

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département des Mines et
de Géologie

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER en Mines et Géologie

Option : Valorisation des ressources minérales

THEME

*Contribution à la caractérisation minéralogique du marbre de Fil-Fila
(Skikda)*

Présenté par :
OUAHAB Ali Idris
ALOUANE Fayçal

Encadré par :

Mr. AKDIM Abdelghani

DEVANT LE JURY

Mme. SOUCI

Mme. BOUNAB

PRESIDENTE

EXAMINATRICE

2020/2021

Remerciements

- ✓ *Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et particulièrement Mr AKDIM Abdelghani notre promoteur et mademoiselle BOUCIF Rima qui nous a aidés durant toute l'année.*
- ✓ *Nous remercions les membres du jury : Monsieur MOUSSACEB Karim de nous avoir fait l'honneur de présider le jury, Madame KICHER Kahina d'avoir accepté de faire partie du jury ainsi que d'examiner notre modeste travail.*
- ✓ *Nous voudrions remercier aussi toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail, le personnel du laboratoire de Génie minier et Génie des procédés pour leur aide et support.*
- ✓ *Nous remercions également la marbrerie industrielle « Bourai » pour avoir accepté de nous recevoir au sein de leurs unités.*
- ✓ *Nous tenons aussi à remercier tous nos amis, rencontrés pendant notre parcours universitaire pour leurs encouragements durant toutes ces années d'études.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère qui veille sur moi depuis les cieux

Ainsi qu'à mon père pour tout ce qu'ils ont fait et pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant toutes mes études.

Mon très cher frère Yacine

Ma chère sœurs Nawel.

Mes amis, Hocine, Sofiane, Aimad, Siham et Sara

A tous les enseignants que j'ai pu rencontrer pendant mon parcours scolaire et qui m'ont permis d'atteindre cet objectif.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Toute la famille ALOUANE. Et surtout à mes parents pour tout ce qu'ils ont fait et pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant toutes mes études.

Mes chers frères et leurs enfants.

Mes chères sœurs et leurs enfants.

Mes amis et amies

A tous mes enseignants de l'université Abderrahmane Mira Bejaia, que ce soit ceux du département science et technologie ou ceux génie minier.



Glossaire

DRX : Diffraction de rayons X

PAF : Perte au feu

LOI : Loss on ignition

FX : Fluorescence X

FTIR : Fourier transform infrared spectroscopy

UV-VIS : Ultraviolet visible

IRTF : Infrarouge à transformé de Fourier

TF : Transformé de Fourier

FFT : Fast Fourier transform

KBr : Bromure de potassium

KN : Kilo Newton

SAA : Spectroscopie d'absorption atomique

PPB : Partie par milliard

CSIRO : Commonwealth scientific and industrial research organization

TCLP : Toxicity characteristic leaching procedure

ATG : Analyse thermogravimétrique



Table des matières

Introduction	1
Chapitre I : Revue bibliographique	3
I.1. Le marbre	3
I.1.1. Définition du marbre	3
I.1.2. Histoire du marbre	4
I.1.3. Origine du cipolin	5
I.1.4. Aperçu minéralogique des marbres de Fil-Fila	5
I.1.5. Les types de marbres	6
I.1.6. Les gisements de marbre en Algérie	8
I.1.7. Les caractéristiques des produits de l'Enamarbre (carrière de Fil-Fila)	11
I.2. Domaine d'utilisation du marbre	12
I.2.1. Les produits dérivés du marbre	12
I.2.2. Le marbre dans la décoration	14
I.3. Marbrerie industrielle « Bourai »	14
I.3.1. Présentation de la marbrerie industrielle « Bourai »	15
I.3.2. Présentation des produits de la marbrerie	16
I.3.3. Schéma technologique de la production	18
I.4. Conclusion	25
Chapitre II : Analyses et caractérisations	26
II.1. Analyses des matières premières	26
II.1.1. Analyse granulométrique	26
II.1.2. Diffraction des rayons X	28
II.1.3. La perte au feu (PAF)	30
II.1.4. Spectrométrie de fluorescence des rayons X	31
II.1.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	35
II.1.6. Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)	38
II.2. Analyse sur les produits finis : Résistance à la compression	50
II.2.1 définitions	50
II.2.2. Courbe contrainte-déformation	51



II.2.3. Mode opératoire	51
II.3. Conclusion.....	52
Chapitre III : Résultats et discussions	53
III.1. Analyses des matières premières	53
III.1.1. Analyse granulométrique	53
III.1.2. Diffraction des rayons X.....	54
III.1.3. La perte au feu (PAF).....	57
III.1.4. La fluorescence X	58
III.1.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	61
III.1.6. La spectrométrie d'absorption atomique	63
III.2. Analyse des produits finis : Résistance à la compression.....	70
III.3. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72



Liste des figures

Figure 1: Marbre brut.	3
Figure 2 : Le Taj Mahal.....	5
Figure 3 : Echantillons de marbres antiques : Musée gallo-romain de Fourvière à Lyon.....	6
Figure 4 : Le Lincoln Memorial, construit principalement en marbre de Yule et en calcaire de l'Indiana.....	7
Figure 5 : Carte des principales ressources minérales d'Algérie (ORGM).....	9
Figure 6 : Carte géographique du massif de Fil-Fila (Google maps, 36.89690282801099, 7.09484471139334).....	10
Figure 7 : Carte géologique du massif de Fil-Fila (ORGM 2011).....	11
Figure 8 : Cave et ses coffres de marbre dans lesquels le lardo di Colonnata s'affine.....	13
Figure 9 : Dalle de marbre produite à la marbrerie industrielle "Bourai" (Béjaïa).....	14
Figure 10 : marbrerie industrielle "Bourai"	15
Figure 11 : Situation géographique de la marbreire industrielle "Bourai"	15
Figure 12 : Revêtement de mur en marbre	16
Figure 13 : Marche et contremarche.....	17
Figure 14 : Carreaux de marbre	17
Figure 15 : Sacs de déchets destinés au stockage	18
Figure 16 : Grains de marbre (blanc à gauche ; gris à droite).....	19
Figure 17 : Doseur des matières premières.....	20
Figure 18 : Malaxeur	21
Figure 19 : Moulage des dalles	21
Figure 20 : Vibrateur	Dalle après la vibration22
Figure 21 : Four.....	22
Figure 22 : Polisseuse industrielle.....	23
Figure 23 : Ponceuse manuelle	24
Figure 24 : cuves de stockage et de traitement des eaux	24
Figure 25 : Tamiseuse à vibrations	28
Figure 26 : Four à haute température	30
Figure 27 : Spectromètre de fluorescence X (Philips PW1606) à manutention automatique d'échantillons.....	31

Figure 28 : Expulsion d'un électron par une source X	32
Figure 29 : Recombinaison d'un électron d'une couche externe vers une couche interne provoquant l'émission de photons X	33
Figure 30 : Schéma d'un appareil de fluorescence X	34
Figure 31 : Spectromètre FTIR	36
Figure 32 : Préparation des pastilles.....	37
Figure 33 : Spectromètre d'absorption atomique	38
Figure 34 : Illustration des trois lois de la spectroscopie	40
Figure 35 : échantillons de marbre gris et blanc mise en solution pour la SAA.....	40
Figure 36 : Broyeur à disques	41
Figure 37 : étalons de plomb.....	44
Figure 38 : étalons de cadmium	46
Figure 39 : étalons de zinc	47
Figure 40 : étalons de cuivre	49
Figure 41 : Machine à traction du LTPE	52
Figure 42 : Distribution granulométrique des échantillons de marbre	54
Figure 43 : Spectre de la DRX du marbre blanc	55
Figure 44 : Spectre de la DRX du marbre gris.....	56
Figure 45 : Les éléments obtenue par la FX du marbre blanc	59
Figure 46 : Résultats de la FX du marbre gris	60
Figure 47 : Spectre de la FTIR du marbre blanc	61
Figure 48 : Spectre de la FTIR du marbre gris	62
Figure 49 : Courbe de tendance du cadmium (Cd)	64
Figure 50 : Courbe de tendance du Zinc (Zn).....	65
Figure 51 : Courbe de tendance du plomb (Pb)	67
Figure 52 : Courbe de tendance du cuivre (Cu)	68
Figure 53 : Courbe de tendance du fer (Fe).....	69
Figure 54 : Résistance à la compression de nos 3 morceaux de dalles	71



Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique du nitrate de plomb	42
Tableau 2 : Caractéristique du nitrate de cadmium.....	42
Tableau 3 : Caractéristique du nitrate de zinc	42
Tableau 4 : Caractéristique du nitrate de cuivre	42
Tableau 5 : Caractéristique du nitrate de fer.....	42
Tableau 6 : étalons de plomb	44
Tableau 7 : étalons de cadmium	45
Tableau 8 : étalons de zinc	47
Tableau 9 : étalons de cuivre	48
Tableau 10 : étalons de fer.....	50
Tableau 11 : Résultats de l'analyse granulométrique	53
Tableau 12 : Phases minéralogique de la DRX du marbre blanc	55
Tableau 13 : Phases minéralogiques du marbre gris.....	56
Tableau 14 : Fx du marbre blanc	58
Tableau 15 : FX du marbre gris	59
Tableau 16 : Liste des pics d'absorption de la FTIR du marbre blanc	61
Tableau 17 : Liste des pics d'absorption de la FTIR du marbre gris.....	62
Tableau 18 : Concentrations de cadmium obtenus par la SAA	64
Tableau 19 : Concentrations du zinc obtenus par la SAA.....	66
Tableau 20 : Concentrations du plomb obtenus par la SAA	67
Tableau 21 : Concentrations du cuivre obtenus par la SAA.....	68
Tableau 22 : concentrations du fer obtenues par la SAA	70
Tableau 23 : Résultats de la résistance à la compression	70

Introduction

Le marbre est considéré comme l'un des premiers, des plus beaux et des plus prestigieux matériaux de finition et de décoration, son utilisation remonte aux empires romains et grecques. Très prisé à l'époque, l'homme a appris à le manier et à l'introduire dans l'art pour en faire la décoration des maisons et des palais

Le Taj Mahal, le péristyle du Grand Trianon de Versailles, l'Acropole d'Athènes, la basilique Sainte-Sophie de Constantinople, le Davide de Michel Ange... autant de merveilles architecturales faites à partir de marbre, sans oublier les innombrables statues à l'effigie des dieux grecs et des empereurs passés. (1)

De nos temps modernes l'homme a trouvé plusieurs autres utilités aux marbres outre la décoration. Il est utilisé tout autant pour ses propriétés physico-chimiques que esthétiques, il est utilisé dans l'élaboration des produits cosmétiques et d'hygiène comme les dentifrices, les masques de beauté, les fonds de teint ... il est utilisé aussi dans l'élaboration des peintures et même dans la conservation de la viande.

De nos jours l'humain est souvent en contact avec du marbre, ce dernier présente-t-il un danger en termes de toxicité, des caractéristiques physico-chimiques assez fiables pour une utilisation quotidienne ainsi que des caractéristiques physico-mécaniques ?

Dans ce travail, nous étudierons le marbre algérien, extrait du gisement de Filfila à Skikda, et utilisé par la marbrerie industrielle « Bourai » située à Béjaïa dans la fabrication de marches, de contremarches, et de revêtement des façades.

En premier lieu, nous définirons le marbre, la marbrerie industrielle « Bourai », le gisement de Filfila ainsi que le procédé technologique de la marbrerie industrielle de fabrication de marches et de contremarches.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les différentes analyses physico-chimiques que nous avons effectuées sur nos échantillons prélevés à l'usine de traitement (Marbrerie industrielle), nous définirons ces différentes analyses, nous expliquerons quelques principes de celles-ci et nous présentons les modes opératoires qu'on a suivis afin d'effectuer ces analyses.

En dernier lieu, nous présenterons nos résultats obtenus des différentes analyses, nous discuterons ces derniers et on les comparera à quelques normes qu'on a trouvées.

Caractérisation et valorisation des marbre dans les matériaux de finitions.

On conclura par un débrief des résultats et un avis des locaux et sur l'avenir de l'industrie du marbre en Algérie.

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Le marbre

I.1.1. Définition du marbre

D'un point de vue littéraire, le terme « marbre » est une appellation traditionnelle dérivée du grec marmaros, qui signifie « pierre resplendissante », puis du latin marmor, et indiquant n'importe quelle pierre lustrable, c'est-à-dire dont la surface pouvait être lustrée au moyen de polissage. Dans ce sens, l'appellation ne se réfère qu'à la capacité d'une roche à être polie et refléter la lumière.



Figure 1:Marbre brut

D'un point de vue scientifique un marbre est une roche métamorphique dérivant d'un calcaire ou d'une dolomie sédimentaire ayant été transformée généralement par le métamorphisme régional ou plus rarement par métamorphisme de contact. Dans ce processus de transformation de la roche originelle, les structures sédimentaires sont effacées et la roche carbonatée recristallise en un amas de cristaux de calcite et/ou de dolomie engrenés de dimensions millimétriques à centimétriques. Les intercalations argileuses, les minéraux détritiques ou les oxydes minéraux présents dans le carbonate originel donnent alors au marbre diverses colorations et veinages polychromiques du plus grand effet esthétique. (Figure 1)

Comme toutes les roches d'origine métamorphique (ex. les ardoises) et aussi fréquemment les roches d'origine magmatique (ex. granites), les marbres possèdent une schistosité, c'est-à-dire une direction préférentielle d'orientation des cristaux qui à

l'Antiquité était utilisée pour découper les blocs selon un plan de moindre résistance de la roche.(2)

I.1.2. Histoire du marbre

A l'époque de la Grèce antique, l'homme utilisait le marbre principalement dans l'art, c'est en effet une matière rare, lourde, fragile et précieuse que seuls des maîtres savaient travailler.

Utilisé aussi par la civilisation des Cyclades dans les sculptures rigides d'idoles funéraires, il est ensuite utilisé en blocs massif pour de prestigieuses réalisations architecturales religieuses comme les tombeaux ou les temples, ou encore même pour les stades.

Les Romains, qui partagent l'engouement pour ce matériau, ont systématisé la recherche, et développent les techniques d'extraction et de transformation. Le marbre fait alors partie des trésors que ramènent les généraux victorieux des provinces nouvellement conquises au même titre que les métaux précieux, les épices ou les esclaves.

L'aura de prestige, d'exclusivité et de luxe ne quitte désormais plus cette matière qui s'illustre dans les réalisations architecturales et artistiques les plus marquantes de l'histoire humaine (l'Acropole d'Athènes, la ville de Rome, la basilique Sainte-Sophie de Constantinople, les cathédrales de Pise, le David de Michel Ange, les temples jaïnset le Taj Mahal en Inde, l'Arche de la Défense à Puteaux, entre autres.) C'est l'une des trois roches officielles de l'état du Vermont, aux États-Unis, les autres étant le granite et l'ardoise. (1) (Figure 2)



Figure 2 : Le Taj Mahal (construction en marbre)

I.1.3. Origine du cipolin

Un cipolin est un calcaire ayant subi un faible métamorphisme qui a entraîné une recristallisation plus ou moins complète des minéraux notamment la calcite. Ainsi, ce sont les cristaux de calcite alors visibles après ce métamorphisme qui donnent l'aspect chatoyant à la roche après un polissage. Le métamorphisme est souvent dû à la pression des terrains situés au-dessus des niveaux calcaires.

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite. Il est gris pâle au rouge vif, si cette pierre est parcourue de veines et de veinules de teinte très variable qui leur donnent l'aspect marbré stricto sensu. (1) (3)

I.1.4. Aperçu minéralogique des marbres de Fil-Fila

Macroscopiquement le marbre blanc présente un aspect homogène, une texture massive et une texture granoblastique. Ce marbre correspond à un calcaire microcristallin, constitué essentiellement de la calcite de forme isométrique irrégulière et de dimension de 0,2 à 0,4 mm.

Le marbre gris présente un aspect non homogène, une texture massive avec la présence de lentille de quartz et une structure microcristalline. Ce marbre correspond à un calcaire microcristallin composé essentiellement de cristaux de calcite de forme irrégulière allongée et de dimension variant de 0,5 à 1,2 mm. (4)

I.1.5. Les types de marbres

I.1.5.1. Les marbres antiques

La notion de marbre antique se rapporte au sens large de pierre polie, cela désigne des roches variées suffisamment fermes qui prenaient un aspect brillant après lustrage et que les anciens appelaient marmoros pour les Grecs, marmor pour les Latins, marmo pour les Italiens et marbre pour les francophones. On y compte de nombreux vrais « marbres » au sens strict moderne (calcaires métamorphisés et entièrement cristallisés) et d'autres calcaires durs (comme les albâtres, les brèches calcaires, entre autres) mais aussi de nombreuses autres roches très différentes des calcaires soit en composition, en texture ou en dureté, notamment des roches siliceuses qui sont beaucoup plus dures, comme les granites, diorites et gneiss, les porphyres, basaltes, serpentinite, etc. (Figure 3)



Figure 3 : Échantillons de marbres antiques : Musée gallo-romain de Fourvière à Lyon

Parmi les marbres antiques nous citons :

- * Marbres Italiens
- * Marbres Français
- * Marbres Egyptiens
- * Marbres Africains
- * Marbres d'Asie mineure
- * Marbre de la Grèce
- * Marbre de la Péninsule Libérique. (5)

I.1.5.2. Les marbres modernes

Les marbres modernes désignent les marbres utilisés dans le monde occidental à partir de la Renaissance et jusqu'à nos jours. Après plusieurs siècles d'utilisations moins intensives du marbre durant le Moyen Âge, de nombreuses carrières sont de nouveau exploitées et de nombreuses autres sont découvertes, depuis environ les XV^e et XVI^e siècles sous l'impulsion des Médicis souverains de Toscane en Italie, et de Louis XIV en France. (Figure 4)



Figure 4 : Le Lincoln Memorial, construit principalement en marbre de Yule et en calcaire de l'Indiana.

