



Laboratoire de Géo-Sciences et Environnement

Département des Sciences de la Terre
Faculté des Sciences et Techniques Guéliz
Université Cadi Ayyad



Mémoire de projet de fin d'étude

*Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement*



IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET DE RESTAURATION : CAS DU PALAIS BADIA DE MARRAKECH

Réalisé par :

ARREBEI Nassima

Encadré par :

- L. DAOUDI

(Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)

Soutenu le 30 juin, devant le jury composé de :

- **L. DAOUDI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **Kh. EL HARIRI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)
- **D. CHAFIKI** (Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech)

2013/2014

DÉDICACES

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude et de reconnaissance à :

Ma chère famille pour son affection, sa patience et ses prières.

Mes meilleurs amis pour leur aide, leur temps, leur encouragements et leur assistance et soutien.

Mon encadrant Mr L. Daoudi qui m'a aidé à améliorer mes connaissances en me donnant informations et conseils.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Remerciement

Avant tout, j'aimerais exprimer ma gratitude et mes sentiments les plus respectueux à mon encadrant Professeur Lahcen Daoudi, pour son soutien, son encadrement de qualité et ses efforts continus pendant toute cette période de stage et sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les Professeurs du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques, qui ont participé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

Il est aussi indispensable aussi de remercier Monsieur Mounaim, Inspecteur des monuments historiques de Marrakech, ainsi que monsieur Mcherfi architecte de la restauration des monuments historiques de Marrakech pour leur coopération en me facilitant l'accès aux informations et aux données.

Finalement, je remercie tous mes amis et mes collègues et spécialement Mr. Gourfi, pour sa sympathie et sa contribution à l'amélioration et la réussite de ce travail.

Liste des figures

FIGURE 1 : PLAN DE SITUATION DU PALAIS BADIA	10
FIGURE 2 : CARTE DE CONSISTANCE DU PALAIS BADIA	12
FIGURE 3 : PROBLEME D'EFFLORESCENCE DU AUX REMONTEES CAPILLAIRES	18
FIGURE 4 : PROBLEME DE DECOLLEMENT DES ENDUITS DE RESTAURATION.....	18
FIGURE 5 : MATERIAUX DE RESTAURATION INCOMPATIBLES.....	19
FIGURE 6 : ETAT DE FISSURES STRUCTURELLES TRES AVANCE.....	19
FIGURE 7 : DEGRADATION DE LA BASE DU MUR DU AUX AGRESSIONS HUMAINES	20
FIGURE 8 : TENTATION DE RESTAURATION TRES MAL EXECUTEE	21
FIGURE 9 : CARTE DE SITUATION DES ECHANTILLONS PRELEVES	22
FIGURE 10 : CALCIMETRE DE BERNARD	24
FIGURE 11 : ILLUSTRATION DU PRINCIPE DE LA DIFFRACTION DES RAYONS X.	26
FIGURE 8 : POSITIONS DES REFLEXIONS BASALES DE DIFFERENTS EDIFICES INTERSTRATIFIES IRREGULIERS SUR LES ESSAIS NATUREL, GLYCOLE ET CHAUFFE.	32
FIGURE 9 : SERIE DE TAMIS	33
FIGURE 10 : PRINCIPE DE LA GRANULOMETRIE LAZER.....	34
FIGURE 11 : APPAREIL DE LA GRANULOMETRIE LASER.....	35
FIGURE 12 : TECHNIQUE DE CONSTRUCTION DES BANCHEES DU PISE.....	37
FIGURE 13 : ILLUSTRATION REPRESENTATIVE D'UN EXEMPLE DE MUR DU PALAIS BADIA	39
FIGURE 14 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE CACO3 DANS LE PISE	40
FIGURE 15 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 1	41
FIGURE 16 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 2.....	42
FIGURE 17 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 3.....	42
FIGURE 18 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 4.....	43
FIGURE 19 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 5.....	43
FIGURE 20 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 6.....	44
FIGURE 21 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON PIS 7.....	44
FIGURE 22 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON K2.....	45
FIGURE 23 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON S3.....	45
FIGURE 24 : DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS DE PISE.....	48
FIGURE 25 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LE PISE	49
FIGURE 26 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE CACO3 DANS LA BRIQUE EN CERAMIQUE	50

FIGURE 27 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR2	52
FIGURE 28 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR2	52
FIGURE 29 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR3	53
FIGURE 30 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR4	53
FIGURE 31 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR5	54
FIGURE 32 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON BR6	54
FIGURE 33 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON S1.....	55
FIGURE 34 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES CARREAUX DE CERAMIQUE	57
FIGURE 35 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV6	58
FIGURE 37 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON S2.....	59
FIGURE 38 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES ENDUITS.....	61
FIGURE 40 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV3	63
FIGURE 41 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV4	63
FIGURE 42 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV5	64
FIGURE 43 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV9	64
FIGURE 44 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON REV10	65
FIGURE 45 : DISTRIBUTION DES CLASSES GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS D'ENDUIT	67
FIGURE 46 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES ECHANTILLONS D'ENDUIT	69
FIGURE 47 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES MORTIERS	70
FIGURE 48 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON MOR1	71
FIGURE 49 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON MOR2	71
FIGURE 50 : DIFFRACTOGRAMME DE L'ECHANTILLON K1.....	72
FIGURE 51 : DISTRIBUTION DES CLASSES GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS DE MORTIER	73
FIGURE 52 : HISTOGRAMME DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES ECHANTILLONS DE MORTIERS.....	74
FIGURE 53 : MATERIAUX DE RESTAURATION ACTUELS.....	79
FIGURE 54 : CARTE TOPOGRAPHIQUE DE MARRAKECH.....	81
FIGURE 55 : DIAGRAMME ILLUSTRANT LA COMPOSITION GRANULOMETRIQUE L'ECHANTILLON DE PISE ORIGINEL ET LES ECHANTILLONS DE TERRE DES REGIONS DE MARRAKECH	83

