3M	0.368
16	B8C3L	0.396

Interprétation des résultats :

La masse volumique des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 0.350 et 0.426 g/cm³ selon les blocs avec une moyenne de 0.384 g/cm³.

La masse volumique des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 0.396 et 0.610 g/cm³ selon les blocs avec une moyenne de 0.476 g/cm³.

La masse volumique des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 0.433 et 0.450 g/cm³ selon les blocs avec une moyenne de 0.441 g/cm³.

On remarque que la masse volumique d'un échantillon lité est toujours supérieur à la masse volumique de l'échantillon massif ayant la même provenance. Ceci indique que les lits gris à beige présents dans les échantillons sont constitués d'impuretés qui augmentent de la masse volumique du minerai.

V.2. Mesure de la densité

La densité est le ratio entre la masse volumique d'une substance donnée et la masse volumique d'une substance de référence, ça équivaut au ratio entre la masse d'une substance donnée et la masse d'un même volume d'une substance de référence. La substance de référence est généralement l'eau.

La procédure utilisée pour déterminer la densité des échantillons (SG : Specific Gravity en anglais) est celle du pycnomètre.

Méthode :

- 1- Peser 5 à 10 g de poudre d'échantillon dans contenant en aluminium et le placer au four à 105 °C et laisser sécher toute la nuit durant ;
- 2- Le lendemain, placer un pycnomètre propre avec son stopper dans le four à 105°C pendant une heure ;
- 3- Peser le pycnomètre avec son stopper à 0.01 g près. Lire la pesée A = ... g.
- 4- Enlever le stopper du pycnomètre et ajouter environ 5 à 10 g de poudre de l'échantillon séché. Replacer le stopper et peser l'ensemble à 0.01 g près. Lire la pesée B = ... g.
- 5- Enlever le stopper et ajouter soigneusement de l'eau distillée aux trois quarts du volume du pycnomètre. Agiter jusqu'à se que l'échantillon soit mouillé en totalité et toutes les bulles d'aires soient éclatées.
- 6- Ajouter de l'eau distillée jusqu'à la jauge et replacer le stopper.
- 7- Sécher l'extérieur du pycnomètre et peser le tout. Lire la pesée C = ... g.
- 8- Rincer le pycnomètre et répéter les étapes 5 à 7 avec uniquement de l'eau distillée à l'intérieur du pycnomètre. Lire la pesée D = ... g.



FIG. 34 : Pycnomètre.

La densité (SG) se calcul avec la formule suivante :

$$SG = \frac{B-A}{(B+D)-(A+C)}$$

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 17 : Densité (SG) des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	SG
01	B1C3M	1.34
02	B1C3L	2.07
03	B2C3M	1.98
04	B2C3L	2.12
05	B3C3M	2.26
06	B3C3L	2.46
07	B4C3M	2.17
08	B4C3L	2.42
09	B5C3M	2.38
10	B5C3L	2.57
11	B6C3M	2.04
12	B6C3L	2.26
13	B6C5L	2.32
14	B7C5L	2.24
15	B8C3M	1.83
16	B8C3L	2.07

Interprétation des résultats :

La densité des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 1.34 et 2.39 selon les blocs avec une moyenne de 2.00.

La densité des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 2.07 et 2.57 selon les blocs avec une moyenne de 2.28.

La densité des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 2.24 et 2.32 selon les blocs avec une moyenne de 2.28.

On remarque que la densité d'un échantillon lité est toujours supérieure à la densité de l'échantillon massif ayant la même provenance. Ceci indique que les lits gris à beige présents dans les échantillons sont constitués d'impuretés qui augmentent la valeur de la densité.

V.3. Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité est déterminé par la mesure de la variation de masse après séchage à 105 °C et évaporation de l'eau contenu dans l'échantillon ;

Méthode :

1- Peser une quantité A = ... g (5 à 10 g) de poudre d'échantillon dans un contenant en aluminium et le placer au four à 105 °C et laisser sécher toute la nuit durant ;

2- Le lendemain, retirer l'échantillon du four et procéder à sa pesée B = ... g.

3- Calculer le taux d'humidité avec la formule suivante :

$$\% \text{ H}_2\text{O} = \frac{A-B}{A} \%$$

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 18 : Taux d'humidité des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	Taux d'humidité
01	B1C3M	31.41
02	B1C3L	29.73
03	B2C3M	14.63
04	B2C3L	13.54
05	B3C3M	15.57
06	B3C3L	13.87
07	B4C3M	13.60
08	B4C3L	10.97
09	B5C3M	6.89
10	B5C3L	5.05
11	B6C3M	32.88
12	B6C3L	21.34
13	B6C5L	18.47
14	B7C5L	5.25
15	B8C3M	14.87
16	B8C3L	8.04

Ces valeurs représentent la moyenne de trois essais pour chaque échantillon.

Interprétation des résultats :

Le taux d'humidité des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 6.89 % et 32.88 % selon les blocs avec une moyenne de 18.55 %.

Le taux d'humidité des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 5.05 % et 29.73 % selon les blocs avec une moyenne de 14.65 %.

Le taux d'humidité des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 5.25 % et 18.47 % selon les blocs avec une moyenne de 11.86 %.

Ces écarts entre les différents blocs s'expliquent par :

- L'emplacement des blocs ; exposition au soleil ;
- L'emplacement des saignés ; sur les affleurements, juste à l'entrée des galeries ou en profondeur.

On remarque que le taux d'humidité d'un échantillon lité est toujours inférieur au taux d'humidité de l'échantillon massif ayant la même provenance. Ceci indique que les couches massives ont un pouvoir d'absorption plus fort que les couches litées.

Remarque :

Le taux d'humidité peut atteindre jusqu'à 60 % du poids du minerai de kieselguhr pendant les périodes pluvieuses (il peut donc contenir jusqu'à 60% de son poids en eau). On ne retrouve pas des valeurs plus grandes que 33 % sur nos échantillons, ceci est dû au fait que les échantillons ont été prélevés durant le mois de septembre 2014.

