

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département: Génie civil et travaux publics



جامعة غليزان  
RELIZANE UNIVERSITY

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Travaux publics:  
Option : Voie et ouvrage d'art

Intitulé :

**Caractéristiques mécaniques des pâtes de ciment à base de la  
diatomite**

**Présenté par:**

Mr : AKKERMI TOUFIK

Mr : YAGOUB DJILLALI

**Devant les membres de jury :**

**Président :** Mlle ABDELHAK. Z

Maître de conférence (B) A (U. Relizane)

**Encadreur :** Mr HAMADACHE MILOUD

Maître de conférence (B) A (U. Relizane)

**Examineur :** Mr BADACH.ABDELHAK

Maître de conférence (B) A (U. Relizane)

**Année universitaire : 2024/2025**

# **REMERCIEMENT**

*«Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu DIEU*

*Miséricordieux, qui nous a donné la force*

*D'achever cette réalisation.»*

*Je tiens à exprimer ma profond à mon directeur respecté pour nous avoir permis*

*de poursuivre nos études, ainsi que pour son soutien et son encouragement*

*Constants dans notre parcours professionnel et académique.*

*Nous voudrions également remercier le **Dr. HAMADACHE MILOUD** pour*

*L'intérêt qu'il a porté et à sa patience pour diriger cette mémoire.*

*Nous tenons à remercier également l'ensemble, des*

*Enseignement du département de génie civil et travaux publics,*

*Qui a contribué à notre formation.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury,*

*Nous leur exprime toute ma gratitude.*

*Nous remercions pareillement l'ensemble des membres du l'école nationale*

*polytechnique d'Oran MAURICE AUDIN et spécialement*

***Mr BADACH ABDELHAK** pour leur aide précieuse.*

## **DEDICACES**

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Tout Puissant, je dédie ce modeste travail à  
mes très chers parents qui ont su être*

*À mes côtés dans les moments difficiles, sans lesquels je n'aurai pas abouti*

*À ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont*

*Procuré, que je puisse les honorer*

*A Ma mère*

*A Mon père*

*À Ma femme*

*A mes enfants: **KELTOUME. DJABIR et ABRAR***

*A toute ma famille **AKKERMI** sans exception.*

*À tous mes collègues de travail dans **subdivision***

***Des Travaux Publics d'El-MATMAR,***

*A mon binôme **YAGOUB DJILALLI** qui était mon frère durant toute l'année.*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à réaliser ce mémoire.*

**AKKERMI TOUFIK**

## **DEDICACES**

*Merci Allah de m'avoir donnée la capacité d'écrire et de réfléchir  
, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout de mes rêves*

*Je dédie ce travail modeste à :*

*Mes parents.*

*À tous les enseignants du Département des Sciences et Technologies.*

*Mes très chers amis.*

*A Tous ...*

*À mes frères bien-aimés.*

*À tous mes collègues de la subdivision des Travaux Publics d'El-MATMAR,*

*Et plus particulièrement*

*À mon binôme AKKERMI TOUFIK.*

**DJILALI YAGOUB**

# *Sommaire*

<b>Sommaire</b> .....	5
<b>Liste des Figures</b> .....	7
<b>Liste des Tableaux</b> .....	9
<b>Résumé</b> .....	10
<b>Introduction générale</b> .....	13
<b><i>CHAPITRE I : Recherches Bibliographiques</i></b>	
<b>I.1. Généralité sur diatomite</b> .....	14
<b>I.1.1. Définition</b> .....	14
<b>I.1.2. Types de diatomite</b> .....	15
<b>I.1.3. Les principaux gisements de la diatomite</b> .....	16
<b>I.1.3.1. Dans le monde</b> .....	16
<b>I.1.3.2. Dans l'Algérie</b> .....	17
<b>I.1.4. Structure de la diatomite</b> .....	19
<b>I.1.4.1. Les types des Surfaces de la diatomite</b> .....	20
<b>I.1.5. Propriétés physiques et spécifications</b> .....	23
<b>I.1.6. Propriété microscopique</b> .....	26
<b>I.1.7. Classification de la diatomite (kieselguhr)</b> .....	27
<b>I.1.8. Domaine d'application et d'utilisation</b> .....	29
<b>I.2. les revues des recherches sur la diatomite</b> .....	32
<b>I.3. conclusion</b> .....	34
<b><i>Chapitre II : d'essai Caractérisation microstructurales et macrostructurales des matériaux utilise et méthode</i></b>	
<b>II.1. introduction et historique</b> .....	35
<b>II.2. Gisement de diatomite situe à Sidi Lakhdar Mostaganem</b> .....	35
<b>II.3. Caractérisation de la diatomite</b> .....	36
<b>II.3.1. Caractérisation chimique</b> .....	36
<b>II.3.2. Caractérisation microstructurale par DRX</b> .....	36
<b>II.3.2.1. Résultats d'analyse de la diatomite par DRX</b> .....	40
<b>II.3.3. Caractérisation par MEB</b> .....	41
<b>II.3.3.1. Résultat d'analyse de la diatomite par MEB</b> .....	42
<b>II.3.4. Résultat d'analyse granulométrique laser</b> .....	43
<b>II.3.5. Caractérisation de la diatomite par BET</b> .....	44

<b>II.4.</b> Analyse thermogravimétrique et la calorimétrie à balayage différentiel (TGA-DSC) de la diatomite brute -----	45
<b>II.5.</b> Mesure de la masse volumique de la diatomite Naturelle -----	47
<b>II.6.</b> Mesure du taux d'humidité -----	47
<b>II.7.</b> Conclusion -----	48
<b><i>Chapitre III : Compagne expérimentale</i></b>	
<b>III.1</b> introduction -----	49
<b>III.2.</b> Matériaux utilisés -----	49
<b>III.2.1.</b> Diatomite -----	49
<b>III.2.2</b> Ciment -----	50
<b>III.2.3.</b> Eau de gâchage -----	51
<b>III.3.</b> Préparation des Formulations et mode d'essai -----	52
<b>III.3.1.</b> Préparation et séquence de malaxage des pâtes de ciment -----	52
<b>III.3.2.</b> Effet de la finesse de la diatomite -----	53
<b>III.3.3.</b> Etape de remplissage et compactage des moules -----	54
<b>III .4 .</b> Modes d'essai des pâtes -----	55
<b>III.4.1.</b> La masse volumique -----	55
<b>III.5.</b> Essais physico-mécanique -----	57
<b>III.5.1.</b> Essai de porosité -----	57
<b>III.6.</b> Les essais physiques -----	58
<b>III.6.1.</b> Les essais non destructifs -----	59
<b>III.6.1.1.</b> Essai d'auscultation dynamique (ultrason) -----	59
<b>III.6.1.2.</b> Mode d'expression de mesurer la vitesse de propagation -----	59
<b>III.6.1.3.</b> Classification des matériaux d'après la vitesse du son -----	60
<b>III.6.1.4.</b> Les mesures de grandeurs physiques par l'appareil ultrasonique -----	60
<b>III.7 :</b> Les essais mécaniques -----	61
<b>III.7.1 :</b> Résistance à la compression -----	62
<b>III.7.2.</b> Résistance à la flexion -----	63
<b>III.8.</b> Interprétation des résultats -----	65
<b>III.8.1.</b> Les Propriétés physique -----	65
<b>III.8.2.</b> Les propriétés mécaniques -----	65
<b><i>Conclusion générale</i></b> -----	67
<b><i>Référence</i></b> -----	68

## *Liste des Figures*

<b>Figure I.1.</b> Diatomées -----	14
<b>Figure I.2.</b> de localisation des principaux sites diatomitiques du monde -----	16
<b>Figure I.3.</b> situation géographique du gisement de la région du Sig -----	19
<b>Figure I.4.</b> Structure des groupes silanol isolés -----	20
<b>Figure I.5.</b> Structure des groupes silanols géminaux -----	20
<b>Figure I.6.</b> Structure des groupes silanols vicinaux -----	21
<b>Figure I.7.</b> Structure hydroxyle à la surface de la diatomite -----	22
<b>Figure I.8.</b> Différents types de liaisons à la surface de la silice -----	23
<b>Figure I.9.</b> courbe de l'analyse granulométrique de la diatomite brute -----	26
<b>Figure I.10.</b> La composition microscopique de la diatomite -----	27
<b>Figure I.11.</b> Etapes de traitement de différents types de kieselguhr -----	28
<b>Figure II.1.</b> Localisation du gisement de la Diatomite à Mostaganem, Algérie -----	36
<b>Figure II.2.</b> Production des rayons X -----	38
<b>Figure II.3.</b> Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une Distance -----	39
<b>Figure II.4.</b> Spectres de DRX Diatomite naturelle -----	40
<b>Figure II.5.</b> Les fonctionnements de MEB -----	41
<b>Figure II.6.</b> Principe du MEB -----	42
<b>Figure II.7.</b> Principe d'EDX -----	42
<b>Figure II.8.</b> Micrographie électronique à balayage de la Diatomite naturelle -----	43
<b>Figure II.9.</b> Analyse Granulométrie Laser de la Diatomite naturelle -----	43
<b>Figure II.10.</b> Analyse Granulométrie Laser par fitting de la Diatomite naturelle -----	44
<b>Figure II.11.</b> Analyse thermique simultanée TGA-DSC pour la diatomite brute -----	46
<b>Figure III.1.</b> Echantillon score, poudre de diatomite -----	49
<b>Figure III.2.</b> Les différentes étapes réalisées pour la préparation des pates (ciment /Diatomite) -----	53
<b>Figure III.3.</b> Les différentes étapes réalisées pour la préparation de la diatomite -----	54
<b>Figure III.4.</b> Compactages des moules en pate ciment/diatomite -----	55
<b>Figure III.5.</b> Eprovette graduée -----	57
<b>Figure III.6.</b> La porosité en fonction de différents dosages de diatomite -----	58
<b>Figure III.7.</b> Montage de l'essai ultrasonique -----	59
<b>Figure III.8.</b> Variation de la vitesse ultrasonique en fonction des teneurs en diatomite --	61
<b>Figure III.9.</b> L'appareil de mesures les résistances mécaniques -----	62

<b>Figure III.10.</b> Essai de compression -----	62
<b>Figure III.11.</b> Évolution temporelle des propriétés de résistance à la flexion -----	63
<b>Figure III.12.</b> Essai de flexion-----	64
<b>Figure III.13.</b> Évolution temporelle des propriétés de résistance à la flexion pour les Différentes variations de diatomite examinées-----	65

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Principaux gisements de diatomite d'Algérie -----	18
<b>Tableau I.2.</b> La composition chimique en % de quelques diatomites exploitées dans le Monde) -----	25
<b>Tableau I.3.</b> Propriétés physico-chimiques de différents types de kieselguhr -----	29
<b>Tableau II.1.</b> Composition chimique de base de la diatomite-----	36
<b>Tableau II.2</b> .Composantes chimiques de DRX -----	40
<b>Tableau II.3</b> .Surface spécifique de l'adsorbant -----	45
<b>Tableau II.4</b> .Valeurs de $\Delta$ pH en fonction du pH-----	47
<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de base de la diatomite -----	50
<b>Tableau III.2</b> .Composition chimique du clinker blanc et gris -----	50
<b>Tableau III.3</b> .Résistances à la compression en MPa -----	50
<b>Tableau III.4</b> .Propriétés chimiques du ciment portland blanc -----	50
<b>Tableau III.5</b> .compositions chimiques et minéralogiques et les caractéristiques Physico-mécaniques du ciment CEM II 42.5R-----	51
<b>Tableau III.6</b> .Formulation des compositions des mélanges de pâte de ciment-----	52
<b>Tableau III.7</b> .les étapes de malaxage des pâtes de ciment-----	53
<b>Tableau III.8</b> .essai réalisées sur pate de ciment + diatomite -----	55
<b>Tableau III.9.</b> Mesure de la masse volumique apparente-----	56
<b>Tableau III.10.</b> Mesures de la masse volumique absolue -----	57
<b>Tableau III.11</b> la vitesse de propagation et la qualité du matériau -----	60
<b>Tableau III.12</b> .Mesures de grandeurs physiques par l'appareil ultrasonique-----	60
<b>Tableau III.13</b> .L'évolution temporelle des résistances à la compression trois points Des différents variantes de diatomite a été étudiée-----	63
<b>Tableau III.14</b> .L'évolution temporelle des résistances en flexion des différentes Variantes de diatomite a été étudiée -----	64

### الملخص

يمثل استخدام الدياتومييت الطبيعي كمادة أساسية في تركيب العجائن الإسمنتية نهجًا مبتكرًا ومستدامًا في مجال مواد البناء. يهدف هذا العمل إلى دراسة الأداء الفيزيائي والميكانيكي لعجائن تعتمد بشكل رئيسي على الدياتومييت، حيث يُستخدم الإسمنت فيها كمادة رابطة ثانوية.

تم تحضير عجائن بنسب مختلفة من الدياتومييت تتراوح بين 70% و95%، ممزوجة بالإسمنت وعلى عكس دراسات أخرى، لم تخضع الدياتومييت لأي معالجة حرارية، وتم استخدامها بحالتها الطبيعية الخام.

يهدف البحث إلى تثمين الدياتومييت كمادة فعالة رئيسية، مع تقليل كمية الإسمنت المستعملة، من أجل الحد من الأثر البيئي للمواد الرابطة الهيدروليكية. تم تقييم العجائن من حيث القابلية للتشكيل، ومقاومة الضغط، والبنية المجهرية.

أظهرت النتائج أن استعمال الدياتومييت بنسب عالية ممكن تقنيًا. وعلى الرغم من انخفاض المقاومة الميكانيكية مع تقليل محتوى الإسمنت، فإن بعض التركيبات، وخصوصًا نسب من 70% إلى 80% دياتومييت ومن 20% إلى 30% إسمنت، أظهرت توازنًا جيدًا بين الأداء الميكانيكي والبعد البيئي. تؤكد هذه الدراسة أن الدياتومييت يمكن أن يلعب دورًا رئيسيًا في تصميم مواد إسمنتية بديلة وأكثر استدامة.

## Abstract

The use of natural diatomite as the primary material in the formulation of cementitious pastes represents an innovative and sustainable approach in the field of construction materials. This study aims to evaluate the physical and mechanical performance of pastes based primarily on diatomite, in which cement is used as a secondary binder.

Pastes were prepared with varying proportions of diatomite ranging from 70% to 95%, mixed with cement. Unlike other studies, the diatomite used in this research was not thermally treated and was employed in its raw natural state.

The objective is to promote diatomite as an active primary material while reducing the cement content in order to minimize the environmental impact of hydraulic binders. The pastes were assessed in terms of workability, compressive strength, and microstructural characteristics.

The results indicate that high-percentage incorporation of diatomite is technically feasible. Although mechanical strength decreases as cement content is reduced, certain mixtures—particularly the one with 70% to 80% diatomite and 20% to 30% cement—demonstrated a good balance between mechanical performance and environmental sustainability. This study confirms that diatomite can play a central role in the development of alternative, more eco-friendly cementitious materials

## Résumé

L'utilisation de la diatomite naturelle comme matériau principal dans la formulation des pâtes cimentaires représente une approche innovante et durable dans le domaine des matériaux de construction. Ce travail vise à étudier les performances physico-mécaniques de pâtes à base de diatomite, dans lesquelles le ciment est utilisé comme liant secondaire.

Des pâtes ont été préparées avec différentes proportions de diatomite, allant de 70% à 95%, mélangée avec du ciment. Contrairement à d'autres recherches, la diatomite utilisée n'a subi aucun traitement thermique, et a été employée à l'état brut.

L'objectif est de valoriser la diatomite comme matériau actif principal, tout en réduisant la teneur en ciment, afin de limiter l'impact environnemental du liant hydraulique. Les pâtes ont été évaluées en termes de maniabilité, de résistance mécanique (principalement à la compression), et d'aspect microstructural.

Les résultats montrent que l'incorporation de la diatomite à haute teneur est techniquement faisable. Bien que la résistance diminue avec la réduction du ciment, les formulations 70% à 80% de diatomite et 20% à 30% de ciment offrent un bon compromis entre durabilité environnementale et performance mécanique minimale. Cette étude démontre que la diatomite peut jouer un rôle central dans la conception de matériaux cimentaires alternatifs plus écologiques.

L'idée du thème est née pour valoriser la terre de la diatomite qui existe d'une façon abondante en Algérie, notamment dans la région nord-ouest. La valorisation cible l'utilisation de la diatomite dans les matériaux de génie civil.

D'une part, la diatomite peut être introduite dans le procédé de fabrication du ciment, afin de réduire le coût de la production des ciments et de limiter le dégagement de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> qui pollue simultanément l'air et l'environnement.

D'autre part, la diatomite peut remplacer partiellement le ciment dans la confection des bétons, des briques et des mortiers de revêtement, afin de modifier leurs propriétés physiques et mécaniques.

### **Argumentation et But de la Recherche**

Le domaine de l'industrie de construction en génie civil s'intéresse à la fabrication économique des ciments écologiques, à l'amélioration des résistances mécaniques et donne surtout à la modification des caractéristiques physiques du béton une attention particulière.

En effet, suite à la nature friable et du caractère pouzzolanique de la diatomite, et suite à ses propriétés physiques, une attention particulière sera dégagée pour la valorisation et à la vulgarisation de l'utilisation de la diatomite soit comme ajout dans la fabrication du ciment ou comme produit de béton plus légers et plus isolants.

Le but de ce mémoire est d'incorporer la diatomite dans la confection des pâtes. Il s'agit de trouver quel type de traitement et quel dosage de la diatomite qui assure des bonnes résistances mécaniques.

Tant dans la fabrication des ciments où les cimenteries peuvent l'utiliser comme un ajout garantissant la fabrication d'un produit écologique et économique. Tant dans la formulation des bétons à haute performance. Tant dans la fabrication des produits à un niveau d'isolation thermique élevé, grâce à l'exploitation de la structure poreuse de la diatomite.

Aussi, l'objectif de ce travail est d'illustrer la valeur économique de l'emploi de la diatomite.

### **Plan de Travail**

En plus de l'introduction générale et de la conclusion générale, le présent mémoire s'articule autour de trois (03) chapitres :

**Le premier chapitre** est consacré à la synthèse bibliographique sur la définition de la diatomite, les procédés de sa production, ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques.

**Le deuxième chapitre** est de mettre en évidence les caractéristiques microstructurales et macrostructurales de la diatomite

**Le troisième chapitre** décrit la méthodologie des essais à effectuer pour déterminer les propriétés mécaniques, les caractéristiques physiques des pâtes. Présente les résultats de l'étude des propriétés à l'état frais et durci des pâtes formulées.