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : HISTORIQUE DES RESTAURATIONS (ARCHIVES DE L'INSPECTION DES MONUMENTS HISTORIQUES DE MARRAKECH, 2014)	16
TABLEAU 2 : LISTE DES ECHANTILLONS ET DES DIFFERENTES ANALYSES EFFECTUEES.....	23
TABLEAU 4 : METHODE PRATIQUE DE DETERMINATION DES MINERAUX ARGILEUX SIMPLES (TABLEAUX: A, B ET C).....	30
TABLEAU 5: TABLEAU DE DETERMINATION DES MINERAUX ARGILEUX INTERSTRATIFIES REGULIERS USUELS.	31
TABLEAU 6 : MODE OPERATOIRE DU GRANULOMETRE LASER.....	34
TABLEAU 7 : CLASSIFICATION DES MATERIAUX CONTENUS DANS LE PISE	36
TABLEAU 7 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LE PISE.....	40
TABLEAU 8 : PROPORTIONS RELATIVES AUX DIFFERENTS MINERAUX DU PISE	46
TABLEAU 9 : CLASSIFICATION GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS DE PISE.....	47
TABLEAU 11 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LE PISE	49
TABLEAU 12 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LA BRIQUE EN CERAMIQUE.....	50
TABLEAU 13 : PROPORTIONS RELATIVES AUX DIFFERENTS MINERAUX DES BRIQUES.....	56
TABLEAU 15 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES CARREAUX DE CERAMIQUE	57
TABLEAU 14 : PROPORTIONS RELATIVES AUX DIFFERENTS MINERAUX DES CARREAUX DE CERAMIQUE.....	60
TABLEAU 19 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES ENDUITS	61
TABLEAU 15 : PROPORTIONS RELATIVES AUX DIFFERENTS MINERAUX DES ENDUITS	65
TABLEAU 16 : CLASSIFICATION GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS D'ENDUIT	67
TABLEAU 23 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES ECHANTILLONS D'ENDUIT	68
TABLEAU 24 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA CACO3 DANS LES MORTIERS	70
TABLEAU 25 : PROPORTIONS RELATIVES AUX DIFFERENTS MINERAUX DES MORTIERS	72
TABLEAU 26 : CLASSIFICATION GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS DE MORTIER	73
TABLEAU 28 : RESULTATS DES POURCENTAGES DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LES ECHANTILLONS DE MORTIERS.....	74
TABLEAU 30 : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE MINERAUX PRESENTS DANS LES BRIQUES BR1 ET BR2	77
TABLEAU 31 : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE CACO3 DES REVETEMENTS REV10 ET REV3	77
TABLEAU 32 : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE MINERAUX PRESENTS DANS LES REVETEMENTS REV10 ET REV3	78
TABLEAU 33 : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE CACO3 ET DE MATIERE ORGANIQUE DES REVETEMENTS REV10 ET REV3.....	78

TABLEAU 34 : COMPARAISON DES POURCENTAGES DE CaCO₃ ET DE MATIERE ORGANIQUE DU PISE, DES MORTIERS ET DES ENDUITS.....79

Sommaire

SOMMAIRE	5
INTRODUCTION :	8
CHAPITRE I : PRESENTATION DU PALAIS BADIA.....	10
1. SITUATION DU PALAIS :	10
2. HISTORIQUE :	11
3. CONSISTANCE :	11
4. TECHNIQUES ET MATERIAUX DE CONSTRUCTION :	12
4-1. <i>Le pisé</i> :	13
4-2. <i>La céramique</i> :	13
4-3. <i>Le mortier</i> :	14
4-3-1. Le liant :	14
4-3-2. Le granulat :	15
4-3-3. L'eau :	15
5. HISTORIQUE DES RESTAURATIONS :	15
CHAPITRE II : ASPECTS DE DEGRADATION DU PALAIS BADIA.....	17
1. L'EFFLORESCENCE (REMONTEE CAPILLAIRE) :	17
2. DEGRADATION DE LA BASE DES MURS :	17
3. DECOLLEMENT DE L'ENDUIT :	18
4. INCOMPATIBILITE DES MATERIAUX DANS LA RESTAURATION :	19
5. FISSURES STRUCTURELLES :	19
6. AGRESSIONS HUMAINES :	20
CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES DE CARACTERISATION	22
1. ÉCHANTILLONNAGE :	22
2. ANALYSE CALCIMETRIQUE :	24
2-1. <i>Principe</i> :	24
2-2. <i>Appareillage</i> :	24
2-3. <i>Protocole expérimental</i> :	25
3. ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE :	25
4. DIFFRACTION DES RAYONS X :	25
4-1. <i>Principe et appareillage</i> :	25
4-1-1. Principe :	25
4-1-2. Appareillage :	26
4-2. <i>Préparation des échantillons</i> :	27
4-3. <i>Traitement des données</i> :	28
4-3-1. Analyse qualitative :	28
4-3-2. Analyse semi – quantitative :	33
5. ANALYSE DE LA GRANULOMETRIE :	33
5-1. <i>Granulométrie par tamisage</i> :	33
5-2. <i>Granulométrie Laser</i> :	34
5-2-1. Principe :	34
5-2-2. Appareillage :	34
CHAPITRE IV : RESULTATS DE LA CARACTERISATION	36