V.4. Mesure de la teneur en carbonate de calcium

La teneur en CaCO_3 d'un échantillon de roche, de sédiment, de sol ... est mesurable par calcimétrie. L'appareillage le plus fréquemment utilisé est le calcimètre de Bernard.

Il existe plusieurs types de montages d'un calcimètre ;

Page | 73

Le matériel nécessaire pour le montage d'un calcimètre selon la norme NF P 94-048 « Sols : Reconnaissance et essais / Détermination de la teneur en carbonate / Méthode du calcimètre » consiste essentiellement de verrerie :

- | | |
|--|------------------------|
| 1- Flacon avec ampoule de niveau | 2- Burette graduée |
| 3- Bac | 4- Flacon à réaction |
| 5- Tube à essai | 6- Système réfrigérant |
| 7- Tubulure (longueur 1 mètre environ) | |

Le montage est indiqué sur la figure ci-dessous ;

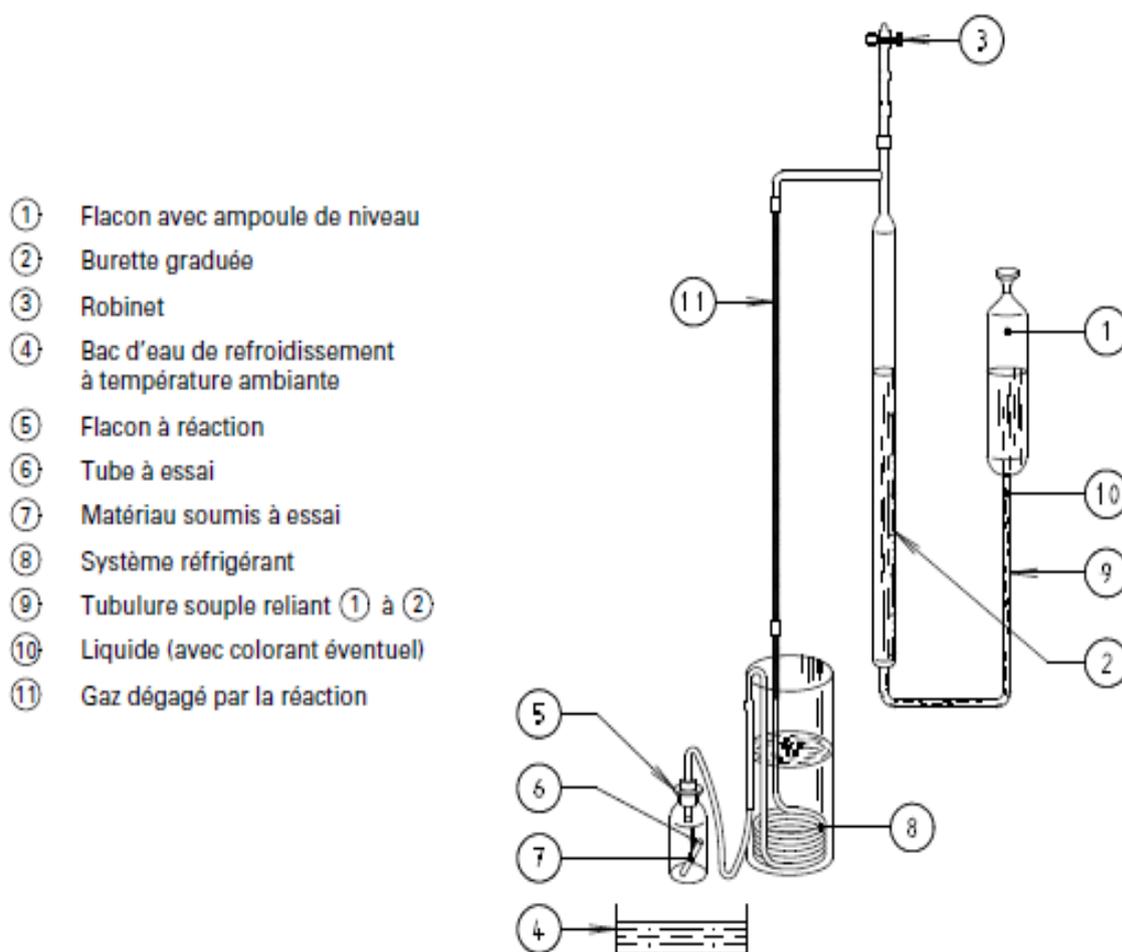


FIG. 35 : Montage d'un calcimètre suivant la norme NF P 94-048.

Toutefois, il existe un autre montage possible du calcimètre de Bernard sans système réfrigérant, en utilisant une solution d'eau salée à saturation, le montage sera donc différent, il est indiqué sur la photo ci-dessous ;