**A la Fin** de ce mémoire, une conclusion finale est dressée suivie par des recommandations.

---

# *Chapitre I*

## *Recherches Bibliographiques*

---

## I.1. Généralité sur diatomite

La diatomite ou terre à diatomées (appelée aussi kieselguhr) est une roche sédimentaire formée par l'accumulation en milieu aquatique de carapaces siliceuses finement structurées de micro-organisme qui revêt une importance dans la fabrication économique des ciments écologique, à l'amélioration des résistance mécanique et donne surtout à la modification des caractéristiques physique des matériaux cimentaire une attention particulière.

La nature friable et du caractère pouzzolanique de la diatomite, et suite à ses propriétés physiques, une attention particulière sera dégagée pour la valorisation et à la vulgarisation de l'utilisation de la diatomite comme une produit de béton plus légers et plus isolants.

### I.1.1. Définition

La diatomite est une roche sédimentaire légère qui se compose principalement de coquilles extrêmement poreuses. Les diatomées sont de minuscules Des organismes constitués d'une seule cellule semblables à des algues, mesurant généralement entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , et possédant une coque siliceuse robuste. Cette roche se présente sous une couleur claire et suscite un intérêt particulier En raison de ses caractéristiques distinctives, telles qu'une porosité élevée (entre 80 % et 90 %), une perméabilité élevée, une légèreté, Une granulométrie réduite, une surface spécifique considérable, une faible conductivité thermique, une inertie chimique et des pores micro cellulaires bien développés caractérisent cette matière.



**Figure 1.1:** Diatomées

### I.1.2.Types de diatomite

La diatomite peut être classée en différents types en fonction de divers facteurs tels que son origine, sa composition et sa pureté :

- **Diatomite marine** : Formé dans les environnements marins, généralement dans les sédiments des océans ou des mers. Son caractéristique Contient des diatomées qui ont prospéré dans des conditions d'eau salée.

La diatomite marine peut avoir une teneur en sel plus élevée que la diatomite d'eau douce.

- **Diatomite d'eau douce** : il Formé dans des environnements d'eau douce, tels que les lacs, les rivières et les étangs, Contient des diatomées adaptées aux conditions d'eau douce.

- **Diatomite de haute pureté** : Diatomite avec un pourcentage élevé de silice pure. Il est apprécié pour son utilisation dans des applications où la pureté est essentielle, comme dans la production de produits pharmaceutiques ou de filtres haute performance.

- **Diatomite de qualité naturelle** : Diatomite avec un mélange naturel de silice et d'impuretés. Il est souvent utilisé dans des applications moins exigeantes, comme en agriculture ou comme amendement du sol.

- **Diatomite calcinée** : la Diatomite calcinée ayant subi un processus appelé calcination, impliquant le chauffage du matériau à des températures élevées.

L'objectif est de modifier les propriétés physiques et chimiques de la diatomite, la rendant plus poreuse et augmentant sa stabilité thermique. Ce type est souvent utilisé dans des applications telles que la filtration et comme additif fonctionnel dans diverses industries.

- **Diatomite amorphe** : ce type de Diatomite est de structure majoritairement amorphe (non cristalline).et connue pour sa surface spécifique élevée et ses propriétés absorbantes, ce qui la rend adaptée à des utilisations telles que la litière pour chats et les absorbants.

- **Diatomite calcinée par flux** : Diatomite ayant subi une calcination par flux, un processus de calcination spécialisé impliquant l'ajout d'agents fondants.

La diatomite calcinée par flux possède des propriétés thermiques et chimiques améliorées, ce qui la rend adaptée aux applications dans la production de réfractaires, de supports de catalyseurs et d'autres processus à haute température.

- **Terre de Diatomées (DE)** : Souvent utilisé comme terme générique pour désigner la diatomite naturelle et calcinée.

La terre de diatomées est largement utilisée dans diverses applications, notamment la filtration, les insecticides, les absorbants et comme amendement du sol.

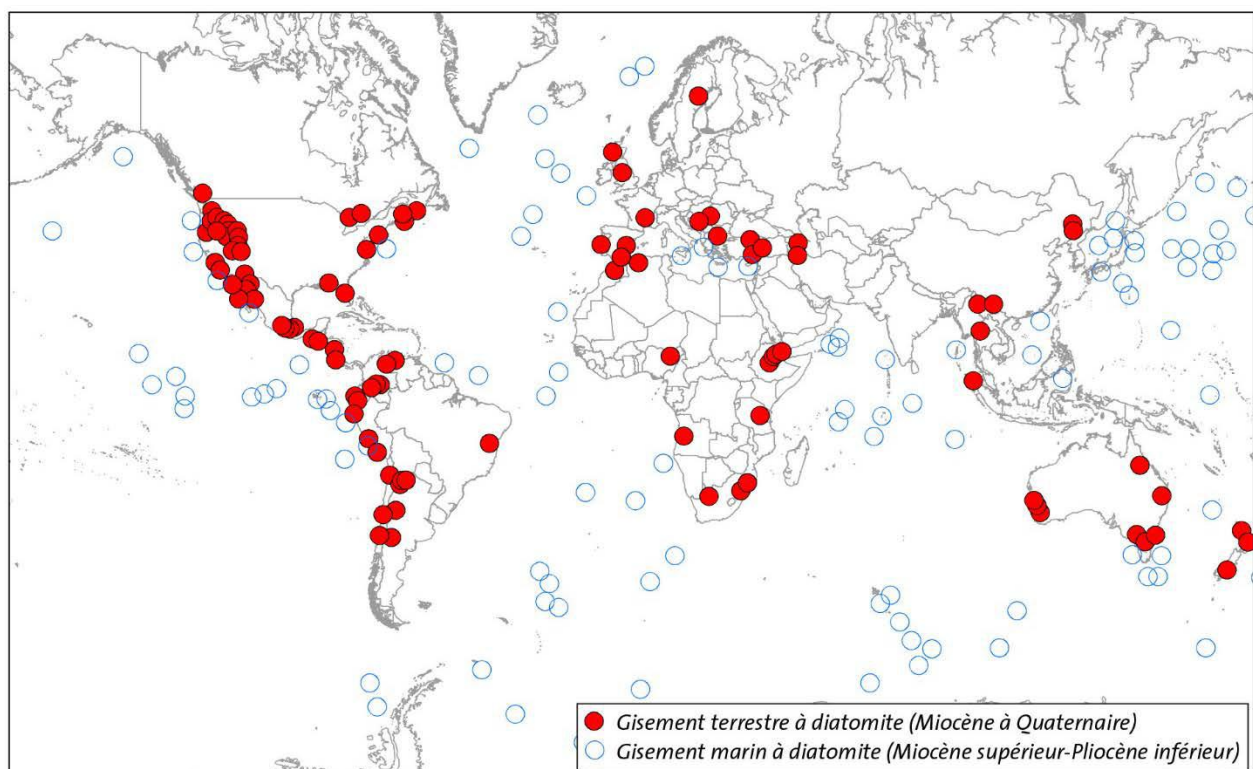
La classification des types de diatomites repose souvent sur les exigences spécifiques des industries et des applications. Les diverses caractéristiques de la diatomite en font un matériau polyvalent offrant un large éventail d'utilisations dans divers secteurs.

### I.1.3. Les principaux gisements de la diatomite

La production mondiale de diatomite par le monde se trouve dans des régions où les conditions climatiques et géologiques ont favorisé la prolifération des diatomées, notamment aux États-Unis, au Danemark, en Chine, en France et en Turquie. Ces pays disposent de grands gisements exploitables, souvent associés à des lacs anciens ou à des environnements marins.

L'Afrique (Kenya, Maroc, Mozambique, Egypte, Afrique du Sud, Nigéria) n'est pas en reste. Ces pays affichent une production annuelle comprise entre 1 000 et 5 000 tonnes [1]

#### I.1.3.1. Dans le monde



**Figure 1.2 :** de localisation des principaux sites diatomitiques du monde (synthèse des travaux antérieurs) [1]

Selon les données de L'USGS (United states geological Survey) les principaux pays producteurs de diatomite en **2024** avec une totale d'environ 3 millions de tonnes répartie comme suite [2] :

**États-Unis : 830 000 tonne** ; La région de la Californie est l'un des plus grands producteurs, avec des dépôts de haute pureté

**Danemark : 440 000 tonne** ; se trouvent dans le nord-ouest du pays, notamment sur les îles de FUR et MORS

**Chine : 270 000 tonne** ; De nombreux gisements se trouvent dans les provinces de Jilin et de Zhejiang.

**France : 250 000 tonne** ; Les gisements dans le bassin de Paris sont connus pour leur qualité et leur accessibilité.

**Turquie : 210 000 tonne** ; Les principaux gisements se situent dans la région de l'Anatolie centrale

**Argentine : 100 000 tonne** ; Les gisements se situent dans les provinces de Neuquén, le rioja, rio negro.

**Mexique : 100 000 tonne** Les gisements se situent dans les régions de Guadalajara, Michoacán et Tlaxcala.

**Pérou : 100 000 tonne** ; Les principaux gisements se situent dans la côte sud et nord du pays

**Afrique** : Des gisements existent en Algérie, au Maroc et en Éthiopie, mais leur exploitation reste limitée.

### **I.1.3.2. Dans l'Algérie**

L'Algérie possède plusieurs gisements de diatomite, notamment dans le nord-ouest du pays. Les plus importants de ces gisements sont: le plus connu Tahalait près de Sig, de Ouillis près de Mostaganem, Chlef, Mohammadia, Ain L'araba, Hammam Bouhadjar [03].

Dans ces gisements, l'épaisseur des couches varie entre 20 et 50m [04]. Et des réserves sont estimées à 6,5 millions de tonnes dans une étude menée pour le Ministère de l'Industrie et des Mines en 2015 [04]. Elle affiche une production annuelle de 3 000 tonnes en 2005 [06].

Les principaux gisements de diatomite d'Algérie se situent dans la région Ouest et sont présentés dans le tableau 1.1 [07].

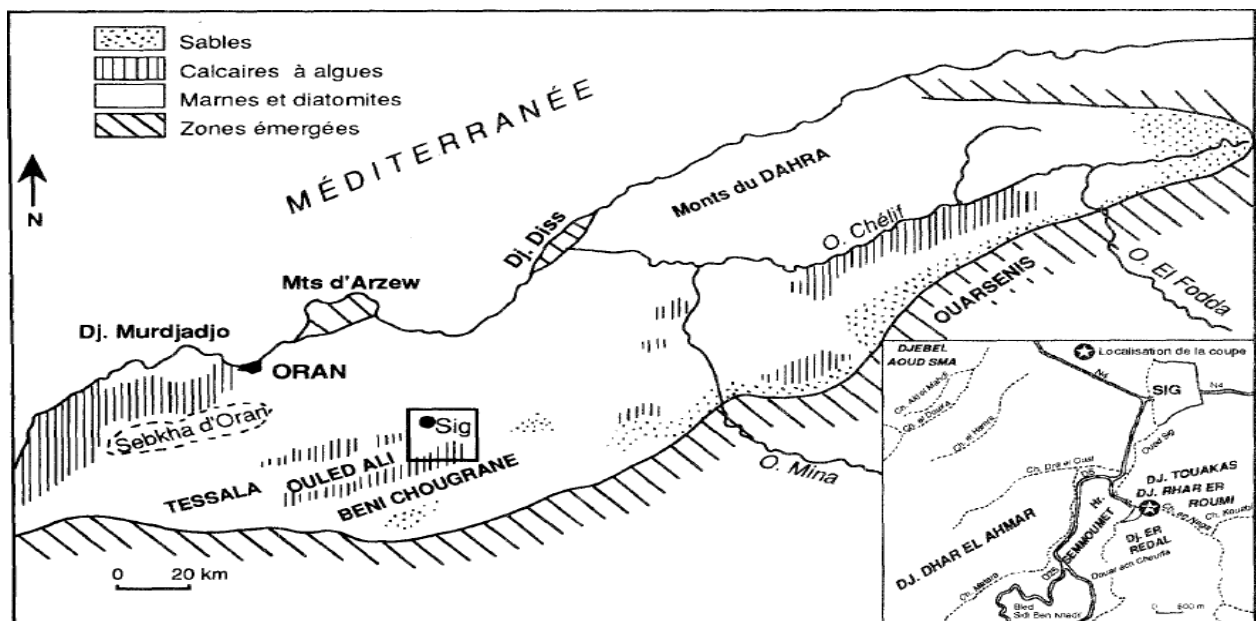
Tableau1.1 : Principaux gisements de diatomite d'Algérie[07]

Gisement (wilaya)	Accès desserte	Géologie	Composition qualité	Utilisations (production)	Réserve, conditions de gisement
<b>Noumène (Tlemcen)</b>	CW108 : 4km Port de Ghazaouet à 40km	Diatomite Avec marnes (Miocène)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6,0% SiO <sub>2</sub> 57,5% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2,3% CaO 13,34% MgO 2,3% K <sub>2</sub> O 0,87%	Charge et absorbant	Très importantes, faible recouvrement
<b>Grimez secteurs chadlia et Tahalait- (Mascara)</b>	Prox. RN4- RN6 Usine : à 16km Port de Ghazaouet 50km	Miocène terminal	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3,32% SiO <sub>2</sub> 59,86% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,5% CaO 12,8% MgO 4,73%	Filtration, Charge et absorbant	1 Mt exploitables réserves géologiques : 6Mt (5 à 7 couches de 0,5 à 4 m d'épaisseur)
<b>Mascara</b>	Prox. RN13	Miocène terminal	Qualité moyenne	Charge, ciment	8 couches de 0,4 à 4,5m d'épaisseur, gisement à réévaluer
<b>AbdelMalek Ramdane (ex Ouillis) (Mostaganem)</b>	Prox, RN11 Port : Mostaganem 35km	Miocène supérieur	SiO <sub>2</sub> >80% Peu carbonatée	Charge, absorbant, ciment. Exploitation arrêtée	Environ 15 couches de 0,2 à 1m sur 20m d'épaisseur (surface 3 ha, peu de recouvrement) Gisement à réévaluer.
<b>Beni zagouani (Mostaganem)</b>	Prox. RN11	Miocène terminal		Charge, absorbant, ciment	Réserves 0,36 Mt
<b>Djebel Meni (Mostaganem)</b>	Prox. RN11	Miocène	Peu carbonatée	Charge, absorbant, ciment	Couche de 1,5m d'épaisseur
<b>Guellal (Mostaganem et Relizane)</b>	Prox.CW8A	Miocène terminal	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3,5% SiO <sub>2</sub> 61,6% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2% CaO 13,3% MgO 0,96% K <sub>2</sub> O 0,6%	Charge, absorbant, ciment	Couche de 0,5m à 2m d'épaisseur

- **Formation diatomitique de la région du Sig:**
- Le gisement de la région du Sig est situé à la retombée nord-occidentale de Beni-Chougrane, soit à 1,5 km au sud de la ville du Sig. Il se trouve sur la rive droite de l'Oued Sig en amont du barrage (Figure 1.3) [05]. Le gisement est composé de trois membres.

Les premiers bancs de diatomite apparaissent. Quant au second, une alternance entre des bancs de diatomite et de marnes est observée sur 20 m. Le troisième membre, les bancs de diatomites alternent de manière plus ou moins régulière avec des calcaires et des marnes.

Ces membres de diatomite sont surmontés par d'épaisse couche de sable, de grés, de marne et de gypse. Cette formation diatomitique s'est déposée dans un intervalle de temps compris entre 6,1 et 5,8 millions d'années.



**Figure 1.3 :** situation géographique du gisement de la région du Sig [05]

#### I.1.4. Structure de la diatomite

Les propriétés importantes des diatomites sont liées à leur structure physique qui forme un agrégat de fines particules perforées suivant un motif régulier de petits pores. En raison de cette porosité qui lui octroie une forte perméabilité. La diatomite présente une structure physique complexe, finement divisée du fait de la juxtaposition des frustules de diatomées qui sont de très petite dimension (10 à 150  $\mu$ m le plus souvent) et de forme variée et irrégulière.

Cette structure contenant jusqu'à 80-90% de vide varie en fonction des espèces et des types de diatomées. La terre de diatomées est constituée principalement de silice présente soit sous la forme d'un pont siloxane Si-O-Si compris dans la structure squelettique de la terre de diatomées, soit sous forme de groupes de silanol Si-OH situés à la surface du matériau.

La diatomite se compose d'une grande variété de diatomées de formes et de tailles différentes dans une structure de diatomées de formes et de tailles très variées dans une structure

### I.1.4.1. Les types des Surfaces de la diatomite

La surface des diatomites brutes est siliceuse à environ 90%. Elle est constituée d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ). Cette surface de diatomite naturelle renferme majoritairement des liaisons de monoxyde de silicium  $\text{SiO}$ . Chaque atome de silicium est associé à quatre atomes d'oxygène.

La surface de la silice est généralement recouverte de groupes hydroxyle  $\text{OH}$ , qui ont un rôle important dans les propriétés d'adsorption de la silice.

Il existe trois types de silanols. Ce sont des groupes silanols isolés, géminaux et vicinaux, comme illustrés par les figures ci-dessous.

Dans les groupes silanols isolés dans lequel l'atome de silicium est lié à la masse par trois liaisons. Quant au quatrième silanol, il a un groupe hydroxyle isolé qui ne peut pas interagir avec un autre groupe silanol adjacent (Figure 1.4).

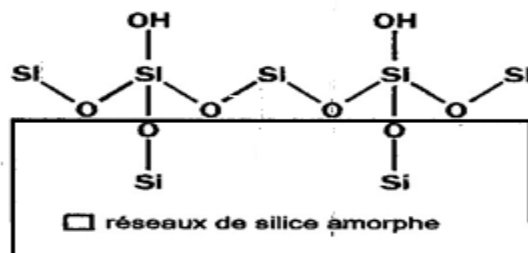


Figure 1.4 : Structure des groupes silanol isolés.

Les groupes silanols géminaux ou deux groupes silanols sont liés à un même atome de silicium comme le montre la figure ci-dessous (Figure 1.5).