1.	OBSERVATION IN SITU :	36
1-1.	<i>Le pisé</i> :	36
1-2.	<i>La Brique cuite</i> :	38
1-3.	<i>Les carreaux de céramique</i> :	38
2.	ANALYSE DU PISE :	40
2-1.	<i>Analyse de la Calcimétrie</i> :	40
2-1-1.	Résultats :	40
2-1-2.	Commentaire :	40
2-2.	<i>Diffraction des rayons X</i> :	41
2-2-1.	Présentation des diffractogrammes :	41
2-2-2.	Commentaire :	46
2-2-3.	Tableau des pourcentages :	46
2-3.	<i>Analyse Granulométrique</i> :	47
2-3-1.	Résultats :	47
2-3-2.	Commentaire:	48
2-4.	<i>Analyse de la matière organique</i> :	49
2-4-1.	Résultats :	49
2-4-2.	Commentaire :	50
3.	ANALYSE DE LA BRIQUE EN CERAMIQUE :	50
3-1.	<i>Analyse de la Calcimétrie</i> :	50
3-1-1.	Résultats :	50
3-1-2.	Commentaire :	51
3-2.	<i>Diffraction des Rayons X</i> :	51
3-2-1.	Présentation des diffractogrammes :	52
3-2-2.	Commentaire :	55
3-2-3.	Tableau des pourcentages :	56
4.	ANALYSE DES CARREAUX DE CERAMIQUE :	57
4-1.	<i>Analyse de la Calcimétrie</i> :	57
4-1-1.	Résultats :	57
4-1-2.	Commentaire :	57
4-2.	<i>Diffraction des Rayons X</i> :	58
4-2-1.	Présentation des diffractogrammes:	58
4-2-2.	Tableau des pourcentages :	60
5.	L'ANALYSE DES ENDUITS :	61
5-1.	<i>L'analyse de la Calcimétrie</i> :	61
5-1-1.	Résultats :	61
5-1-2.	Commentaire :	61
5-2.	<i>Diffraction des Rayons X</i> :	62
5-2-1.	Résultats :	62
5-2-2.	Commentaire :	65
5-2-3.	Tableau des pourcentages :	65
5-3.	<i>L'analyse de la Granulométrie</i> :	67
5-3-1.	Résultats :	67
5-3-2.	Commentaire :	68
5-4.	<i>L'analyse de la Matière organique</i> :	68
5-4-1.	Résultats :	68
5-4-2.	Commentaire :	69
6.	L'ANALYSE DES MORTIERS :	70
6-1.	<i>L'analyse de la Calcimétrie</i> :	70
6-1-1.	Résultats :	70
6-1-2.	Commentaire :	70
6-2.	<i>Diffraction des Rayons X</i> :	71
6-2-1.	Résultats :	71
6-2-2.	Commentaire :	72

6-3. Analyse de la Granulométrie :	73
6-3-1. Résultats :	73
6-3-2. Commentaire :	74
6-4. Analyse de la matière organique :	74
6-4-1. Résultats :	74
6-4-2. Commentaire :	75
CHAPITRE V : DISCUSSION DES RESULTATS	76
1. VALIDITE DES MATERIAUX DE RESTAURATION ACTUELS :	76
1-1. La brique en céramique :	76
1-1-1. Comparaison physico-chimique :	76
1-1-2. Comparaison minéralogique :	76
1-2. Le sable utilisé pour la fabrication des enduits:	77
1-2-1. Comparaison physico-chimique :	77
1-2-2. Comparaison minéralogique :	77
1-4.C Conclusion :	78
2. COMPATIBILITE DE L'ENDUIT ET DU MORTIER DE RESTAURATION AVEC LE PISE ORIGINEL :	79
2-1. Comparaison physico-chimique :	79
2-2. Comparaison minéralogique :	80
2-3. Conclusion :	80
3. ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION DU PALAIS BADIA :	81
3-1. Comparaison physico-chimique :	82
3-2. Comparaison granulométrique :	82
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES :	84

INTRODUCTION :

Erigé pour entretenir la mémoire, le monument énonce le passé en le peuplant de figures que l'autorité souhaite immortaliser. Les monuments historiques du monde entier constituent un témoignage des civilisations et des hommes d'autrefois qui ont marqué l'histoire de leur foi, de leur culture, de leur art et de leur science. Ils ont légué à l'humanité entière des monuments bâtis ou creusés dans le roc pour résister jusqu'à nos jours au défi du temps. La notion de Monuments Historiques n'a pris essentiellement naissance qu'au XVIIIe siècle, elle s'est développée surtout au XIXe siècle sous la pression des romantiques qui réclamaient de façon virulente la sauvegarde d'un patrimoine qui mérite d'être transmis aux générations futures pour être reconnu et valorisé au fil des siècles (Dussaule, 1982).

Aujourd'hui, sous la vague de l'urbanisation et de la technologie, l'Homme ne s'empêche de sa curiosité à vivre l'expérience de la découverte de l'Histoire et des édifices bâtis par nos ancêtres autrefois. C'est cette curiosité humaine en effet qui rend le monument historique, non seulement un atout principal de développement durable, mais aussi un levier important de développement socio-économique, étant donné qu'il contribue dans une mesure importante à stimuler le tourisme.

Cette prise de conscience est déjà bien ancrée dans des pays qui ont depuis longtemps jeté les ponts entre des concepts aussi éloignés que culture et économie, culture et management pour aboutir aujourd'hui à une parfaite symbiose (UNESCO, 2008). C'est pourquoi la restauration et la sauvegarde du patrimoine architectural sont devenues une préoccupation majeure, faisant partie intégrante dans les investissements et les plans nationaux de développement économique, vue l'importance du tourisme et celle des profits qu'en retire le revenu national.

Au Maroc, étant l'un des pays dotés d'un patrimoine culturel riche et diversifié, l'activité touristique officielle se base sur l'héritage culturel qu'exposent les villes antiques riches avec leurs monuments historiques, leurs artisanats et leurs cultures populaires. Les principales villes impériales connues à travers l'histoire du Maroc sont : Fès, Marrakech, Rabat et Meknès. Ces capitales ont été de toute évidence l'héritage de différentes dynasties

(Idrisside, Almoravide, Almohade, Mérinide, Saâdienne, et Alaouite). Chaque région possède ses particularités et ses atouts historiques, contribuant ainsi à la culture nationale et à l'héritage civilisationnel. Parmi les obligations prioritaires au Maroc, figure la protection du patrimoine sous toutes ses formes et la préservation des monuments historiques. De ce fait, le tourisme au Maroc s'affirme de plus en plus comme une véritable priorité de son plan de développement, compte tenu de son impact positif économique et social.

La ville de Marrakech par exemple, renferme plusieurs monuments des plus prestigieux de l'art islamique : Agdal et Koutoubia (12^{ème} siècle), Tombeaux Saâdiens (16^{ème} siècle), Palais Badià (16^{ème} siècle). Ces monuments historiques d'une exceptionnelle qualité ont permis à cette ville d'être classée « Patrimoine Mondial » par l'UNESCO (1995).