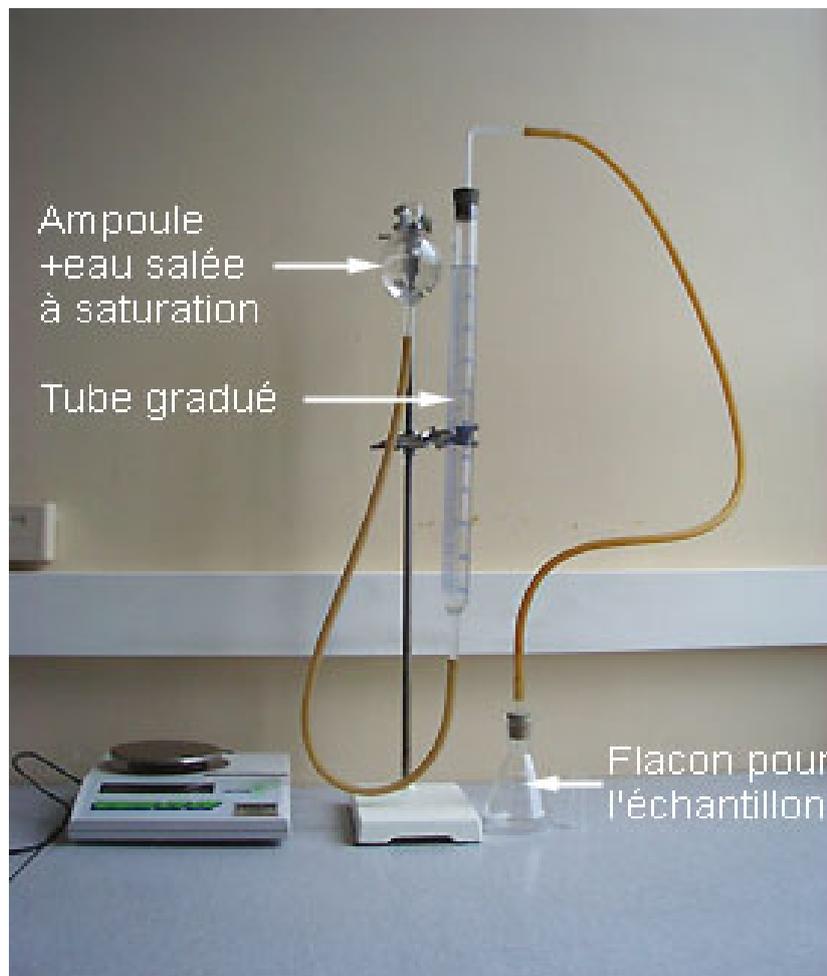


FIG. 36 : Montage d'un calcimètre de Bernard avec eau salée à saturation.

Le dosage du carbonate de calcium est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué d'un échantillon d'une masse donnée à pression et température standard. On mesure le volume de CO₂ dans un tube manométrique après attaque de l'échantillon à l'acide chlorhydrique (HCl) suivant la réaction suivante :



On utilise l'eau saturée en sel pour éviter la perte du CO₂ à partir de sa réaction avec H₂O selon la réaction suivante :



Méthode :

- 1- Prépare une solution saturée de NaCl.
- 2- remplir au même niveau le niveau de la solution saturé en NaCl du tube gradué et de l'ampoule du calcimètre et noter la division qui correspond au volume V_{1t} sur le tube gradué.
- 3- tarer la balance puis peser une masse m_t (environ 0.25g) de la poudre de CaCO_3 pur.
- 4- tarer la balance puis peser une masse $m_{(Ech)}$ (environ 2.5 g) de l'échantillon à étudier.
- 5- introduire le carbonate de calcium pur.
- 6- remplir un petit tube avec de l'acide chlorhydrique (HCl) et l'introduire dans l'ernlemeyer avec une pince avec précaution pour ne pas le verser avant fermeture du système.
- 7- fermer le système en bouchant l'ernlemeyer avec le bouchon relié au tube gradué du calcimètre.
- 8- renverser l'acide contenu dans le tube sur la poudre de CaCO_3 pur.
- 9- agiter de temps en temps l'ernlemeyer pour activer la réaction.
- 10- noter à la fin de l'effervescence la division qui correspond au volume V_{2t} sur le tube gradué.
- 11- le volume de CO_2 dégagé par le carbonate de calcium pur est la différence des volumes $V_{2t}-V_{1t}$.
- 12- Répéter les étapes 5 à 10 pour l'échantillon à étudier et noter le volume V_2 sur le tube gradué.
- 13- le volume de CO_2 dégagé par l'échantillon est la différence des volumes V_2-V_1

Calcul de la teneur en carbonates

Pour l'échantillon témoin (carbonate pur) le volume de CO_2 dégagée est :

$$V_t = V_{2t} - V_{1t}$$

Pour l'échantillon à étudier le volume de CO_2 dégagée est :

$$V(Ech) = V_2 - V_1$$

La teneur en carbonates de l'échantillon étudié est déterminée par la formule suivante

$$T(\text{CaCO}_3) = \frac{m_t \cdot V(Ech)}{m(Ech) \cdot V_t} \times 100 \%$$

Remarque :

- S'assurer que le gaz recueilli dans la burette ne contient pas d'hydrogène sulfuré (H_2S) à l'odeur très caractéristique. Ce serait un indice que la prise d'essai contenait des sulfures. Si cela était le cas, il faudrait refaire un essai en ajoutant à l'acide chlorhydrique quelques centimètres cubes d'acétate de calcium à 5 % afin de neutraliser les dégagements gazeux parasites qui s'ajoutaient à ceux du dioxyde de carbone.
- Un dégagement gazeux ininterrompu et lent peut être dû au fait que le matériau est constitué de carbonate double de calcium et de magnésium $Mg,Ca(CO_3)_2$ (dolomite). Dans ce cas, l'essai doit être poursuivi pendant au moins 15 min.

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 19 : Teneur en $CaCO_3$ des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	Teneur en $CaCO_3$
01	B1C3M	15.66
02	B1C3L	27.39
03	B2C3M	23.99
04	B2C3L	30.65
05	B3C3M	21.14
06	B3C3L	24.61
07	B4C3M	22.68
08	B4C3L	33.70
09	B5C3M	22.88
10	B5C3L	35.75
11	B6C3M	20.03
12	B6C3L	27.10
13	B6C5L	21.53
14	B7C5L	22.22
15	B8C3M	17.45
16	B8C3L	21.63

Ces valeurs représentent la moyenne de trois essais pour chaque échantillon.

Interprétation des résultats :

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 15.66 % et 23.99 % selon les blocs avec une moyenne de 20.54 %.

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 21.63 % et 35.75 % selon les blocs avec une moyenne de 28.69 %.

Page | 77

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 21.53 % et 22.22 % selon les blocs avec une moyenne de 21.87 %.