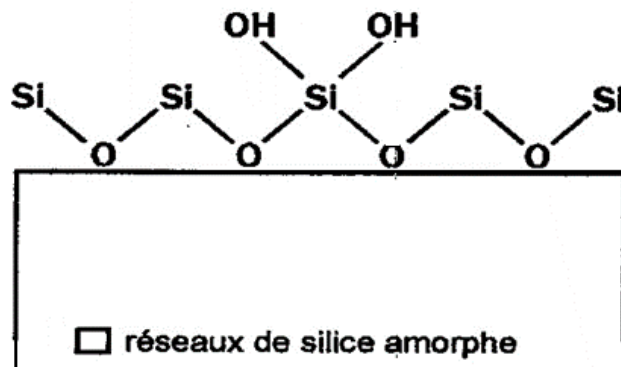
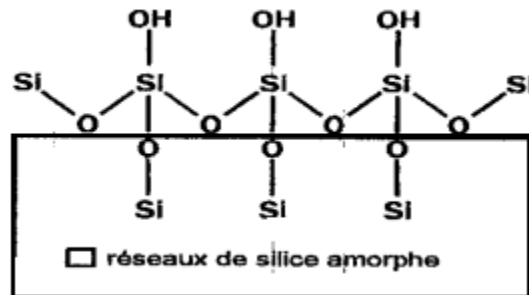


Figure 1.5 : Structure des groupes silanols germinaux

Enfin, les groupements silanols vicinaux sont portés par deux atomes de silicium adjacents, comme le montre la figure ci-dessous (Figure 1.6).

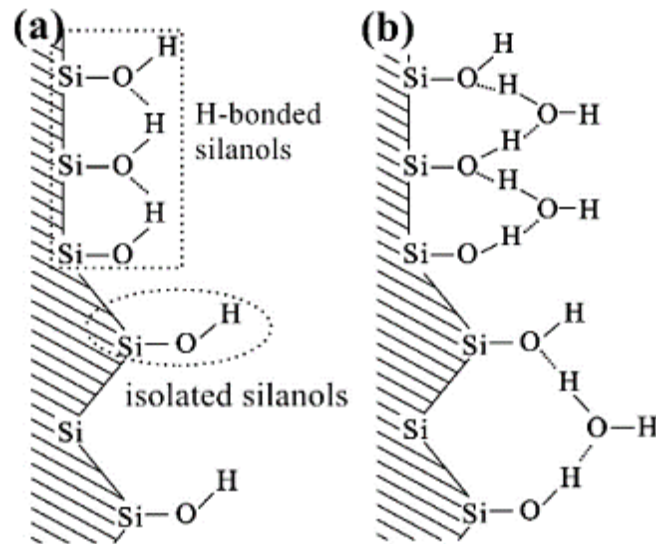


**Figure 1.6:** Structure des groupes silanols vicinaux.

Il convient de noter que ces groupes silanols sont responsables du caractère hydrophile de la surface de la silice car ils peuvent interagir avec l'eau par une liaison hydrogène. Le nombre de groupes silanols peut conduire à des surfaces très hydrophiles et vice versa. En d'autres termes, les silanols isolés prédominent ainsi sur la surface déshydratée. Lorsque le degré d'hydratation augmente, le taux de liaison augmente, ce qui diminue la quantité de silanols libres [08].

Les silanols isolés et liés par H à la surface de la diatomite sont liés à l'eau physiquement adsorbée à température ambiante. Le silicium hydroxyle peut se dissocier en  $\text{Si-O}^-$  et  $\text{H}^+$  ce qui donne une surface chargée négativement. Par conséquent, la diatomite présente une mobilité électrophorétique négative, des propriétés d'adsorption et d'échange de cations (par exemple, des cations métalliques ou colorants).

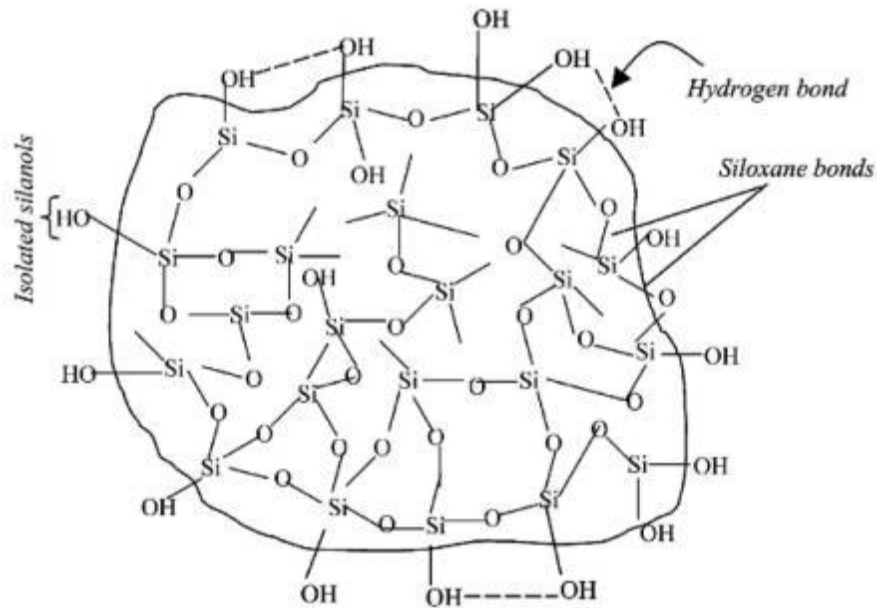
La diatomite est électropositive par protonation lorsque le pH est inférieur au  $\text{pHPZC}$  (pH où la charge nette est nulle). Par conséquent, la diatomite peut posséder une excellente capacité d'adsorption sur les cations et les anions en modifiant le pH de la solution.



**Figure 1.7 :** Structure hydroxyle à la surface de la diatomite : (a) isolée, (b) liée à l'eau physiquement adsorbée [09]

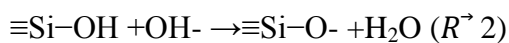
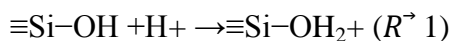
La diatomite est couramment utilisée comme adsorbant pour l'élimination des métaux lourds lors du traitement de l'eau en raison de ses propriétés physiques et chimiques uniques [08]. Généralement, les interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant se produisent à la surface de l'eau. Compte tenu de la quantité limitée de groupes hydroxyle électronégatifs à la surface de la diatomite, la modification de la surface est nécessaire pour éliminer les différents métaux lourds présents dans l'eau. Plusieurs méthodologies de modification de la diatomite, telles que la calcination, l'acidification et la fonctionnalisation et la fonctionnalisation organique.

Les groupes silanol isolés (-SiOH), le groupe silanol double libre ( $-i(\text{OH})_2$ ), et les ponts -Si-O-Si avec des atomes d'oxygène sont séparés à la surface de la silice [10]. (Figure 1.8). On trouve également une grande quantité de groupes silanol (-OH) à la surface de la diatomite.



**Figure 1.8 :** Différents types de liaisons à la surface de la silice

Les groupes silanol (-OH) s'ionisent dans une solution aqueuse et gagnent ou perdent des protons en fonction du pH. À faible pH, la diatomite est chargée positivement en raison du gain de protons par le groupe -OH (Réaction 1). En revanche, la surface perd des protons et se charge négativement à un pH élevé (Réaction 2).



Ainsi, l'ion hydrogène ( $\text{H}^+$ ) en compétition avec les cations (ions métalliques) et les groupes chimiques à la surface de la diatomite est le principal processus d'adsorption à faible pH [09].

### I.1.5. Propriétés physiques et spécifications :

La diatomite est une roche légère riche en silice qui résulte de l'accumulation de frustules (enveloppes siliceuses) de diatomées à l'échelle microscopique. En raison de ses caractéristiques physico-chimiques spécifiques, elle est utilisée dans divers secteurs industriels : filtration, charge minérale, production de briques, agrégats légers pour le ciment Portland, et également dans les domaines du biomédical et de la cosmétique.

Deux attributs principaux sous-tendent ces utilisations : sa composition chimique et sa structure physique, qui lui procurent d'autres caractéristiques primordiales telles que la porosité, le potentiel d'absorption, la surface spécifique, l'inertie chimique et la réfractarité. Différents procédés industriels peuvent permettre de moduler ces caractéristiques.

Dans son état brut, la diatomite est constituée principalement de silice ( $\text{SiO}_2$ ), représentant entre 85 et 94 % de sa composition. Elle renferme aussi d'autres oxydes tels que  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$ , qui sont des marqueurs de la présence d'impuretés (argiles, carbonates, matière organique).

Il s'agit d'une roche extrêmement légère (avec une densité variant entre 0,2 et 0,3, ce qui équivaut à 200-300  $\text{kg/m}^3$ ), caractérisée par sa porosité, sa composition de 50 à 70 % d'eau et sa friabilité. Sa teinte pâle peut osciller entre le gris clair et le bleu-vert, voire atteindre le blanc, en fonction de l'humidité et des impuretés présentes. D'un point de vue minéralogique, elle fait partie de la famille des opales et est constituée de silice amorphe hydratée dont la formule chimique est  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Elle est peu compacte et se coupe facilement en minces couches de quelques millimètres.

Sur le plan chimique, la diatomite est inerte, ce qui veut dire qu'elle est résistante aux acides et aux bases faibles, à l'exception de l'acide fluorhydrique. Cependant, dans un environnement fortement alcalin, elle possède une propriété pouzzolanique : à température ordinaire et en contact avec l'eau, elle interagit avec la chaux pour produire des composés stables aux caractéristiques comparables à celles du ciment hydraulique. Elle présente aussi une réfractairité modérée, avec un point de ramollissement se situant entre 1400 et 1600 °C. Elle présente une structure très délicate et complexe, issue de l'organisation de frustules de diatomées dont la taille varie entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . La forme, qui diffère d'une espèce à l'autre, a un impact sur les propriétés physiques. Par exemple, les frustules en forme d'aiguille nuisent à la filtration tout en améliorant l'efficacité de la clarification.

La diatomite se caractérise également par un certain nombre de propriétés physiques distinctives :

- Densité apparente basse : de 0,08 à 0,5 en état sec (0,13 pour les poudres non tamisées, 0,45 pour les blocs) ; 1,3 pour le matériau humide brut ; la densité réelle avoisine les 2,1, semblable à celle de l'opale.
- Porosité extrêmement haute : variant entre 85 et 95 %, due à la surface de contact limitée entre les frustules.
- Faible conductivité thermique : se situant entre 0,07 et 0,2  $\text{kcal/m.h.}^\circ\text{C}$ , cela lui confère d'excellentes qualités d'isolations.
- Superficie spécifique significative : variant de 3 à 38  $\text{m}^2/\text{g}$  en fonction des produits.
- Excellente capacité d'absorption : capable d'absorber jusqu'à 4,5 fois son poids en liquide (par exemple, entre 100 et 300  $\text{cm}^3$  d'huile pour 100 mg).

- Dureté intermédiaire : située entre 4,5 et 6,0 (selon l'échelle de Mohs) pour les particules, elle est approximativement de 1,5 en termes de masse, ce qui la qualifie d'abrasif léger.

**Tableau 1.2** : la composition chimique en % de quelques diatomites exploitées dans le monde [11].

Échantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Pertes
La chine	82.9	5.75	1.41	0.69	0.06	0.06	0.24	0.21	7.93
Turque	76.5	7.25	3.85	0.5	0.45	0.85	-	-	0.43
Egypt.	83.6	4.24	1.07	-	-	-	6.17	-	4.86
Algérie	72.1	5.3	3.8	0.37	0.65	0.54	7.2	2.6	7.44
Jordanie	72.5	11.42	5.81	-	7.21	0.96	1.48	0.25	0.64
Mexique	70.38	13.52	3.37	-	0.17	0.3	0.66	0.42	11.18
Guangdong	90.1	-	0.3	0.4	-	-	0.5	0.2	8.5
ShengZhou, la province due Zhejiang en Chine	65	17.50	4.8	-	0.5	-	1.1	-	11.1
La chine	62.8	9.7	11.4	-	7.3	-	-	-	8.8
Maroc	72	7.3	4.3	-	1.8	1.2	10	1	2.4
Suizhou. Chine	71.35	13.26	5.5	0.08	6.7	0.11	1.94	0.15	0.91
Caldiran. Bassin du lac Van. Anatolie orientale. Turquie	96.7	11.5	0.65	0.65	0.8	1.4	-	-	15.3
Sheng Zhou. Chine	89.6	2.5	1.8	-	1.5	-	0.1	-	5.45

L'analyse granulométrique sédimentaire de cette diatomite est présentée sur la figure I.9. L'analyse montre que 60% des particules ont un diamètre inférieur à 10 µm. Cette diatomite ne contient pas d'éléments grossiers car elle a un diamètre dans l'ensemble inférieur à 70 µm.

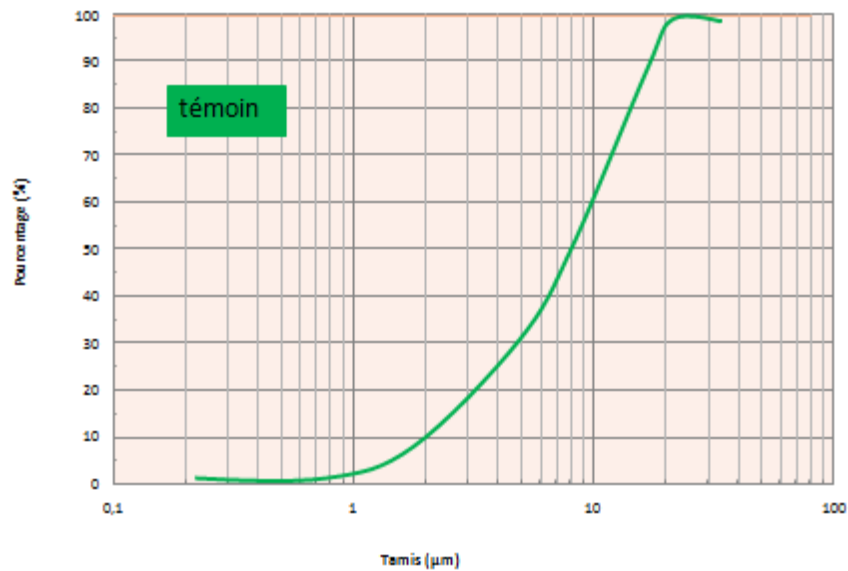
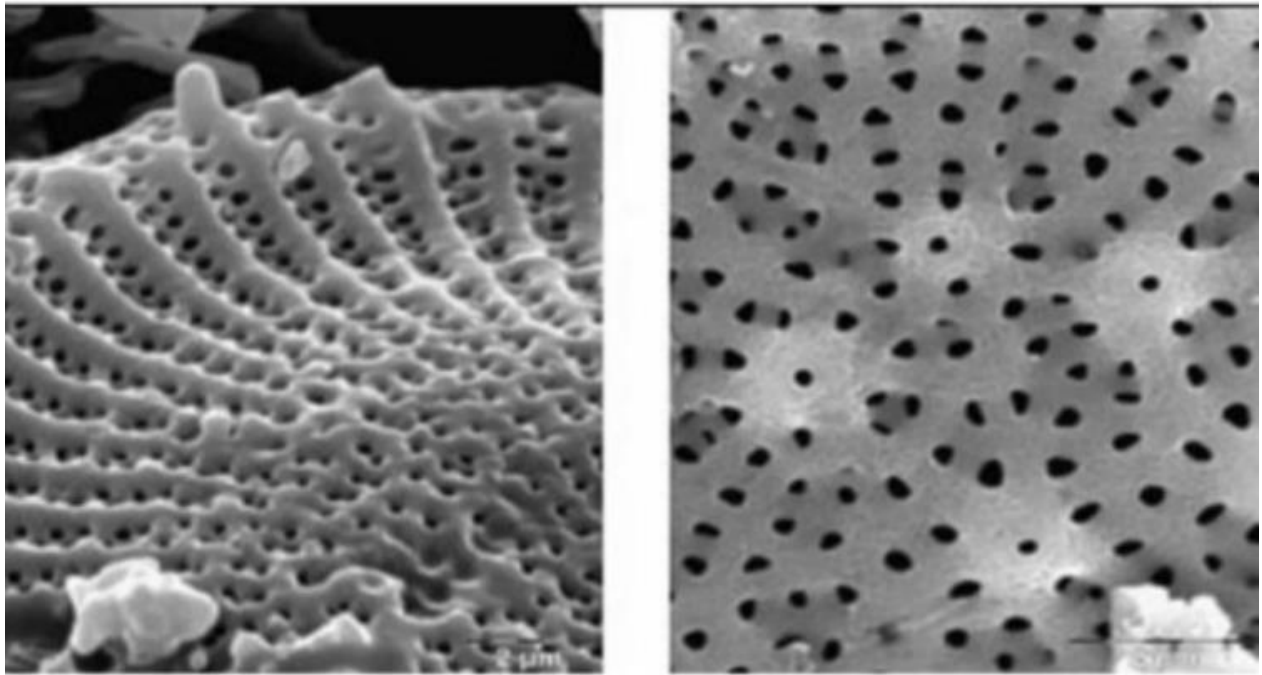


Figure 1.9 : courbe de l'analyse granulométrique sédimentaire de la diatomite brute [43]

### I.1.6. Propriété microscopique

Les diatomites possèdent des propriétés fondamentales liées à leur structure physique, constituée d'un ensemble de petites particules perforées présentant une organisation systématique de minuscules cavités (voir Figure I.10). Cette caractéristique de porosité confère à la diatomite une perméabilité notable [12], ce qui explique son utilisation répandue dans plusieurs secteurs industriels alimentaires pour filtrer l'eau, les jus, le vin et l'huile, dans le but de supprimer bactéries et protozoaires. Elle est aussi employée comme support chromatographique. Par ailleurs, en raison de sa teneur en silice opaline d'une finesse remarquable et sous forme amorphe, la diatomite sert également de source de silice réactive. Ces observations mettent en lumière la nature amorphe et la structure distinctive des diatomites.