Parmi les marbres modernes on site :

- * Marbres de Grèce
- * Marbres d'Italie
- * Marbres de France
- * Marbres d'Espagne
- * Marbres du Portugal
- * Marbres du Royaume-Uni
- * Marbres d'Irlande
- * Marbres de Russie
- * Marbres nordiques
- * Marbres d'Allemagne
- * Marbres belges
- * Marbres algériens
- * Marbres hors d'Europe (États-Unis ; Québec). (5)

I.1.6. Les gisements de marbre en Algérie

L'Algérie possède des richesses minérales très diverses et variées, référencant 07 gisements de marbre en exploitation, et plus de 58 usines de transformation, le pays ne parvient pas à s'auto-suffire et importe chaque année plus de 500000 tonnes de marbre et de granite. Les autorités locales, entre-autre le ministre des mines encourage les privés à investir dans les gisements de marbre, et a annoncé qu'un plan est déjà préparé, aboutissant à la signature de 26 contrats visant à exploiter les 20 mines de marbre qui sont laissées à l'abandon pour le moment. (6)

I.1.6.1. Les gisements de marbre en exploitation en Algérie

Les 07 gisements de marbre actuellement en exploitation sont :

- * Carrière de Fil-Fila : marbre blanc ; marbre gris ; marbre reseda vert.
- * Carrière de Krystel : marbre rouge ; marbre jaune et rose.
- * Carrière de Mahouna : marbre mahouna.
- * Filon d'onyx de Ain Smara : marbre onyx doré.
- * Carrière de Bouhnifia : marbre onyx jaune.
- * Carrière de sidi M'Barek : travertin.
- * Carrière de Honaine : marbre blanc et vert. (Figure 5)

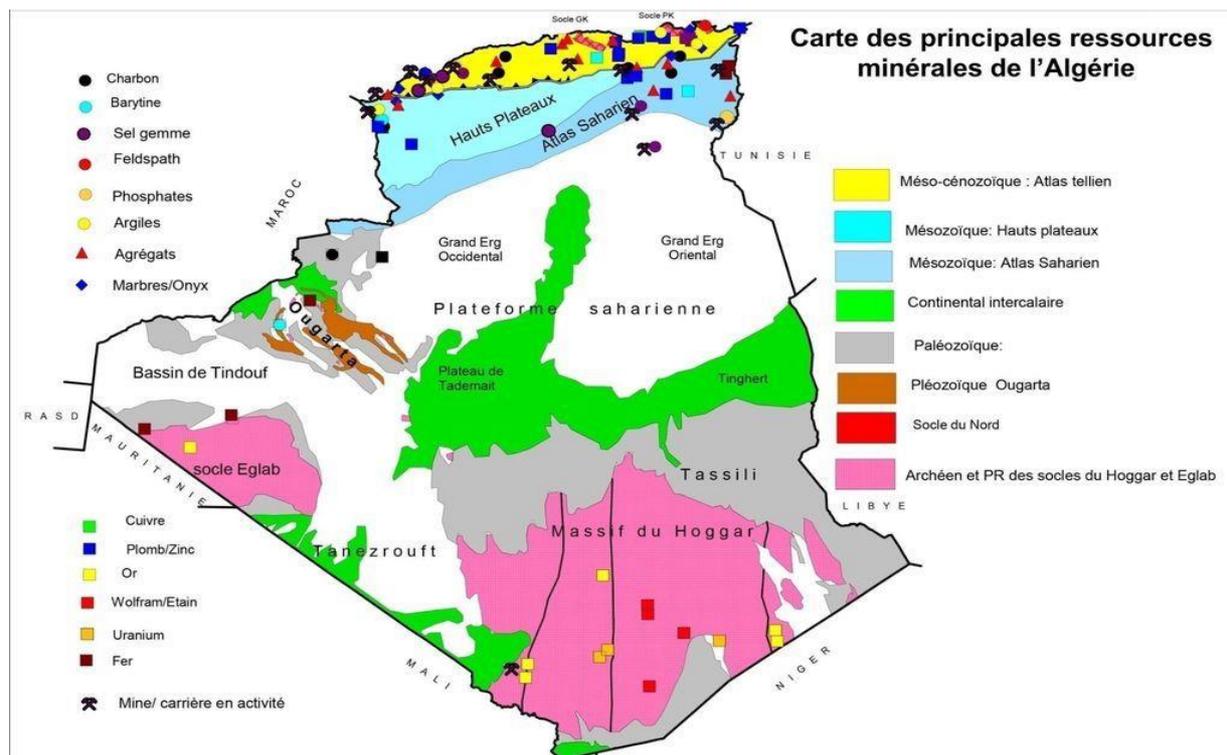


Figure 5 : Carte des principales ressources minérales d'Algérie (ORGM)

I.1.6.2. Le gisement de Fil-Fila

Nous nous sommes intéressés au gisement de Fil-fila de faite qu'il fournit la matière première (marbre), pour la marbrerie lieu de notre stage.

I.1.6.2.1. Situation géographique

Le massif de Fil-Fila est situé à l'Est de la ville de Skikda. La carrière de marbre (ENAMARBRE) occupe un terrain très accidenté d'altitude maximale de 580 m à proximité de deux points de repère, le signal Fil-Fila (M_1) à une altitude de 588 m au-dessus du niveau de la mer et le piton rocheux (M_2) à une altitude de 568 m au-dessus du niveau de la mer, les coordonnées Lambert de ces deux points de référence sont les suivant ($X_1=891-908$, $Y_1=408-586$) et ($X_1=891-593$, $Y_1=408-757$).

Le gisement de marbre est situé sur un plateau de 530-560 m d'altitude, délimité à l'Ouest par une pente abrupte et vers l'Est par une pente douce qui continue jusqu'à une altitude de 580 m. La carrière de marbre de Fil-Fila relève de la wilaya de Skikda. (6) (7) (Figure 6)



Figure 6 : Vu du ciel du massif de Fil-Fila (Google maps)

I.1.6.2.2. Géologie du massif de Fil-Fila

Djebel Fil-Fila se caractérise par la présence d'une série de roches argileuses, gréseuses et calcaires métamorphisés. Il existe parmi cette série de roches métamorphisées plusieurs corps lenticulaires de roches calcaires pures. La deuxième caractéristique géologique la plus marquante est la présence de deux grands massifs de granite à tourmaline qui sont situés du côté Nord-Est et Sud-Ouest du Djebel Fil-Fila, sur les deux côtés des granites apparaissent des formations de contact.

Vers l'Est et le Sud du Djebel Fil-Fila on retrouve des schistes à séricite et des micaschistes comprenant plusieurs veines de quartz sous-jacentes à une série de roches argileuses arénacées supposées être de l'éocène supérieur. Près du bord de la mer, on peut voir des schistes quartziques fortement plissées de l'Albo-Aptien. La partie occidentale du massif de Fil-Fila est recouverte par d'énormes accumulations de dunes de sable. (3) (6) (7) (Figure 7)

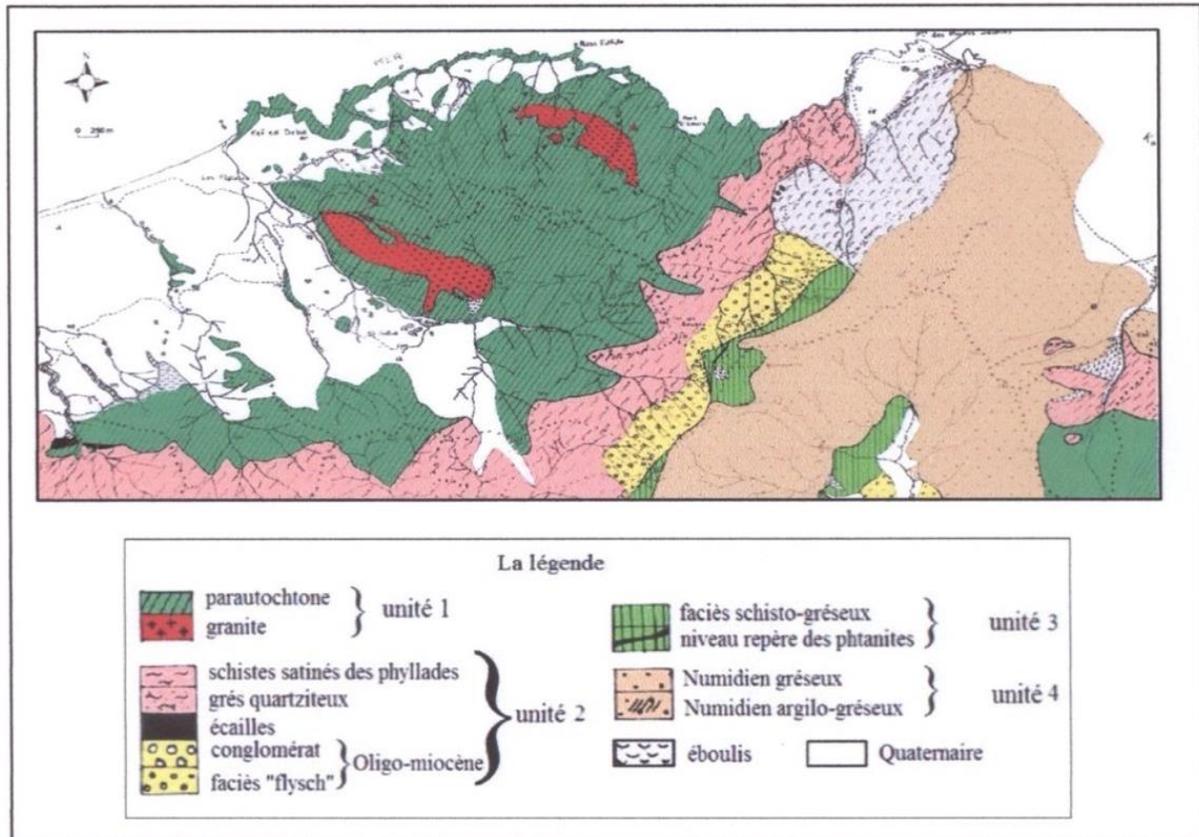


Figure 7 : Carte géologique du massif de Fil-Fila (ORGM 2011)

I.1.7. Les caractéristiques des produits de l'Enamarbre (carrière de Fil-Fila)

Les marbres retenus dans les industries des matériaux de finitions doivent répondre à certaines caractéristiques physico-mécanique, celles du gisement en question sont déterminées par l'office de recherche géologique et minière (ORGM), comme suit :

I.1.7.1. Propriétés physico-mécanique du marbre blanc

- Charge de rupture à la Compression à sec : 961 Kg /cm²
- Charge de rupture à la Compression après gélivité : 966 kg/ cm²
- Coefficient de saturation : 0,87 %
- Essai de résistance au choc : 40 (Kg /cm) cm³
- Essai de résistance à l'usure : 1,82 G/cm²
- Densité apparente : 2 684 Kg /m³
- Compacité : 98,03 %
- Porosité : 1,96 % (8)



I.1.7.2. Propriétés physico-mécanique du marbre gris

- Charge de rupture à la Compression à sec : 1 378 Kg /cm²
- Charge de rupture à la Compression après gélivité : 1 026 kg/ cm²
- Coefficient de saturation : 0,50 %
- Essai de résistance au choc : 56 (Kg /cm) cm³
- Essai de résistance à l'usure : 0,719 G/cm²
- Densité apparente : 1 738 Kg/m³
- Compacité : 88,7 %
- Porosité : 0,3 % (8)

I.2. Domaine d'utilisation du marbre

Les marbres sont utilisés dans les constructions, principalement dans les produits de finitions pour leur solidité et leur aspect esthétique

I.2.1. Les produits dérivés du marbre

I.2.1.1. Poudre de marbre

La poudre de marbre broyée en granulométrie fine est une charge minérale recherchée pour ses utilisations en peinture pour donner de la charge, en papeterie pour donner de la densité et de la brillance, en additif au pH neutre pour les plastiques, les cosmétiques, la pharmaceutique et la nourriture animale (apport de calcium). (9)

I.2.1.2. Dalle de marbre

Comme matériau de décoration, le marbre découpé sous forme de dalles est principalement utilisé pour le revêtement de murs et de sols intérieurs ou extérieurs. Il existe actuellement des techniques inspirées des produits composites qui permettent la réalisation des plaques de grandes dimensions, allégées et renforcées. (9)

I.2.1.3. Dispositif de conservation de la viande

Le marbre a été utilisé expérimentalement au XIX^e siècle pour la conservation de la viande. Et, aujourd'hui encore, et cela depuis des siècles, à Colonnata, les vasques de marbre blanc servent à la maturation du lard. (9)

I.2.1.4. Marbre en Métrologie

Le marbre peut être utilisé en métrologie, comme un comparateur (appareil de mesure) ou un Trusquin. Pour la métrologie, les caractéristiques recherchées du marbre sont :

- La planéité, pour avoir une surface de référence fiable sur toute la surface de travail.
- Une surface lisse (polie), pour permettre le déplacement aisé des instruments sur la surface de travail.
- La stabilité dans le temps, le marbre ne se déforme pas ou peu.
- La faible conductivité de chaleur.
- Le faible coefficient d'extension à la chaleur.
- La dureté, supérieure à des « marbres » en fonte ou en acier.
- La résistance à l'acide, à la rouille (par rapport à des « marbres » en fonte ou en acier).
- Son caractère amagnétique (seulement paramagnétique). (9) (Figure 8)



Figure 8 : coffres de marbre dans lesquels le lardo di Colonnata s'affine.

Le marbre est utilisé aussi dans la fabrication de dentifrice, dans certains produits cosmétique, dans la conception de certaines peintures ou comme alternative au ciment dans le béton. (10)

I.2.2. Le marbre dans la décoration

Très tendance en déco depuis quelques années, le marbre allie élégance et résistance. Longtemps utilisé comme plan de travail dans la cuisine et le revêtement de sol dans la salle de bains, il se faufile aujourd'hui dans le mobilier et les objets déco.

Dans notre cas, nous avons étudié les produits d'une entreprise locale « Terastonne » marbrerie industrielle « Bourai », spécialisée dans la production de dalles de marbres à partir de granulats de marbre gris et blanc du gisement de Fil-Fila. (Figure 9)



Figure 9 : Dalle de marbre produite à la marbrerie industrielle "Bourai" (Béjaïa)

I.3. Marbrerie industrielle « Bourai »

Société à responsabilités limitées, la marbrerie « Bourai » est l'une des plus active dans la région, elle répond aux besoins de l'industriel et couvre la demande du domaine du bâtiment en matière de produits de finitions, situé dans une zone accessible à la clientèle. (Figure 10)



Figure 10 : marbrerie industrielle "Bourai" Béjaïa (Prise le 04/04/2021)

I.3.1. Présentation de la marbrerie industrielle « Bourai »

Fondée en 2008 par les frères Bourai, la marbrerie anciennement appelée « Terastonne » siège au village de Djebira, Boukhelifa à Béjaïa, tandis que les produits finis sont présentés au showroom aux lieux dit 4 chemin dans la ville de Béjaïa. (Figure 11)



Figure 11 : Situation géographique de la marbrerie industrielle "Bourai" Bejaïa

I.3.2. Présentation des produits de la marbrerie

Les revêtements de murs sont des morceaux de marbre coupés aléatoirement d'une roche de marbre de forme cubique, afin d'avoir trois surfaces lisses et une surface amorphe qui donne un côté esthétique à la dalle.

Ces morceaux de marbre ont une largeur de 3cm, une longueur de 10 cm et une épaisseur qui est plus ou moins égale à 1,5 cm à quelques dixièmes de millimètre près. Ils sont collés l'un à l'autre à l'aide d'une résine collante durcissante. (Figure 12)



Figure 12 : Revêtement de mur en marbre (prise le 04/04/2021)

Les marches et contremarches sont découpés à la dimension voulu par le client à partir de dalles de marbres fabriquée dans l'usine. Plusieurs coloris sont disponibles (blanc et gris, blanc et beige, ou complètement blanc). Leurs épaisseurs sont de 2,5cm. (Figure 13)



Figure 13 : Marche et contremarche (prise le 04/04/2021)

Les chutes issues de la découpe des marches et contremarches sont réutilisées comme carreaux de 30 cm de longueur et de 20 cm de largeur. (Figure 14)



Figure 14 : Carreaux de marbre (prise le 04/04/2021)

Le reste des chutes dont les dimensions sont trop petites sont récoltées et entreposées et sont proposées aux publiques pour être utiliser comme remblais, ou sont acheminées vers un lieu de décharge si elles s'accablent en quantité dans l'usine. (Figure 15)



Figure 15 : Sacs de déchets destinés au stockage (prise le 04/04/2021)

I.3.3. Schéma technologique de la production

Pour la production des dalles de marbre, les ouvriers suivent un schéma spécifique de l'acheminement de la matière première à la livraison du produit fini aux clients.

I.3.3.1. Les quantités utilisées pour faire une dalle de marbre

La marbrerie industrielle fabrique des dalles de marbre de 67kg, d'une épaisseur de 2,5 cm et d'une superficie de 1,05 m² (1,5x0,7 m). Dans le processus de fabrication de ces dalles, la marbrerie utilise :

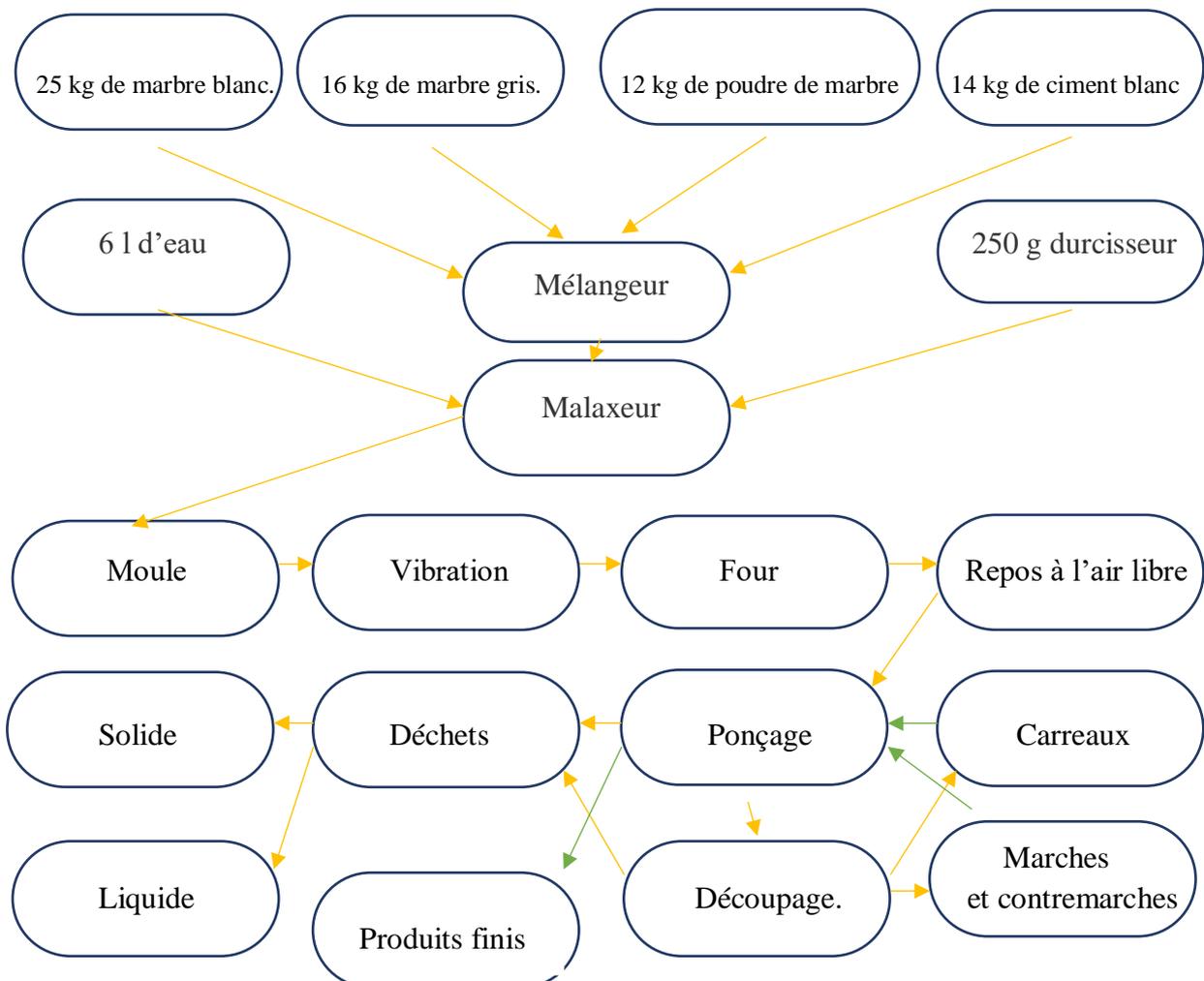
- 25kg de grains de marbre blanc,
- 16 kg de grains de marbre gris,
- 12kg de poudre de marbre (tous les trois provenant de la carrière de Fil-Fila),
- 14 kg de ciment blanc comme agent fixateur,
- 250g de durcisseur (SIKA)
- 6 litres d'eau. (Figure 16 : dépôts du marbre gris et blanc)(11)