On remarque que la teneur en carbonates (CaCO_3) d'un échantillon lité est toujours supérieure à la teneur en carbonates (CaCO_3) de l'échantillon massif ayant la même provenance. Ceci indique que les couches massives contiennent moins d'impuretés que les couches litées et que l'impureté la plus prépondérante dans nos échantillons est le carbonate de calcium.

Conversion des teneurs

Un programme de conversion des teneurs de carbonate de calcium (CaCO_3) en teneur en CaO a été réalisé sur un tableur Excel suivant le principe de la conservation des masses énoncé ci-après :

On sait qu'une molécule de carbonate de calcium peut être décomposée comme suit :



Connaissant les masses molaires des atomes de Calcium (Ca), du Carbone (C) et de l'oxygène (O) qui sont :

$$M(\text{Ca}) = 40,078 \pm 0,004 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{C}) = 12,01074 \pm 0,0008 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{O}) = 15,9994 \pm 0,0003 \text{ g.mol}^{-1}$$

On peut calculer la masse molaire des molécules de carbonate de calcium (CaCO_3), de chaux (CaO) et de dioxyde de carbone (CO_2) qui sont :

$$M(\text{CaCO}_3) = 100,08694 \pm 0,0057 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{CaO}) = 56,0774 \pm 0,0043 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{CO}_2) = 44,00954 \pm 0,0014 \text{ g.mol}^{-1}$$

Un échantillon de carbonate de calcium pur contient donc $M(\text{CaO})/ M(\text{CaCO}_3)$ de chaux et $M(\text{CO}_2)/ M(\text{CaCO}_3)$ de dioxyde de carbone soit :

$$100 \% \text{ CaCO}_3 = 56,03 \% \text{ CaO} + 43,97 \% \text{ CO}_2$$

La conversion a donc donné les résultats suivants :

Tableau N° 20 : Teneur convertie en CaO des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	Teneur en CaO
01	B1C3M	8.77
02	B1C3L	15.35
03	B2C3M	13.44
04	B2C3L	17.17
05	B3C3M	11.84
06	B3C3L	13.79
07	B4C3M	12.71
08	B4C3L	18.88
09	B5C3M	12.82
10	B5C3L	20.03
11	B6C3M	11.22
12	B6C3L	15.18
13	B6C5L	12.06
14	B7C5L	12.45
15	B8C3M	9.78
16	B8C3L	12.12

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Transfert des teneurs CaCO3-CaO.xls". The data is organized into two main sections: CaCO3 (rows 1-10) and CaO (rows 11-17). Below these is a summary table (rows 19-25) with columns for N°Ech, Code Ech, %CaCO3, %CaO, and Date.

CaCO3				
	C	Ca	O	
Masse Molaire	100,087 +/- 0,006		g/mol	
	12%	40,04%	47,96%	
	12,01074	40,078	15,9994	
	0,0008	0,004	0,0003	
	1	1	3	
	12,01074	40,078	47,9982	
	0,0008	0,004	0,0009	
			100,08694	
			0,0057	
			Teneur	
			100,00%	
CaO				
	Ca	O		
	40,04%	47,96%		
	40,078	15,9994		
	0,004	0,0003		
	1	1		
	40,078	15,9994		
	0,004	0,0003		
			56,0774	
			0,0043	
			Teneur	
			56,03%	
N°Ech	Code Ech	%CaCO3	%CaO	Date
Ech T	CaCO3 100 %	100	56,03%	30/05/2015
Ech 1	B6C3L	31,74	17,78%	30/05/2015
Ech 1	B6C3L	27,88	15,62%	30/05/2015
Ech 1	B6C3L	26,33	14,75%	30/05/2015
Ech 2	B6C3M	25,43	14,25%	04/06/2015
Ech 2	B6C3M	19,03	10,66%	04/06/2015

FIG. 37 : Tableau Excel des conversions des teneurs.

Si l'on compare les résultats obtenus avec ceux de la SONAREM (voir tableau n°21), on trouve qu'on est à 0,8 % près, ceci indique que la méthode utilisée pour la détermination de la teneur de CaCO_3 ainsi que la procédure de conversion des teneurs en CaO adoptée nous donnent des résultats assez proches des résultats obtenus par fluorescence X.

Tableau N° 21 : Comparaison des teneurs en CaO avec ceux de la SONAREM.

N° Echantillon	Code Echantillon	Teneur en CaO	% CaO SONAREM	
			Bloc	Valeur
01	B1C3M	8.77	Bloc 1	14.35
02	B1C3L	15.35		
03	B2C3M	13.44	Bloc 2	14.28
04	B2C3L	17.17		
05	B3C3M	11.84	Bloc 3	13.85
06	B3C3L	13.79		
07	B4C3M	12.71	Bloc 4	14.01
08	B4C3L	18.88		
09	B5C3M	12.82	Bloc 5	13.32
10	B5C3L	20.03		
11	B6C3M	11.22	Bloc 6	11.11
12	B6C3L	15.18		
13	B6C5L	12.06	Bloc 7	11.39
14	B7C5L	12.45		
15	B8C3M	9.78	Bloc 8	12.08
16	B8C3L	12.12		
Moyenne du gisement		13.60	12.80	

V.5. Analyse des résultats

Le tableau ci-après récapitule tous les résultats des essais de caractérisation réalisés sur tous les échantillons.

Tableau N° 22 : Tableau récapitulatif des résultats des essais de caractérisation.