**Figure 1.10** : La composition microscopique de la diatomite [12].

### **I.1.7. Classification de la diatomite (kieselguhr)**

Plusieurs critères ont été utilisés dans la classification des diatomées. Premièrement, la morphologie du test siliceux [13]. Certaines données écologiques, relatives au milieu de vie, ainsi qu'aux températures, pH et salinités supportées [14], sont quelquefois invoquées comme discriminantes. D'autres éléments de classification peuvent être la forme des chloroplastes (anciennement chromophores) [15] ou de celle des pyrénoides [16]. Certains auteurs préconisent en outre de prendre en considération les modalités de la reproduction et types de gamies des diatomées [17]. Enfin, les classifications précédentes peuvent se voir adjointes à une classification phylogénique sur base moléculaire, ou mises en comparaison avec cette dernière. L'étude des caractéristiques morphologiques via la microscopie optique a conduit dans un premier temps à la classification des diatomées en deux groupes, centriques et pennées, qui se différençaient par leur forme générale ainsi que par les axes de symétrie des frustules. En accord avec la classification sur critères morphologiques, les diatomées sont actuellement classées habituellement en trois grands groupes : centriques, pennées araphides et pennées raphides. Les diatomées centriques se reconnaissent à la symétrie centrale de leur frustule. Les diatomées pennées présentent quant à elles une symétrie bilatérale. Les pennées raphides se distinguent des pennées araphides par la présence sur au moins une de leurs valves d'un raphé. [18]. Suivant le type de traitement, on peut classer le kieselguhr en trois classes : diatomite naturelle qui reçoit un traitement mécanique, de la diatomite calcinée et on trouve aussi de la diatomite fluxée (activée). [19]

Les étapes de traitement pour différents types de kieselguhr sont présentées dans la figure 1.11

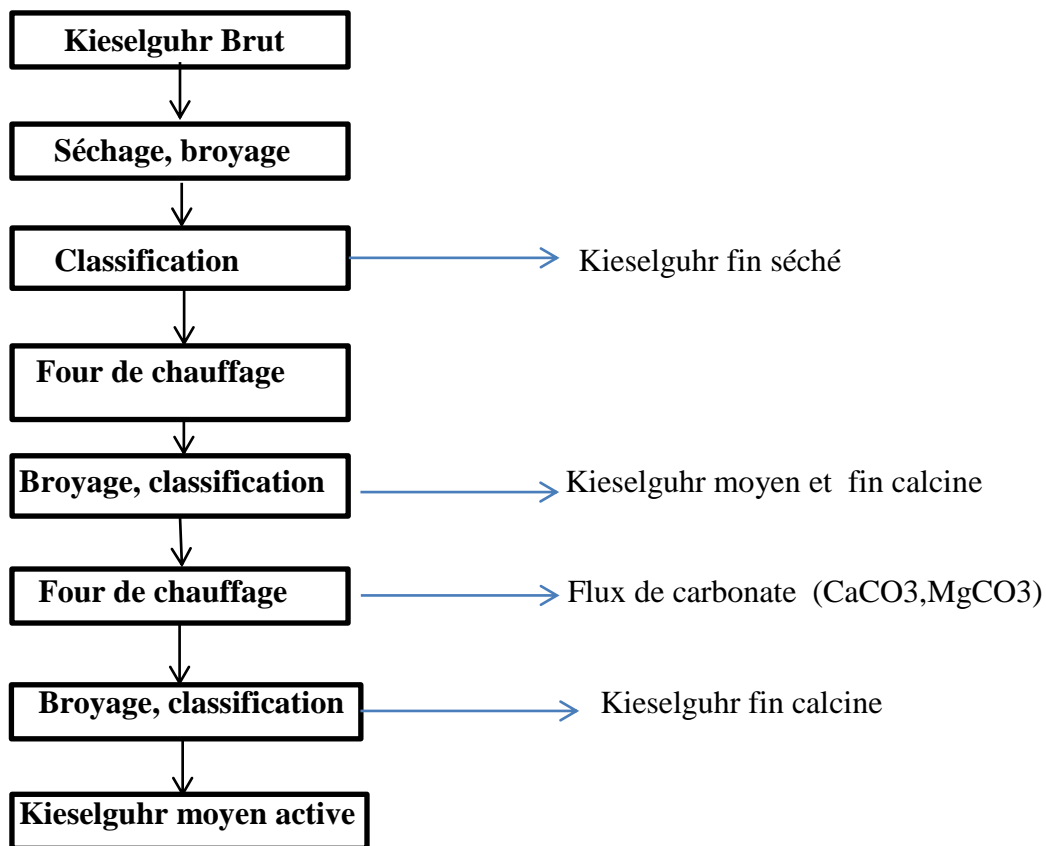


Figure 1.11 : Etapes de traitement de différents types de kieselguhr.

- ❖ **Kieselguhr sec** : Suivant les conditions climatiques où se trouve le gisement, les conditions de transport et de stockage du matériau, l'humidité peut varier de 30 à 65 %. Cette humidité peut être éliminée par séchage dans des fours.
- ❖ **Kieselguhr calciné** : Pour changer la taille des grains, on procède à un chauffage à des températures comprises entre 800 et 1000 °C. Le degré de consolidation des particules est fonction de cette température et du temps de traitement.
- ❖ **Kieselguhr activé** : Le kieselguhr est calciné avec ajout d'alcalin tel que du carbonate de sodium (1 à 6%). Les deux composés seront bien mélangés puis traités à des températures

de 1000 à 1200 °C. L'ajout de carbonate conduit à la formation de silicate de sodium, fondant nécessaire à l'agglomération des grains.

Le tableau 1.3 présente quelques propriétés physiques de différentes variétés de kieselguhr.

**Tableau 1.3** : Propriétés physico-chimiques de différents types de kieselguhr [19].

Propriétés	Kieselguhr Américain séché	Kieselguhr Danois calciné	Kieselguhr Américain calciné	Kieselguhr Français calciné	Kieselguhr Allemand calciné	Kieselguhr USA activé
Couleur	Blanche Grise	Jaune Marron	Rose	Jaune Marron	Marron	Blanche
pH	7	5.2	7.5	6.9	7	9.7
Diamètre moyen (µm)	14.2	19.3	15.9	14.1	13.9	30.1
Perméabilité (darcy)	0.06	0.09	0.28	0.09	0.08	1.6
Quantité cristalline %	2	2.2	7.6	9.2	9.8	59.7
Masse volumique (g/l)	288	280	271	255	209	290

### I.1.8. Domaine d'application et d'utilisation

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques distinctives, la diatomite est utilisée dans une grande diversité d'applications industrielles et environnementales. Grâce à sa structure alvéolée, sa porosité considérable, son faible poids et son inertie chimique, ce matériau polyvalent trouve des applications dans de nombreux domaines, y compris la construction, le filtrage, l'isolation thermique et la stabilisation du sol. Voici une description technique et approfondie de ses principaux champs d'application :

#### 1. Matériaux de Construction:

**a) Incorporation dans les ciments et bétons:** la diatomite est couramment employée dans le secteur du ciment et du béton. Quand elle est incorporée au ciment, sa haute concentration en silice interagit avec l'hydroxyde de calcium dégagé durant l'hydratation pour créer des hydrates de silicate de calcium (CSH), ce qui renforce la structure du béton.

- **Avantage :**
  - Amélioration de la résistance à la compression et à la flexion.
  - Réduction de la porosité du béton, augmentant sa durabilité et sa résistance aux agents agressifs comme les chlorures.
  - Réduction de l'empreinte carbone en remplaçant partiellement le ciment Portland, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus écologiques.

#### **b) Application dans les mortiers:**

La diatomite en tant qu'additif léger, trouve aussi son application dans les mortiers. Elle contribue à alléger les compositions tout en optimisant les caractéristiques thermiques, un avantage particulièrement appréciable pour des édifices requérant des matériaux à la fois légers et isolants.

#### **2. Amélioration des sols:**

La diatomite est essentielle pour la stabilisation des sols, notamment pour consolider les sols instables ou argileux. Elle sert à ajuster les caractéristiques des sols sensibles, en particulier dans le domaine de la construction civile et de la géotechnique.

**a) Stabilisation des sols argileux:** L'intégration de la diatomite aux sols argileux diminue leur plasticité et augmente leur portance, contribuant ainsi à renforcer la stabilité des fondations et des infrastructures. On l'utilise pour renforcer les sous-sols des routes et des fondations.

#### **b) Applications géotechniques:**

- **Renforcement des sous-sols :** Utilisée dans les projets de routes et de fondations pour augmenter la stabilité des sols.
- **Réduction du gonflement :** Aide à stabiliser les sols qui sont sensibles aux variations d'humidité.

### 3. Filtration et Drainage:

La diatomite est un filtre très efficace, employé pour la purification des eaux résiduaires et industrielles. Grâce à sa structure poreuse, elle a la capacité de capturer les impuretés et d'effectuer une purification efficace des liquides.

**a) Filtration des eaux usées et industrielles:** Elle est employée pour la purification de l'eau dans divers domaines industriels, y compris la gestion des eaux de pluie et les rejets de construction, grâce à sa grande perméabilité et ses propriétés filtrantes.

#### b) Avantages dans les systèmes de drainage

- **Réduction de l'encrassement des drains :** Empêche l'accumulation de particules fines dans les drains.
- **Amélioration du débit d'eau :** Grâce à sa perméabilité élevée, elle assure une meilleure circulation des eaux.
- **Utilisation dans les remblais et barrages :** La diatomite sert de filtre naturel pour empêcher les particules fines de bloquer les flux d'eau et maintenir la stabilité des structures, telles que les barrages.

**4. Matériaux Isolants:** La diatomite, en raison de sa faible conductivité thermique, est un matériau d'isolation thermique et acoustique prisé dans les applications de construction et d'industrie.

**a) Isolation thermique:** La diatomite, en tant qu'isolant, est employée pour minimiser les déperditions énergétiques dans les édifices, en particulier dans les murs et constructions industrielles soumis à des chaleurs intenses, tels que les chaudières et les fours. Les panneaux d'isolation thermique fabriqués à partir de diatomite assurent une excellente résistance thermique tout en étant de faible poids.

**b) Isolation acoustique:** Grâce à sa structure poreuse, la diatomite absorbe de manière efficace les ondes sonores. Elle est donc intégrée dans les revêtements acoustiques ou panneaux d'insonorisation pour minimiser les nuisances sonores dans des édifices tels que les studios, bureaux ou hôtels.

**c) Revêtements et peintures:** Elle est également utilisée comme **charge légère** dans les peintures et revêtements, offrant des propriétés d'isolation thermique et acoustique tout en permettant une finition esthétique.

### 5. Autres Applications Innovantes

**a) Matériaux réfractaires:** La diatomite est employée dans la production de briques réfractaires et d'autres matériaux résistants à des températures hautes. Ces matières sont employées

dans des applications industrielles comme les cheminées et fours industriels, où la résistance à la chaleur est primordiale.

#### **b) Projets de construction durable**

Dans le domaine de l'éco construction, la diatomite est appréciée pour son faible impact carbone et ses caractéristiques naturelles. Elle est surtout employée dans les constructions écologiques et dans les initiatives qui intègrent des matériaux recyclés. Par exemple, pour la fabrication de béton écologique, la diatomite représente une alternative intéressante au ciment, favorisant ainsi des méthodes de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

**c) Stabilisation des remblais:** Dans les projets de génie civil, la diatomite est utilisée pour réduire le poids des structures de remblais, minimisant ainsi les charges sur les fondations et améliorant la stabilité globale des structures.

## **I.2. les revues des recherches sur la diatomite**

- Des essais réalisés dans des projets routiers ont montré une augmentation de 25 % de la capacité portante des sols argileux après incorporation de 15 % de diatomite.
- Des recherches ont montré que l'ajout de 10 % à 20 % de diatomite calcinée dans les mélanges de béton peut augmenter la résistance à long terme de 10 % à 15 % par rapport à un béton classique. De plus, les propriétés d'auto-cicatrisation sont améliorées.

La valorisation d'une des ressources naturelles que possède l'Algérie. L'étude indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la diatomite pour produire des mortiers, des briques et la fabrication des ciments composés.

Afin de réduire l'effet de serre attribué aux émissions de CO<sub>2</sub> apportées par les industries cimentaires et afin d'optimiser leurs coût de production, la réalisation des mortiers par substitution d'une partie du ciment par de la diatomite conduit aux constatations et conclusions suivantes :

#### **Caractérisation De Diatomite Calcinée**

- La teneur en silice augmente avec l'augmentation de la température de calcination.
- La surface spécifique diminue jusqu'à la température de 600°C.
- La granulométrie devient grossière lorsque la température est inférieure ou égale à 800°C.

**Pates de ciment diatomite sans superplastifiant**

- Les mortiers de diatomite nécessitent un grand besoin en eau pour assurer une ouvrabilité acceptable.
- Le temps de prise des pâtes du ciment augmente avec l'augmentation du dosage de diatomite ; donc elle peut être utilisée comme un retardateur de prise.
- La résistance mécanique des pâtes du ciment est inversement proportionnelle avec le dosage de poudre diatomite
- La formulation qui donne les meilleures résistances est celle obtenue en remplaçant 15% du ciment par la diatomite calcinée à 600°C.
- L'utilisation de la diatomite sans adjuvant permet aussi d'avoir des mortiers et briques de performances physiques exploitables surtout dans l'isolation thermique.

**Pates De Ciment Diatomite Avec Superplastifiant**

- la prise de l'ensemble des pâtes de diatomite est moins rapide que celle de la pâte ordinaire.
- Les essais de compression ont montré que le remplacement partiel du ciment par de la diatomite permet d'avoir des ciments de performances mécaniques intéressante.

**Mortiers de diatomite avec poudre aluminium et chaux**

- Masse volumique très faible.
- La conductivité thermique de mortier de chaux et diatomite est plus faible que mortier ordinaire.

**Mortiers Diatomite Avec Chaux**

- La conductivité thermique de mortier de chaux et diatomite est faible que mortier ordinaire. Aussi, la conductivité thermique du mortier est inversement proportionnelle avec la température de calcination de diatomite.

**Durabilité des mortiers vis-à-vis des milieux agressifs**

- La présence de la diatomite dans les pâtes de ciment a entraîné une forte absorption d'eau. Cette absorption devient drastique, lorsque les pâtes sont formulées avec le superplastifiant.
- Jusqu'à l'âge de 28 j l'augmentation de dosage en diatomite provoque une augmentation de la perte de masse pour tous les solutions agressives (HCl, NaCl, CaSO<sub>4</sub> et NaOH).
- Pour chaque dosage en diatomite, le PH augmente à cause de l'absorption de la solution par la diatomite.

### **I.3. conclusion**

En conclure, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord les propriétés de la diatomite utilisée dans le béton. Nous précisons que :

- Sous l'appellation "diatomite " il existe des types très différents.
- Les caractéristiques des diatomites jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques.
- On remarque que la pâte à base ciment/diatomite est utilisable dans les matériaux de constructions.
- Cette dernière à utiliser dans plusieurs domaines, notamment construction, l'isolation thermique et Acoustique.

---

## *Chapitre II*

---

*Caractérisation microstructurales et  
macrostructurales des matériaux utilise et  
méthode d'essai*

## II.1 Introduction et historique

Dans de nombreux lacs du monde entier, ainsi que dans les environnements marins, les diatomées sont une composante importante des populations de phytoplancton (l'ensemble des organismes végétaux vivant en suspension dans l'eau). Les accumulations de diatomées sont connues dans tous les environnements aquatiques, y compris les zones humides, les lacs et l'environnement marin [20]. Dans les environnements marins, les accumulations de sédiments riches en diatomées remontent au crétacé supérieur [21], tandis que les plus anciens sédiments lacustres riches en diatomées datent de l'Éocène [22], avec de grands dépôts trouvés au Miocène [23]. Des accumulations massives de frustules de diatomées fossiles ont été observées dans de nombreux lacs situés dans des environnements riches en silice, en particulier dans des zones volcaniques et hydrothermales actives, comme le lac Yellowstone, aux États-Unis [24], le lac Myvatn, en Islande [25], ou le lac Challa, Tanzanie/Kenya [26]. Dans ces milieux, les concentrations élevées de silicium dissous favorisent la croissance des diatomées [27]. Cependant, de fortes concentrations de diatomées dans les sédiments ont également été observées dans des lacs sans influence volcanique ou hydrothermale, par exemple dans des lacs du nord de la Suède [28] ou du Lough Neagh, en Irlande [29].

## II.2. Gisement de diatomite situé à Sidi Lakhdar Mostaganem

Le gisement de la diatomite à Sidi Lakhdar, situé à 400 Km à l'Ouest d'Alger soit au l'Est de la wilaya de Mostaganem à 50Km de celle-ci.

Cette étude reposera sur une approche scientifique centrée sur le gisement de Mostaganem, Figure II.2, localisé dans l'ouest de l'Algérie. Ce gisement est caractérisé par des bancs de « diatomite », se présentant sous forme d'affleurements qui s'étendent sur une hauteur d'environ 10 mètres. Ces bancs se présentent distinctement sur de très longues distances, sous forme de couches intercalaires variables où l'épaisseur de la diatomite augmente en profondeur tandis que celle des stériles diminue. Les couches potentielles de diatomite se situent généralement à la base et sont relativement considérables. L'exploitation antérieure du gisement de Mostaganem s'est réalisée à ciel ouvert. Il est à souligner que le gisement de Mostaganem est un dépôt marin, et les couches de diatomées d'origine marine sont constituées par une roche très riche en silice.

Les coordonnées géographiques du Gisement de la Diatomite est de : **36° 7'14.29"N**, **0°27'54.43"E**, Altitude de **772m** au niveau de la mère méditerranéenne.



**Figure II.1.** Localisation du gisement de la Diatomite à Mostaganem, Algérie [30]

### II.3. Caractérisation de la diatomite

Cette première étape vise à analyser en profondeur les propriétés physico-chimiques et microstructurales de la diatomite dans son état naturel. Selon Min Jang et al [31], étudier plusieurs propriétés physico-chimiques par une méthode simplifiée et efficace pour immobiliser la diatomite poreuse naturelle suite à des résultats expérimentaux sur l'effet de pH, la tendance de sorption, leur vitesse de sorption et même l'interprétation du MEB, DRX.

#### II.3.1. Caractérisation chimique

La composition chimique de la diatomite est représenté dans le tableau II.1 suivant :

**Tableau II.1.** Composition chimique de base de la diatomite [30].

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cl	Pertes
71,80	7.20	5.30	3.80	0,37	0,54	0,65	2.60	0,02	7.44

Ce tableau révèle que la diatomite est un minéral naturel et environ de 7.44% des pertes. La composition chimique de la diatomite contient principalement de la silice (71.80%) et de CaO (7.20%).

La masse volumique de la diatomite est de 1,77 g/cm<sup>3</sup>.

#### II.3.2. Caractérisation microstructurale par DRX

La Diffraction par rayon X est nommé par la langue française « DRX » et en anglais « XRD », la diffraction des rayons X est une méthode non destructive, elle permet de déterminer la nature des phases cristallisées présentes dans un échantillon.

La nature des rayonnements permet de classier en deux types différents [32] :

- Rayonnements électromagnétiques.
- Rayonnements corpusculaires.

**a. Rayonnements électromagnétiques**

Ils sont constitués par un champ électromagnétique sinusoïdal, se caractérisent par :

- Fréquence  $\nu$
- Longueur d'onde  $\lambda$
- Vitesse  $c$  (vitesse de la lumière dans le vide).