D'un point de vue structurel, les monuments de Marrakech ont été dégradé par l'épreuve du temps mais aussi par l'action destructrice de l'homme, due au développement rapide et expansif qu'a connu la ville de Marrakech durant ces dernières décennies. Certains de ces monuments ont malheureusement atteint un état de délabrement très avancé et inquiétant. Une intervention rapide et bien étudiée s'impose pour freiner cette destruction, qu'il ne serait pas exagérer de qualifier de « crime » contre la mémoire de l'humanité. Dans les pays développés, les études scientifiques de caractérisation des matériaux utilisées dans l'édification et la restauration des monuments historiques sont très avancées ; cependant dans les pays en voie de développement, ce type d'investigation scientifique est encore très restreint si elle n'est pas inexistante.

Notre travail s'inscrit dans cette optique, il a pour objectif principal d'apporter un diagnostic scientifique précis sur l'état et les causes des dégradations relevées sur les matériaux utilisés pour la construction et la restauration des monuments historiques. Nous avons focalisé le présent travail sur l'étude des matériaux du prestigieux Palais Badià. La démarche adoptée consiste dans un premier lieu de faire un diagnostic des dégradations subies par la Palais. Ensuite une caractérisation des différents matériaux utilisés dans la construction sera effectuée. Enfin, une discussion et une comparaison avec les matériaux locaux sera faite afin d'identifier les matériaux adéquats pour la restauration.

CHAPITRE I : PRESENTATION DU PALAIS BADIA

1. Situation du Palais :

Le palais Badià se situe au cœur de l'ancienne Médina de Marrakech, entre les Tombeaux Saâdiens au Sud-ouest et Palais Bahia au Nord-est (**fig.1**).

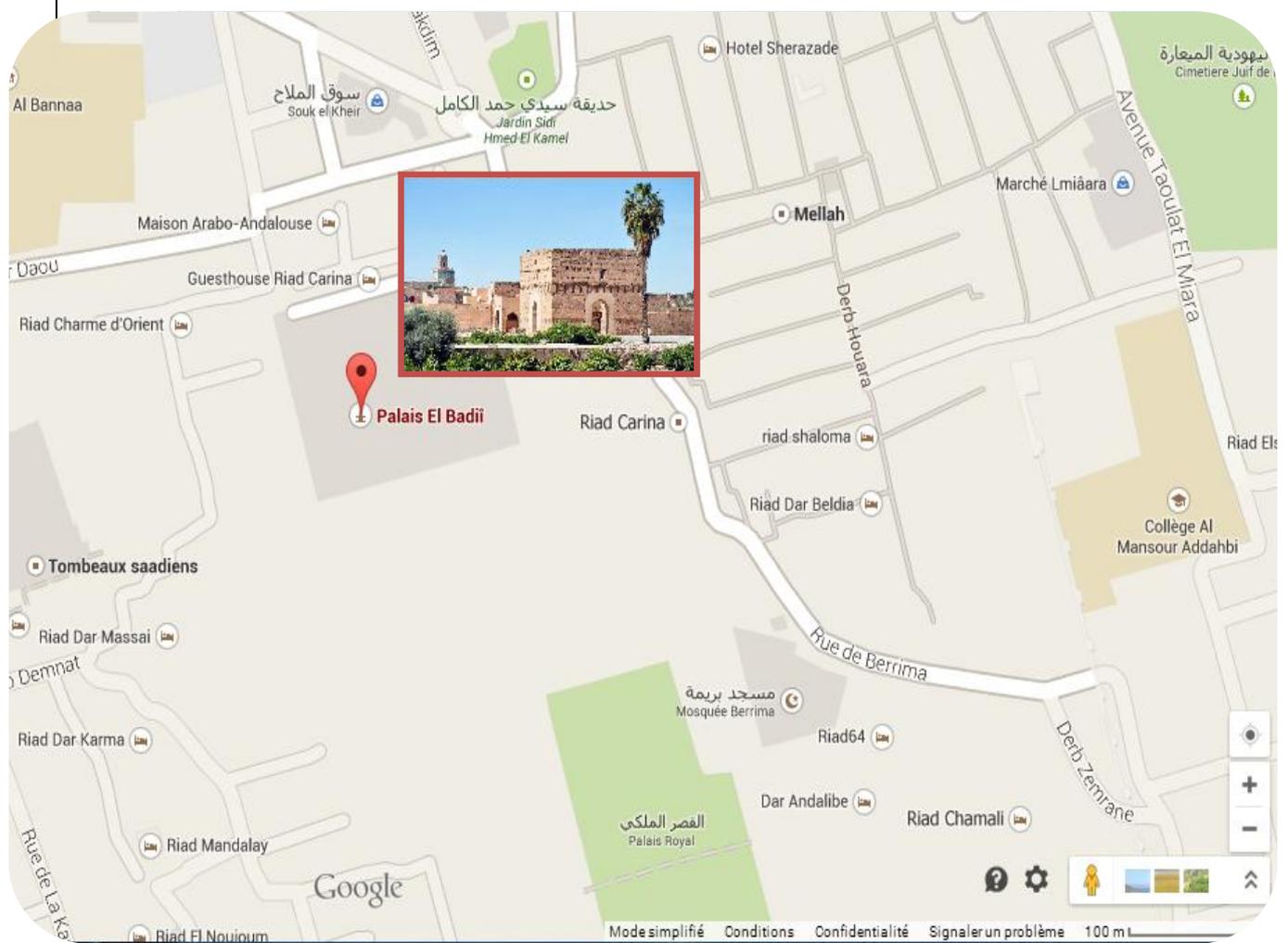


Figure1 : Plan de situation du Palais Badià

2. Historique :

Le Badià désigne l'ensemble palatial construit par le plus illustré des souverains Saâdiens Ahmed Al Mansour Ad Dahbi (le doré). Entamés en décembre 1578, quelques mois après l'avènement du sultan ; les travaux de construction n'auraient été achevés que seize ans plus tard.

Pour bâtir cette œuvre grandiose, le sultan choisit l'endroit Nord-est de la Kasbah Almohad. L'emplacement avait l'avantage de jouxter les appartements privés du sultan. Le palais était destiné aux fêtes et aux audiences solennelles où le faste du souverain pouvait se manifester à l'élite du royaume et aux ambassades étrangères.

La disposition générale du palais et son décor atteste une influence de Grenade, son plan inspirant vraisemblablement du palais de l'Alhambra. Les descriptions anciennes nous dépeignent également le somptueux décor du Badià qui ne nous est connu qu'à travers le décor des tombeaux Saâdiens.