N° Ech	Code Ech	Masse vol	Densité	% H ₂ O	% CaCO ₃	% CaO
01	B1C3M	0.388	1.34	31.41	15.66	8.77
02	B1C3L	0.441	2.07	29.73	27.39	15.35
03	B2C3M	0.426	1.98	14.63	23.99	13.44
04	B2C3L	0.506	2.12	13.54	30.65	17.17
05	B3C3M	0.350	2.26	15.57	21.14	11.84
06	B3C3L	0.440	2.46	13.87	24.61	13.79
07	B4C3M	0.394	2.17	13.60	22.68	12.71
08	B4C3L	0.504	2.42	10.97	33.70	18.88
09	B5C3M	0.391	2.38	6.89	22.88	12.82
10	B5C3L	0.610	2.57	5.05	35.75	20.03
11	B6C3M	0.372	2.04	32.88	20.03	11.22
12	B6C3L	0.438	2.26	21.34	27.10	15.18
13	B6C5L	0.450	2.32	18.47	21.53	12.06
14	B7C5L	0.433	2.24	5.25	22.22	12.45
15	B8C3M	0.368	1.83	14.87	17.45	9.78
16	B8C3L	0.396	2.07	8.04	21.63	12.12
Moyenne		0.432	2.16	16.01	24.28	13.60

Dans cette partie on cherchera à trouver les relations qui existent entre les paramètres physico-chimiques mesurés sur les différents échantillons.

Le constituant principal des échantillons du minerai est la diatomite (silice amorphe), l'impureté prépondérante étant les carbonates CaCO₃ (CaO).

Il existe deux types de minerais :

- Un minerai massif de couleur blanche ;
- Et un minerai lité, formés par une superposition alternée de fins lits de couleur blanc et beige.

On cherchera maintenant à analyser les résultats suivant chaque paramètre selon la provenance et la qualité du minerai (massif ou lité) tout en observant l'évolution des autres paramètres.

V.5.1. Analyse suivant la masse volumique

L'analyse des résultats suivant la masse volumique montre que les échantillons de minerai massif ont les plus petites masses volumiques ($< 0,395 \text{ g/cm}^3$) tandis que les échantillons de minerai lité ont des masses volumiques plus grandes ($> 0,432 \text{ g/cm}^3$) (mis à part les échantillons B8C3L et B2C3M), (voire tableau N°23).

Tableau N° 23 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des masses volumiques.

N° Ech	Code Ech	Masse vol	Densité	% H ₂ O	% CaCO ₃	% CaO
5	B3C3M	0,35	2,26	15,57	21,14	11,84
15	B8C3M	0,368	1,83	14,87	17,45	9,78
11	B6C3M	0,372	2,04	32,88	20,03	11,22
1	B1C3M	0,388	1,34	31,41	15,66	8,77
9	B5C3M	0,391	2,38	6,89	22,88	12,82
7	B4C3M	0,394	2,17	13,6	22,68	12,71
16	B8C3L	0,396	2,07	8,04	21,63	12,12
3	B2C3M	0,426	1,98	14,63	23,99	13,44
14	B7C5L	0,433	2,24	5,25	22,22	12,45
12	B6C3L	0,438	2,26	21,34	27,1	15,18
6	B3C3L	0,44	2,46	13,87	24,61	13,79
2	B1C3L	0,441	2,07	29,73	27,39	15,35
13	B6C5L	0,45	2,32	18,47	21,53	12,06
8	B4C3L	0,504	2,42	10,97	33,7	18,88
4	B2C3L	0,506	2,12	13,54	30,65	17,17
10	B5C3L	0,61	2,57	5,05	35,75	20,03

V.5.2. Analyse suivant la densité

L'analyse des résultats suivant la densité ne permet pas d'établir une règle selon que la nature du minerai soit massive ou litée, mais suivant la provenance on peut observer que les échantillons provenant des blocs 1, 2 et 8 sont les échantillons les moins denses (massifs ou lités), les échantillons provenant des blocs 3, 4 et 5 sont les plus denses (massifs ou lités) et les échantillons provenant des blocs 6 et 7 sont entre les deux (voire tableau N°24).

Tableau N° 24 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des densités.

N° Ech	Code Ech	Masse vol	Densité	% H ₂ O	% CaCO ₃	% CaO
1	B1C3M	0,388	1,34	31,41	15,66	8,77
15	B8C3M	0,368	1,83	14,87	17,45	9,78
3	B2C3M	0,426	1,98	14,63	23,99	13,44
11	B6C3M	0,372	2,04	32,88	20,03	11,22
16	B8C3L	0,396	2,07	8,04	21,63	12,12
2	B1C3L	0,441	2,07	29,73	27,39	15,35
4	B2C3L	0,506	2,12	13,54	30,65	17,17
7	B4C3M	0,394	2,17	13,6	22,68	12,71
14	B7C5L	0,433	2,24	5,25	22,22	12,45
5	B3C3M	0,35	2,26	15,57	21,14	11,84
12	B6C3L	0,438	2,26	21,34	27,1	15,18
13	B6C5L	0,45	2,32	18,47	21,53	12,06
9	B5C3M	0,391	2,38	6,89	22,88	12,82
8	B4C3L	0,504	2,42	10,97	33,7	18,88
6	B3C3L	0,44	2,46	13,87	24,61	13,79
10	B5C3L	0,61	2,57	5,05	35,75	20,03

V.5.3. Analyse suivant le taux d'humidité

L'analyse des résultats suivant le le taux d'humidité ne permet pas d'établir une règle selon que la nature du minerai soit massive ou litée, mais suivant la provenance on peut observer que les échantillons provenant des blocs 1 et 6 sont les échantillons les plus humides qu'ils soient massifs ou lités, les échantillons provenant des blocs 2, 3, 4, 5, 7 et 8 sont les moins humides (massifs ou lités), ceci est du à la période d'échantillonnage (en septembre) et à l'exposition des blocs au soleil par rapport à leur localisation (voire tableau N°25).

Tableau N° 25 : Résultats classés suivant l'ordre décroissant des taux d'humidité.