L'énergie du rayonnement est quantifiée et son transport se fait sous forme de photons, pour cette raison ce rayonnements est également appelé rayonnements photonique, chaque un de ces photons transporte une énergie  $E$  donnée par la relation :

$$E = h \nu \quad (\text{II.1})$$

Ou'  $h$  est la constante de Planck.

Exemples de rayonnements électromagnétiques : lumière, rayons X.

**b. Rayonnements corpusculaire**

Ils sont constitués par des corpuscules, se caractérisent par :

- Masse  $m$  animés.
- Vitesse  $V$

Ayant donc une énergie cinétique donnée par la relation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{II.2})$$

En 1924, Louis de Broglie a montré que :

Pour chaque corpuscule en mouvement correspondant une onde associée, de longueur d'onde  $\lambda$ , suivant la relation:

$$\lambda = \frac{h}{mV} \quad (\text{II.3})$$

Exemples de rayonnements corpusculaires : électrons, neutrons.

A partir des interactions entre les deux types de rayonnements et la matière, il apparaît donc une dualité Onde - corpuscule.

L'aspect corpusculaire est responsable de l'interprétation de certaines interactions, citons

comme exemple : ionisation. D'autres sont expliqués en tenant compte de l'aspect ondulatoire (exemple : diffusion).

### Production des rayons X

Le tube de Coolidge des rayons X sont des rayonnements électromagnétiques, ils peuvent être produits de deux manières très spécifiques :

Par des changements d'orbite d'électrons provenant des couches électroniques ; les rayons X sont produits par des transitions électroniques faisant intervenir les couches internes, proches du noyau. Cette transition nécessite une excitation qui peut être provoquée par des rayons X ou bien par un bombardement d'électrons.

Par accélération d'électrons (accélération au sens large : freinage, changement de trajectoire).

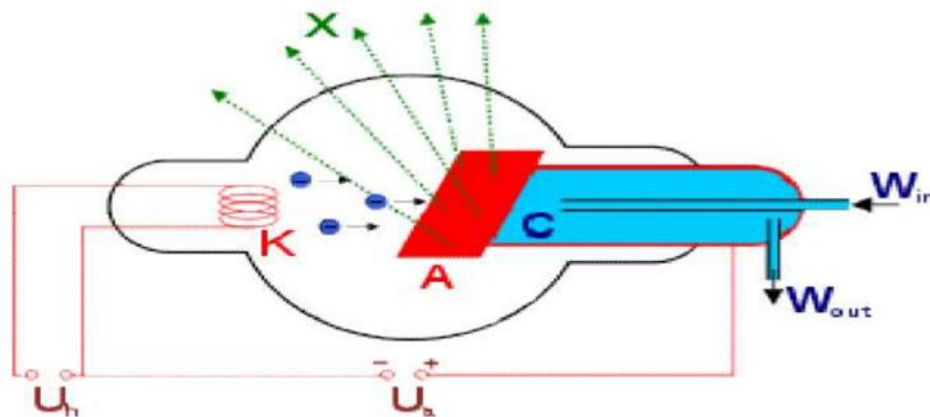
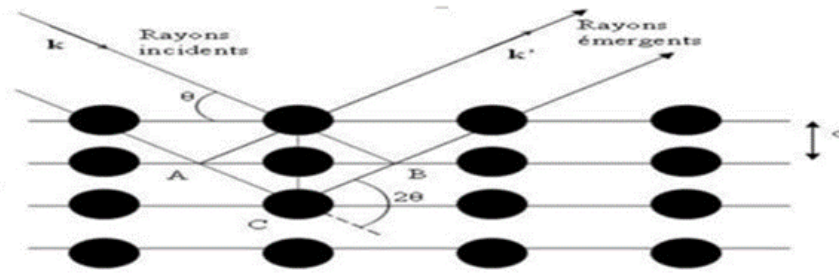


Figure II.2. Production des rayons X

La comparaison des diagrammes expérimentaux avec ceux de références répertoriés dans les bases de données (dans ce travail nous avons utilisé le fichier JCPDS) permet d'identifier la nature et la structure des matériaux, ainsi que d'identifier les éléments qui sont inconnus et qui déterminerons également les indices de Miller et les phases les plus probables [33].

#### a. Le principe de diffraction des rayons x et les lois de Bragg

Considérons un faisceau de rayons  $x$  monochromatique et parallèle de longueur d'onde, frappe sous un angle  $\theta$  la surface d'un cristal qui contient un ensemble de plans ( $hkl$ ) dont l'inter distance dit  $d_{hkl}$



**Figure II.3.** Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance [34].

La diffraction de faisceau des rayons X se réalise si l'interaction des rayons X avec les atomes des plans ( $hkl$ ) satisfait la loi de Bragg [35] :

$$2dhkl \sin\theta = n\lambda \quad (\text{II.4})$$

$\lambda$  : La longueur d'onde rayonnement incident.

$\theta$ : Angle de Bragg.

$n$  : Ordre de la diffraction

### b. Dispositif expérimental

La diffractomètre utilisé est de type EQUINOX 3000 qui disponible au Laboratoire LAMINE.

Ce dispositif est équipé d'une anticathode de cuivre utilisant la radiation  $K_\alpha$  de longueur d'onde  $\lambda = 1,5406$ .

Il est constitué de :

- Une source de rayons.
- Une anticathode de cuivre.
- Un détecteur.

### La source de rayons X utilise

- Une anticathode de cuivre et émet un faisceau de rayons X divergent.
- Un monochromateur arrière en graphite permettant d'éliminer la radiation  $K_\beta$  de cuivre.

Le détecteur permet de recevoir les rayons diffractés par l'échantillon.

La source et le détecteur sont situés sur un cercle centré sur l'échantillon appelé cercle goniométrique.

La source est fixe, alors que l'échantillon et le détecteur se déplacent aux vitesses angulaires respectives  $\omega$  et  $2\omega$ . Ainsi, le détecteur placé à un angle  $2\theta$  ( $\theta$  étant l'angle de Bragg). Pour caractériser notre poudre, le détecteur effectue une rotation de  $10^\circ$  à  $70^\circ$ . Les données ont été converties par programme X' Pert Plus.

### II.3.2.1. Résultats d'analyse de la diatomite par DRX

L'analyse minérale de notre échantillon, la diatomite du dépôt Sidi Lakhdar par diffraction des rayons X a été réalisée au laboratoire LABMAT de ENPO, représenté à la figure II.4.

Cette figure montre que les résultats de l'analyse minérale aux rayons X (DRX) de la diatomite révèlent la forte présence de quartz, suivi de calcite, et de quelques traces de magnésium.

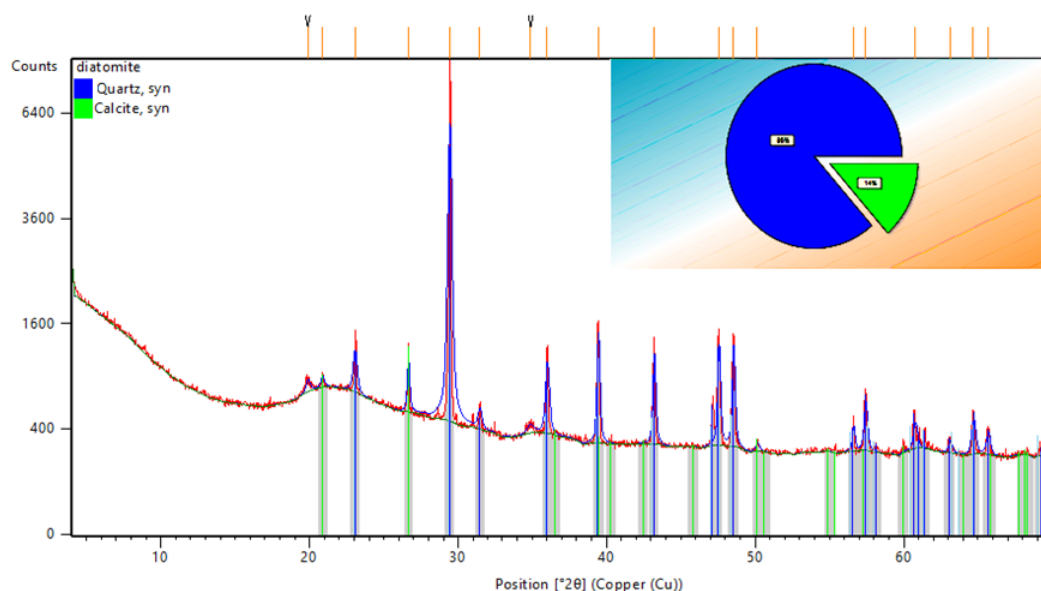


Figure II.4. Spectres de DRX Diatomite naturelle

On remarque que le taux de Quartz en couleur bleu score 84% est très élevé en comparant par la calcite en couleur verte de score 16%.

Le tableau II.2 illustre une liste de modèle des composantes chimiques de  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$  et  $\text{SiO}_2$  par DRX.

Tableau II.2. Composantes chimiques de DRX

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[ $^\circ 2\theta$ ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-083-4601	16	Calcium Carbonate	0.000	0.089	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
*	01-087-2096	84	Silicon Oxide	0.000	0.604	$\text{SiO}_2$

### II.3.3. Caractérisation par MEB

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière permettant d'obtenir des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. Un faisceau d'électrons vient frapper la surface de l'échantillon générant l'émission d'un spectre de particules sous forme de rayonnements : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés et rayons X. Le traitement de ces différents rayonnements apporte de l'information sur la matière dont est constitué l'échantillon.

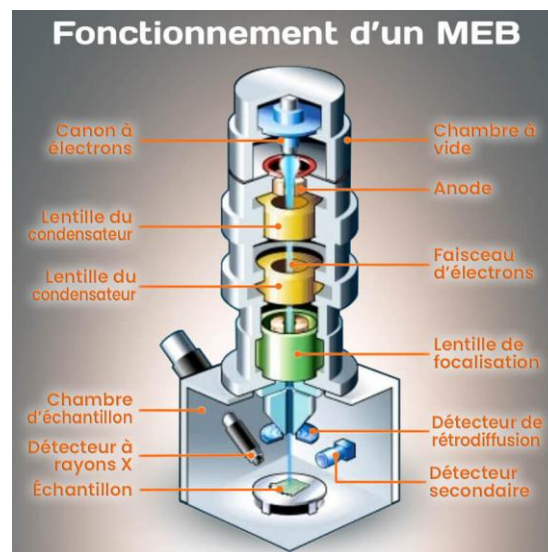


Figure II.5. Les fonctionnements de MEB

#### - Principe de MEB

Dans un **Microscope Électronique à Balayage**, un faisceau électronique balaye à la surface d'un échantillon. L'interaction électron-matière génère alors plusieurs types d'émissions, comme le montre le schéma simplifié ci-contre. Les électrons secondaires permettent d'imager la surface de l'échantillon, avec un contraste topographique.

Les électrons rétrodiffusés donnent une image avec un contraste chimique sur une surface plane. Les photons X rendent possible l'analyse chimique en Spectroscopie à Dispersion d'Énergie (EDS).

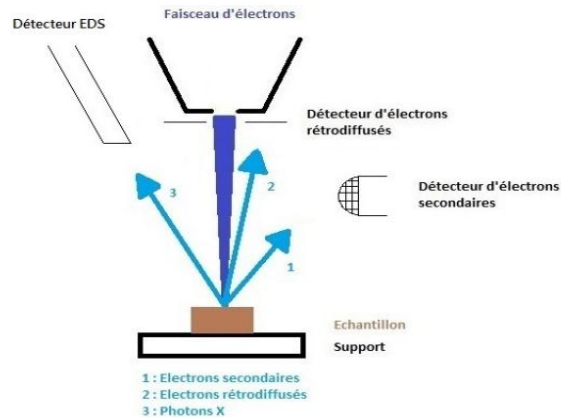


Figure II.6 : principe du MEB

### Principe d'EDX

L'analyse dispersive en énergie EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometry) permet d'obtenir une analyse quantitative ou qualitative, suivant les conditions, des éléments chimiques dans un échantillon solide et dans un volume micrométrique (une sphère de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres), en comptant le nombre de photons X émis par ce dernier pendant un temps déterminé quand il est bombardé par un faisceau d'électrons.

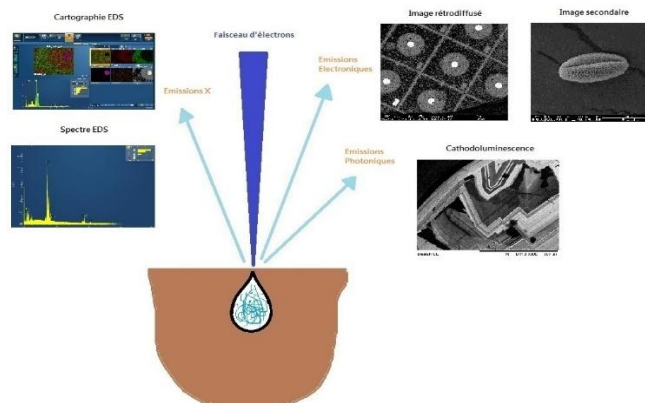
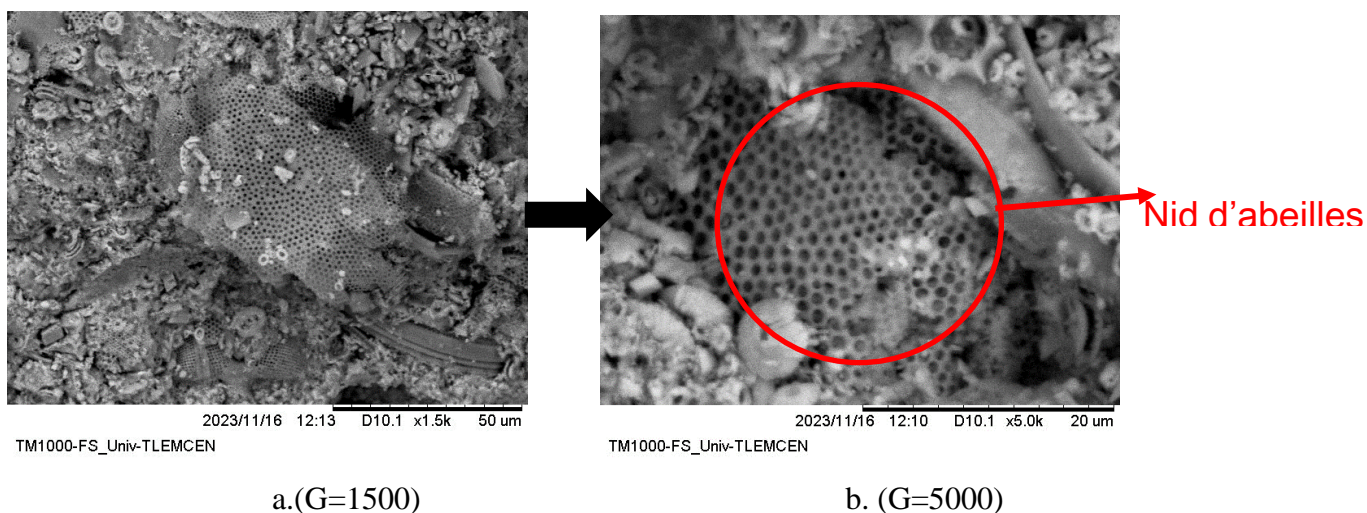


Figure II.7. Principe d'EDX

#### II.3.3.1 Résultat d'analyse de la diatomite par MEB :

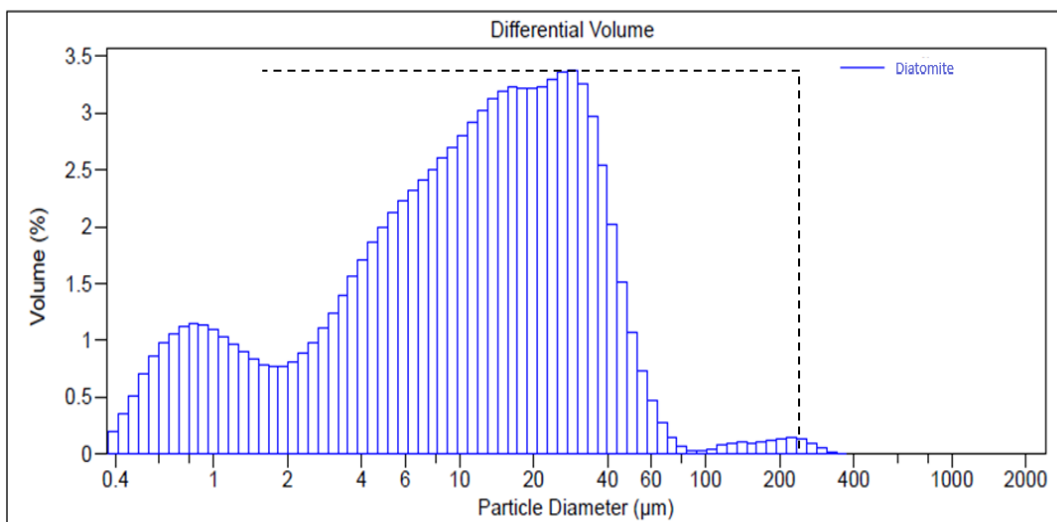
Ces résultats sont appuyés par l'analyse microscope électronique à balayage (figure II.8 a et b) montre une structure poreuse plus moins régulière en forme de nid d'abeilles pour l'échantillon de la diatomite broyée à 80µm.



**Figure II.8.** Micrographie électronique à balayage de la Diatomite naturelle [36].

### II.3.4. Résultat d'analyse granulométrique laser :

La granulométrie laser est une technique créée dans les années 1970. De façon générale, la granulométrie permet la mesure de la taille des particules, ou plus exactement de leurs rayons. La granulométrie laser, elle, permet la mesure de tailles comprises entre 0,05 et 900  $\mu\text{m}$ , ce qui est bien plus précis qu'avec la technique par tamis. Elle convient donc particulièrement aux suspensions de polymères, à tout type de poudre (minérale ou non).



**Figure II.09.** Analyse Granulométrique Laser de la Diatomite naturelle [36].

On remarque dans la figure II.09 qu'il y a une représentation correcte de l'histogramme, les surfaces de des rectangles proportionnels aux effectifs, et cela en répondant à des exigences normatives ISO 13320 [36].