Le Badià fut détruit au 17^{ème} siècle dans le temps de la dynastie ismailienne. Commencé vers 1696, la démolition dura une dizaine d'années, une grande partie de ses matériaux aurait été acheminée vers Meknès pour être réemployée dans la construction de la ville royale de Moulay Ismail (1677-1727) (Benzzi, 2001).

En 1953, une campagne de fouilles fut entreprise. Elle permit de dégager un grand nombre de structures importantes à travers lesquelles on entrevoit quelques détails du plan d'ensemble.

3. Consistance :

L'ensemble palatial est constitué d'une grande cour en forme de rectangle de 135m sur 110m, au milieu de laquelle fut aménagé un bassin de 90m sur 20m, de part et d'autre de ce bassin central deux parterres sont couvertes d'arbres. Les angles du palais sont occupés par des bassins rectangulaires de 30m sur 10m. Autours de l'immense cour du Palais Badià s'organisent les ruines imposantes d'anciens pavillons (**fig.2**). Sur les côtés est et ouest, deux pavillons se font face : le "*pavillon de cristal*" et le "*pavillon des audiences*" de plan quasi identique. Les côtés nord et sud, sont quant à eux occupés par le "*pavillon vert*" ainsi que par celui de "*l'héliotrope*" qui possédaient deux galeries ouvertes. L'ensemble comptait 360 pièces.

La juxtaposition de ces éléments suit un ordre imposé par des impératifs de sécurité, d'intimité et de fonction ; l'ensemble est entouré d'une enceinte qui marque les limites du palais.

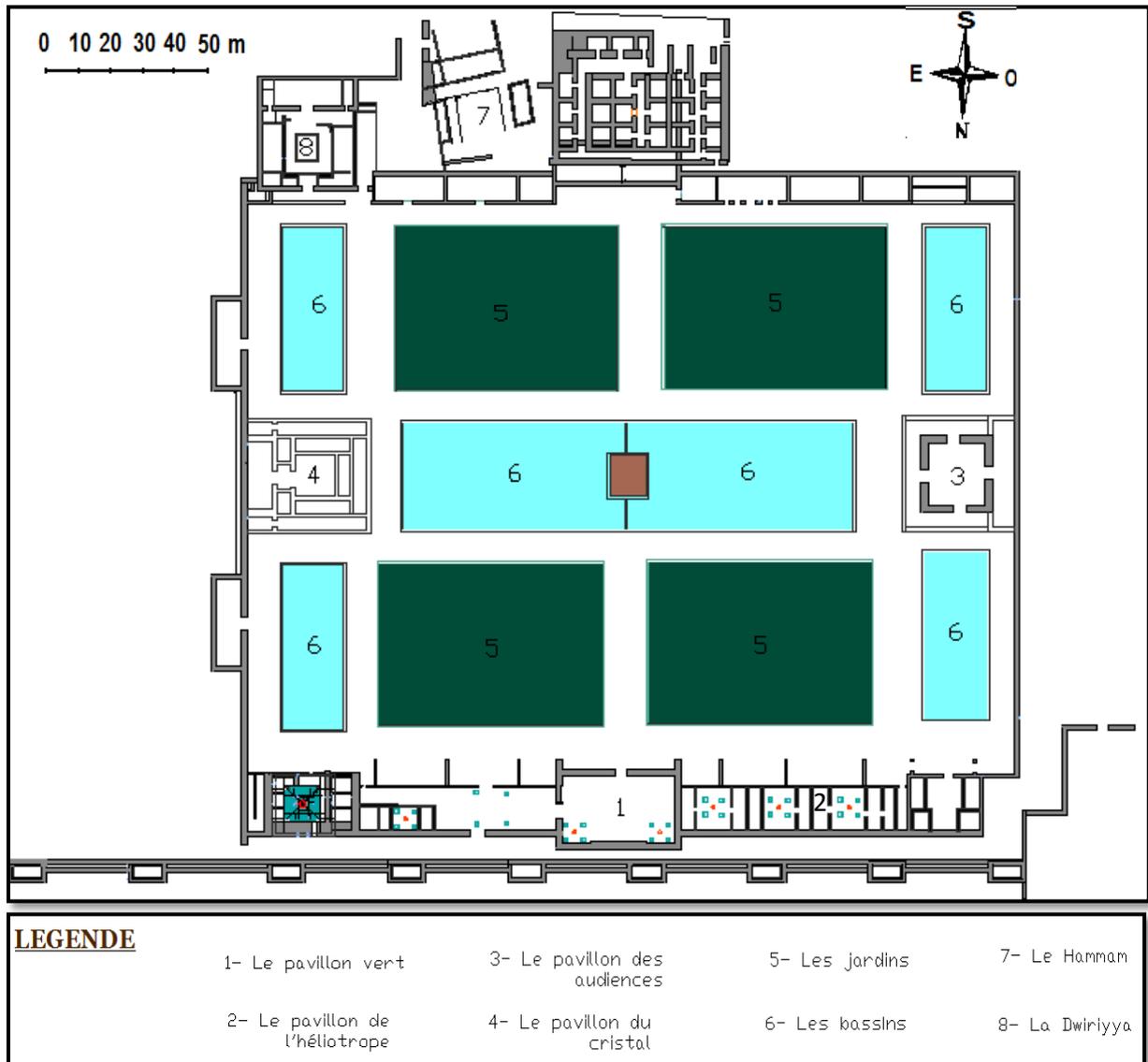


Figure 2 : Carte de consistance du Palais Badià

4. Techniques et matériaux de construction :

Les principales techniques de construction adoptées au Palais Badià sont :

- ✚ **Le pisé** pour la construction des murs,
- ✚ **La brique en céramique (en terre cuite)** pour la réalisation des voûtes, du couronnement, des coins de murs, des parements de décoration et des intercalaires dans les murs en pisé,
- ✚ **Les enduits** pour la protection et le lissage des murs en pisé,

Les carreaux de céramique pour la réalisation des revêtements de sol et des revêtements muraux.