N° Ech	Code Ech	Masse vol	Densité	% H ₂ O	% CaCO ₃	% CaO
11	B6C3M	0,372	2,04	32,88	20,03	11,22
1	B1C3M	0,388	1,34	31,41	15,66	8,77
2	B1C3L	0,441	2,07	29,73	27,39	15,35
12	B6C3L	0,438	2,26	21,34	27,1	15,18
13	B6C5L	0,45	2,32	18,47	21,53	12,06
5	B3C3M	0,35	2,26	15,57	21,14	11,84
15	B8C3M	0,368	1,83	14,87	17,45	9,78
3	B2C3M	0,426	1,98	14,63	23,99	13,44
6	B3C3L	0,44	2,46	13,87	24,61	13,79
7	B4C3M	0,394	2,17	13,6	22,68	12,71
4	B2C3L	0,506	2,12	13,54	30,65	17,17
8	B4C3L	0,504	2,42	10,97	33,7	18,88
16	B8C3L	0,396	2,07	8,04	21,63	12,12
9	B5C3M	0,391	2,38	6,89	22,88	12,82
14	B7C5L	0,433	2,24	5,25	22,22	12,45
10	B5C3L	0,61	2,57	5,05	35,75	20,03

V.5.4. Analyse suivant la teneur en carbonate

L'analyse des résultats suivant la teneur en CaCO_3 (ou CaO) montre que les échantillons de minerai massif ont les plus petites teneurs en carbonate tandis que les échantillons de minerai lité ont les plus grandes teneurs (mis à part les échantillons lités de la couche 5 et l'échantillon lité du bloc 8 couche 3), (voire tableau N°26).

Tableau N° 26 : Résultats classés suivant l'ordre croissant des teneurs en CaCO_3 (ou CaO).

N° Ech	Code Ech	Masse vol	Densité	% H_2O	% CaCO_3	% CaO
1	B1C3M	0,388	1,34	31,41	15,66	8,77
15	B8C3M	0,368	1,83	14,87	17,45	9,78
11	B6C3M	0,372	2,04	32,88	20,03	11,22
5	B3C3M	0,35	2,26	15,57	21,14	11,84
13	B6C5L	0,45	2,32	18,47	21,53	12,06
16	B8C3L	0,396	2,07	8,04	21,63	12,12
14	B7C5L	0,433	2,24	5,25	22,22	12,45
7	B4C3M	0,394	2,17	13,6	22,68	12,71
9	B5C3M	0,391	2,38	6,89	22,88	12,82
3	B2C3M	0,426	1,98	14,63	23,99	13,44
6	B3C3L	0,44	2,46	13,87	24,61	13,79
12	B6C3L	0,438	2,26	21,34	27,1	15,18
2	B1C3L	0,441	2,07	29,73	27,39	15,35
4	B2C3L	0,506	2,12	13,54	30,65	17,17
8	B4C3L	0,504	2,42	10,97	33,7	18,88
10	B5C3L	0,61	2,57	5,05	35,75	20,03

En conclusion on peut établir les relations suivantes :

Dans un minerai de diatomite, quand la teneur des impuretés diminue (dans notre cas c'est les carbonates CaCO_3 constituant l'impureté la plus prépondérante) la masse volumique et la densité du minerai diminuent et le taux d'humidité augmente dans des conditions où tous les échantillons sont exposés aux mêmes conditions d'exposition au soleil et d'emplacement.

Page | 86

En effet, les échantillons de qualité massive ont les plus faibles teneurs en carbonate CaCO_3 (ou CaO), on peut donc conclure que les inter-lits de couleur beige présents dans les échantillons lités contribuent à augmenter cette teneur, cela indique qu'ils sont constitués principalement de carbonates.

Les échantillons de qualité massive ont les plus faibles masses volumiques, on peut donc conclure que les inter-lits de couleur beige présents dans les échantillons lités contribuent à augmenter cette propriété physique, cela indique que le minerai massif est plus léger que le minerai lité, donc plus pure.

Les échantillons de qualité massive ont les plus faibles densités comparés avec les échantillons de qualité litée d'une même provenance (même saigné).

Les échantillons de qualité massive ont le plus fort taux d'humidité comparés avec les échantillons de qualité litée d'une même provenance (même saigné). La généralisation peut être faite si l'on considère le fait que les échantillons ne sont pas exposés de la même façon au soleil.

CHAPITRE VI : ESSAIS DE TRAITEMENT

[2] [8] [9]

VI.1. Préparation des échantillons pour la calcination

Avant de procéder à la calcination, les échantillons ont été préparés de la sorte suivante :

- prendre 50 g de l'échantillon broyé $d < 63 \mu\text{m}$;
- s'assurer que l'échantillon ne contienne plus d'eau libre en vérifiant que sa masse n'évolue plus après séchage à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 1 heure ;
- peser 10 à 30 g de l'échantillon séché dans un creuset en porcelaine (le creuset doit préalablement être lavé et séché) ;
- l'échantillon peut à présent être enfourné dans le four à mouffles.



FIG. 38 : photo d'un creuset en porcelaine.



FIG. 39 : photo d'une balance de haute précision.

VI.2. Essais de calcination

Les essais de calcination ont été réalisés dans un four à moufles pouvant aller à une température maximale de 1300°C, laboratoire du département du génie minier, école nationale polytechnique.

Page | 88

Une fois que les échantillons préparés suivant la procédure précédemment décrite, la calcination à été réalisé suivant les étapes suivantes :

- préchauffer le four à moufle à 1100 °C ;
- enfourner les échantillons préparés dans des creusets en porcelaine ;
- calciner les échantillons à une température 1100 °C durant 1 heure ;
- sortir les échantillons du four avec précaution et laisser refroidir toute la nuit durant.



FIG. 40 : photo d'un four à moufle de laboratoire.

VI.3. Perte au feu et Evolution des teneurs en carbonates

Après calcination, les deux paramètres mesurés sont la perte au feu (PAF) et la teneur en carbonate de calcium CaCO_3 qui seront ensuite converti en teneur en CaO .

VI.3.1. Perte au feu (PAF)

La perte au feu ou LOI (Loss on ignition en anglais) étant la perte de masse d'un matériau après calcination, elle est déterminée de la façon suivante :

- peser l'échantillon avant l'entrée au four à moufle m_1 ;
- peser l'échantillon après sortie du four à moufle et refroidissement m_2 ;
- calcul de la PAF suivant la formule suivante :

$$PAF = \frac{\Delta m}{m} \% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \%$$

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 27 : PAF des échantillons.