Figure 16 : Grains de marbre (blanc à gauche ; gris à droite) prise le 04/04/2021

I.3.3.2. Schéma technologique

Nous avons schématisé le fonctionnement de l'industrie dans le diagramme ci-dessous :



I.3.3.3. Les étapes de production des dalles de marbres

I.3.3.3.1. Le mélange des matières premières

La première étape consiste à mélanger les matières premières préalablement pesées par les doseurs automatiques, puis elles passent par une trémie dans un mélangeur mécanique afin d'homogénéiser le tout. (Figure 17)



Figure 17 : Doseur des matières premières (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3.2. Ajout de l'eau et du durcisseur

Après le mélange des matières premières, 6 litres d'eau et 250 grammes de durcisseur (SIKA) sont ajoutés, puis malaxer le tout pour homogénéiser au maximum possible et bien répartir les différentes matières au moment du moulage de dalles de marbre et nous obtiendrons un bel effet esthétique. (Figure 18)



Figure 18 : Malaxeur (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3. Moulage et vibration de la dalle



Figure 19 : Moulage des dalles (prise le 04/04/2021)

Cette étape consiste à mettre dans un moule de 1,5 m de longueur et de 0,7 m de largeur, préalablement lubrifié avec un agent de démoulage le mélange des matières premières et de mettre les dalles dans un vibreur afin d'enlever toute bulle d'air présente dans le mélange et de réduire au maximum la porosité de la dalle finie. (Figure 19 et 20)



Figure 20 : Vibrateur + dalle de marbre après vibration (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3.4. Mise au four des dalles

Afin d'éliminer toute l'eau présente dans la dalle et d'accélérer le séchage, les dalles sont mises dans un four à 35° Celsius pendant 24 heures. Après cette étape, les dalles sont entreposées à l'air libre pour s'acclimater à l'atmosphère et à l'air libre avant de passer à l'étape du polissage. (Figure 21)



Figure 21 : Four de séchage (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3.5. Le polissage

Le polissage se fait par moulages successifs au moyen de meules tournantes horizontales. La grenaille d'acier, le carbure de silicium ou le carbure de bore, l'électro corindon, et les diamants naturels ou artificiels sont les produits abrasifs couramment utilisés. Des produits chimiques tels que l'acide sulfurique ou le sel d'oseille, peuvent par ailleurs être ajoutés à la poudre abrasive.



Figure 22 : Polisseuse industrielle (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3.6. Le découpage

Le découpage des dalles de marbres se fait selon les besoins du client, souvent l'ouvrier réussit à découper 2 marches ou 4 contremarches d'une dalle de 1,05 m² et 2 carreaux, pour cette étape des scies circulaires de fer doux sans dents sont utilisées, en y versant de l'eau dans la voie que fais la scie pour traverser la dalle.

I.3.3.3.7. Le polissage et le ponçage

Une fois découpé au grès du client, un polissage des bords des marches, contremarches et carreaux est effectué, afin de les rendre plus lisse et de limer les bords tranchants, pour cette étape des ponceuses manuelles sont utilisées. (Figure 23)



Figure 23 : Ponceuse manuelle (prise le 04/04/2021)

I.3.3.3.8. Recyclages des déchets

Une fois toutes ces étapes finissent, les produits finaux sont entreposés en attendant leur livraison aux clients. Tandis que les déchets produits par le découpage, sont récolter et emmagasinés, ainsi les déchets aqueux produits par le ponçage et le polissage sont traités, afin de séparer l'eau des résidus de marbre. (Figure 24)



Figure 24 : cuves de stockage et de traitement des eaux (prise le 04/04/2021)

L'eau est ensuite réutilisée dans les étapes de ponçage et de polissage, tandis que les résidus solides de marbre sont ajoutés aux déchets de découpage afin d'être donnés aux clients pour une utilisation comme remblais sinon envoyés dans une décharge.

I.4. Conclusion

Le marbre s'est fait une place importante dans notre société, grâce notamment à ses caractéristiques physico-chimiques qui présentes de grandes résistances à la compression, au choc et à l'usure, grâce à son cotés esthétique très prisé de nos temps et grâce aussi à la diversité de son utilisation.

Face à la forte demande, l'homme a réussi à développer plusieurs méthodes pour valoriser le marbre, dans notre cas, il est utilisé comme matériaux de décoration et de finition, donc la marbrerie industrielle à élaborer un schéma technologique adéquat afin de fabriquer des dalles à partir du marbre extrait du gisement de Fil-fila.



Chapitre II : Analyses et caractérisations

Dans ce chapitre, nous aborderons les différentes analyses effectuées sur les matières premières et les produits finis dans le but de les caractériser.

Les analyses effectuées sont :

Analyses des matières premières :

- Analyse granulométrique.
- Diffraction par rayon X. (DRX)
- La perte au feu. (PAF)
- La fluorescence X. (FX)
- La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. (FTIR)
- La spectroscopie d'absorption atomique. (SAA)

Analyse des produits finis :

- La résistance à la compression pour les produits finis.

Nous les définirons, Nous donnerons les principes de ces analyses et nous expliquerons le mode opératoire adopté pour les réaliser.

II.1. Analyses des matières premières

Les analyses des matières premières sont réalisées sur les marbres gris et blanc, échantillonnés aléatoirement au dépôt de l'usine de production.

II.1.1. Analyse granulométrique

II.1.1.1. Définition

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques physiques (poids, taille, ...). Par métonymie, c'est aussi le nom donné au résultat de cette analyse.

Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres, cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage ou par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, nous dénommons les granulats, fines, sables, gravillons ou cailloux. Cependant, pour un granulat donné, tous les grains qui le constituent n'ont pas tous la même dimension.

Pour cela, nous procédons au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, nous repartions les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

II.1.1.2. Matériel utilisé

Nous avons utilisé des tamis ayant des mailles carrées d'ouverture, la dimension nominale d'un tamis correspond à la longueur du côté de la maille (en mm) (norme NF X 11-501). Nous utilisons aussi une tamiseuse à vibrations de laboratoire et une balance pour peser chaque fraction obtenue.

Dimensions des tamis : 4mm ; 3,15mm ; 2mm ; 1,4mm ; 1mm ; 0,5mm ; 0,355mm.

II.1.1.3. Mode opératoire

La conception des dalles requiert des proportions massives bien précises de matières premières, cité précédemment. Afin de caractériser notre matériau, et pour des fins analytiques, nous avons procédé par un échantillonnage de type aléatoire à partir des fractions pesées afin qu'il soit représentatif le maximum possible.

Les poids des échantillons prélevés en été déterminés de sortes à reproduire les rapports entre les fractions des différentes matières premières nécessaires pour la conception d'une dalle.

- Grains de marbre blanc : 25kg  480g
 - Grains de marbre gris : 16kg  307,2
 - Poudre de marbre : 12kg  230,41
- * Nous avons superposé nos tamis de manières à ce que les dimensions des mailles soient décroissantes du haut vers le bas.
 - * Nous avons versé nos échantillons un par un dans la série de tamis et on allume la tamiseuse à une amplitude de 4 pendant 10 minutes.
 - * Nous avons pesé chaque fraction de nos échantillons. (Figure 25)



Figure 25 : Tamiseuse à vibrations (prise le 10/05/2021)

III.1.1.4. Broyage

Afin de caractériser les matières premières précédemment prélever, nous avons dû effectuer une préparation mécanique du marbre gris, le marbre blanc étant déjà dans les dimensions adéquates vu qu'il a déjà subi une préparation mécanique pour obtenir de la poudre de marbre.

La préparation mécanique du marbre gris consiste :

- * Peser 200g de marbre gris
- * Broyer le marbre gris à l'aide du broyeur à disque du Laboratoire de technologie des matériaux et du génie des procédés de l'université de Bejaïa jusqu'à avoir des dimensions inférieures à 0,063 mm.

II.1.2. Diffraction des rayons X

II.1.2.1. Définition

La cristallographie aux rayons X, radiocristallographie ou diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X par la matière, particulièrement quand celle-ci est cristalline.

La diffraction des rayons X est une diffusion élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie des photons (longueurs d'onde inchangées), qui donne lieu à des interférences d'autant plus

marquées que la matière est ordonnée. Pour les matériaux non cristallins, nous parlons plutôt de diffusion. (12)

II.1.2.2. Principe de la DRX

Les rayons X, comme toutes les ondes électromagnétiques, provoquent un déplacement du nuage électronique par rapport au noyau dans les atomes. Ces oscillations induites provoquent une ré-émission d'ondes électromagnétiques de même fréquence : ce phénomène est appelé diffusion Rayleigh.

La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angström), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire très faible ; ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction des rayons X.

Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées « pics de diffraction », peuvent être déterminées très simplement par la formule suivante, dite loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Avec

d = distance inter réticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques ;

θ = demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) ;

n = ordre de réflexion (nombre entier) ;

λ = longueur d'onde des rayons X.

Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller $\{hkl\}$, nous pouvons indexer les pics de diffraction selon ces indices. (12)

II.1.2.3. Mode opératoire

Nous avons préparé l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. Nous avons envoyé des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, nous avons fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

II.1.3. La perte au feu (PAF)

II.1.3.1. Définition

Lors de la chauffe d'un minéral, on peut avoir :

- Une perte de masse du fait du départ des espèces volatiles : c'est la perte au feu ;
- Un gain de masse dû à l'incorporation d'atomes d'oxygène (oxydation), nous parlons alors de « perte au feu négative » ou parfois de « gain au feu » (gain on ignition, GOI).

La « perte au feu » ou « LOI » (loss on ignition en anglais) est donc simplement la différence de masse :

Perte au feu = masse avant calcination m_0 - masse après calcination m_1

Nous l'exprimons parfois en pourcentage :

Perte au feu (%) = $100 \times (m_0 - m_1) / m_0$.

II.1.3.2. Matériel utilisé

- Un four à haute température (de 50° C à 3000° C). (Figure 26)
- Un dessiccateur à gel de silice.
- Deux jarres résistantes à la température.



Figure 26 : Four à haute température (prise le 15/06/2021)

II.1.3.3. Mode opératoire

- Nous avons broyé nos 2 échantillons de marbre à une dimension inférieure à 0,063mm

- Nous avons pesé environ 1g de nos 2 échantillons (marbre blanc ; marbre gris) qu'on met dans les jarres.
- Nous avons mis les jarres dans le four et on fait augmenter la température jusqu'à 1050° C.
- Nous avons laissé les jarres dans le four pendant 2h à 1050°C.
- Après les 2h, nous avons éteint le four et on attend que la température redescende.
- Nous avons pris nos 2 jarres et on les a mises dans le dessiccateur afin de protéger nos échantillons contre l'humidité.
- Enfin, nous avons pesé nos échantillons et nous calculons la PAF.

II.1.4. Spectrométrie de fluorescence des rayons X

II.1.4.1. Définition

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X.



Figure 27 : Spectromètre de fluorescence X.

Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X, c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, nous pourrions en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.(13)

II.1.4.2. Principe de la fluorescence X

Quand un matériau est soumis à un rayonnement de faible longueur d'onde et donc de forte énergie, comme les rayons X, les rayons gamma ou bien un faisceau d'électrons ou d'ions suffisamment accélérés, les atomes constituant le matériau peuvent subir une ionisation, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés des couches électroniques (on parle aussi d'orbitales atomiques) de chacun de ces atomes. On appelle rayonnement primaire la source énergétique qui produit l'ionisation, pour que celle-ci ait lieu, il est nécessaire que le rayonnement primaire soit assez énergétique pour arracher un électron de la couche interne de l'atome. Plus précisément, l'énergie des photons ou des particules primaires doit être plus grande que le potentiel d'ionisation. On appelle effet photoélectrique l'arrachement d'un électron sous l'effet d'un photon énergétique.

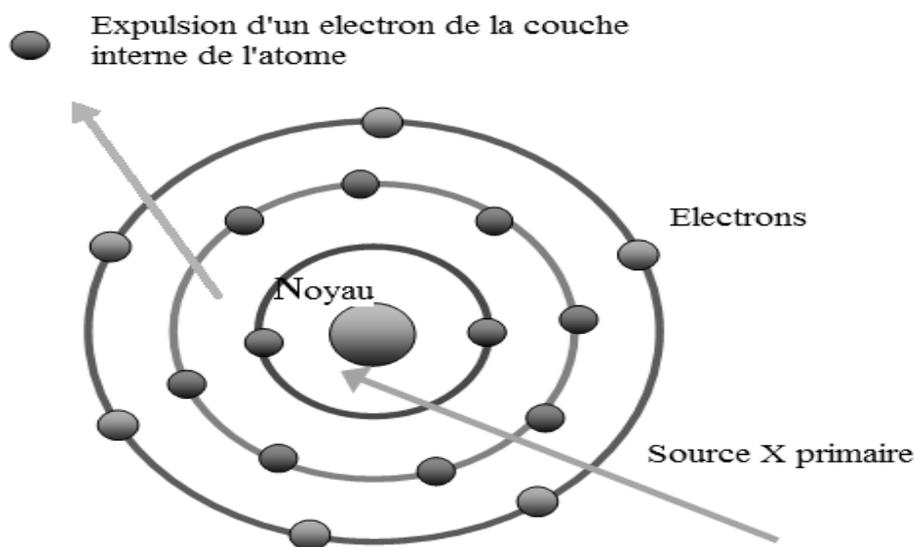


Figure 28 : Expulsion d'un électron par une source X

L'atome est alors dans un état excité mais la perte d'un électron a rendu la structure électronique de l'atome instable. La désexcitation se fait par une transition électronique : un électron d'un niveau plus élevé « descend » pour occuper la case quantique vide. Cette transition électronique provoque l'émission d'un photon X. Les photons ont une énergie comprise entre 50 eV et une centaine de keV et une longueur d'onde allant d'un dixième d'Å à 300 Å.

Comme ils sont dans le domaine des rayons X, il s'agit de fluorescence X. Si le photon est recapturé par le même atome et provoque l'éjection d'un électron périphérique, il s'agit d'une émission Auger.

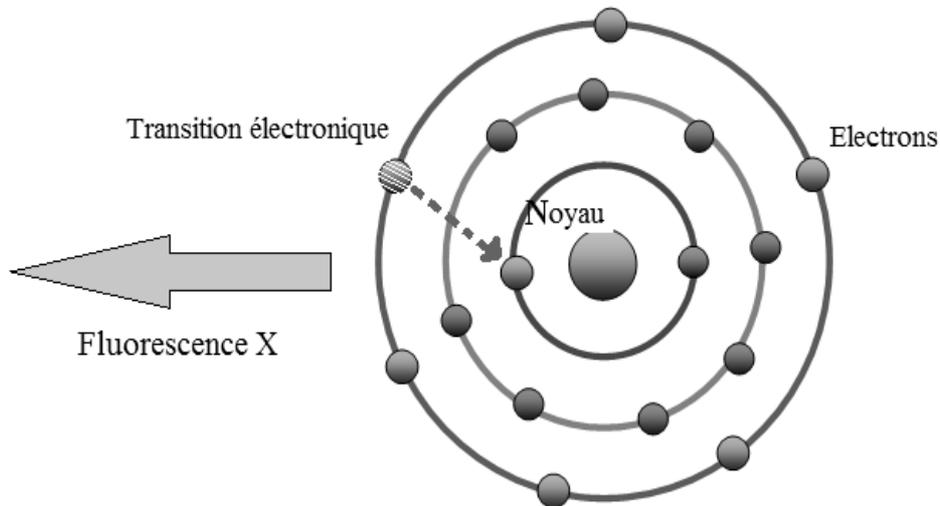


Figure 29 : Recombinaison d'un électron d'une couche externe vers une couche interne provoquant l'émission de photons X

L'énergie du photon X émis est égale à la différence d'énergie des deux orbitales concernées. Il est donc caractéristique de l'atome où l'émission a été générée. On appelle spectre d'énergie la distribution des énergies de l'ensemble des photons émis. Le spectre d'énergie est donc caractéristique de la composition de l'échantillon. Le terme de fluorescence est appliqué aux phénomènes dans lesquels l'absorption d'un rayonnement produit la réémission d'un rayonnement moins énergétique. (10)

II.1.4.3. Intérêts de l'analyse

La fluorescence X va nous permettre d'obtenir plusieurs types d'informations :

- Une information qualitative, avec les éléments dont la masse atomique est comprise entre 11 et 92 (Na jusqu'à U).
- Une information quantitative, allant d'une détection de l'ordre du ppm à 100% de l'élément.

Les échantillons pourront se trouver sous forme de solide, de poudre, de liquide ... avec des méthodes différentes :

- L'analyse spatiale d'un échantillon
- L'analyse d'un fragment
- La cartographie d'un échantillon permettant de montrer la distribution des éléments

La résolution spatiale est de 10 μm environ et le temps d'analyse est relativement long.