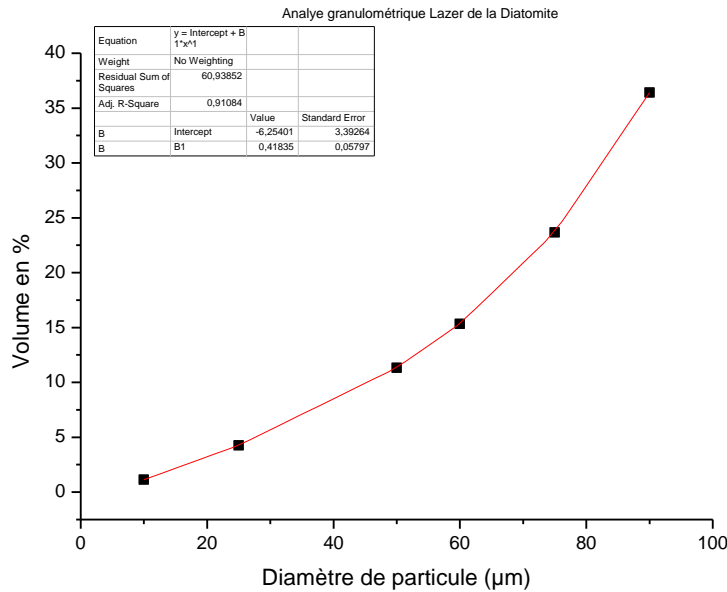


Figure II.10. Analyse Granulométrie Laser par fitting de la Diatomite naturelle[36].

Cette figure représente le volume en fonction de diamètre des particules en micromètre, ce graphe est ce forme de fonction exponentielle leur faitage de  $R^2=0,91084$ , une évolution régulière (gradation des particules).

### II.3.5. Caractérisation de la diatomite par BET

La surface spécifique est déterminée à partir du volume  $V_m$ , volume de gaz adsorbé pour recouvrir entièrement la surface du solide d'une couche mono moléculaire d'adsorbat ; le volume  $V_m$  est déterminé à partir de l'équation linéarisée de BET dans le domaine  $0,05 < P/P_0 < 0,35$  ; l'expression linéarisée est la suivante :

$$P / [V (P_0 - P)] = [1 / (V_m \cdot C)] + [(C - 1) / (V_m \cdot C)] P/P_0 \quad (II.5)$$

**P** : pression d'équilibre,

- **P<sub>0</sub>** : pression de vapeur saturante de l'adsorbat à la température de la mesure,
- **V** : volume de gaz adsorbé par gramme de solide à la pression p,
- **V<sub>m</sub>**: volume de gaz nécessaire pour recouvrir entièrement la surface du solide d'une couche mono moléculaire d'adsorbat,
- **C** : constante caractéristique du système gaz/ solide étudié.

L'équation BET permet de tracer  $P/[V (P - P_0)] = f( P/P_0)$  qui est une droite dont la pente  $\alpha =$

$(C - 1) / (V_m \cdot C)$  et l'ordonnée à l'origine  $\beta = 1/V_m \cdot C$  permettent de calculer  $V_m = 1/(\alpha + \beta)$  et par la suite la surface spécifique à partir de la relation :

$$S_{\text{BET}} \text{ (m}^2\text{/g)} = N \cdot A \cdot V_m \cdot 10^{-20} / m \cdot V_M \quad (\text{II.6})$$

- **N** : nombre d'Avogadro,
- **A** : aire occupée par une molécule d'adsorbat en  $\text{Å}^2$  ( $16,2\text{Å}^2$  pour  $\text{N}_2$ ),
- **m** : masse du solide,
- **$V_M$**  : volume molaire  $22414\text{cm}^3/\text{mol}$ .

Les mesures ont été effectuées au niveau du centre de recherche scientifique et technique en analyses physico- chimique (C.R.A.P.C), à l'aide d'un appareil NOVA 1000e (Qantachrome instrument). La valeur est regroupée dans le tableau II.3.

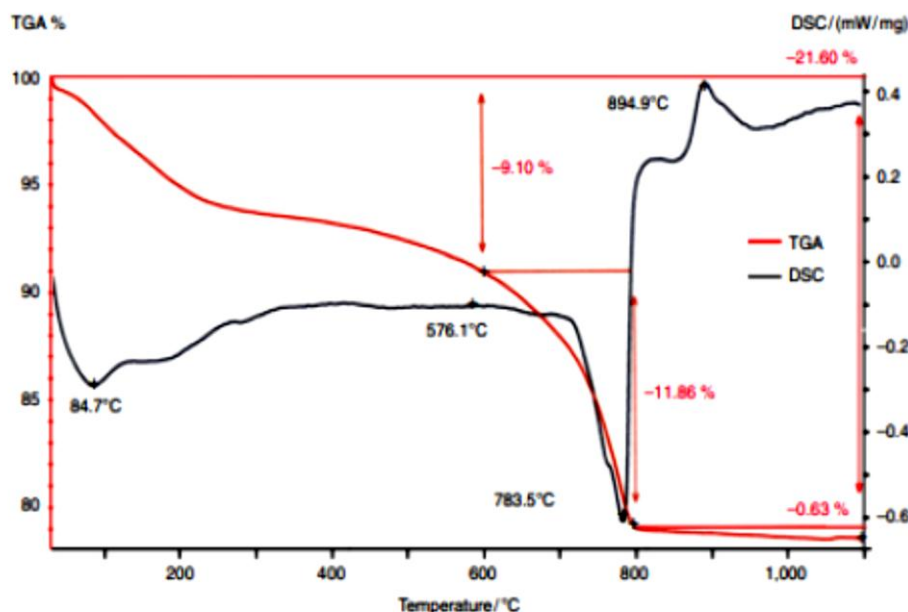
**Tableau II.3.** Surface spécifique de l'adsorbant.

Adsorbant	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)
Diatomite	17.8839

#### II.4. Analyse thermogravimétrique et la calorimétrie à balayage différentiel (TGA-DSC) de la diatomite brute :

L'analyse thermogravimétrique et la calorimétrie à balayage différentiel (TGA-DSC) ont été réalisées à l'aide d'un instrument entièrement informatisé Netzsch STA 409 PC TGA-DSC simultané. Environ 10 mg de poudre de diatomite brute a été placée dans un creuset en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour l'analyse simultanée de la TGA-DSC, et a été chauffée à une vitesse de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , de la température ambiante à  $1100^\circ\text{C}$  dans un environnement d'air statique.

Les résultats des analyses simultanées TGA-DSC pour l'échantillon de diatomite brute sont présentés dans la Figure II.11.



**Figure II.11.** Analyse thermique simultanée TGA-DSC pour la diatomite brute

Les résultats de la courbe de l'analyse gravimétrique thermique de l'échantillon, indiquent la perte de masse lors de l'augmentation de la température et ont révélé que la diatomite a quatre pertes de masse : la première perte (environ 5 %) entre la température ambiante et 200°C, la deuxième perte de masse (environ 4,10 %) dans la plage de température allant de 200 à environ 600°C, la troisième perte (environ 11,86 %) dans la gamme de 600 à 800°C et la dernière perte (environ 0,63%) dans la plage de 800 à 1100°C.

Les résultats des mesures de la DSC sur la diatomite indiquent que lorsque la température est augmentée, plusieurs réactions endothermiques et exothermiques ont lieu.

Celles-ci sont clairement détectées par les fluctuations du graphique de la figure II.11.

Nous pouvons voir sur le spectre DSC trois pics endothermiques à 84,7, 576,1 et 783,5°C, et un pic exothermique à 894,9°C. Le pic endothermique centré à 84.7°C et un épaulement autour de 165°C a été attribué à la perte d'eau absorbée sur la diatomite brute.

Le petit pic à 576.1°C pourrait être dû à la transformation du quartz. Le grand pic endothermique à 783.5°C a été attribué à la formation de ponts siloxane résultant de la déshydroxylation de groupes silanol isolés sur la surface interne de la diatomite qui correspond à la perte maximale de masse (20.96%). À 894,9°C, on peut voir un pic exothermique causé par la cristallisation. La direction exothermique est indiquée le long de l'axe vertical. Généralement, le quartz est connu pour donner une réaction endothermique entre 565°C et 575°C, dans la figure II.11, le pic endothermique à 576.1°C est très bas à cause de la structure amorphe. Ces courbes peuvent

également être utilisées dans la détermination de la température optimale dans le processus de calcination des flux pour éliminer les impuretés.

### II.5. Mesure de la masse volumique de la diatomite Naturelle :

La masse volumique réelle représente la masse de la diatomite par unité de volume. Elle est calculée à l'aide de l'équation (II.7) suivante :

$$\rho \text{ réel} = \frac{m_1 - m_0}{V_0 - V_{al}} \quad (\text{II.7})$$

Quant à la masse volumique apparente (le rapport entre la masse de l'adsorbant et le volume du pycnomètre). Elle est calculée à partir de l'équation (II.8) suivante :

$$\rho \text{ apparente} = \frac{m_1 - m_0}{V_0} \quad (\text{II.8})$$

$\rho_{al}$  : représente la masse de l'alcool par unité de volume et elle est déterminée par l'équation (II.9) suivante :

$$\rho_{al} = m_{al} / V_{al} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$m_0$ : la masse du pycnomètre vide (g).

$V_0$  : le volume du pycnomètre (25mL)

$V_{al}$  : le volume de l'alcool.

$m_1$  : la masse du pycnomètre rempli avec l'adsorbant (la diatomite brute) (g).

$m_2$  : la masse du pycnomètre rempli avec l'adsorbant et l'alcool (g).

$m_{al}$  : la masse de l'alcool (g).

Les valeurs obtenues sont représentées dans le tableau II.4 ci-dessous.

**Tableau II.4** Mesure de la masse volumique réelle.

$m_0$ (g)	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_{al}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_{al}$ (cm <sup>3</sup> )	$P_{apparente}$ (g.cm <sup>-3</sup> )	$P \text{ réel}$ (g.cm <sup>-3</sup> )
17.3783	27.3758	43.5908	15.195	19.360	0.399	1,77

La masse volumique réelle de la diatomite brute obtenue est de l'ordre de **1,77 g.cm<sup>-3</sup>**.

### II.6. Mesure du taux d'humidité :

Le taux d'humidité est déterminé par la mesure de la variation de masse après séchage à 115°C et évaporation de l'eau contenu dans l'échantillon. On calcule le taux d'humidité avec la formule (II.10) suivante :

$$H\% = \frac{m_0 - m}{m_0} \% \quad (\text{II.10})$$

avec ;

$m_0$  : masse de la diatomite brute avant séchage à 115°C (g).

$m$  : masse de la diatomite après séchage à 115°C (g).

Le taux d'humidité obtenu est de l'ordre de 14.65 %.

## **II.7. Conclusion :**

Au terme de ce travail, nous avons pu mettre en évidence les caractéristiques microstructurales et macrostructurales de la diatomite, un matériau naturel aux propriétés physiques et chimiques remarquables. Grâce aux différentes méthodes d'analyse et d'essai, notamment Ces caractérisations sont basées sur l'analyse chimique par l'FX, DRX, MEB....etc, l'analyse granulométrique par laser, il a été possible de confirmer la structure poreuse, la faible densité et la grande capacité d'absorption de la diatomite.

Ces propriétés font de la diatomite un matériau prometteur dans de nombreux domaines tels que la valorisation en construction, ou encore la protection de l'environnement. Les résultats obtenus soulignent l'importance de choisir des méthodes d'essai adaptées pour une caractérisation complète, et ouvrent la voie à des recherches plus approfondies sur ses applications industrielles.

## **Chapitre III**

### **Compagne expérimentale**

### III.1 introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'effet de la diatomite sur le comportement mécanique des pâtes de diatomite. Et de consacrée aux résultats des essais d'identification expérimentale des propriétés de la diatomite.

### III.2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont tous de matériaux locaux. Pour nos différents essais, Ont utilisé la diatomite comme matériau principale et le ciment blanc comme ajout.

#### III.2.1. Diatomite

La diatomite est obtenue par Le gisement de la diatomite à Sidi Lakhdar C'est une roche sédimentaire siliceuse, poreuse et friable de couleur blanche à grise, massive ou litée.

Elle est d'origine organique et fossile composée de silice hydratée amorphe, qui résulte du dépôt des coquilles fossilisées microscopiques d'anciennes algues unicellulaires, appelées diatomées. Elle s'écrit selon la formule  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . La Figure(III.1) donne un aperçu sur la nature de diatomite.



**Figure III.1 : Échantillon score, poudre de diatomite.**

La composition chimique de la diatomite est représenté dans le tableau III.1 suivant :

**Tableau III.1.** Composition chimique de base de la diatomite [31].

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cl	Pertes
71,80	7.20	5.30	3.80	0,37	0,54	0,65	2.60	0,02	7.44

### III.2.2 Ciment

#### A. Composition chimique du clinker blanc et gris :

**B. Tableau III 2 :** Composition chimique du clinker blanc et gris [38].

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	F	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Perte au feu
Gris	20.8	5.5	3.61	65.6	2.13	-	0.91	0.19	0.87	0.24
Blanc (normal)	23.1	6.2	0.28	67.8	0.83	0.24	0.14	0.05	0.89	0.50
Blanc (minéralisé)	23.8	2.3	0.27	68.0	0.48	0.85	0.12	0.04	0.65	0.90

#### C. Propriétés mécaniques, chimique et physiques

Les ciments blancs doivent répondre à toutes les performances physiques et mécaniques exigées par la norme EN 197 "Ciments". Au lieu de reproduire les spécifications de cette norme, nous donnons ci-après, les caractéristiques moyennes de classes de ciment blanc fabriquées par une usine certifiée en Europe [39].

**Tableau III 3 :** Résistances à la compression en MPa [40].

Type de ciment	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours
CEM II/ B-L 42.5N	28	41	52
CEM I 42.5 N LA	25	42	57
CEM I 52.5 N LA	32	50	64
CEM I 52.5 R LA	40	-	66

**Tableau III 4:** Propriétés chimiques du ciment portland blanc [41] [42].

Composants	En 197-1 :2000 CEM II 42.5	Norme américaine (ASTM C, type I)
MgO	5% Maximum	6% Maximum
Cl	0.10% Maximum	0.10% Maximum
Résidus Insolubles	5% Maximum	/
Perte au Feu	4% Maximum	4% Maximum

Le ciment utilisé dans cette étude est le CEM II /B-L 42.5 R, de nom commercial Biskria.

Les compositions chimiques et minéralogiques ainsi les caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le tableau (III.5) Suivant :

**Tableau III 5:** compositions chimiques et minéralogiques et les caractéristiques physico-mécaniques du ciment CEM II /B-L 42.5 N [43]

compositions chimiques (%)									
SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P.Feu	R.Insoluble
55.70	28.57	4.28	3.81	1.11	2.43	0.12	0.44	10	0.7
compositions minéralogiques (%)									
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A			C <sub>4</sub> AF		
57-63		12-18		6.5-8.5			10-12		
Propriétés physiques									
Masse volumique absolue (kg/ m <sup>3</sup> )		Surface spécifique de Blaine (SSB) (cm <sup>2</sup> /g)		Expansion (mm)		Début de prise (min)		Fin de prise (min)	
2924		4833		0.2		120-180		180-280	

### III.2.3. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans le mélange de notre étude pâte (diatomite/ ciment) suite à la norme EN 196-1, avec E/L égale 0,5.

A l'état frai l'eau joue deux rôles essentiels :

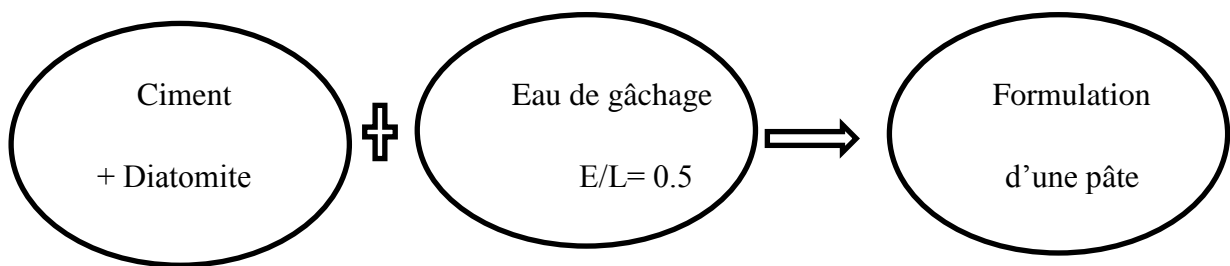
- Elle participe activement à l'ouvrabilité des pâtes fraîches en lui donnant une fluidité satisfaisante pour la mise en place, grâce à son action lubrifiante sur les différents grains, et grâce à la cohésion de la pâte résultant de l'association des grains fins avec l'eau. Il ne faut cependant pas abuser de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances.
- Elle confère la maniabilité de la pâte à l'état frais et assure l'hydratation du ciment et donc améliore de la résistance mécanique.

### III.3. Préparation des Formulations et mode d'essai

Afin d'étudier l'efficacité de l'ajout de la diatomite dans la fabrication des pâtes, on a utilisé deux types de formulations. Une première formulation de pâte de ciment pour étudier le comportement à l'état frais et la deuxième formulation pour étudier le comportement mécanique à l'état durci.

Les formulations des pâtes de diatomite ont été confectionnées par une composition entre le ciment blanc avec des pourcentages de (05, 10, 15, 20, 25 et 30) % d'une part et d'autre part pour la diatomite naturelle des pourcentages de (95, 90, 85, 80, 75 et 70) %. Cette opération est préparée par l'eau de gâchage avec un rapport Eau/Liant égale à 0.5.

Le schéma représente l'opération suivante :



**Tableau III.6:** Formulation des compositions des mélanges de pâte de diatomite.

Bloc Diatomite Comprimé %	BDC 70	BDC 75	BDC 80	BDC 85	BDC 90	BDC 95
Diatomite (g)	945	1012.5	1080	1147.5	1215	1282.5
ciment (g)	405	337.5	270	202.5	135	67.5
Eau/Liant	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

#### III.3.1. Préparation et séquence de malaxage des pâtes de ciment

Une méthode de malaxage inspirée de la norme EN 196-1 a été adoptée, avec quelques ajustements afin de l'adapter à la nature des matériaux utilisés, à savoir le ciment blanc, la diatomite et l'eau. Dans un premier temps, le ciment blanc et la diatomite ont été mélangés à sec pendant une durée allant de 15 secondes à 1 minute, afin d'assurer l'homogénéité du mélange et d'éviter l'agglomération des particules fines de diatomite. Ensuite, les deux tiers de l'eau de gâchage ont été ajoutés progressivement, tout en maintenant le malaxeur en marche à faible vitesse, pendant 90 secondes. Une pause de 30 secondes a suivi, permettant de racler les parois du

bol de malaxage à l'aide d'une spatule. La quantité restante d'eau a ensuite été incorporée progressivement, et le malaxage a été poursuivi pendant 90 secondes supplémentaires. Cette méthode vise à obtenir une pâte homogène et de consistance appropriée pour la réalisation des essais mécaniques ou physiques.