N° Echantillon	Code Echantillon	PAF
01	B1C3M	14.48
02	B1C3L	21.72
03	B2C3M	17.42
04	B2C3L	22.77
05	B3C3M	13.95
06	B3C3L	18.29
07	B4C3M	15.61
08	B4C3L	23.90
09	B5C3M	15.74
10	B5C3L	23.78
11	B6C3M	14.67
12	B6C3L	20.24
13	B6C5L	14.89
14	B7C5L	15.47
15	B8C3M	14.13
16	B8C3L	15.16

Interprétation des résultats :

La perte au feu des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 13.95 % et 17.42 % selon les blocs avec une moyenne de 15.14 %.

La perte au feu des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 15.16 % et 23.90 % selon les blocs avec une moyenne de 20.84 %.

La perte au feu des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 14.89 % et 15.47 % selon les blocs avec une moyenne de 15.18 %.

On remarque que la perte au feu d'un échantillon lité est toujours supérieure à la perte au feu de l'échantillon massif ayant la même provenance. Ceci indique que les couches massives contiennent moins d'élément qui se désintègrent au feu que les couches litées et que.

Si on compare les deux paramètres teneur et carbonates CaCO_3 et PAF sur nos échantillons, on remarque que les échantillons ayant les plus fortes teneurs en carbonates ont aussi les plus fortes PAF et les échantillons ayant les plus faibles teneurs en carbonates ont aussi les plus faibles PAF (voir tableau n° 28).

Tableau N° 28 : résultats classés suivant l'ordre croissant de la PAF et des teneurs en CaCO_3 .

N° Echantillon	Code Echantillon	PAF ↑
5	B3C3M	13,95
15	B8C3M	14,13
1	B1C3M	14,48
11	B6C3M	14,67
13	B6C5L	14,89
16	B8C3L	15,16
14	B7C5L	15,47
7	B4C3M	15,61
9	B5C3M	15,74
3	B2C3M	17,42
6	B3C3L	18,29
12	B6C3L	20,24
2	B1C3L	21,72
4	B2C3L	22,77
10	B5C3L	23,78
8	B4C3L	23,9

N° Echantillon	Code Echantillon	Teneur en CaCO_3 ↑
1	B1C3M	15.66
15	B8C3M	17.45
11	B6C3M	20.03
5	B3C3M	21.14
13	B6C5L	21.53
16	B8C3L	21.63
14	B7C5L	22.22
7	B4C3M	22.68
9	B5C3M	22.88
3	B2C3M	23.99
6	B3C3L	24.61
12	B6C3L	27.10
2	B1C3L	27.39
4	B2C3L	30.65
8	B4C3L	33.70
10	B5C3L	35.75

VI.3.2. Teneur en carbonate

La détermination de la teneur en carbonates CaCO_3 après calcination a été faite par calcimétrie comme dans le cas de la caractérisation. La conversion des teneurs en CaO a aussi été faite de la même manière que dans le cas de la caractérisation.

Les résultats obtenus sur les échantillons sont énumérés sur le tableau ci-après :

Tableau N° 29 : Teneur en CaCO_3 après calcination avec leur conversion en teneur en CaO .

N° Echantillon	Code Echantillon	Teneur en CaCO_3	Teneur en CaO
01	B1C3M	3.67	2.06
02	B1C3L	5.54	3.10
03	B2C3M	1.98	1.11
04	B2C3L	3.04	1.70
05	B3C3M	4.07	2.28
06	B3C3L	3.52	1.97
07	B4C3M	2.37	1.33
08	B4C3L	3.53	1.98
09	B5C3M	2.01	1.13
10	B5C3L	1.61	0.90
11	B6C3M	2.86	1.60
12	B6C3L	6.86	3.48
13	B6C5L	4.69	2.63
14	B7C5L	5.05	2.83
15	B8C3M	4.24	2.38
16	B8C3L	3.78	2.12

Interprétation des résultats :

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 3 partie massive oscille entre 1.98 % et 4.24 % après traitement selon les blocs avec une moyenne de 3.03 %. Pour les mêmes échantillons, la teneur de CaO obtenue par conversion oscille entre 1.11 % et 2.38 % avec une moyenne de 1.70 %.

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 3 partie litée oscille entre 1.61 % et 6.86 % après traitement selon les blocs avec une moyenne de 3.98 %. Pour les mêmes échantillons, la teneur de CaO obtenue par conversion oscille entre 0.90 % et 3.84 % avec une moyenne de 2.23 %.

La teneur en carbonates (CaCO_3) des échantillons de la couche 5 litée oscille entre 4.69 % et 5.05 % après traitement selon les blocs avec une moyenne de 4.87 %. Pour les mêmes échantillons, la teneur de CaO obtenue par conversion oscille entre 2.63 % et 2.83 % avec une moyenne de 2.73 %.

On remarque que la teneur en carbonate CaCO_3 (ou CaO) diminue remarquablement pour tous les échantillons d'une valeur moyenne de 24.27 % en CaCO_3 (13.60 % en CaO) à une valeur moyenne de 3.67 % en CaCO_3 (2.06 % en CaO).

Le taux de réduction de la teneur en carbonate CaCO_3 (ou CaO) n'a aucune relation avec la teneur de départ.

En conclusion on peut établir les relations suivantes :

La perte au feu est plus importante dans les échantillons de minerai de qualité litée que dans les échantillons de minerai de qualité massive.

La perte au feu est en relation directe avec la teneur en carbonate CaCO_3 (ou CaO), vu que les échantillons contenant le plus de carbonate ont la plus forte PAF.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La diatomite est un minéral très particulier tant par la combinaison de propriétés physico-chimiques qu'il possède que par la multitude des domaines d'application industrielles qui l'utilise. C'est un minéral stratégique avec un marché mondial ouvert et en progression continue à travers le temps.