Les teneurs limites détectables sont de quelques dixièmes de ppm (en masse) ou de quelques ppm pour les éléments de numéro atomique supérieur à 14. Elles sont de quelques ppm ou quelques dizaines de ppm pour les éléments plus légers ($14 > Z > 8$). Naturellement, ces teneurs sont abaissées si l'on peut enrichir l'échantillon avant la mesure ; des montages particuliers, tels que ceux utilisant la réflexion totale, permettent d'abaisser encore la limite de détection. (13)

II.1.4.4. Instrumentation

Les spectromètres de fluorescence X utilisent des rayons X comme source d'excitation. Le faisceau est dirigé vers l'échantillon qui émet le rayonnement de fluorescence dans un angle solide uniquement limité par l'absorption. Il y a deux types d'appareils selon le mode de détection du rayonnement de fluorescence :

- Les spectromètres à dispersion d'énergie
- Les spectromètres à dispersion de longueur d'onde

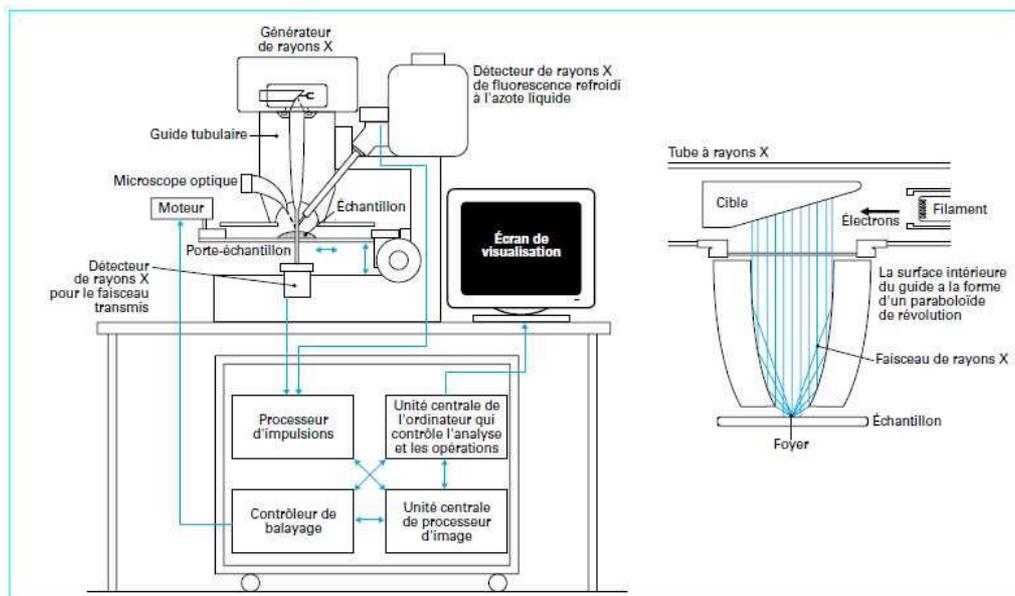


Figure 30 : Schéma d'un appareil de fluorescence X

Dans les spectromètres de laboratoire, on utilise généralement des tubes à rayons X comme source d'excitation. Pour ioniser les atomes de l'échantillon à analyser et provoquer leur

fluorescence, nous pourrions également utiliser des électrons rapides (15 à 30 keV). C'est notamment le cas des microscopes électroniques à balayages. Le faisceau d'électrons sert à constituer des images en « électrons secondaires » ou en « électrons rétrodiffusés » mais peut également être utilisé pour ioniser localement les atomes de l'échantillon et provoquer leur fluorescence. Compte tenu de la taille du faisceau et de la profondeur de pénétration des électrons, on dispose ainsi d'une sonde locale permettant l'identification et le dosage des éléments dans un volume de quelques mètres cubes

L'intérêt est de réaliser des micro-rayons X afin de traiter des surfaces les plus petits possibles. Pour cela les appareils sont équipés d'optique capillaire. Un capillaire est un tube de verre de faible diamètre intérieur. Le fonctionnement de l'optique capillaire est basé, comme pour le miroir spéculaire, sur le principe de la réflexion totale des rayons X par sa surface interne. En dessous de l'angle critique de réflexion, l'efficacité de transmission des rayons X à travers le capillaire est relativement importante. (13)

II.1.4.5. Préparation des échantillons

Selon la nature du matériau, l'échantillon mesuré peut être le matériau brut, sans préparation. C'est le cas d'un échantillon solide ayant une tenue mécanique suffisante et les bonnes dimensions, par exemple métal, verre ou polymère découpé aux bonnes dimensions.

Dans d'autres cas, l'échantillon doit faire l'objet d'une préparation

- Poudre obtenue par broyage.
- Verre obtenu par dissolution du matériau.
- Liquide mis dans une coupe.

II.1.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

II.1.5.1. Définition

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie IRTF (ou encore FTIR, de l'anglais Fourier Transform InfraRed spectroscopy) est une technique utilisée pour obtenir le spectre d'absorption d'émission, la photoconductivité ou la diffusion Raman dans l'infrarouge d'un échantillon solide, liquide ou gazeux.

Un spectromètre FTIR permet de collecter simultanément les données spectrales sur un spectre large. Ceci lui confère un avantage significatif sur les spectromètres à dispersion qui ne peuvent mesurer l'intensité que dans une gamme réduite de longueurs d'onde à un instant donné.

Le terme « spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier » vient du fait qu'il est nécessaire de passer par une transformation de Fourier pour convertir les données brutes en réel résultat spectral. Pour d'autres usages de ce genre de technique, voir spectroscopie par transformée de Fourier. (14)



Figure 31 : Spectromètre FTIR

II.1.5.2. Principe de la FTIR

Le but de toute spectroscopie d'absorption est de mesurer la quantité de lumière absorbée par un échantillon, en fonction de la longueur d'onde. La technique la plus simple pour le faire est la « spectroscopie dispersive », c'est-à-dire illuminer l'échantillon avec un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde donnée, mesurer combien de lumière est absorbée, puis répéter l'opération pour différentes longueurs d'onde. C'est, par exemple, le principe de fonctionnement des spectromètres UV-Vis. (15)

Le principe de la spectroscopie par transformée de Fourier est une façon moins intuitive d'obtenir la même information. Plutôt que d'illuminer l'échantillon avec un faisceau de lumière monochromatique, cette technique utilise un faisceau contenant une combinaison de multiples fréquences de la lumière, et on mesure l'absorption par l'échantillon. Le faisceau est ensuite modifié pour contenir une combinaison de fréquences différentes, on mesure de nouveau l'absorption par l'échantillon, et l'opération est répétée de nouveau, de multiples fois. Une fois toutes les données acquises, un ordinateur prend toutes ces données et calcule à rebours pour en déduire l'absorption à chaque longueur d'onde.

Le faisceau décrit ci-dessus est produit à partir d'une source de lumière à large bande, contenant l'ensemble du spectre des longueurs d'onde à mesurer. La lumière passe par un interféromètre de Michelson, un ensemble de miroirs réfléchissants ou semi-réfléchissants dans une certaine configuration, dont l'un est déplacé par un moteur de façon à faire varier le trajet parcouru par la lumière. Au fur et à mesure que le miroir se déplace, chaque longueur d'onde se trouve périodiquement bloquée ou transmise par l'interféromètre, par interférences. Différentes longueurs d'onde sont ainsi modulées à des vitesses différentes, de sorte que, à chaque instant, le faisceau sortant de l'interféromètre possède un spectre différent. (16) (17)

Comme mentionné précédemment, un traitement par ordinateur est nécessaire pour convertir les données brutes (l'« interférogramme », la lumière absorbée en fonction de la position du miroir) en données directement exploitables (lumière absorbée en fonction de la longueur d'onde). Ce procédé requiert un algorithme commun, la transformation de Fourier, qui donne son nom à cette technique. (18)

II.1.5.3. Mode opératoire

Pour réaliser l'analyse on a besoin de préparer des pastilles de nos 2 échantillons afin de les passer dans l'appareil de l'analyse. (Figure 32)



Figure 32 : Préparation des pastilles (prise le 04/04/2021)

Nos pastilles seront constituées de 0,002 g de notre matière première et de 0,08 g de KBr Qui est indétectable par l'appareil.

- Nous avons mélangé le KBr et nos échantillons pour homogénéiser la pastille.

- Nous avons mis les mélanges dans des moules en forme de pastille.
- Nous avons soumis le tout à une pression de 80kN à l'aide d'une presse hydraulique.
- Nous avons mis nos pastilles une par une dans l'appareil et on obtient un spectre.
- Nous avons interprété notre spectre suivant la table de correspondance en spectroscopie infrarouge. (19)

II.1.6. Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)

II.1.6.1. Définition

En chimie analytique, la spectrométrie d'absorption atomique (Atomic absorption spectroscopy en anglais ou SAA) est une technique servant à déterminer la concentration des éléments métalliques (métaux alcalins, alcalino-terreux, métaux de transition) ainsi que des métalloïdes dans un échantillon. Ceux-ci sont atomisés à l'aide d'une flamme alimentée d'un mélange de gaz ou d'un four électromagnétique.

La sensibilité de ce dernier est plus importante que la flamme et permet de quantifier les éléments recherchés de l'ordre du ppb. En 2010, c'est une méthode mono élémentaire, chaque élément à doser nécessite une source de lumière caractéristique. Elle fait partie des méthodes classiques d'analyse en chimie analytique. Basée sur des méthodes optiques, elle conduit aussi bien à des résultats qualitatifs qu'à des données quantitatives. L'absorption est utilisée généralement pour faire un dosage, l'élément est connu, on détermine une concentration. (20) (Figure 33)



Figure 33 : Spectromètre d'absorption atomique (prise le 09/06/2021)

II.1.6.2. Principe de la SAA

L'analyse se base sur l'absorption de photons par des atomes à l'état fondamental, et on utilise à cet effet en général des solutions sauf dans le cas des hydrures. Une préparation est donc souvent nécessaire : dissolution d'un alliage par exemple.

Bien que cette technique date du XIXe siècle, sa forme moderne fut développée dans les années 1950 par des chimistes australiens, menés par Alan Walsh et travaillant à la Division of Chemical Physics du CSIRO à Melbourne. (21)

II.1.6.3. Expériences de Kirchhoff

Les 3 expériences de Kirchhoff permettent de démontrer les principes de l'absorption et de l'émission atomique.

- En faisant passer à travers un prisme une lumière polychromatique on obtient un spectre continu.
- En remplaçant la lumière polychromatique par un bec Bunsen, dans lequel brûle un sel métallique, nous voyons apparaître les raies brillantes qui caractérisent l'élément. On obtient donc le spectre d'émission de cet élément.
- En combinant les deux expériences on obtient le spectre d'absorption du sel métallique. Nous voyons donc apparaître la même chose que dans la première expérience mis à part qu'aux endroits où on voyait apparaître les raies d'émissions de la seconde expérience nous remarquons des raies sombres. Ceci est dû à la présence dans la flamme d'une large proportion d'atomes restés à l'état fondamental qui absorbent les radiations lumineuses de la lumière polychromatique aux longueurs d'onde caractéristiques de l'élément, ce qui est une manifestation de l'absorption atomique. (21) (Figure 34)

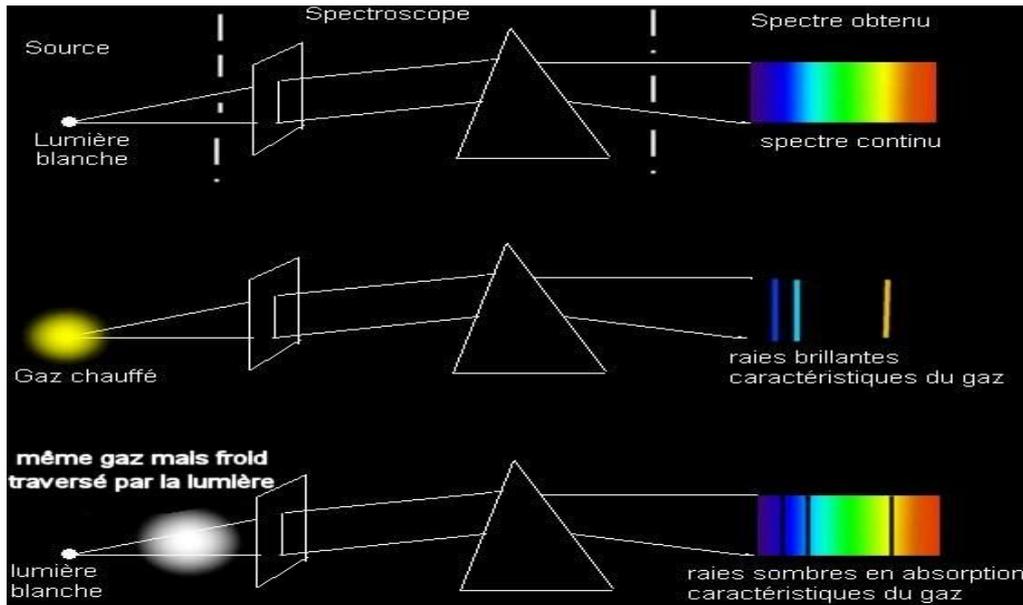


Figure 34 : Illustration des trois lois de la spectroscopie

II.1.6.4. Mode opératoire

II.1.6.4.1. Préparation des échantillons

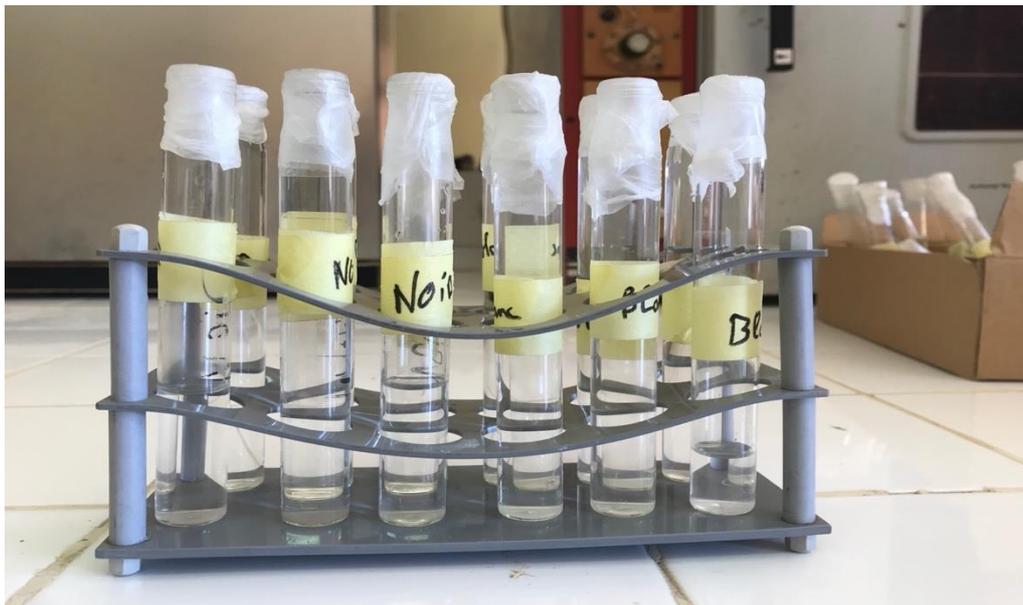


Figure 35 : échantillons de marbre gris et blanc mise en solution pour la SAA

II.1.6.4.1.A. Réactifs chimiques utilisés

- Eau distillée
- Acide acétique HCH_3CO_2 concentré à 98- 100%.
- Hydroxyde de sodium NaOH 98%

II.1.6.4.1.B. TCLP, EPA 1311

Lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques.

- Nous avons broyé préalablement le produit à une dimension inférieure à 0,063 mm. (Figure 36)
- Dans une fiole de 1000ml, nous avons versé 500ml d'eau distillée et nous ajoutons 5,7 ml d'acide acétique.
- Nous avons pesé précisément 2,572 g d'hydroxyde de sodium.
- Nous l'avons dissous dans le ballon et nous complétons au trait de jauge avec de l'eau distillée pour atteindre 1L
- Une fois la solution de lixiviation prête, nous avons ajouté 200 ml de cette dernière à 10 g de chacun de nos deux échantillons et nous laissons sous une agitation pendant 18 heure \pm 2h avec une vitesse de 30 tours/min.
- Nous avons filtré nos deux échantillons avec du filtre à papier, ensuite avec des filtres à seringue de 45 μ m.



Figure 36 : Broyeur à disques

II.1.6.4.2. Préparation des étalons

II.1.6.4.2.A. Réactifs chimiques utilisés

- Nitrate de plomb

Tableau 1 : Caractéristique du nitrate de plomb

Nom	Formule chimique	Marque	Masse molaire	Solubilité	Pureté
Nitrates de plomb	Pb (NO ₃) ₂	-	331.2 g/mol	Soluble	99%

- Nitrate de cadmium

Tableau 2 : Caractéristique du nitrate de cadmium

Nom	Formule chimique	Marque	Masse molaire	Solubilité	Pureté
Nitrates de cadmium	Cd (NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	-	308,47 g/mol	Soluble	98.5%

- Nitrate de zinc

Tableau 3 : Caractéristique du nitrate de zinc

Nom	Formule chimique	Marque	Masse molaire	Solubilité	Pureté
Nitrates de cadmium	Zn (NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	-	297,48 g/mol	Soluble	98%

- Nitrate de cuivre

Tableau 4 : Caractéristique du nitrate de cuivre

Nom	Formule chimique	Marque	Masse molaire	Solubilité	Pureté
Nitrates de cadmium	Cu (NO ₃) ₂ , 3H ₂ O	-	241,60 g/mol	Soluble	98%

- Nitrate de fer

Tableau 5 : Caractéristique du nitrate de fer

Nom	Formule chimique	Marque	Masse molaire	Solubilité	Pureté
-----	------------------	--------	---------------	------------	--------

Nitrates de cadmium	Fe (NO ₃) ₃ , 3H ₂ O	-	241,86 g/mol	Soluble	98%
----------------------------	---	---	-----------------	---------	-----

- Eau distillée

II.1.6.4.2.B. Courbe d'étalonnage

Nitrates de plomb :

- Préparation d'une solution mère de Plomb, de concentration 1g/L, et de volume de 500mL :

Nous avons dissout une quantité de 0.8073 de Pb(NO₃)₂ dans 500mL d'eau distillée dans une fiole jaugé de 500mL.

Pour la masse de 0.803g du solide Pb(NO₃)₂ il a été calculé comme suit :

- Les données sont :

Cmassique = 1g/L, et de volume de 500mL :

1- On calcul la concentration molaire :

$$C \text{ molaire} = C \text{ massique} / M_m \text{ (Masse molaire du Pb)}$$

$$C \text{ molaire} = 1(\text{g/L}) / 207.2 \text{ (Pb g/mol)}$$

$$C \text{ molaire} = 0.004826 \text{ mol/L}$$

2- Calcul de la masse à prélever de Pb(NO₃)₂

$$n = m/M \text{ (Pb(NO}_3)_2) \implies m = n * M$$

$$C \text{ molaire} = n/V \implies n = C \text{ molaire} * V$$

$$m = C \text{ molaire} * V * M \text{ (Pb(NO}_3)_2)$$

$$m = 0.004826 * 0.5 * 331.2$$

$$m = 0.7992277949 \text{ g}$$

3- Prendre en considération la pureté qu'est de 99 %=0.99

$$m' = m/P$$

$$m' = 0.7992277949 / 0.99$$

$$m' = 0.8073 \text{ g}$$

- Préparation d'une solution fille de Plomb, de concentration 20mg/L, et de volume de 100mL :

Dans une fiole jaugée de 100mL, nous avons mis 2mL de la solution mère à 1g/L et nous avons complété le volume avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. (Figure 37) (Tableau 6)

Tableau 6 : étalons de plomb

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
[Pb(II)] mg/L	0.5	1	2.5	3	5	10	15	20
V _p (ml) (à partir de la solution fille)	0.5	1	2.5	3	5	10	15	20
Veau distillée (ml)	19.5	19	17.5	17	15	10	5	0



Figure 37 : étalons de plomb (prise le 12/06/2021)

Nitrates de cadmium :

- Préparation d'une solution mère en cadmium, de concentration 1g/L, et de volume de 500mL :

Nous avons dissout une quantité de 1.3929g de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dans 500mL d'eau distillée dans une fiole jaugé de 500mL.