**Tableau III.7 :** les étapes de malaxage des pâtes de ciment.

	Etape	Matériaux introduits	Duré de malaxage
Pâte de ciment	1	Diatomite + ciment	15s+1 min
	2	Arrêt de quelques secondes	15s
	3	Introduit de 2/3 l'eau	90s
	4	Arrêt de quelques secondes	30s
	5	Introduit de 1/3 l'eau	90s



**Figure III.2 :** Les différentes étapes réalisées pour la préparation des pâtes (ciment/diatomite).

### III.3.2. Effet de la finesse de la diatomite

La diatomite naturelle, non broyée, présente une finesse limitée qui dépend directement de la taille des frustules de diatomées formés lors de la sédimentation. Cette finesse naturelle influence ses propriétés d'usage de plusieurs façons. Tout d'abord, la porosité reste élevée grâce à la structure intacte des frustules, ce qui permet une bonne capacité de rétention et une certaine efficacité dans des applications de filtration grossière ou d'isolation thermique. Cependant, en l'absence de broyage, la surface spécifique reste relativement faible, limitant ainsi son pouvoir adsorbant. De plus, la granulométrie naturelle ne permet pas de filtration fine, ce qui rend la diatomite non broyée moins efficace pour les usages nécessitant une séparation de très petites

particules. Sur le plan chimique, sa réactivité est aussi réduite, car les surfaces internes des particules restent peu exposées.

Le diamètre utilisé dans cette étude est 125  $\mu\text{m}$



**Figure III.3 :** Les différentes étapes réalisées pour la préparation de la diatomite

### III.3.3. Etape de remplissage et compactage des moules

1. On remplit les moules prismatiques 40x40x160mm selon des couches, on pique chaque couches cinq fois avec des espaces différent.
2. Dans chaque couche coulée soumit à une vibration. Pour assurer la stabilité à l'état frais du mortier, afin d'éliminer les risques de sa ségrégation.
3. Après la dernière couche, on arase la surface supérieure des éprouvettes avec une réglette

**NB :** Les essais réalisés visent à déterminer les propriétés mécaniques et de durabilités des mortiers avec diatomite. Le mortier confectionné est introduit dans des moules 40x40x160mm, après 24heures les éprouvettes sont démoulées et conserves à l'air libre.



**Figure III.4 :** Compactages des moules en pate ciment/diatomite.

### III .4 .Modes d'essai des pâtes

Les formulations réalisées doivent être caractérisés à l'état frais et durci, Les différents essais faits au cours de ce travail sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau III.8 :** essai réalisées sur pate de ciment /diatomite

<b>Etat durci</b>	<b>densité</b>	<b>Masse volumique apparente</b> <b>Masse volumique absolue</b>
	<b>Résistance</b>	<b>A la compression/flexion/ ultrasonique</b>

#### III.4.1. La masse volumique

##### ➤ Masse volumique apparente:

Est une mesure de la masse d'un matériau par unité de volume, y compris les vides et les espaces inter particulaires. Elle représente la densité totale d'un matériau en incluant à la fois la masse des particules solides et les vides présents entre ces particules.

L'échantillon doit être séchée pendant 48 heures dans une étuve à air, chauffée à 100/110°C.

##### ➤ Mode opératoire :

- Préparation de l'échantillon.
- Mesure de volume de l'échantillon.
- Mesure de la masse de l'échantillon.
- Calcul de la masse volumique apparent par la division de la masse de l'échantillon sur son volume.
- Répétition de l'essai pour améliorer la précision.

➤ **Résultats :**

La masse volumique apparente est donnée par la relation suivante :

$$\rho_d = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

**Tableau III.9 :** Mesures de la masse volumique apparente de la pâte après 48 heures  
Sur **BDC 80%**.

<b>BDC</b>	<b>Masse (g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>80%</b>	<b>305.5</b>	256	1.19
	<b>306.8</b>		
	<b>303.2</b>		
	<b>150.5</b>	256	0.59
	<b>149.7</b>		
	<b>151.7</b>		
	<b>150.0</b>	256	0.58
	<b>149.0</b>		
<b>151.2</b>			

➤ **Remarque :**

- La densité des variantes étudiées est influencée par deux facteurs : le pourcentage d'ajout de diatomite et l'âge.
- La densité diminue de manière proportionnelle en fonction de l'âge.

➤ **Masse volumique absolue :**

La masse volumique représente la masse d'un minéral par unité de volume d'après [44].

La masse volumique représente la masse d'un minéral 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  $V = \dots$  mL.

- 5- Calculer la masse volumique avec la formule suivante  $\rho = m/V$  ( $\text{g/cm}^3$ ).



**Figure III.5 :** Eprouvette graduée.

Les résultats de mesures sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.10 :** Mesures de la masse volumique absolue [44]..

Echantillon	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Masse volumique en $\text{g/Cm}^3$	0,388	0,426	0,350	0,394	0,391	0,372	0,368	0,432	0,433	0,438
$\rho$ absolue moyenne en $\text{g/Cm}^3$	<b>0,399</b>									

### III.5. Essais physico-mécanique

#### ➤ III.5.1. Essai de porosité

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation de la durabilité, elle est déterminée par l'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau est sa masse à l'état sec.

Dans cet essai les éprouvettes utilisées sont carottées à partir d'échantillons prismatiques ( $40 \times 40 \times 160$ )  $\text{mm}^3$  sont séchés dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante (variation de 0.1% après 24h), ainsi la masse sèche "Msec" de l'échantillon est déterminée.

Pour obtenir la porosité accessible à l'eau par immersion "PW" les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation (variation en masse de 0.1% après 24h) selon la norme NBN B 15-215, et sont pesés dans l'air " $M_{\text{sat}}$ " et dans l'eau " $M_{\text{eau}}$ ". On définit PW comme étant la porosité ouverte d'un matériau.

Pour obtenir la porosité accessible à l'eau par immersion sous vide "Pwv", les échantillons sont été saturés sous vide selon la norme NBN B 24-213 et pesés à l'air " $M_{\text{sat V}}$ " et dans l'eau " $M_{\text{eauV}}$ "

"PWV" est définie comme étant la Porosité Totale du matériau.

Les porosités "PW " et "PWV " sont calculées respectivement selon les équations a et b :

$$P_W = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{eau}} \times 100 \quad \% \quad (a)$$

$$P_{WV} = \frac{M_{satV} - M_{sec}}{M_{satV} - M_{eauV}} \times 100 \quad \% \quad (b)$$

Les résultats de la porosité des différents dosages de diatomite pour un âge de 7 jours.

D'après les résultats de figure III.5, on remarque que la porosité augmente on fonction de l'augmentation de dosage de diatomite .Ces diminutions traduisent la légèreté de la diatomite.

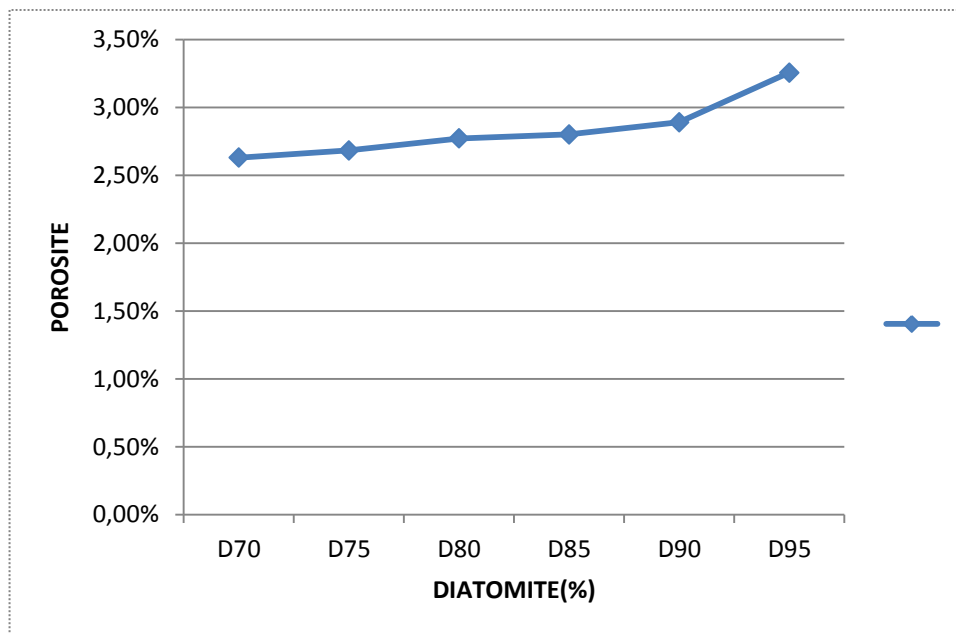


Figure III.5 : La porosité en fonction de différents dosages des pâtes

### III.6. Les essais physiques :

Avant de réaliser chaque essai mécanique, les masses volumiques de toutes les éprouvettes de chaque variante étudiée ont été mesurées en utilisant des tests de pesée. Pour ce faire, chaque éprouvette est placée sur une balance et pesée.

#### III.6.1. Les essais non destructifs

Les essais non destructifs et on dit aussi le contrôles non destructif ; c'est un ensemble des méthodes de reconnaissance qui permettent de vérifier la résistance du béton et de mortier aussi de faire caractériser l'état d'intégrité de la structure ou de matériaux. Ces essais nous permettons de suivre les changements des propriétés avec le temps.

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

### III.6.1.1. Essai d'auscultation dynamique (ultrason) :

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression à travers un élément en béton).

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue.



Figure III.6 : Montage de l'essai ultrasonique.

### III.6.1.2. Mode d'expression de mesurer la vitesse de propagation :

La vitesse de propagation du son à travers le béton est mesurée par la formule suivante :

$$V=L/T$$

Avec :

- V : la vitesse de propagation du son, en m/s.
- L : la longueur de parcours, en m.
- T : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur en seconde s.

### III.6.1.3. Classification des matériaux d'après la vitesse du son:

Tableau III.10 : la vitesse de propagation et la qualité du matériau [45]

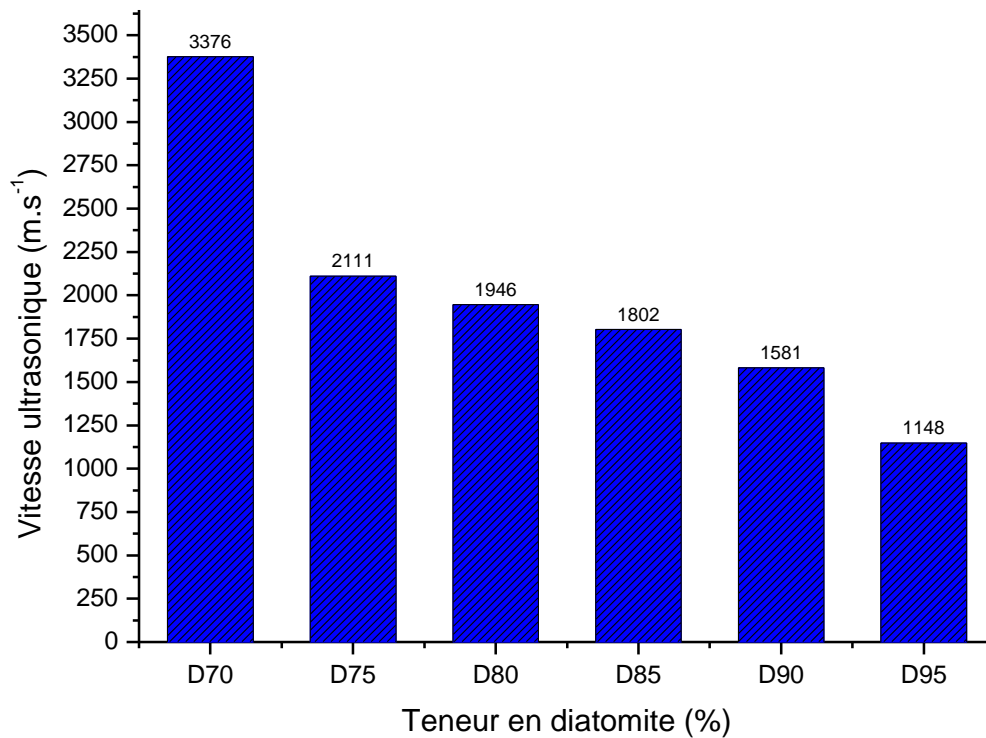
Type de matériaux	Plage typique de vitesse ultrasonique
Béton ordinaire	3000-4500 m/s
Béton légère	1500-3000 m/s
Diatomite	1000-2500 m/s (selon densité, humidité, traitement)

### III.6.1.4. Les mesures de grandeurs physiques par l'appareil ultrasonique

Les mesures sont faites par l'appareil ultrasonique (essai non destructif) sur les éprouvettes des pâtes (ciment/diatomite) de dimensions  $(40 \times 40 \times 160)$  mm<sup>3</sup> avec différentes teneurs en diatomite, ces mesures sont représentées dans le tableau III.11.

**Tableau III.11** : Mesures de grandeurs physiques par l'appareil ultrasonique.

BLOC DIATOMITE COMPRIME	d(m)	T1 (µs)	T2 (µs)	T moy (µs)	V (m/s)
<b>BDC 70%</b>	0,04	2,8	20,9	11,85	<b>3376</b>
<b>BDC 75%</b>	0,04	18,8	19,1	18,95	<b>2111</b>
<b>BDC 80%</b>	0,04	20,3	20,8	20,55	<b>1946</b>
<b>BDC 85%</b>	0,04	21,6	22,8	22,2	<b>1802</b>
<b>BDC 90%</b>	0,04	26,8	23,8	25,3	<b>1581</b>
<b>BDC 95%</b>	0,04	34,4	35,3	34,85	<b>1148</b>



**Figure III.7** : Variation de la vitesse ultrasonique en fonction des teneurs en diatomite

Dans cette figure qui représente la variation de la vitesse ultrasonique en fonction des teneurs des diatomites. On a illustrée une Plage typique de la vitesse ultrasonique entre 1500 et 3000 m/s selon le tableau III.11, qui est représenté les mesures de grandeurs physiques par l'appareil ultrasonique, cette plage indique que ce matériau formuler dans notre étude (pâte Diatomite/Ciment) est équivalent d'un béton léger, en élimine la teneur en diatomite D95, leur vitesse mesurer est de 1148 m/s inférieure à 1500 m/s.

### **III.7 : Les essais mécaniques**

Les évaluations mécaniques sont réalisées en laboratoire de l'école nationale polytechnique d'Oran MAURICE AUDIN. Les tests sont effectués à l'aide d'une machine d'essais de flexion et de compression contrôlée par ordinateur, sur un ensemble d'éprouvettes. Les différentes variantes sont soumises à des propriétés mécaniques à des âges différents, notamment à 07 et 28 jours.



**Figure III .8** : L'appareil de mesures les résistances mécaniques

### III.7.1 : Résistance à la compression :

La résistance à la compression a été mesurée conformément à la norme EN196-1, les éprouvettes testées sont des pâtes de ciment/diatomite de dimension (40x40x160) mm<sup>3</sup>.



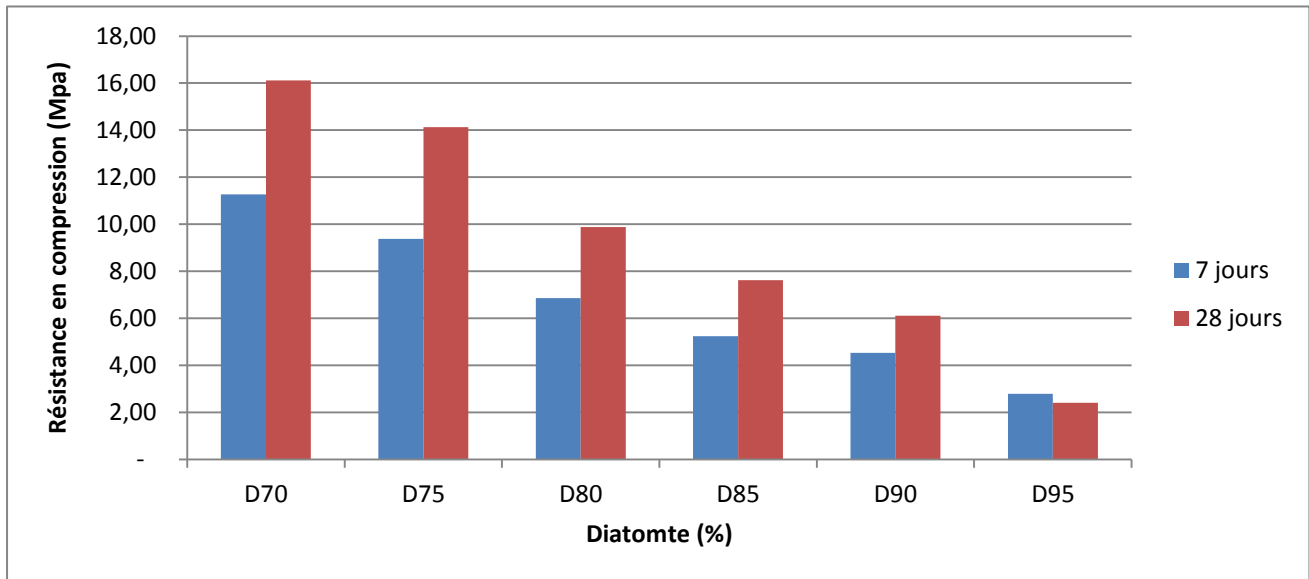
Figure III.9 : Essai de compression.

Les résultats de la résistance à la compression des différents dosages de diatomite en fonction de l'âge jusqu'à 28 jours.

D'après les résultats présentés au tableau III.11, on remarque que pour les âges (7 et 28 jours), les résistances de la compression diminuent avec l'augmentation de dosage en diatomite c'est à dire diminution du dosage de ciment blanc.

**Tableau. III.12 :** L'évolution temporelle des résistances à la compression des différentes variantes de diatomite a été étudiée.