Le gisement de diatomite de Sig localisé au nord-ouest de l'Algérie dans la wilaya de Mascara, structuré suivant 7 couches principales, est d'une taille assez importante avec une étendue de 200 ha et renferme 6.575 millions de tonnes de minerai uniquement dans la couche n°3 (selon le calcul de la SONAREM).

La campagne d'échantillonnage a été réalisée durant le mois de septembre 2014. Le prélèvement des échantillons a été fait suivant des saignés perpendiculaires aux couches de diatomite sur les épontes des galeries ouvertes dans les blocs avec réseau souterrain et perpendiculairement aux couches de diatomite qui affleurent en surface dans les blocs sans réseau souterrain.

Tous les travaux de laboratoire ont été réalisés au laboratoire du département génie minier (Ecole Nationale Polytechnique).

La préparation mécanique a été faite en utilisant un concasseur à percussions, quartage puis broyage manuel à $d < 63 \mu\text{m}$ au mortier.

Le prélèvement des petites quantités des différents échantillons pour les essais de caractérisation et de traitement a été fait à l'aide d'une échantillonneuse rotative.

Les essais de caractérisation ont porté sur la détermination de la masse volumique, la densité, l'humidité, la teneur en carbonate CaCO_3 et la perte au feu (PAF).

Un programme de conversion des teneurs de CaCO_3 en teneur de CaO a été réalisé suivant le principe de la conservation de la masse sur un tableur Excel afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux de la SONAREM.

Les résultats de la caractérisation ont confirmé le fait de la présence en grande quantité du carbonate de calcium, avec une moyenne de 24,27 % en CaCO_3 (13,60 % en CaO, valeur convertie) sur tous les échantillons. Le carbonate de calcium est donc l'impureté la plus prépondérante dans le minerai de diatomite de Sig.

Des relations entre les différents paramètres physico-chimiques mesurés ont été établies ;

Dans un minerai de diatomite, quand la teneur des impuretés diminue (dans notre cas c'est les carbonates CaCO_3 constituant l'impureté la plus prépondérante) la masse volumique et la densité du minerai diminuent et le taux d'humidité augmente dans des conditions où tous les échantillons sont exposés aux mêmes conditions d'exposition au soleil et d'emplacement. La perte au feu est également en relation directe avec la teneur en carbonate CaCO_3 (ou CaO), vu que les échantillons contenant le plus de carbonate ont la plus forte PAF.

Les essais de traitement ont portés sur la calcination à $1100\text{ }^\circ\text{C}$ durant 1 heure ont été réalisés sur tous les échantillons. Les résultats des calcinations ont été observés sur l'évolution de la teneur en carbonate CaCO_3 . En effet les teneurs ont été réduites considérablement jusqu'à une valeur moyenne de 3.67% en CaCO_3 (2.06% en CaO).

Cela dit, on ne peut se prononcer sur la possibilité d'utilisation de ce produit dans les applications industrielles ayant des exigences pointus (tel que la filtration) concernant les teneurs en impuretés pour des raisons diverses :

- La méthode utilisé dans la détermination de la teneur en carbonate CaCO_3 est celle de la calcimétrie, qui est une méthode moins précise que celle de la fluorescence X.
Il est donc nécessaire de faire des analyses chimiques plus complètes avec de meilleures précisions de mesure afin de déterminer les teneurs des différentes impuretés : CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , ...
- Mesurer d'autres propriétés telles que la porosité et la perméabilité.

Les perspectives pour la poursuite de ces travaux consistent en :

- La caractérisation d'une façon plus complète et plus précise du minerai de diatomite : analyses microscopiques, minéralogiques, chimiques et granulo-chimiques ;
- Etudier l'apport de la calcination simple en faisant varier la température de calcination et le temps de séjour dans le four ;
- Etudier l'apport de la calcination avec activation en ajoutant différents fondants : Na_2CO_3 , NaCl , NaOH , KCl , KOH , ...
- Procéder à des essais de filtration de différents produits agro-alimentaires ;

Bibliographie

- [1] AFNOR, 1996, *NF P 94-048 Sols : Reconnaissance et essais Détermination de la teneur en carbonate Méthode du calcimètre*, norme française.
- [2] BGS, 1993, *Industrial Minerals Laboratory manual Diatomite*, Mineralogy and petrology series.
- [3] Geofield, 2012 - 2013, *Études de Faisabilité Technique et Economique pour la valorisation des gisements de Feldspath de Ain Barbar, Diatomée de Sig, Baryte de Draïssa, Dolomie de Teiouelt, Carbonate de calcium de Béni Saf et de Oggaz*, Geofield.
- [4] Metso corporation, 2010, *Basics in mineral processing, Edition 7*, Metso corporation.
- [5] NEGRONI J-M, 2007, *Fiches détaillés diatomite*, Géologue groupe, Imerys.
- [6] OULDHAMOU M, 2011- 2012, *Support de cours de minéralurgie*, Département génie minier, ENP.
- [7] Rocher Ph, 1995, *Mémento roches et minéraux industriels Diatomite*, BRGM.
- [8] SIDAM, 1979, *Etude de développement de l'industrie algérienne de bentonite, kieselguhr, argile activées et perlite expansée – phase I – vol. 2 : kieselguhr*, SIDAM.
- [9] SONAREM, 1977 – 1979, *Rapport sur les travaux de prospection détaillée effectuées sur le gisement de kieselguhr de Tallait dans la région de Sig – tome II – calcul et état des réserves du gisement de kieselguhr de Tallait dans la région de Sig*, SONAREM.
- [10] SRDJAN M. BULATOVIC, 2007, *handbook of flotation reagents*, Elsevier Science & Technology Books.
- [11] USGS, 2014, *Mineral Commodity Summaries Diatomite*, USGS.
- [12] USGS, 2012, *2012 Mineral Yearbook*, USGS.