Pour la masse de 1.3929 du solide $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ il a été calculé comme suit :

- Les données sont :
Cmassique = 1g/L, et de volume de 500mL :

4- nous calculons la concentration molaire :

$$C \text{ molaire} = C_{\text{massique}} / M_m \text{ (Masse molaire du Cd)}$$

$$C \text{ molaire} = 1(\text{g/L}) / 112,41 \text{ (Cd g/mol)}$$

$$C \text{ molaire} = 0.008896 \text{ mol/L}$$

5- Calcul de la masse à prélever de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}$

$$n = m/M (\text{Cd}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O}) \implies m = n * M$$

$$C_{\text{molaire}} = n/V \implies n = C_{\text{molaire}} * V$$

$$m = C_{\text{molaire}} * V * M (\text{Cd}(\text{NO}_3)_2, 4\text{H}_2\text{O})$$

$$m = 0.008896 * 0.5 * 308,47$$

$$m = 1.3720\text{g}$$

6- Prendre en considération la pureté qu'est de 98.5 %=0.985

$$m' = m/P$$

$$m' = 1.3720/0.985$$

$$m' = 1.3929 \text{ g}$$

- Préparation d'une solution fille en Cadmium, de concentration 10mg/L, et de volume de 100mL :

Dans une fiole jaugée de 100mL, nous avons mis 1mL de la solution mère à 1g/L et nous avons complété le volume avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. (Figure 38) (Tableau 7)

Tableau 7 : étalons de cadmium

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
[Cd(II)] mg/L	0.3	0.5	1	2	3	4	5	7
V _p (ml) (à partir de la solution fille)	0.6	1	2	4	6	8	10	14
Veau distillée (ml)	19.4	19	18	16	14	12	10	6



Figure 38 : étalons de cadmium prise le 12/06/2021)

Nitrates de Zinc :

- Préparation d'une solution mère en Zinc, de concentration 1g/L, et de volume de 500mL :

Nous avons dissout une quantité de 2.3214g de $Zn(NO_3)_2, 6H_2O$ dans 500mL d'eau distillée dans une fiole jaugé de 500mL.

Pour la masse de 2.3214g du solide $Zn(NO_3)_2, 6H_2O$ il a été calculé comme suit :

- Données sont :

C massique = 1g/L, et de volume de 500mL :

7- Nous calculons la concentration molaire :

$$C \text{ molaire} = C \text{ massique} / M_m \text{ (Masse molaire du Zn)}$$

$$C \text{ molaire} = 1(\text{g/L}) / 65,38 \text{ (Zn g/mol)}$$

$$C \text{ molaire} = 0.01529 \text{ mol/L}$$

8- Calcul de la masse à prélever de $Zn(NO_3)_2, 6H_2O$

$$n = m/M \text{ (} Zn(NO_3)_2, 6H_2O \text{)} \implies m = n * M$$

$$C \text{ molaire} = n/V \implies n = C \text{ molaire} * V$$

$$m = C \text{ molaire} * V * M \text{ (} Zn(NO_3)_2, 6H_2O \text{)}$$

$$m = 0.01529 * 0.5 * 297,48$$

$$m = 2.2750 \text{ g}$$

9- Prendre en considération la pureté qu'est de 98 % = 0.98

$$m' = m/P$$

$$m' = 2.2750 / 0.98$$

$$m' = 2.3214 \text{ g}$$

- Préparation d'une solution fille en Zinc, de concentration 10mg/L, et de volume de 100mL :

Dans une fiole jaugée de 100mL, nous avons mis 1mL de la solution mère à 1g/L et nous avons complété le volume avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. (Figure 39) (Tableau 8)

Tableau 8 : étalons de zinc

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
[Zn(II)] mg/L	0.1	0.3	0.5	1	1.5	2	3	3.5
V _p (ml) (à partir de la solution fille)	0.2	0.6	1	2	3	4	6	7
Veau distillée (ml)	19.8	19.4	19	18	17	16	14	13



Figure 39 : étalons de zinc (prise le 12/06/2021)

Nitrates de Cuivre :

- Préparation d'une solution mère en Cuivre, de concentration 1g/L, et de volume de 500mL :

Nous avons dissout une quantité de 2.3214g de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2, 3\text{H}_2\text{O}$ dans 500mL d'eau distillée dans une fiole jaugé de 500mL.

Pour la masse de 2.3214g du solide $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2, 3\text{H}_2\text{O}$ il a été calculé comme suit :

- Les données sont :

C massique = 1g/L, et de volume de 500mL :

10- nous calculons la concentration molaire :

C molaire = C massique / Mm (Masse molaire du Cu)

C molaire = 1(g/L) / 63,546 (Cu g/mol)

C molaire = 0.015736 mol/L

11- Calcul de la masse à prélever de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2, 3\text{H}_2\text{O}$

$n = m/M (\text{Cu}(\text{NO}_3)_2, 3\text{H}_2\text{O}) \implies m = n * M$

C molaire = $n/V \implies n = C_{\text{molaire}} * V$

$m = C_{\text{molaire}} * V * M (\text{Cu}(\text{NO}_3)_2, 3\text{H}_2\text{O})$

$m = 0.015736 * 0.5 * 241,60$

$m = 1.900 \text{ g}$

12- Prendre en considération la pureté qu'est de 98 % = 0.98

$m' = m/P$

$m' = 1.900 / 0.98$

$m' = 1.93978 \text{ g}$

- Préparation d'une solution fille en Cuivre, de concentration 20mg/L, et de volume de 100mL :

Dans une fiole jaugée de 100mL, nous avons mis 2mL de la solution mère à 1g/L et nous avons complété le volume avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. (Figure 40) (Tableau 9)

Tableau 9 : étalons de cuivre

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
[Cu(II)] mg/L	0.5	1	2	4	6	8	14	20
V _p (ml) (à partir de la solution fille)	0.5	1	2	4	6	8	14	20
Veau distillée (ml)	19.5	19	18	16	14	12	6	0



Figure 40 : étalons de cuivre (prise le 12/06/2021)

Nitrates de fer :

- Préparation d'une solution mère en Fer, de concentration 1g/L, et de volume de 500mL :

Nous avons dissout une quantité de 2.20965g de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dans 500mL d'eau distillée dans une fiole jaugé de 500mL.

Pour la masse de 2.20965g du solide $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ il a été calculé comme suit :

- Les données sont :

C massique = 1g/L, et de volume de 500mL :

13- On calcul la concentration molaire :

$$C \text{ molaire} = C \text{ massique} / M_m \text{ (Masse molaire du Fe)}$$

$$C \text{ molaire} = 1(\text{g/L}) / 55,845 \text{ (Fe g/mol)}$$

$$C \text{ molaire} = 0.017906706 \text{ mol/L}$$

14- Calcul de la masse à prélever de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

$$n = m/M \text{ (Fe(NO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O)} \implies m = n \cdot M$$

$$C \text{ molaire} = n/V \implies n = C \text{ molaire} \cdot V$$

$$m = C \text{ molaire} \cdot V \cdot M \text{ (Fe(NO}_3)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O)}$$

$$m = 0.017906706 \cdot 0.5 \cdot 241,86$$

$$m = 2.16545 \text{ g}$$

15- Prendre en considération la pureté qu'est de 98 % = 0.98

$$m' = m/P$$

$$m' = 2.16545 / 0.98$$

$$m' = 2.20965g$$

- Préparation d'une solution fille en Fer, de concentration 20mg/L, et de volume de 100mL :

Dans une fiole jaugée de 100mL, nous avons dissout 2mL de la solution mère à 1g/L et nous avons complété le volume avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. (Tableau 10)

Tableau 10 : étalons de fer

N°	1	2	3	4	5	6
[Fe(II)] mg/L	0.5	1	4	8	12	20
V _p (ml) (à partir de la solution fille)	0.5	1	4	8	12	20
Veau distillée (ml)	19.5	19	16	12	8	0

II.2. Analyse sur les produits finis : Résistance à la compression

Nous avons effectué cette analyse sur les dalles de marbres produites par la marbrerie industrielle.

II.2.1 définitions

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement), par opposition à la résistance à la traction qui est une résistance à l'allongement (éclatement) et à la résistance au cisaillement qui est principalement une résistance à la torsion (vrille).

C'est une valeur clé pour la conception de structures. Elle se mesure sur des matériaux ainsi que sur des composants ou des structures.

Par définition, la résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uniaxial atteint à la rupture complète du matériau. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu mais le matériau se déformera de manière irréversible, de sorte que la résistance à la compression est assimilée à l'effort atteint à la limite de la déformation. (22) (23)

II.2.2. Courbe contrainte-déformation

L'essai de compression commence par une région linéaire où la déformation du matériau est proportionnelle à la contrainte suivant la loi de Hooke $\sigma = E\epsilon$ où E est le module de Young.

Dans cette région linéaire, le matériau se déforme élastiquement et revient à sa longueur initiale lorsque la contrainte est supprimée.

La région linéaire se termine au point limite d'élasticité. Au-dessus de ce point, le matériau subit une déformation plastique et ne revient pas à sa longueur initiale une fois que la charge est retirée.

Par définition, la contrainte uniaxiale est la force divisée par la surface $\sigma = F / A$ où F est la charge appliquée en newtons et A est la surface de la section transversale en m².

La déformation correspondante est $\epsilon = (l - l_0) / l_0$ où l est la longueur de l'échantillon comprimé et l₀ sa longueur initiale.

La résistance à la compression correspond au point de la courbe de contrainte-déformation défini par $\sigma^* = F^* / A_0$ et $\epsilon^* = (l^* - l_0) / l_0$ où F* est la charge appliquée juste avant de détruire l'échantillon et l* est la longueur de l'échantillon juste avant sa destruction.
(24) (25)

II.2.3. Mode opératoire

Nous avons effectué cet essai sur les dalles finis.

- Nous découpons les dalles à des dimensions de 4x4 cm.
- Nous avons placé nos dalles dans la machine à traction.
- Nous avons allumé la machine à traction et on règle la surface à 1600 mm² et le taux à 200N/s.
- Nous avons effectué l'essai sur 3 échantillons.



Figure 41 : Machine à traction du LTPE

II.3. Conclusion

Les dalles de marbre conçu par la marbrerie sont constamment en contact avec les clients dans la vie quotidienne, des aliments peuvent être posé dessus, des enfants peuvent jouer dessus ou juste le fait d’être dans le même environnement que ces dalles peuvent avoir des répercussions sur le client.

Toutes les analyses physico-chimiques effectuées visent à déterminer les caractéristiques des matières premières et à déterminer si elles présentent un danger dans la vie quotidienne.

L’analyse DRX nous permettra de déterminer les phases minéralogiques des matières, l’analyse FX nous donnera les composants, l’analyse FTIR nous déterminera les matières organiques susceptibles de se perdre avec l’augmentation de la température (PAF), quant à la SAA, elle nous permettra de déterminer la concentration en métaux lourds dans le marbre et d’en déduire si il est toxique ou non, on a effectué une analyse de résistance à la compression parce que les dalles sont destinés à être des marches et contremarche, donc la plus part du temps soumis à la compression.

Chapitre III : Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de nos analyses, nous discuterons ces résultats et nous les comparerons à des travaux précédemment faits et aux normes des matériaux de finitions.

III.1. Analyses des matières premières

Nous avons effectué ces analyses dans les différents laboratoires de l'université Abderahmane Mira Bejaïa et de l'université de Setif. L'analyse granulométrique, la préparation des échantillons et des étalons pour la SAA ainsi que la préparations des pastille pour la FX ont été effectuées au laboratoire 24 du département des mines et géologie, la SAA et l'analyse FTIR ont été effectués au laboratoire du génie des procédés, la DRX et la FX ont été effectués à l'université de Setif, le broyage a été effectué au laboratoire de technologie des matériaux et du génie des procédés, tant dis que la PAF a été effectué au laboratoire de biomathématique, biophysique, biochimie et de scientométrie.

III.1.1. Analyse granulométrique

Le tableau 11 résume les résultats obtenus par l'analyse et sont projetés sous formes d'histogramme dans la figure 42.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse granulométrique

Taille des mailles des tamis (mm)	Masse des grains blanc (g)	Masse des grains blanc (%)	Masse des grains gris (g)	Masse des grains gris (%)	Masse de la poudre de marbre (g)	Masse de la poudre de marbre (%)
4	223,56	46,37	4,60	1,49	0	0
3,15	232,46	48,22	1,80	0,58	0	0
2	19,90	4,12	16,25	5,28	0	0
1,4	1,34	0,27	24,60	8,00	0	0
1	1,20	0,25	68,54	22,26	1,48	0,64
0,5	1,22	0,25	180,11	58,57	42,5	18,47
0,355	0	0	9,30	3,02	36,45	15,84
<0,355	2,39	0,49	2,29	0,74	149,58	65,03
Totaux	482,07	100	307,49	100	230,01	100

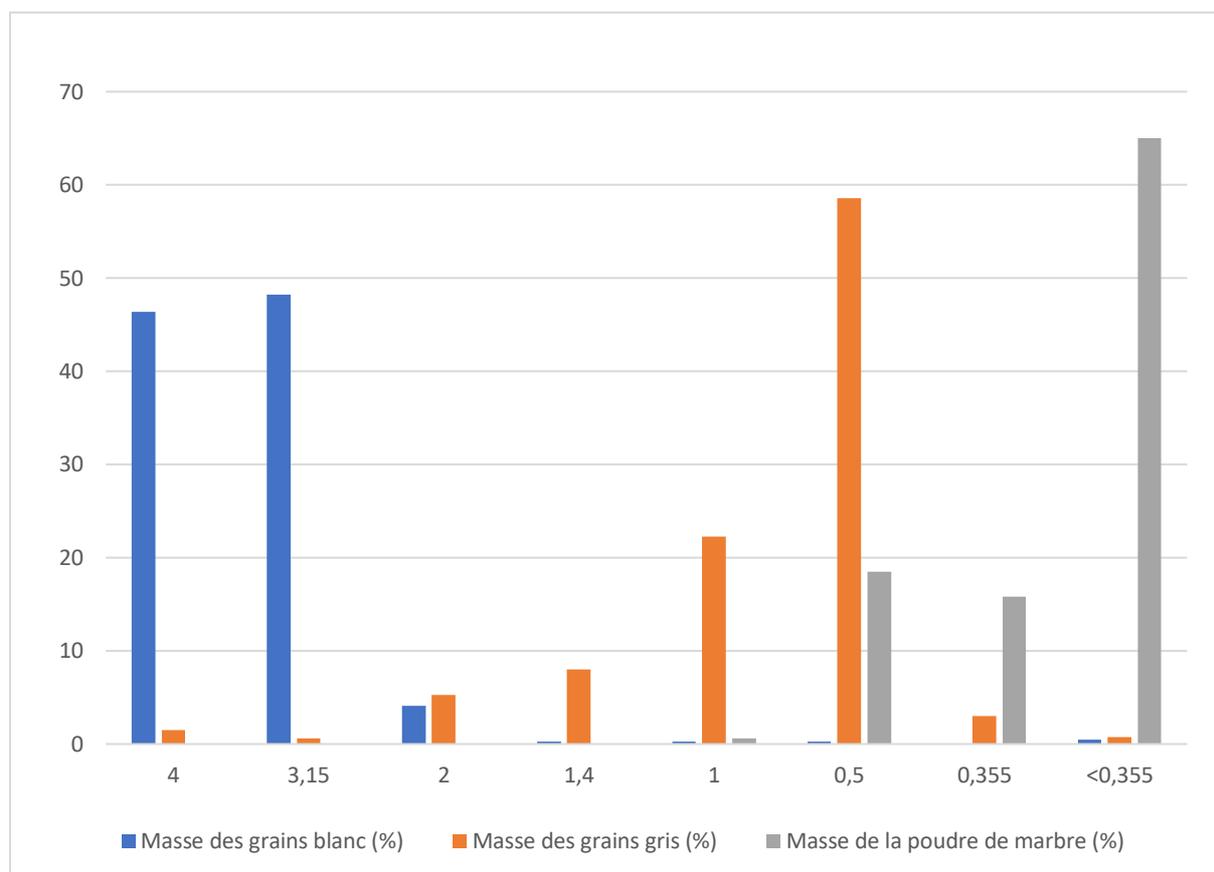


Figure 42 : Distribution granulométrique des échantillons de marbre

- Grains blancs : Nous avons constaté que la fraction la plus massive est celle correspondant a une ouverture de maille de tamis supérieure à 3,15 mm (94,59%)
- Grains gris : Nous avons constaté que la fraction la plus massive est celle correspondant à une ouverture de maille de tamis allant de 0,5 mm à 1 mm (58,27%)
- Poudre de marbre : Nous avons constaté que la fraction la plus massive est celle correspondant à une ouverture de maille de tamis inférieur à 0,355 mm (65,03%)

Cette différence entre la dimension des grains blanc et des grains gris fait en sorte que les grains gris ressortent sur les dalles une fois finis et polis, et que cela donne le côté esthétique recherchée par la clientèle.

III.1.2. Diffraction des rayons X

Les spectres de DRX des marbres ont été obtenus sur les fractions brutes et tamisées à 63 µm, on constate une différence dans le nombre de pics entre le marbre blanc et le marbre gris

III.1.2.1. Résultats de la DRX du marbre blanc

Après le passage de l'échantillon dans le diffractomètre à rayons X, nous avons obtenu un spectre représenté dans la figure 43, dans la phase minéralogique est rapporté dans le tableau 12.