4-1. Le pisé :

La technique du pisé est considérée comme étant l'une des premières techniques de construction de l'humanité. Les vestiges les plus anciens de bâtiments en pisé se trouvent à Mehgrah, dans la vallée de l'Indus au Pakistan (Benzzi, 2001).

Le pisé est l'une des très nombreuses façons de mettre en œuvre le matériau de terre. C'est un procédé qui permet de construire avec de la terre sans la soutenir par aucune pièce de bois et sans la mélanger de paille ni de bourre. Il consiste à damer, banchée par banchée, entre des planches en bois (banches), à l'épaisseur voulue, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend consistance et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations.

La préparation de la terre consiste à mélanger du tout-venant avec de la chaux et de l'eau. Comme tout mélange de liants et d'agréats, le liant assure la liaison entre les agrégats. Une certaine proportion de liant doit tout de même être respectée. Pour le pisé, on peut donner comme ordre de grandeur que, en dessous de 5 % de liant, il y a risque d'effritement et si la proportion dépasse les 15 %, des fissures apparaîtront (Mcherfi, 2012)

Il est important de se rappeler que chaque terre est différente et que les techniques de pisage varient. On peut donc dire que chaque mur en pisé est unique.

4-2. La céramique :

La céramique est le résultat de la cuisson d'une pâte argileuse de façon irréversible (au-delà de 700°C). Du fait de sa structure et de sa composition, l'argile a pour propriété de présenter un état plastique qui permet de modeler l'objet choisi (céramique). Pour faciliter le façonnage de l'objet, un dégraissant minéral ou végétal est ajouté. Il s'agit de sable ou de paille ou de tout autre élément ayant pour propriétés d'influencer la plasticité, le retrait de l'eau au séchage et la cohésion de l'objet afin qu'il ne subisse pas de chocs susceptibles de le briser lors de l'élévation de température.

Au cours de la cuisson, les cristaux sont détruits ; il y a alors formation de silicates d'aluminium cristallins et du quartz. La présence de sodium et de potassium dans l'argile provoque la fusion partielle de celle-ci. En refroidissant, l'argile fondue ne retrouve pas sa

structure cristalline. Il se forme à sa place une masse dure, non cristalline (matériaux vitrifiés, verre). Le verre agit comme un ciment entre les cristaux de Quartz et les silicates d'aluminium (Akpat, 2001).

Le taux de vitrification et la résistance de la céramique dépendent de la température atteinte pendant la cuisson (et de la composition du mélange). Plus la température est élevée, plus la céramique sera résistante.

Comme l'argile contient aussi du fer, le matériau après la cuisson est de couleur jaune si on la cuit à basse température et rouge si la cuisson se fait à haute température dans une atmosphère oxydante.

En définitif, les transformations qui affectent certains minéraux à la cuisson sont dépendantes de paramètres comme la composition chimique, la température, la pression ou la nature des fluides susceptibles d'intervenir dans la réaction (tension de vapeur d'eau ou de CO₂ par exemple).

4-3. Le mortier :

Le mortier est à la base de tous les travaux de maçonnerie que ce soit pour construire, pour enduire ou pour réparer. Il a pour fonction principale le scellement des éléments de maçonnerie de telle sorte qu'ils constituent un seul bloc, ce qui doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de l'eau de pluie.

Par définition un mortier est un mélange de liant, de granulats et d'eau :

4-3-1. Le liant :

On distingue deux types de liants :

- **La chaux :** elle a été utilisée depuis le V^{ème} siècle. Elle est généralement obtenue par la cuisson de blocs de calcaire dans des fours à chaux à 800°C durant trois jours. La pierre calcaire doit être la plus pure possible. Après refroidissement et destruction du four, des petits blocs de chaux vives (oxyde de calcium) sont récupérés. Une chaux dite « grasse » est obtenue par barbotage actif de la chaux dans de l'eau. Son durcissement se fait par carbonatation avec le dioxyde de carbone de l'air.

Un mortier à chaux a une faible résistance mécanique à la compression et un fort pouvoir de rétention de l'eau.

- **Le ciment** : Il correspond à des mélanges artificiels, selon des proportions définies, de calcaire (80 à 90 %), de silice (2% à 8%), d'alumine (5 à 15 %) et de fer (0.1 à 1 %). Ces trois derniers éléments sont apportés sous forme de sable, argile (ou schistes) cuits à 1450°C. Pour faciliter la prise du ciment, 5 % de gypse est ajouté au mélange après cuisson.

Un mortier à ciment présente une forte résistance mécanique et un fort pouvoir de rétention de l'eau.

4-3-2. Le granulat :

Le sable est le granulat le plus couramment utilisé, son rôle est d'accroître la compacité du mortier, pour cela il doit être inerte de toute impureté, surtout organique (végétation,...).

4-3-3. L'eau :

Elle sert à hydrater et à augmenter l'ouvrabilité du mortier. L'ouvrabilité peut être définie comme étant la propriété du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie.

Le dosage en eau est fonction de l'utilisation du mortier, par exemple un enduit à projeter doit être plus liquide qu'un mortier d'assemblage.

Notre but à travers cette étude est en fait, de caractériser de manière plus précise les matériaux utilisés pour chaque technique de construction.

5. Historique des restaurations :

Les premières restaurations cataloguées apportées au Palais Badià sont relativement récentes (fin des années quatre-vingt). Avant cette date, nous ne possédons pas de preuves écrites d'éventuels travaux d'entretiens apportés à ce monument. Il faut souligner que, suite à l'action du Sultan Moulay Ismail, le Palais Badià avait subi une destruction et un isolement total de toute action humaine pendant une longue période ; ce qui explique son état relativement plus dégradé, comparé aux autres monuments de la ville de Marrakech.

Cependant, d'autres facteurs tels : les remontées capillaires des eaux, l'effritement, le décollement des enduits et le décrochement des carreaux de zellige du sol et des murs

intérieurs, sont parmi les causes qui ont incité les responsables à entreprendre plusieurs restaurations (**tab.1**) étalées sur plusieurs années.

Date de la conservation	Travaux réalisés
1986	- Première intervention de restauration par l'architecte Packar
1999 – 2002	- Restauration des Pavillons.
2010	- Consolidation des arcades.
2012 – 2014	- Colmatage de fissures, - Consolidation des dégradations avancées, - Assainissement des eaux pluviales.