Les variantes	Résistance en compression (MPa)							
	7j				28j			
Age	E1	E2	E3	moyenne	E1	E2	E3	moyenne
<b>BDC 70%</b>	11.22	11.17	11.43	<b>11.27</b>	15,750	16,25	16,33	<b>16.11</b>
<b>BDC 75%</b>	9,64	9,07	9,42	<b>9.38</b>	14,950	13,55	13,86	<b>14.12</b>
<b>BDC 80%</b>	6,5	6,74	7,33	<b>6.86</b>	8,88	11,69	9,05	<b>9.87</b>
<b>BDC 85%</b>	5,55	5,20	4,95	<b>5.23</b>	6,83	8,81	7,22	<b>7.62</b>
<b>BDC 90%</b>	4,25	4,57	4,78	<b>4.53</b>	6,34	5,79	6,20	<b>6.11</b>
<b>BDC 65%</b>	2,61	2,89	2,87	<b>2.79</b>	2,05	2,45	2,70	<b>2.4</b>



**Figure.III.10** Évolution temporelle des propriétés de résistance à la flexion pour les différentes variations de diatomite examinées.

### III.7.2. Résistance à la flexion

Selon la norme [EN 196-1], l'essai consiste à rompre en flexion (par trois points) des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(40 \times 40 \times 160)$  mm<sup>3</sup>.



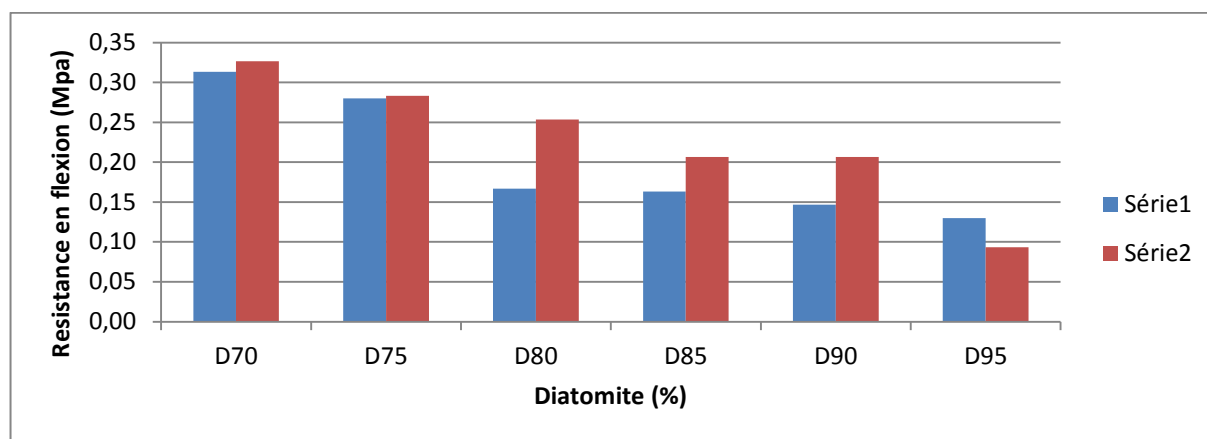
**Figure III.11** : Essai de flexion simple

Les résultats de la résistance à la flexion des différents dosages de diatomite en fonction de l'âge jusqu'à 28 jours.

D'après les résultats présentés au tableau III.13, on remarque que pour les âges (7 et 28 Jours), les résistances de flexion diminuent avec l'augmentation de dosage en diatomite.

**Tableau. III.13 :** L'évolution temporelle des résistances en flexion des différentes variantes de diatomite a été étudiée.

Les variantes	Résistance en flexion (MPa)							
	7j				28j			
Age								
Eprouvette	E1	E2	E3	moyenne	E1	E2	E3	moyenne
<b>D70</b>	0.30	0.39	0.25	<b>0.31</b>	0.37	0.35	0.26	<b>0.33</b>
<b>D75</b>	0.35	0.23	0.26	<b>0.28</b>	0.28	0.22	0.35	<b>0.28</b>
<b>D80</b>	0.16	0.18	0.16	<b>0.17</b>	0.26	0.25	0.25	<b>0.25</b>
<b>D85</b>	0.13	0.18	0.18	<b>0.16</b>	0.23	0.21	0.18	<b>0.21</b>
<b>D90</b>	0.15	0.15	0.14	<b>0.15</b>	0.21	0.24	0.17	<b>0.21</b>
<b>D95</b>	0.13	0.12	0.14	<b>0.13</b>	0.10	0.09	0.09	<b>0.09</b>



**Figure.III.12 :** Évolution temporelle des propriétés de résistance à la flexion pour les différentes variations de diatomite examinées.

### III.8. Interprétation des résultats

#### III.8.1. Les Propriétés physique

Les essais mécaniques effectués sur différentes variantes de diatomite ont révélé les observations suivantes concernant leur résistance à la flexion et à la compression :

- La masse volumique de variantes élaborées par la substitution des pourcentages de la diatomite a diminué par rapport aux variantes témoins, cela est expliqué par la Chapitre III Partie expérimentale
- faible masse volumique de la diatomite (0,58 g/cm<sup>3</sup>), cette diminution évolue en fonction de l'augmentation du pourcentage d'introduction.

### **III.8.2. Les propriétés mécaniques**

L'utilisation de la diatomite algérienne comme matériaux de remplacement, 70 %, 80 %, 90% et 95 % en poids de ciment tandis que la quantité d'eau a été maintenus constants. La résistance mécanique a été déterminée à l'âge 7 et 28 jours, et les résultats des tests en fonction de l'âge sont présentés.

La résistance à la flexion a été déterminée à l'âge de 7 et 28 jours, et les résultats sont présentés en fonction de l'âge dans le tableau III.13 et la figure III.12. En général, la résistance à flexion des pâtes diminuait avec l'augmentation de la teneur en diatomite. Les valeurs de la résistance à la flexion de mortiers substitués (70, 75, 80, 85,90 et 95 %) variée entre 0.13 MPa et 0.31 MPa à l'âge de 07 jours et 0.09 MPa et 0,33 MPa à l'âge de 28 jours.

Comme prévu, la résistance mécanique augmenté avec l'âge. Le taux d'augmentation est en fonction de niveau de remplacement de la diatomite et l'âge. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en diatomite, on observe que La résistance mécanique à la compression de la pâte substituée par la diatomite algérienne (70, 75, 80, 85,90 et 95 %) varie de 11.27 MPa à 2,79 MPa à l'âge de 7 jours et 16,11 MPa à 2,40 MPa à l'âge de 28 jours.

Les éprouvettes contenant 70% et 80% de matériaux de remplacement (diatomite) ont une résistance à la compression plus élevée comparable aux pâtes à 85% à 95% de diatomite ont résistance à la compression inférieure aux valeurs minimales données dans les normes européenne (Terre cuite (NF EN 771-1) et Terre crue (XP P13-901)) et les normes algérienne (BTC (terre compressé) 2 à 5 MPa (usage courant)).

## Conclusion générale

---

Ce travail a été consacré à la valorisation d'une des ressources naturelles que possède l'Algérie. L'étude entreprise dans ce mémoire indique qu'il est possible d'exploiter les gisements de ressources naturelles telles que la diatomite pour produire des mortiers, des briques et la fabrication des ciments composés.

Afin de réduire l'effet de serre attribué aux émissions de CO<sub>2</sub> apportées par les industries cimentaires et afin d'optimiser leurs coût de production, on a réalisé des pâtes par substitution d'une partie du ciment par de la diatomite.

Les résultats de nos travaux réalisés ont conduit aux constatations et conclusions suivantes :

- Faible densité,
- La résistance mécanique des pâtes du ciment est inversement proportionnelle avec le dosage de poudre diatomite,
- La formulation qui donne les meilleures résistances est celle obtenue en remplaçant 70% à 80% du ciment par la diatomite,
- L'utilisation de la diatomite permet aussi d'avoir des matériaux absorbants.

### **Recommandations**

Afin de compléter le travail de ce mémoire nous suggérons les recommandations pratiques suivantes :

- ✓ Suivre l'évolution de la résistance à la compression et à la traction par flexion à long terme.
- ✓ Suivre la conductivité électrique et thermiques.

### REFERENCE

- [01] Rocher PH. (1995). Mémento roches et minéraux industriels – Diatomite : Rap. BRGM, R38758, 62p.
- [02] Mineral comidity summaries 2024 – diatomite (pdf)
- [03] Djeribiai W ; Chegaar O, «Elimination de polluant organique(phénol) par adsorption sur argile naturelle., thèse MASTER 2018. Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued.
- [04] Van Den Broeck, JULES. La Diatomite (Kieselgur), les diatomées et leurs emplois dans l'industrie. Société des silices fossiles de France, (1948).
- [05] ANDI. (2015). Potentiel minéral de l'Algérie. Direction générale des mines/ ministère de l'industrie et des mines. URL : <http://www.andi.dz/PDF/Article/Potentiel%20Mineral%20de%20l'Algerie%202.pdf>
- [06] Messeaouda F. (2015). Etude de la capacité de rétention et d'élimination des cations métalliques par des adsorbants naturels. Université de Mustapha Stambouli : Mascara, Algérie. Thèse de doctorat : Biologie, science de la nature et de la vie, 184 p.
- [07] H. MERADI, Synthèse et caractérisation d'une poudre thermo protectrice à 1600 °C, mémoire de magister, université d'Annaba, 2009.
- [08] ALEXANDER, GO B., W. M. HESTON, et R. K. ILER. "The solubility of amorphous silica in water." The Journal of Physical Chemistry vol.58, no 6, p.453-455. Doi: 10.1021/j150516a002, (1954).
- [09] LIU, HUAN, ZHAO, YONGCHUN, ZHOU, YUMING. Removal of gaseous elemental mercury by modified diatomite. Science of the Total Environment, vol. 652, p. 651-659, (2019).
- [10] AL-GHOUTI, M. A., KHRAISHEH, M. A. M., ALLEN, S. J., et al. The removal of dyes from textile wastewater: a study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth. Journal of environmental management, vol. 69, no 3, p. 229-238, (2003).
- [11] AL-GHOUTI, M., KHRAISHEH, M. A. M., AHMAD, M. N. M., et al. Thermodynamic behaviour and the effect of temperature on the removal of dyes from aqueous solution using modified diatomite: a kinetic study. Journal of Colloid and Interface Science, vol. 287, no 1, p. 6-13, (2003).
- [12] Vasconcelos et al; Permeability of diatomite layers processed by different colloidal techniques; J. of the Eur. Ceram. Soc. 20, pp201-207, (2000)
- [13] Round FE, Crawford RM, Mann DG (1990) The diatoms. Biology and morphology of the genera, Cambridge University Press, pp 747.

## Références Bibliographiques

---

- [14] Hustedt F (1939) Systematische und ökologische Untersuchungen über die Diatomeenflora von Java, Bali und Sumatra. Arch. Hydrobiol./Suppl. 16: 274-394.
- [15] Mereschkowsky, C. (1902-1903). Les types de l'endochrome chez les diatomées. Scripta Botanica 21 : 1-193.
- [16] Schmid AMM (2001) Value of pyrenoids in the systematics of the diatoms: their morphology and ultrastructure. In Proceedings of 16th International Diatom Symposium. Amvrosiou. Athens (A. Economou-Amili, éditeur): 1-30.
- [17] Kooistra, W. H. C. F., Medlin, L. K. (1996). Evolution of the diatoms (Bacillariophyta). IV. A reconstruction of their age from small subunit RNA coding regions and the fossile records. Molecular Phylogenetics and Evolution 6 : 391-407.
- [18] Ruck, E. C. Theriot, E. C. (2011). Origin and evolution of the canal raphe system in diatoms. Protist. Sous presse.
- [19] H. MERADI, Synthèse et caractérisation d'une poudre thermo protectrice à 1600 °C, mémoire de magister, université d'Annaba, 2009.
- [20] CLARKE, Jonathan. "The occurrence and significance of biogenic opal in the regolith." Earth-Science Reviews, vol.60, no 3-4, p. 175-194. Doi : 10.1016/S0012- 8252(02)00092-2, (2003)
- [21] HARWOOD, DAVID M., NIKOLAEV, VLADIMIR A., et WINTER, DIANE M. "Cretaceous records of diatom evolution, radiation, and expansion." The Paleontological Society Papers, vol.13, p. 33-59. Doi : 10.1017/S1089332600001455, (2007).
- [22] FLOWER, R.J. Diatom Methods Diatomites: Their Formation, Distribution, and Uses. In: Elias, S.A. and Mork, C.J. (Eds.), Encyclopedia of Quaternary Science, Elsevier, Amsterdam, p. 501-506, (2013)
- [23] BRADBURY, J. P., et W. N. KREBS. "Fossil continental diatoms: paleolimnology, evolution, and biochronology." Short Courses in Paleontology, vol.8, p. 119-138. Doi: 10.1017/S2475263000001458, (1995).
- [24] THERIOT, EDWARD C., FRITZ, SHERILYN C., WHITLOCK, CATHY, et CONLEY, DANIEL J. "Late Quaternary rapid morphological evolution of an endemic diatom in Yellowstone Lake, Wyoming." Paleobiology, vol.32, no 1, p. 38-54. Doi : 10.1666/0094-8373, (2006).
- [25] OPFERGELT, S., EIRIKSDOTTIR, E.S., BURTON, K.W., EINARSSON, A., SIEBERT, C., GISLASON, S.R., HALLIDAY, A.N. Quantifying the impact of freshwater diatom productivity on

## Références Bibliographiques

---

silicon isotopes and silicon fluxes: Lake Myvatn, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters* 305, p. 73–82, (2011).

[26] BARKER, Philip A., HURRELL, Elizabeth R., LENG, Melanie J., PLESSEN, Birgit, WOLFF, Christian, CONLEY, Daniel J., KEPPENS, Eddy et al. "Carbon cycling within an East African lake revealed by the carbon isotope composition of diatom silica: a 25- ka record from Lake Challa, Mt. Kilimanjaro." *Quaternary Science Reviews*, vol.66, p. 55-63. Doi : 10.1016/j.quascirev.2012.07.016, (2013).

[27] WALLACE, ALAN R. "Chapter B: Regional Geologic Setting of Late Cenozoic Lacustrine Diatomite Deposits, Great Basin and Surrounding Region: Overview and Plans for Investigation." *Bulletin* 2209-B. Doi : 10.3133/b2209B, (2003).

[28] FRINGS, PATRICK J., CLYMANS, WIM, JEPPESEN, ERIK, LAURIDSEN, TORBEN L., STRUYF, ERIC et CONLEY, Daniel J. "Lack of steady-state in the global biogeochemical Si cycle: emerging evidence from lake Si sequestration." *Biogeochemistry*, vol.117, no 2, p. 255-277. Doi: 10.1007/s10533-013-9944-z, (2014).

[29] PLUNKETT, G. M., N. J. WHITEHOUSE, V. A. HALL, D. M. BROWN, ET M. G. L. BAILLIE. "A precisely-dated lake-level rise marked by diatomite formation in northeastern Ireland." *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, vol.19, no 1, p. 3-7. Doi: 10.1002/jqs.816, (2004).

[30] Caractérisation sur les matériaux minéraux (Diatomite) pour l'élimination des colorants de Textile (mémoire 2023/2024) Université de RELIZANE.

[31] Jang, SH. Min, TH. Kim, JK. Park. «Removal of arsenate and arsenite using hydrous ferric oxide incorporated into naturally occurring porous diatomite », *Environmental Science & Technology*, <https://doi.org/10.1021/es051501t>, 40,1636-1643/16369, VOL. 40, N° 5, (2006).

[32] J. P. Eberhart, *Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux solides*, Doin, Editeurs,(1976).

[33] Z.Ghemouda. Effet plasmas des ions d'argon (Ar+) sur l'interaction entre des couches minces réfractaires et des substrats en acier : analyse par le rayonnement "X, thèse de Magister, UNIV. D'OUARGLA. (2009).

[34] Diffraction-rayons-X techniques -Determination-structure.xml. Consulté le 07/2019.

[35] Jean-Jacques Rousseau, *Cristallographie géométrique et radiocristallographie*, Ed. Dunod, Paris, (2000).

[36] Iso 13320 Analyse granulométrique par diffraction laser -Méthodes par diffraction l(2020)

[37] BRGM/RP-68326-FR – Rapport final

## Références Bibliographiques

---

- [38] <http://charef.canalblog.com/archives/2006/12/12/3412851.html> 13:25 29/03/2022
- [39] La norme européenne NF EN 197-1.
- [40] BLIZAK Ahmed Khalil, « Influence de sable mixte sur les propriétés du micro béton au ciment blanc », Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Département de génie civil 2016.
- [41] OUNNAS Rym «Elaboration et caractérisation d'un ciment à base d'une opale », Université BADJI MOKHTAR - ANNABA, Département de génie civil 2020/2021.
- [42] La norme belge NBN B 12-109:2020.
- [43] doctorat de l'université de Toulouse Délivré par l'Université Toulouse III-Paul Sabatier  
Discipline ou spécialité : Génie Civil Présentée et soutenue par Fatma SAIDAT Le 12-02-2013
- [44] BENKACI Djamel, « Caractérisation et valorisation de la diatomite (contribution à l'évaluation du potentiel industriel) » Mémoire de Magister En : Génie Minier, à Ecole Nationale polytechnique (2015).
- [45] La norme européenne NF EN 12504-4.

***SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS***

**CEMII42.5R** Ciment portlandite artificielle classe 42.5

**E/L** Rapport eau sur ciment/diatomite

**Mair** Masse de l'éprouvette d'essai, pesée dans l'air (g)

**M eau** Masse de l'éprouvette d'essai, pesée dans l'eau (g)

**Msec** Masse de l'éprouvette d'essai, séché à 105°C (g)

**M initiale** Masse de l'éprouvette d'essai avant l'absorption dans l'eau (g)

**M finale** Masse de l'éprouvette d'essai après l'absorption dans l'eau (g)

**MV** Masse volumique de mortier (kg/m<sup>3</sup>)

**MI** la masse des éprouvettes avant l'immersion dans la solution (g).

**M2** la masse des éprouvettes après l'immersion dans la solution (g).

**Pw** les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation

**PWV** la Porosité Totale du matériau

**Rc** Résistance mécanique à la compression

**Rtf** Résistance mécanique à la traction par flexion

**HCl** Acide chlorhydrique

**NaOH** Hydroxyde de sodium

**NaCl** Chlorure de sodium

**(CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O)** Solution de sulfate de calcium

**MgSo<sub>4</sub>** Sulfate de magnésium

**CH<sub>3</sub>COOH** Acide Acétique

**CaSO<sub>4</sub>** Sulfate de calcium