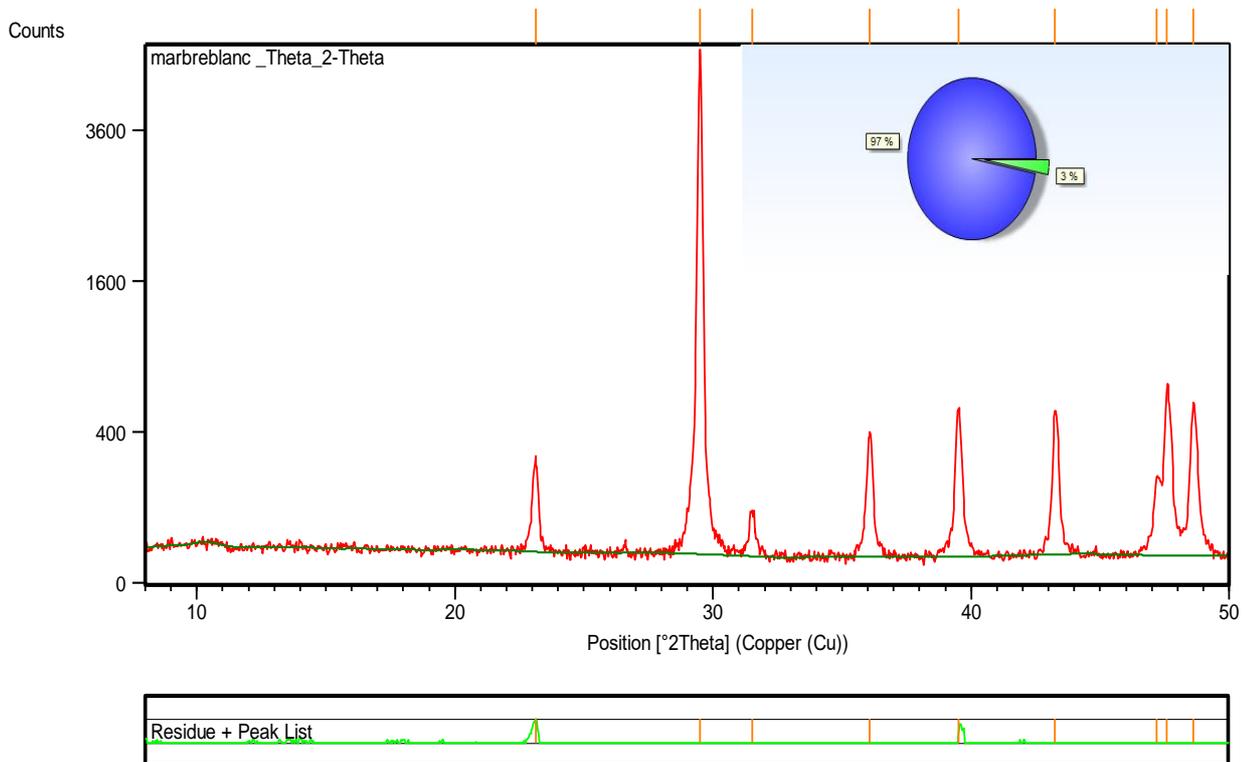


Figure 43 : Spectre de la DRX du marbre blanc

Tableau 12 : Phases minéralogiques de la DRX du marbre blanc

Code référence	Nom du composant	Formule chimique	Score
00-024-0027	Calcite	CaCO ₃	70

La lecture du spectre obtenu nous démontre que la phase minéralogique la plus dominante dans le marbre blanc est la calcite dont la formule est : CaCO₃. Ce qui confirme les résultats obtenus par une étude précédemment effectuée. (26) (6)

III.1.2.2. Résultats de la DRX du marbre gris

Après le passage de l'échantillon du marbre gris dans le diffractomètre à rayons X, nous avons obtenu un spectre représenté dans la figure 44, dont les phases ont été rapportées dans le tableau 13.

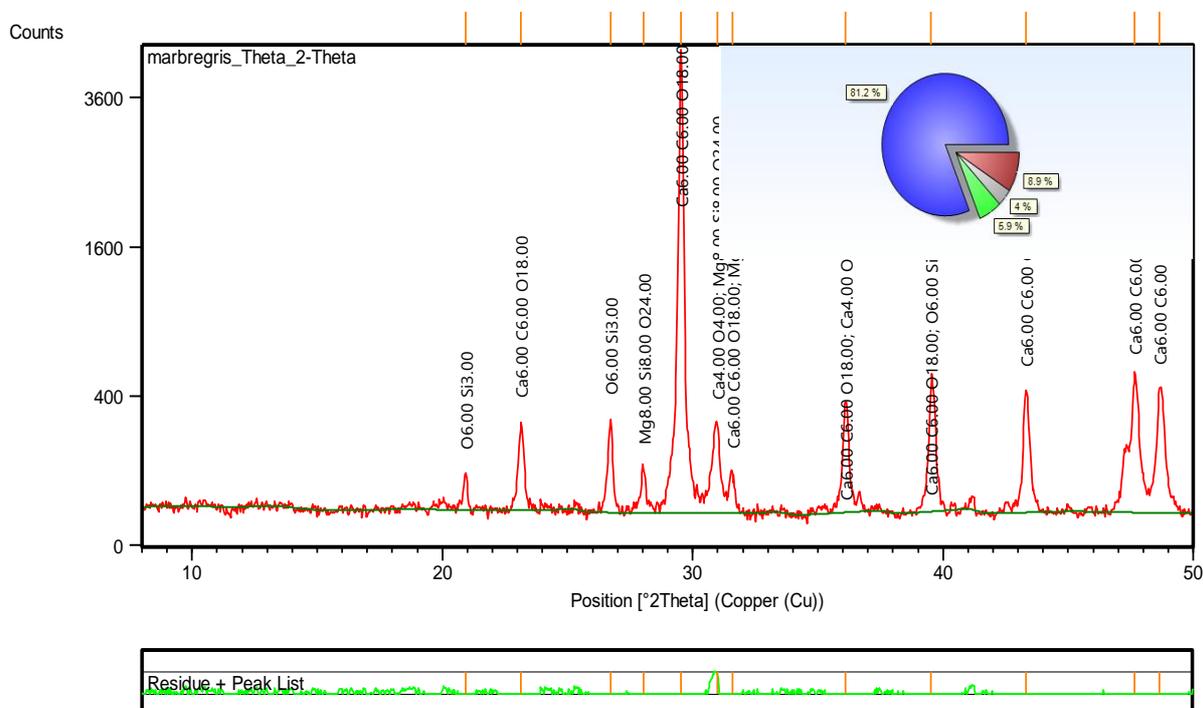


Figure 44 : Spectre de la DRX du marbre gris

Tableau 13 : Phases minéralogiques du marbre gris

No	Code référence	Nom de l'échantillon	Formule chimique	Score
1	00-001-0837	Calcite	CaCO ₃	49
2	00-028-0775	Oxyde de calcium	CaO	42
3	00-046-1045	Quartz,Syn	SiO ₂	40
4	00-022-0714	Enstatite	MgSiO ₃	34

Après la lecture de notre spectre, Nous avons déterminé que l'échantillon renferme plusieurs phases minéralogiques différentes qui sont référencés dans le tableau 13.

Le marbre gris renferme outre la calcite (CaCO_3), des phases d'oxyde de calcium, d'énstatite ainsi que du quartz qui est l'origine de cette couleur foncée (gris, noir) à notre marbre.

Nous avons remarqué que nos résultats sont en concordance avec les travaux de Redha Chabbi. (26)

III.1.3. La perte au feu (PAF)

Après les manipulations effectuées, nous avons calculé les pertes au feu comme suit :

Nous avons :

- m_i , la masse initiale de l'échantillon du marbre blanc : $m_i = 0,9981\text{g}$.
- m , la masse de l'échantillon du marbre blanc après 2h dans le four à 1050°C : $m = 0,6419\text{g}$.
- Donc la PAF_B , la perte au feu du marbre blanc :

$$\text{PAF}_B = 100 \times (m_i - m) / m$$

$$\text{PAF}_B = 35,6878\%$$

- On a m_0 , la masse initiale du marbre gris : $m_0 = 1,0005\text{g}$
- m_2 , la masse de l'échantillon du marbre gris après 2h dans le four à 1050°C : $m_2 = 0,6114\text{g}$
- Donc la PAF_G , la perte au feu du marbre gris :

$$\text{PAF}_G = 100 \times (m_0 - m_2) / m$$

$$\text{PAF}_G = 38,8905\%$$

Après avoir calculer les PAF, à savoir 35,6878% pour le marbre blanc 38,8905% pour le marbre gris, nous avons constaté des pertes dans les masses de nos deux marbres.

Cela est probablement dû à la présence de la matière organique qui faisait office d'un ciment colmatant les particules de la roche sédimentaire ayant subi un métamorphisme donnant le marbre en question. (15)

Pour déterminer les matières organiques perdues dans nos 2 échantillons, nous avons effectué une analyse FTIR présentée dans ce qui suit.



III.1.4. La fluorescence X

III.1.4.1. Résultats de la FX du marbre blanc

Les résultats de l'analyse sont mentionnés dans le tableau 14, et sont projetés dans le diagramme circulaire de la figure 45.

Tableau 14 : Résultats FX du marbre blanc

Composant	Résultats masse%
Na ₂ O	0,2206
MgO	0,1569
Al ₂ O ₃	0,0614
SiO ₂	0,1980
P ₂ O ₅	0,0153
SO ₃	0,2218
Cl	0,0474
K ₂ O	0,0093
CaO	63,2832
Fe ₂ O ₃	0,0183
PaF	35,6878
Total	99,92

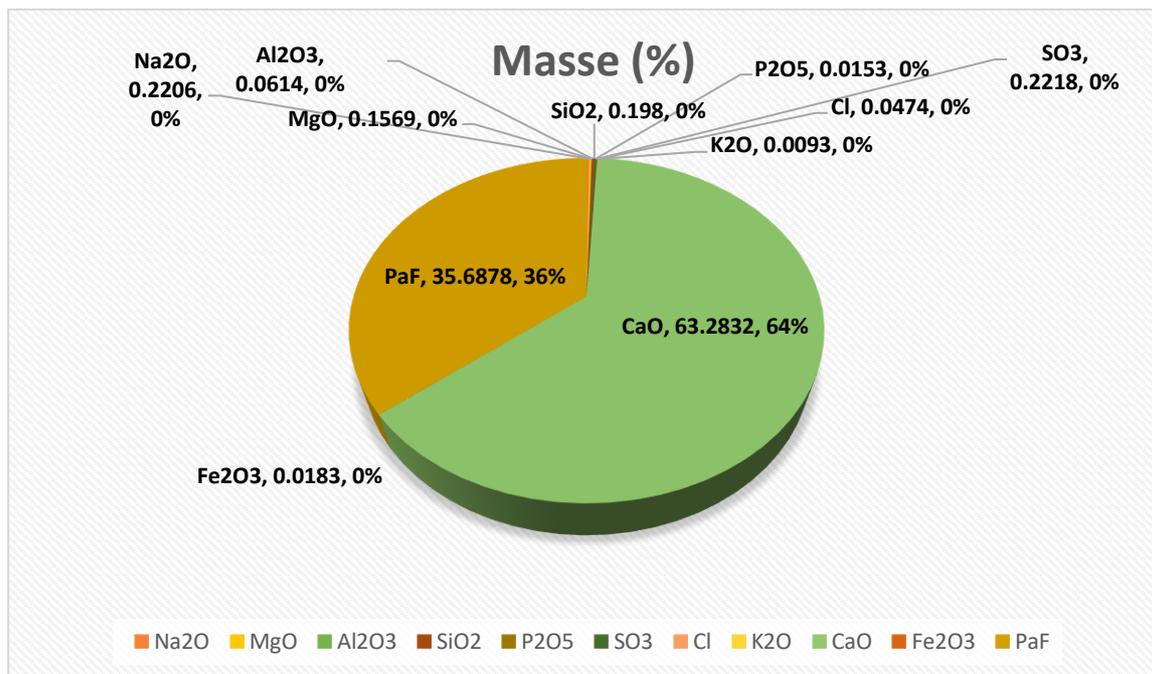


Figure 45 : Les fractions des éléments obtenue par la FX du marbre blanc

Dans le diagramme circulaire, nous avons remarqué que l'oxyde de calcium (CaO) est majoritaire dans l'échantillon du marbre blanc avec une fraction de 64%, or que 36% de la matière s'est perdu avec traitement thermique (PAF). Le reste des éléments (Na ; MG ; Al ; Si...) sont présents sous forme de traces le tout avec des taux inférieurs à 0,2%

Les résultats obtenus sont en concordance par ceux de la DRX.

III.1.4.2. Résultats de la FX du marbre gris

Les résultats de l'analyse sont mentionnés dans le tableau 15, et sont projetés dans le diagramme circulaire de la figure 46.

Tableau 15 : Résultats de la FX du marbre gris

Composant	Résultats masse%
Na2O	0,2120
MgO	1,2894
Al2O3	1,6744
SiO2	5,9826
P2O5	0,0629
SO3	0,3245

Cl	0,0280
K ₂ O	0,1216
CaO	49,6820
MnO	0,0443
Fe ₂ O ₃	1,3383
PaF	38,8905
Total	99,3799

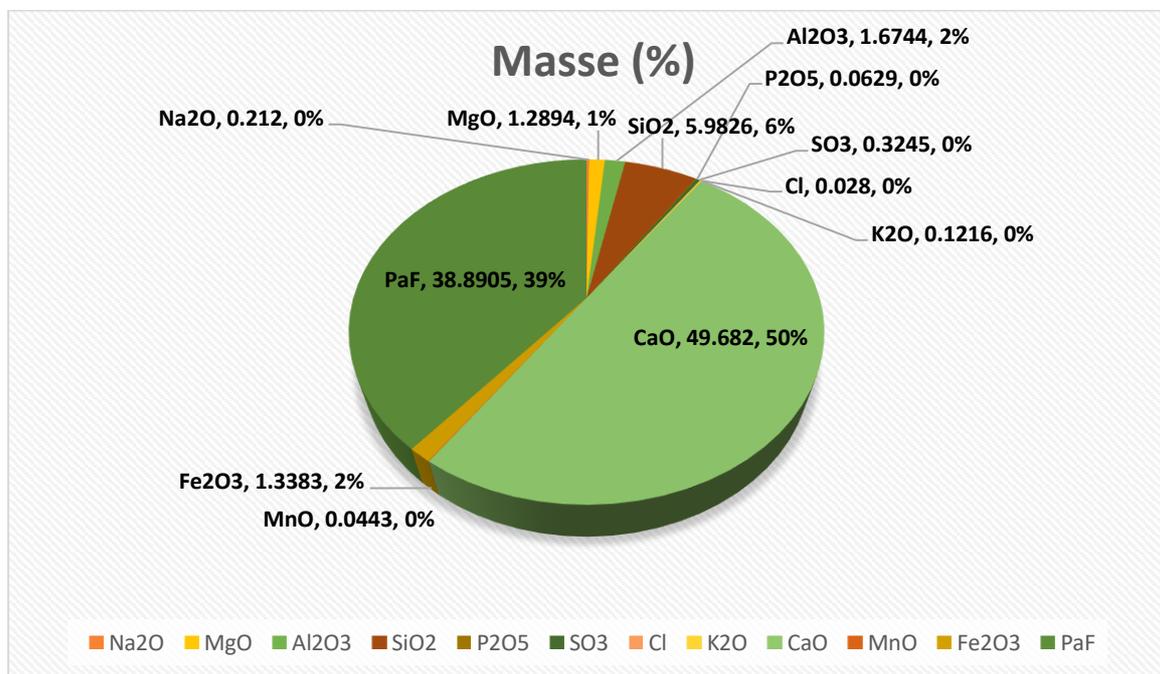


Figure 46 : Résultats de la FX du marbre gris

Dans la lecture de notre diagramme circulaire (figure 47), contrairement au marbre blanc, le calcium ne représente que 49,682% de la composition, nous avons constaté un taux de SiO₂ plus important que dans l'échantillon du marbre blanc. Les oxydes de magnésium, d'aluminium et de fer se présentes en fractions plus importante. L'analyse a mis en évidence la présence de l'oxyde manganèse qui est complètement absent dans le marbre blanc.

Ces résultats sont presque équivalant aux résultats obtenus dans l'étude précédemment réalisé (26) (6), nous avons constaté une différence entre du taux de fer, supérieur à celui trouvé par les études précédentes. Nous supposons que cette différence est liée à un contact de notre échantillon avec du fer lors de la manipulation. (L'encapsulation)

La différence minéralogique entre les deux échantillons explique la différence de couleur.

III.1.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

III.1.5.1. Résultats de la FTIR du marbre blanc

La FTIR du marbre blanc nous a donné le spectre représenté par la figure 47 et ce dernier est récapitulé dans le tableau 16.

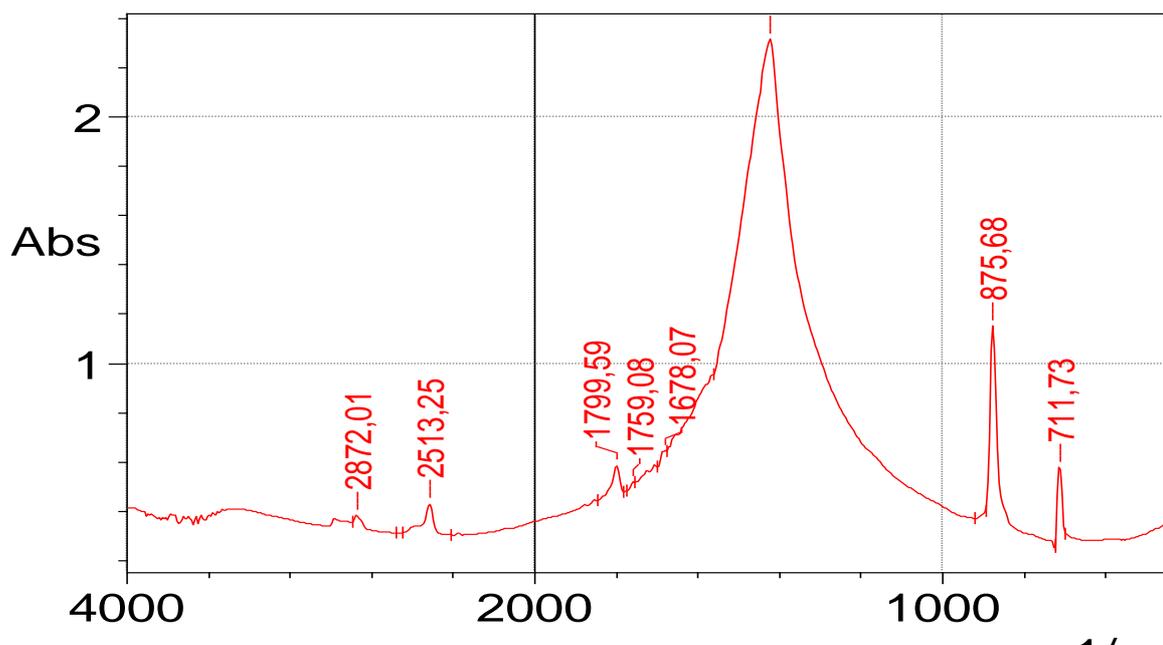


Figure 47 : Spectre de la FTIR du marbre blanc

Tableau 16 : Liste des pics d'absorption de la FTIR du marbre blanc

Pic d'absorption cm^{-1}	Liaison	Formes des bandes
711,73	$\nu\text{C-O}$	Faible
875,68	$\nu\text{C-O}$	Fine et moyenne
1420,21	$\nu\text{C-O}$	Intense
1678,07	δOH	Doublet
1759,08	Harmonique C-O	-
1799,59	Harmonique C-O	-
2872,01	Harmonique C-O	-

Après l'obtention du spectre de la FTIR du marbre blanc, l'identification des pics s'est faite à partir d'une table de correspondance en spectroscopie infrarouge. (16)

Les pics correspondants aux absorbances 711,73 ; 875,68 et 1420,21 correspondent aux composés aromatiques, dont le benzène monosubstitué et monodisub, appartenant à la famille des composés aromatique hydrocarbures.