Tableau 1 : Historique des restaurations (Archives de l'inspection des monuments historiques de Marrakech, 2014)

CHAPITRE II :

ASPECTS DE DEGRADATION DU PALAIS BADIA

Les différentes pathologies que connaît Palais Badià apparaissent à l'œil nu (fissures, décollement d'enduits, humidité intempestive, ...), mais ces symptômes cachent souvent des désordres qui concernent d'autres domaines de la construction. Dans la construction traditionnelle, souvent on conjugue plusieurs faiblesses pendant des années sans trop de conséquences, c'est souvent un événement brutal qui déclenche une pathologie qui couvait depuis longtemps.

Les types de pathologies rencontrées dans le Palais sont les suivantes :

- 1. L'efflorescence (remontée capillaire) :** (fig.3) La densité sèche du pisé étant assez faible, la venue d'eau entraîne une succion importante dans le matériau sec et crée une migration de cette eau libre vers l'intérieur de la structure. Le sol se re-sature et la baisse des forces de succion diminue fortement la cohésion interne de la terre. Lorsque des sels sont présents dans la maçonnerie, ceux-ci auront tendance à migrer à travers le mortier au lieu des éléments de la maçonnerie. La perméance à la vapeur d'eau des mortiers diminue avec l'augmentation de l'hydraulicité du liant. Les mortiers purement à base de chaux sont les plus perméables à la vapeur d'eau, alors que les mortiers purement à base de ciment sont les plus imperméables. Les mortiers à forte perméance à la vapeur d'eau offre un trajet de faible résistance favorisant l'évaporation de l'humidité vers l'extérieur.
- 2. Dégradation de la base des murs :** Les dégradations de la base des murs sont dues essentiellement au manque de fondations et à l'action des infiltrations d'eau (remontées capillaires). : C'est l'humidité qui provient du sol et remonte dans le mur qui affaiblit la base du mur avant qu'elle ne dégrade l'enduit situé au dessus.

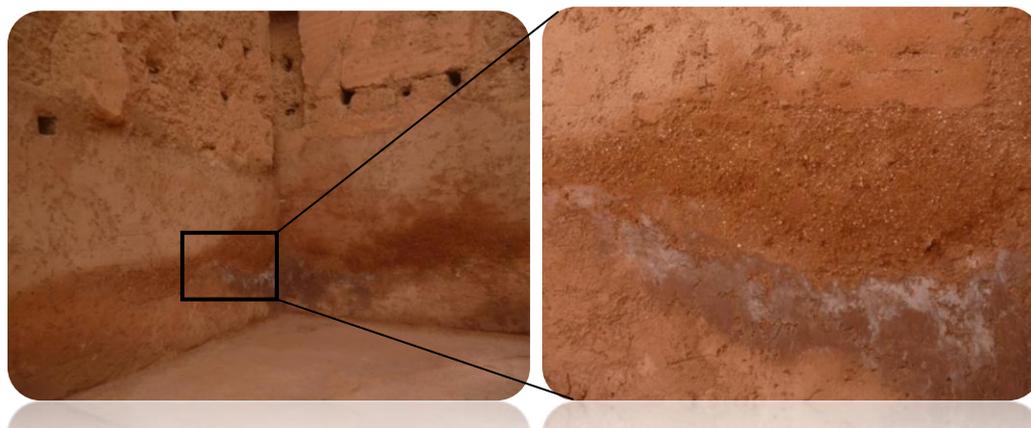


Figure 3 : Problème d'efflorescence dû aux remontées capillaires

- 3. Décollement de l'enduit :** (fig.4) Le décollement de l'enduit est dû à l'érosion humide et l'introduction de matériaux non compatibles (ex. : le ciment) dans les restaurations antérieures. La chute de l'enduit par plaques démontre que l'enduit choisi n'était pas approprié à la maçonnerie. Un enduit étanche et rigide, ne peut se concevoir que sur un bâtiment protégé des eaux de condensation et des remontées capillaires et bâti sur des semelles de fondations indéformables. Le mur lui-même peut s'effondrer au fur et à mesure des va-et-vient de l'eau (Il faut savoir que des phénomènes électrostatiques interviennent dans les mouvements de l'eau : par temps orageux, l'eau monte et elle redescend par temps sec.)



Figure 4 : Problème de décollement des enduits de restauration

4. Incompatibilité des matériaux dans la restauration : (fig.5) Presque la plupart des monuments de la ville a connu des tentatives de restauration pendant les dernières décennies, le Palais Badià n'en manque rien. Or, il ya lieu de constater que bien souvent ces interventions n'ont pas toujours été effectuées en respect des normes de restauration reconnues. Malheureusement, un ensemble considérable de malfaçons ont influé sur la santé des murs presque millénaires. L'incompatibilité des matériaux de construction avec ceux des murs entraine un rejet mutuel et le plus fragile cède.

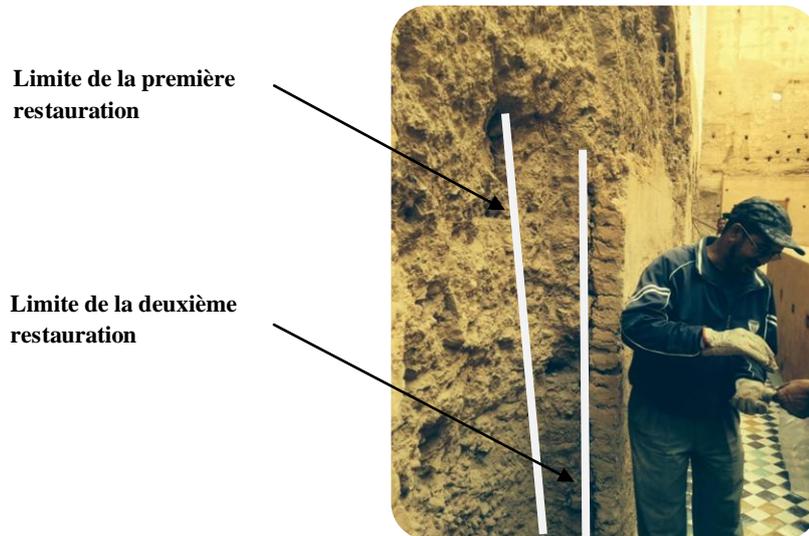


Figure 5 : Matériaux de restauration incompatibles

5. Fissures structurelles : Les fissures structurelles sont souvent dues à des mouvements de terrains et/ ou à un défaut de qualité de mise en œuvre. Généralement les fissures dans l'enduit ne sont pas forcément le signe d'un mouvement de la maçonnerie, mais quand le décapage de l'enduit fait apparaître le prolongement de la fissure (fig.6) pour atteindre la structure du mur, il ya raison de s'inquiéter.