Le pic correspondant à l'absorbance 1678,07 est relatif à un acide carboxylique, qui constituent l'un des types d'acide de la chimie organique. On les trouve de manière abondante dans la nature.

Les pics correspondant aux absorbances 1759,08 ; 1799,59 et 2872,01 sont relatifs à des harmonique C-O.

III.1.5.2. Résultats de la FTIR du marbre gris

La FTIR du marbre gris nous a donné le spectre présenté dans la figure 48 et ce spectre est lu dans le tableau 17.

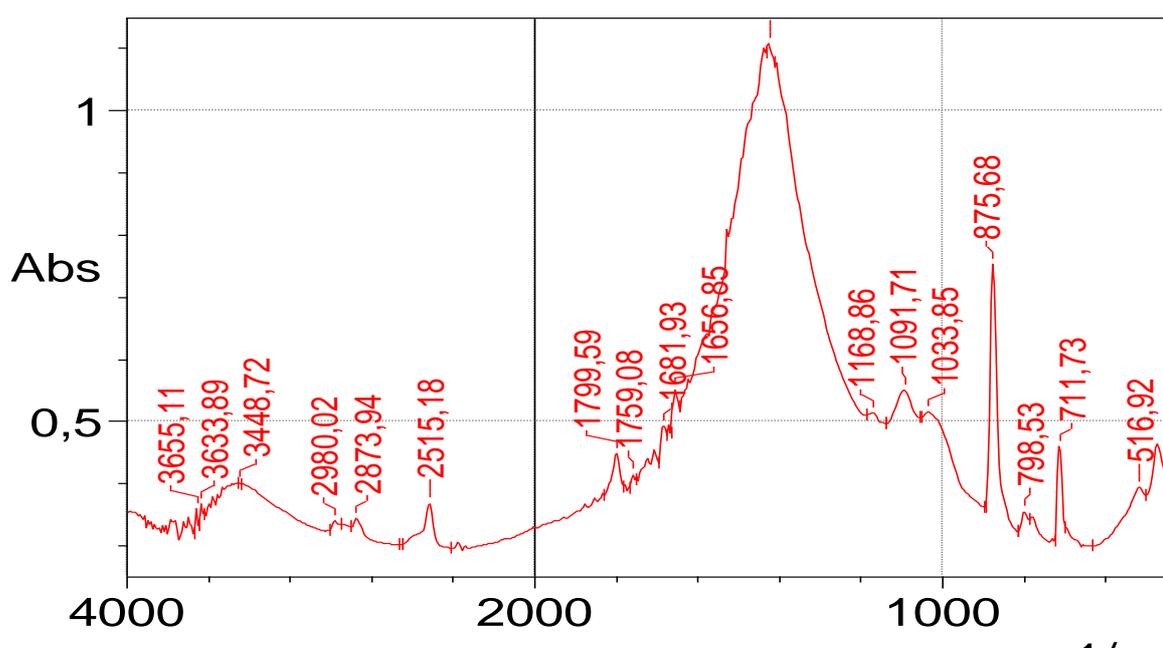


Figure 48 : Spectre de la FTIR du marbre gris

Tableau 17 : Liste des pics d'absorption de la FTIR du marbre gris

Pic d'absorption cm^{-1}	Liaison	Forme des bandes
516,92	$\delta\text{Si-O-Si}$	Moyenne
711,73	$\nu\text{C-O}$	Faible
798,53	$\nu\text{Si-O}$	Forte
875,68	$\nu\text{C-O}$	Fine et moyenne

1033,85 ; 1091,71	ν Si-O	
1168,86	ν C-O	Intense
1420,21	ν C-O	Faible à forte
1656,85	δ OH	Doublet
1681,93	δ OH	Doublet
1759,08	Harmonique C-O	-
1799,59	Harmonique C-O	-
2873,94	Harmonique C-O	-
2980,02	δ OH	Doublet
3633,89 ; 3655,11	δ OH	Doublet

Le pic correspondant à l'absorbance 516,92 est relatif à un bromoalcane, qui est un composé organique qui contient une liaison d'un atome de carbone à un atome de brome.

Les pics correspondants aux absorbances 711,73 ; 875,68 ; 1168,86 ; 1420,21 sont relatifs à des composés aromatiques.

Les pics correspondants aux absorbances 798,68 ; 1033,85 ; 1091,71 sont relatifs à des fluoroalcane, qui sont des composés organiques qui comporte des liaisons carbone-fluor.

Les pics correspondant aux absorbances 1759,08 ; 1799,59 et 2873,94 sont relatifs à des harmonique C-O.

Les pics correspondants aux absorbances 1656,85 ; 1681,93 ; 2980,02 ; 3633,89 ; 3655,11 sont relatifs à des acides carboxyliques.

III.1.5.3. Récapitulatif des résultats

Après l'identifications de nos pics, nous avons constaté que nos échantillons sont abondants en composés organiques quantitativement et qualitativement, présentant de différentes propriétés et caractéristiques, ce qui nous explique les grandes valeurs de perte aux feu (35%, 38% respectivement pour le marbre blanc et gris).

III.1.6. La spectrométrie d'absorption atomique

L'analyse par SAA permet de déterminer la toxicité du marbre du fait que ce dernier est fortement utilisé dans les plans de cuisine et des restaurant, certains aliments à effets agressifs dont les vinaigres, les agrumes et les alcools alimentaires réagissent chimiquement avec le marbre et destituent les composants de ce dernier.

III.1.6.1. Résultats de la SAA du cadmium (Cd)

Le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA nous a permis d'obtenir la courbe de tendance ci présentée dans la figure 49.

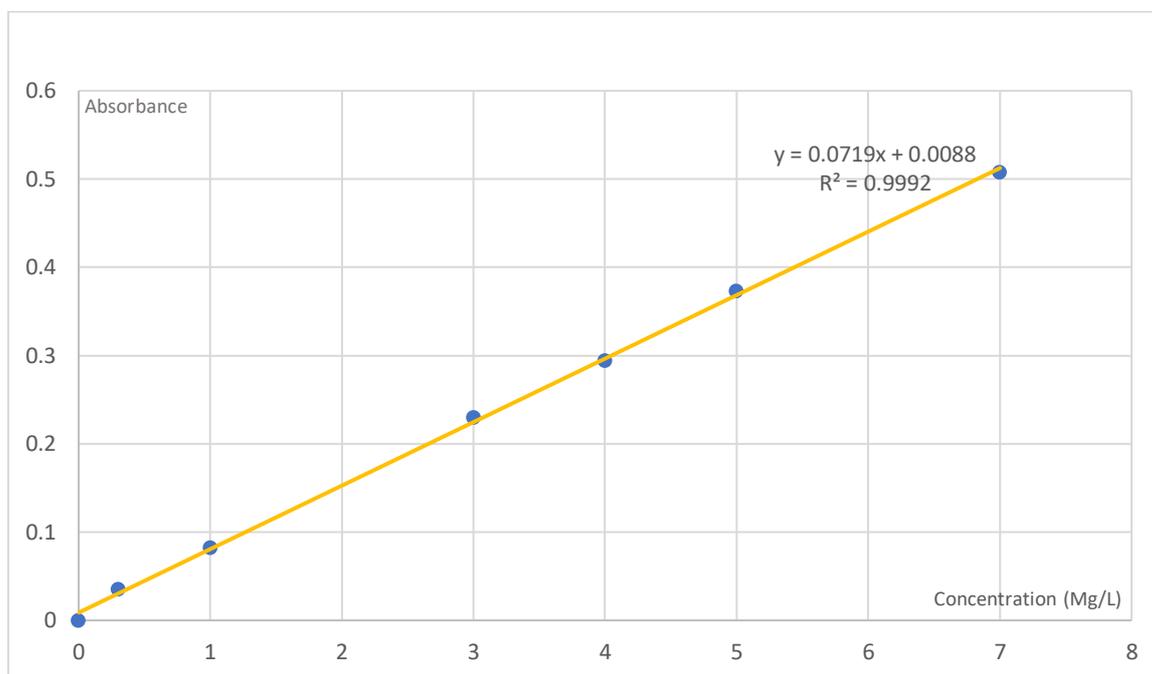


Figure 49 : Courbe de tendance du cadmium (Cd)

Après le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA, nous avons obtenu une courbe de tendance de coefficient de détermination $R^2 = 99,92\%$, correspondant à la valeur technique relative à la conception de l'appareil.

Les concentrations de cadmium dans nos échantillons obtenus par la SAA sont présentées dans le tableau 18.

Tableau 18 : Concentrations de cadmium obtenus par la SAA

Nom de l'échantillon	Signal	Concentration
Cd	Abs	Mg/L
Blanc	-0,0000	0,0000
Étalon 1	0,035	0,3000
Étalon 2	0,082	1,0000
Étalon 3	0,230	3,0000
Étalon 4	0,294	4,0000
Étalon 5	0,373	5,0000

Étalon 6	0,508	7,0000
Marbre gris	0,003	-0,0930
Marbre blanc	0,437	5,9396

Nous avons constaté une concentration négative de cadmium dans notre échantillon de marbre gris qui s'explique par un taux de cadmium inférieur à 0,3 mg/l ou inexistant.

Nous avons constaté un taux de 5,9396 mg/l dans notre échantillon de marbre blanc.

Les deux marbres présentent un état de non toxicité vis-à-vis des valeurs du cadmium obtenues conformément la norme ISO 91.100.01. (27)

III.1.6.2. Résultats de la SAA du zinc (Zn)

Le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA nous a permis d'obtenir la courbe de tendance ci présentée dans la figure 50.

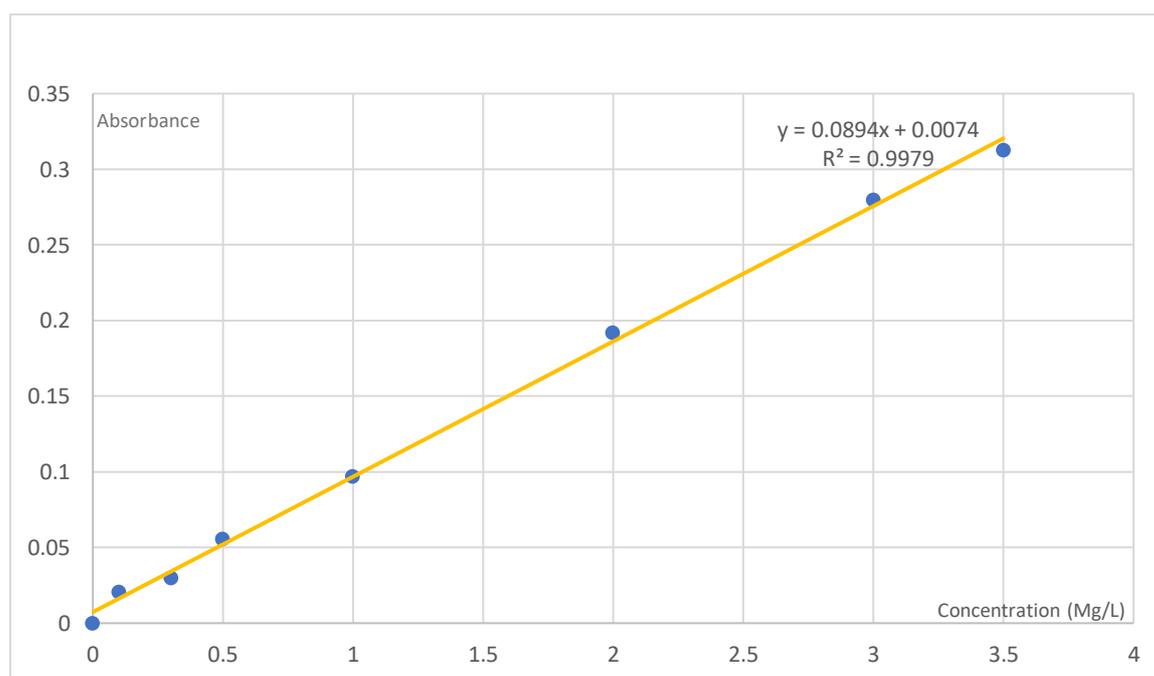


Figure 50 : Courbe de tendance du Zinc (Zn)

Après le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA, nous avons obtenu une courbe de tendance avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,79\%$, correspondant à la valeur technique relative à la conception de l'appareil.

Les concentrations de zinc présent dans nos échantillons obtenus par la SAA sont présentées dans le tableau 19.

Tableau 19 : Concentrations du zinc obtenus par la SAA

Nom de l'échantillon	Signal	Concentration
Zn	Abs	Mg/L
Blanc	-0,0000	0,0000
Étalon 1	0,021	0,1000
Étalon 2	0,030	0,3000
Étalon 3	0,056	0,5000
Étalon 4	0,097	1,0000
Étalon 5	0,192	2,0000
Étalon 6	0,280	3,0000
Étalon 7	0,313	3,5000
Marbre gris	0,006	-0,0039
Marbre blanc	0,018	0,1286

Nous avons constaté une valeur négative du taux de concentration du zinc dans le marbre gris, et un très faible taux de concentration dans le marbre blanc.

Les deux taux restent en dessous des taux exigés par la norme ISO 91.100.01.(27)

III.1.6.3. Résultats de la SAA du plomb (Pb)

Le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA nous a permis d'obtenir la courbe de tendance ci présentée dans la figure 51.

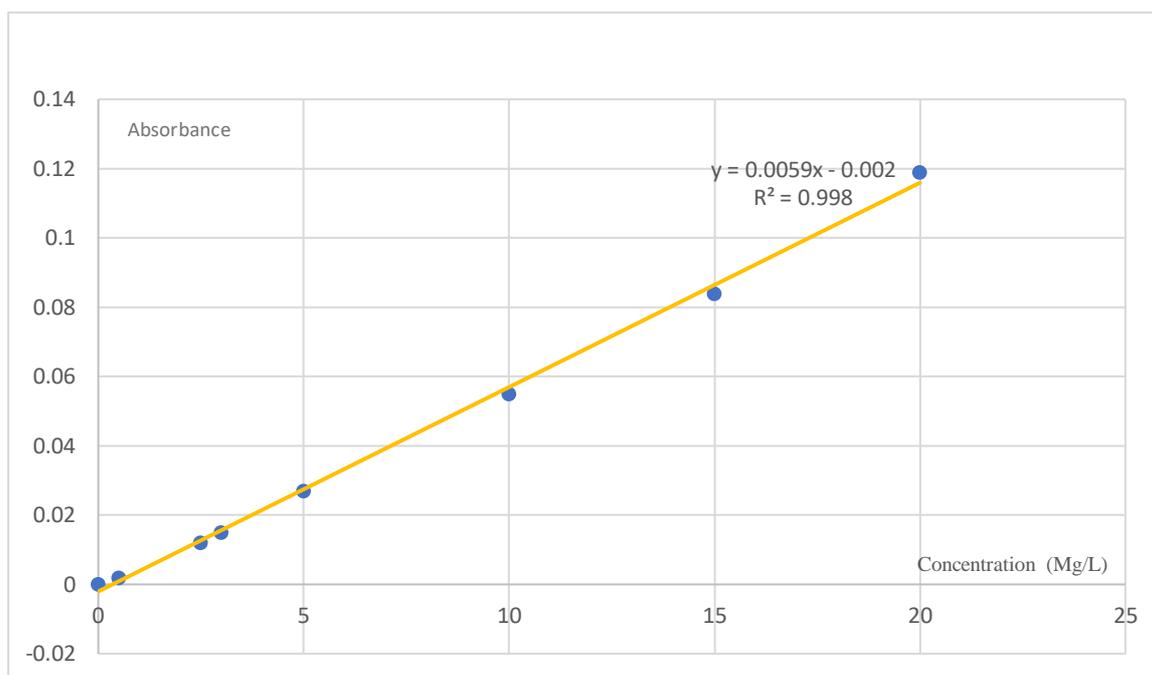


Figure 51 : Courbe de tendance du plomb (Pb)

Après le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA, nous avons obtenu une courbe de tendance avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,8\%$, correspondant à la valeur technique relative à la conception de l'appareil.

Les concentrations de plomb présent dans nos échantillons obtenus par la SAA sont présentées dans le tableau 20.

Tableau 20 : Concentrations du plomb obtenus par la SAA

Nom de l'échantillon	Signal	Concentration
Pb	Abs	Mg/L
Blanc	-0,0000	0,0000
Étalon 1	0,002	0,5000
Étalon 2	0,012	2,5000
Étalon 3	0,015	3,0000
Étalon 4	0,027	5,0000
Étalon 5	0,055	10,0000
Étalon 6	0,084	15,0000
Étalon 7	0,119	20,0000
Marbre gris	0,001	0,5330
Marbre blanc	0,003	0,8169

Nous avons constaté des taux très faible de concentration de plomb dans nos 2 échantillons de marbre. Les 2 taux restent en dessous de la norme ISO 90.100.01.(27)

III.1.6.4. Résultats de la SAA du cuivre (Cu)

Le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA nous a permis d'obtenir la courbe de tendance ci présentée dans la figure 52.

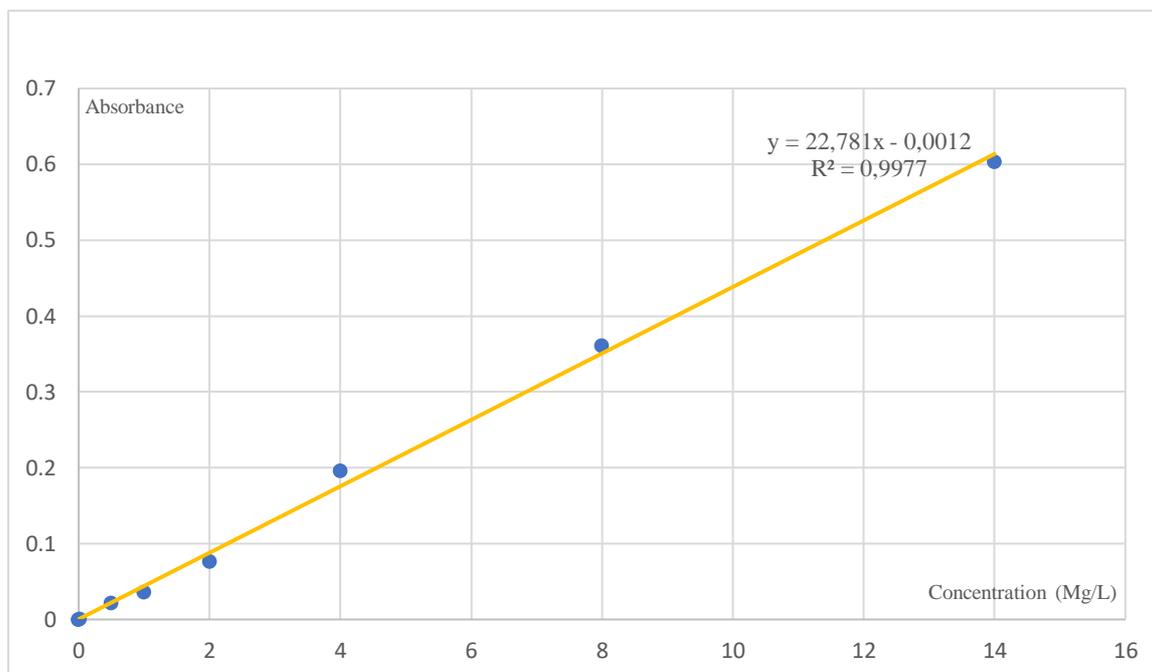


Figure 52 : Courbe de tendance du cuivre (Cu)

Après le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA, nous avons obtenu une courbe de tendance avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,77\%$, correspondant à la valeur technique relative à la conception de l'appareil.

Les concentrations de cuivre présent dans nos échantillons obtenus par la SAA sont présentées dans le tableau 21.

Tableau 21 : Concentrations du cuivre obtenus par la SAA

Nom de l'échantillon	Signal	Concentration
Cu	Abs	Mg/L
Blanc	-0,0000	0,0000
Étalon 1	0,022	0,5000
Étalon 2	0,036	1,0000
Étalon 3	0,077	2,0000

Étalon 4	0,196	4,0000
Étalon 5	0,361	8,0000
Étalon 6	0,604	14,0000
Marbre gris	0,001	0,0135
Marbre blanc	-0,001	0,0000

Nous avons constaté des taux très faible de concentration du cuivre dans nos deux échantillons, inférieurs à la valeur guide de la norme 91.100.01.(27)

III.1.6.5. Résultats de la SAA du fer (Fe)

Le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA nous a permis d'obtenir la courbe de tendance ci présentée dans la figure 53.

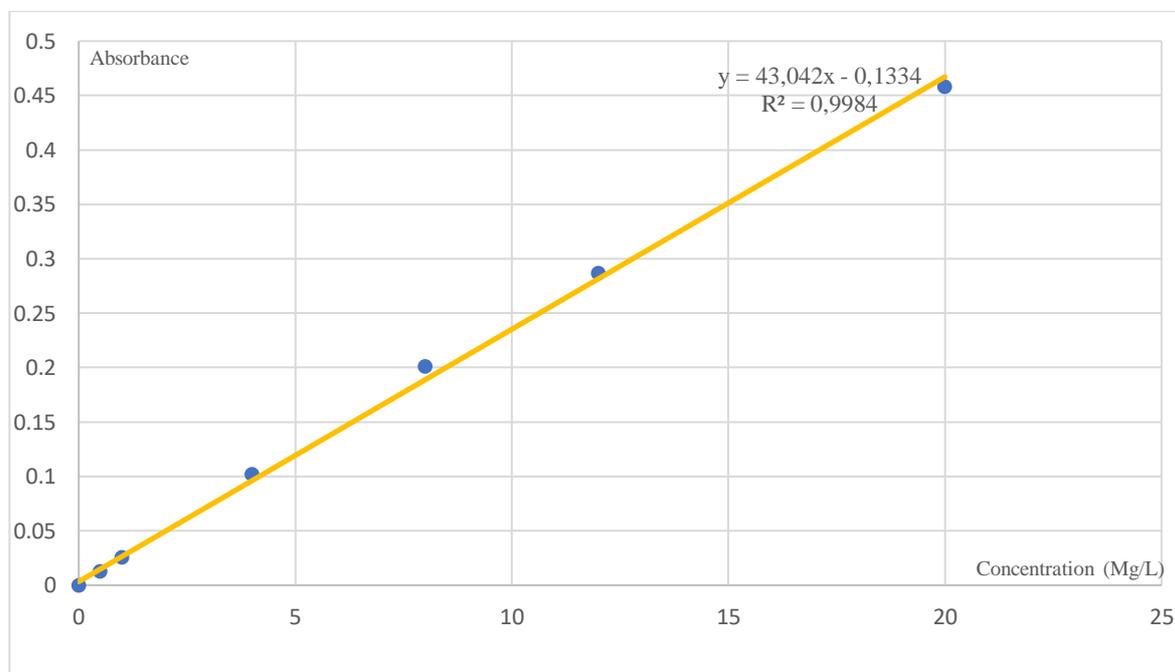


Figure 53 : Courbe de tendance du fer (Fe)

Après le passage de nos étalons dans l'appareil de la SAA, nous avons obtenu une courbe de tendance avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,84\%$, correspondant à la valeur technique relative à la conception de l'appareil.

Les concentrations de fer présent dans nos échantillons obtenus par la SAA sont présentées dans le tableau 22.

Tableau 22 : concentrations du fer obtenues par la SAA

Nom de l'échantillon	Signal	Concentration
Fe	Abs	Mg/L
Blanc	-0,0000	0,0000
Étalon 1	0,013	0,5000
Étalon 2	0,026	1,0000
Étalon 3	0,102	4,0000
Étalon 4	0,201	8,0000
Étalon 5	0,287	12,0000
Étalon 6	0,458	20,0000
Marbre gris	-0,001	0,0000
Marbre blanc	-0,001	0,0000

Nous avons constaté une absence d'absorbance correspondant à l'élément fer, nous n'avons pas de fer dans nos échantillons.

L'état d'absence du fer dans le marbre confirme l'hypothèse de contamination de l'échantillon lors de l'encapsulation de l'analyse FTIR du marbre gris.

Remarque :

Les résultats de l'analyse des échantillons nous affirment que le marbre est conforme pour une utilisation domestique.

III.2. Analyse des produits finis : Résistance à la compression

Pour les analyses mécaniques, nous nous sommes contentés uniquement de la résistance à la compression, du fait que la marbrerie industrielle « Bourai » conçoit des produits finis destinés au revêtement, donc soumis uniquement à un impact de compression de compactage.

Les résultats des tests effectués au niveau du laboratoire des travaux publics de l'est Béjaïa (LTPEB) sont représentés dans le tableau 23 et sont projetés dans l'histogramme en figure 54.

Tableau 23 : Résultats de la résistance à la compression

Échantillons	Surface (mm ²)	Force (KN)	Résistance à la compression (MPa)
1	1600	150,7	94,1

2	1600	155,4	97
3	1600	160,6	100

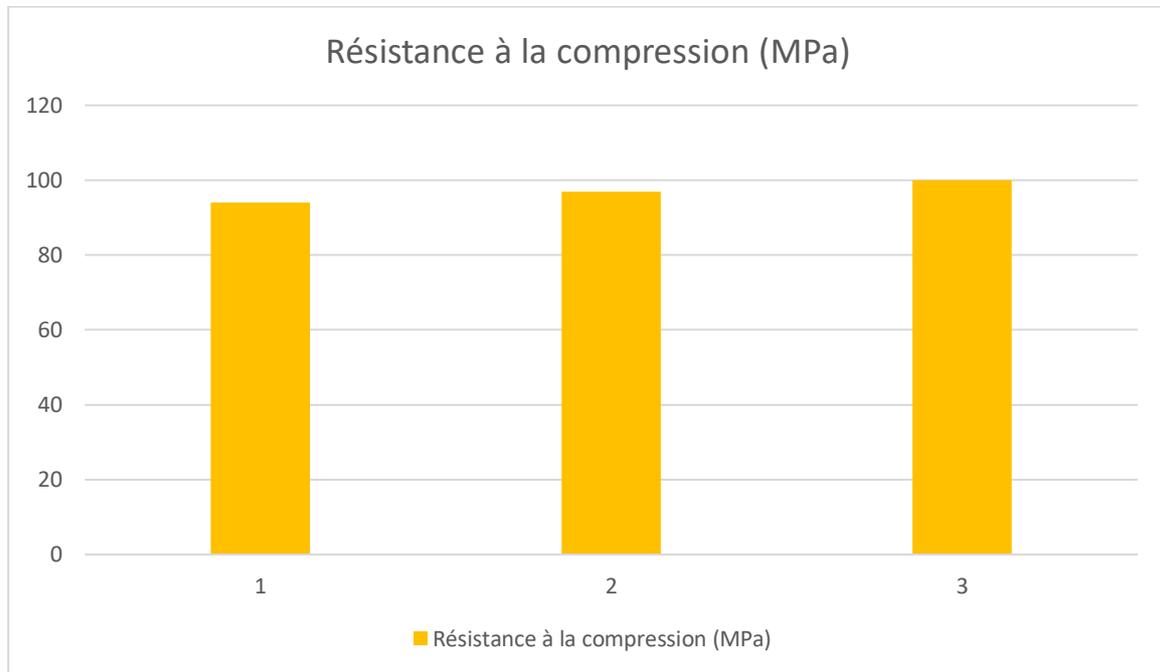


Figure 54 : Résistance à la compression de nos 3 morceaux de dalles

De l’histogramme, nous avons constaté que nos 3 tests nous ont donnés des résultats proches :

- Test effectué sur la première dalle : $R_c=94,1$ MPa
- Test effectué sur la deuxième dalle : $R_c=97$ MPa
- Test effectué sur la troisième dalle : $R_c= 100$ MPa

Conformément à la norme ISO 91.100. Déterminant les caractéristiques mécaniques des matériaux de finitions, les produits de finitions de la marbrerie industrielle « Bourai » sont conforme en matière de résistance à la compression. (27)

III.3. Conclusion

Les résultats de toutes ces analyses nous affirment que le marbre du gisement de Fil-Fila, utilisé par la marbrerie industrielle dans la fabrication de matériaux de finition est conforme aux normes et saint pour une utilisation quotidienne et un contact quotidien avec l’humain.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de caractériser les marbres du gisement de Fil-Fila utilisés par la marbrerie industrielle « Bourai » dans la fabrication de matériaux de finitions, et de définir le procédé technologique adopté par l'usine dans la fabrication de ces matériaux.

Le marbre blanc présente une composition presque parfaite, une seule phase à été détecté par l'analyse DRX relative à la calcite (CaCO_3), quant au marbre gris, nous avons noté quelques autres phases qui sont à l'origine de cette coloration noirâtre (Quartz (SiO_2); Enstatite (MsSiO_3))

Avec l'analyse FX, nous avons confirmé que notre marbre blanc était essentiellement composé d'oxyde de calcium (CaO), et nous avons détecté d'autre composant dans le marbre gris, dont les oxydes de silice (SiO), de fer (FeO), d'aluminium (AlO) et de magnésium (MgO).

Les pertes au feu sont respectivement de 35% pour le marbre blanc et de 38% pour le marbre gris, après une analyse FTIR nous avons déterminé les différents composés organiques qui se sont perdus avec l'augmentation de la température.

Les échantillons de marbres possèdent des taux de concentration en métaux lourds inférieur aux valeur guides limitées par la norme ISO 90.100.01 des matériaux de constructions.

La résistance à la compression de nos dalles est de 97 MPa en moyenne. Cette valeur est au-dessus de la valeur exigée par la norme, indiquant 40 MPa minimum, Nous déduisant que le procédé technologique adopté par la marbrerie et le process de conception de leurs produits sont adéquats, respectant des proportions bien étudiées.

Les ressources de l'Algérie en marbre, en matériaux de construction à base de pierres et même en pierres d'ornementation, sont gigantesques, mais faute de volonté politique et d'entreprises compétitives, cette filière stagne. Plus grave, elle manque même de perspectives. Les conférenciers espèrent un regain d'intérêt de la part des nouvelles autorités du pays.

S'exprimant lors d'une rencontre des professionnels du marbre et autres pierres de construction et d'ornementation, le directeur du groupe GICA a indiqué que le marbre algérien constitue un marché prometteur mais délaissé, ajoutant que l'Algérie possède de nombreux gisements qui restent selon lui, "insuffisamment exploités".

Les responsables affirment que la filière marbre peut générer des richesses et contribuer à la diversification de l'économie nationale si elle est bien exploitée.

Le directeur du groupe GICA a souligné, par ailleurs, la nécessité de mettre en place un système d'information "efficace" pour réorganiser cette filière.

"L'attribution des titres miniers, le manque des statistiques et une main d'œuvre qualifiée figurent parmi les difficultés rencontrées par les professionnels de la filière marbre" a-t-il dit.



Références

- (1) Écrit de l'historien Pascal Julien, Marbres, de carrières en palais et interview à ce propos sur France-Culture, le 12 mars 2008, émission Métropolitain.
- (2) Le Petit Robert de la langue française, s. v. marbre et Trésor de la langue française informatisé, 2006.
- (3) Lanani.M.S, Boustouh.S, Contribution à l'étude géologique du gisement de marbre de Fil-Fila, mémoire master académique en géologie, université de Jijel, 2015.
- (4) Bouderies.A, Mezghache.H, Géostatistique et répartition spatiale des différents types de marbre dans le gisement de Fil-Fila, Université Badji Mokhtar, 2019.
- (5) Gabriele Borghini (ed.), marbres Antiques (Matériaux du groupe I de la culture artistique - Institut central pour le catalogue et la documentation), Rome 1992.
- (6) Bououden.D, Les carrières de marbre du massif de Fil-Fila : Contexte géologique, minéralogique, qualité des matériaux et méthode d'exploitation, Mémoire magister Ressources minérales, Université de Constantine, 2015.
- (7) Ayachi, Chiheb. Etude géologique, cartographie et pétrographique du gisement de marbre de Fil-Fila (Skikda), 2011.
- (8) Recherche faites par l'Enamarbre.
- (9) Jacques Dubarry de Lassale, "Utilisation des marbres", H. Vial, mars 2001.
- (10) Minéralogie appliquée aux arts, par C. P. Brard, tome second, 1821.
- (11) L.Bourai, directeur de la marbrerie industrielle, 2021.
- (12) Kurt F. J. Heinrich, « The physics of X-Ray », dans Electron beam X-Ray Microanalysis, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- (13) B. Beckhoff, B. Kanngießner, N. Langhoff, R. Wedell et H. Wolff, Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, Springer, 2006.
- (14) P. Griffiths et J.A. de Hasseth, Fourier Transform Infrared Spectrometry, Wiley-Blackwell, 2007, 2^e éd.
- (15) F. Farcas, P.Touzé. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier 5FTIR) une méthode intéressante pour la caractérisation du ciment.Bulletin des laboratoires des ponts et des chaussées 4350. pp 77-88 (2001)
- (16) Robert White, Chromatography/Fourier transform infrared spectroscopy and its applications, New York/Basel, éd 1, 1990.

- (17) C.N. Banwell et E.M. McCash, *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*, McGraw-Hill, 1994, 4^e éd.
- (18) J.Connes, « Near-Infrared Planetary Spectra by Fourier Spectroscopy. I. Instruments and Results », *Journal of the Optical Society of America*, vol. 56, n^o7.
- (19) George Socrates, *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*, John Wiley & Sons, 12 avril 2004.
- (20) Waterlot Christophe, « Évaluation des effets d'une lampe à cathode creuse pulsée à courant variable sur les interférences spectrales de l'arsenic dans le dosage du cadmium par spectrophotométrie d'absorption atomique », *Rev. can. genie civ.*, 2010
- (21) L'vov, B. V., « Fifty years of atomic absorption spectrometry », *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 60, 2005.
- (22) Thomas J. Urbanik, Sung K. Lee et Charles G. Johnson, « Column Compression Strength of Tubular Packaging Forms Made of Paper », *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 34, n^o 6, 2006.
- (23) Michael A. Ritter, US Dept of Agriculture, Forest Service, *Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance*, Washington D.C., 1990.
- (24) *Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux*, J.-P. Eberhart, éd. Doin éditeurs, 1976
- (25) D. Stoelhorst, *The use of waste materials in civil engineering*, Waste Materials in Construction, Elsevier Science B.V, 1991.
- (26) Redha Chabi, *Etude Pétrographique, Minéralogique Et Géochimique Des Granitoïdes Et Des Pegmatites À Mr Associates. L'exemple Du Massif De Filfila* [Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar - Annaba]. 2007.
- (27) Normes ISO, <https://www.iso.org/fr/ics/91.100.01/x/>.

Résumé

La marbrerie industrielle « Bourai » utilise les marbres du gisement de Fil-Fila dans la conception de dalles, le procédé technologique adopté par la marbrerie est adéquat, vu que la résistance à la compression est de 97 MPa ce qui est largement supérieur à la norme.

Le marbre blanc présente une seule phase minéralogique qui est la calcite (CaCO_3) par analyse DRX, le marbre gris présente outre la calcite des phases de quartz (SiO_2) et d'énstatite (MgSiO_3), la FX nous indique la dominance de l'oxyde de calcium (CaO) dans le marbre blanc, tant dis que celle-ci est amoindri dans le marbre gris avec la présence des oxydes de silice (SiO), de fer (FeO), d'aluminium (AlO) et de magnésium (MgO), les pertes au feu sont respectivement de 35% pour le marbre blanc et de 38% pour le marbre gris, après une analyse FTIR nous avons déterminé les différents composés organiques qui se sont perdus avec l'augmentation de la température, les échantillons de marbres possèdent des taux de concentration en métaux lourds inférieur aux valeur guides limitées par la norme ISO 90.100.01 des matériaux de constructions.

Mots clés : Marbre ; Matériaux de finitions ; Fil-Fila ; Marbrerie ; Analyse.

SUMMARY

The industrial marble factory "Bourai" uses the marbles of the deposit of Fil-Fila in the design of slabs, the technological process adopted by the marble factory is adequate, given that the resistance to compression is 97 MPa which is largely superior to the standard.

The white marble presents only one mineralogical phase which is the calcite (CaCO_3) by DRX analysis, the grey marble presents besides the calcite phases of quartz (SiO_2) and enstatite (MgSiO_3), the FX indicates us the dominance of the oxide of calcium (CaO) in the white marble, so much so that this one is reduced in the grey marble with the presence of the oxides of silica (SiO), iron (FeO), Aluminum (AlO) and magnesium (MgO), the fire losses are respectively 35% for white marble and 38% for gray marble, after an FTIR analysis we have determined the various organic compounds that were lost with the increase in temperature, the marble samples have concentration rates of heavy metals below the guide values limited by the standard ISO 90. 100.01 for construction materials.

Key words: Marble ; Finishing materials ; Fil-Fila ; Analysis.