Figure 6 : Etat de fissures structurelles très avancé

Ceci est le cas de la plupart des pavillons du Palais Badià qui connaissent une situation inquiétante, car les fissures sont très enfoncées dans la structure avec des épaisseurs très larges.

6. Agressions humaines : Ce type de pathologies concernant beaucoup le Palais Badià, où les habitations sont accolées à la muraille et l'annexion des borjs (bastions) aménagés en « habitations » en n' hésitant pas quelques fois, carrément à les couvrir par une dalle en béton armé et d'autres fois à évacuer les eaux usées à travers la muraille.

L'organisation aussi de festivals à l'intérieur du palais peut malheureusement être des fois désavantageuse vis-à-vis à la santé de la construction. Comme l'exemple des feux qu'allument les organisateurs la nuit au pied des murs et qui provoquent un aspect de dégradation très mal vue (**fig.7**) qu'on confuse souvent avec des remontées capillaires.



Figure 7 : Dégradation de la base du mur dû aux agressions humaines

Tout cela constitue une atteinte à l'intégrité du monument et au patrimoine culturel de la ville en général.

Dans ce même volet, il ne sera peut être pas exagéré de qualifier quelques opérations d'intervention antérieures dans l'entretien des remparts d'agression humaines. En effet, des pans entiers des murs ont été reconstruits à la hâte avec des matériaux de récupération usés sans aucun souci de respect de normes dans le domaine.

La conséquence est tout simplement une dégradation beaucoup plus avancée qu'à l'origine (**fig.8**).



Figure 8 : Tentation de restauration très mal exécutée

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES DE CARACTERISATION

1. Échantillonnage :

Les échantillons concernant les pisés, les mortiers, les briques cuites et les carreaux de zellige ont été pris partir du mur et de l'ornementation du sol où la construction est mal conservée (**fig.9 et tab.2**). L'échantillonnage est fait avec soin pour ne pas aggraver la dégradation. Au total, 29 échantillons ont été prélevés ; 6 briques de céramique (BR), 2 mortiers (MOR), 6 échantillons de pisé (PIS), 12 échantillons de revêtement (REV). Par ailleurs, certains échantillons ont été prélevés sur les tombeaux Saadiens, pour pouvoir comparer avec ceux du Palais Badiaa (S1, S2, S3, K1 et K2).



REV 1 **Figure 9 : Carte de situation des échantillons prélevés**

N° d'échantillon	Désignation	Analyses effectuées			
		DRX	Calcimétrie	Matière organique	Granulo.
BR1	Brique de canal d'évacuation en céramique	X	X		
BR2	Brique de restauration	X			
BR3	Brique en céramique de soubassement	X			
BR4	Brique intercalée au pisé	X			
BR5	Brique intercalée au pisé du mur	X			
BR6	Brique intercalée au pisé du mur	X	X		
MOR1	Mortier de restauration de l'époque française	X	X	X	X
MOR2	Mortier du mur de soubassement	X	X	X	X
PIS1	Pisé de la partie protégé avec barrière	X	X	X	X
PIS2	Pisé de l'extension à coté de la prison	X	X	X	X
PIS3	Pisé du mur	X	X	X	X
PIS4	Pisé du mur	X	X	X	X
PIS5	Pisé du mur	X	X	X	X
PIS6	Pisé du mur de la prison	X	X	X	X
PIS7	Pisé du mur originel	X	X	X	X
REV1	Revêtement d'enduit de restauration en décollement	X	X	X	X
REV2	Revêtement d'enduit mural de restauration altéré	X	X	X	X
REV3	Revêtement d'enduit mural de restauration altéré (capillarité)	X	X	X	X
REV4	Revêtement d'enduit mural de restauration non altéré	X	X	X	X
REV5	Revêtement d'enduit mural de restauration non altéré	X	X	X	X
REV6	Revêtement en carreaux de céramique	X	X		
REV7	Revêtement en carreaux de céramique de la koutoubia	X	X		
REV8	Revêtement en carreaux de céramique du Badia	X	X		
REV9	Revêtement en chaux de restauration	X	X	X	X
REV10	Revêtement en sable de restauration	X		X	
S1	Brique originel des tombeaux Saâdiens	X	X	X	X
S2	Revêtement en carreaux de céramique des tombeaux Saâdiens	X	X	X	X
S3	Pisé originel des tombeaux Saâdiens	X	X	X	X
K1	Mortier de mur bas en maçonnerie de la Koutoubia	X	X	X	X
K2	Pisé du mur originel de la Koutoubia (façade gauche)	X	X	X	X

Tableau 2 : Liste des échantillons et des différentes analyses effectuées

2. Analyse Calcimétrique :

2-1. Principe :

Afin de mettre en évidence la variation des cortèges argileux en fonction de la teneur des différents échantillons en CaCO_3 , nous avons fait appel à cette technique basée sur le principe donné par Vatan (1967), selon lequel, tout matériau contenant du carbonate de calcium (CaCO_3) fait effervescence au contact d'un acide (ex : HCl), celle-ci correspond au dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) sous forme de gaz, selon la réaction chimique suivante :



Le volume de CO_2 dégagé est déterminé, ce qui permet de calculer le % de CaCO_3 contenu dans le matériau, selon la formule suivante : $\% \text{CaCO}_3 = \Delta V / (M \cdot k)$

Avec : ΔV = différence de volume d'eau dans le tube avant et après réaction (ml).

K = coefficient dépendant de la pression et de la température pendant la manipulation

M = masse de l'échantillon (en g).

2-2. Appareillage :

L'appareil utilisé est le calcimètre de Bernard (**fig.10**).

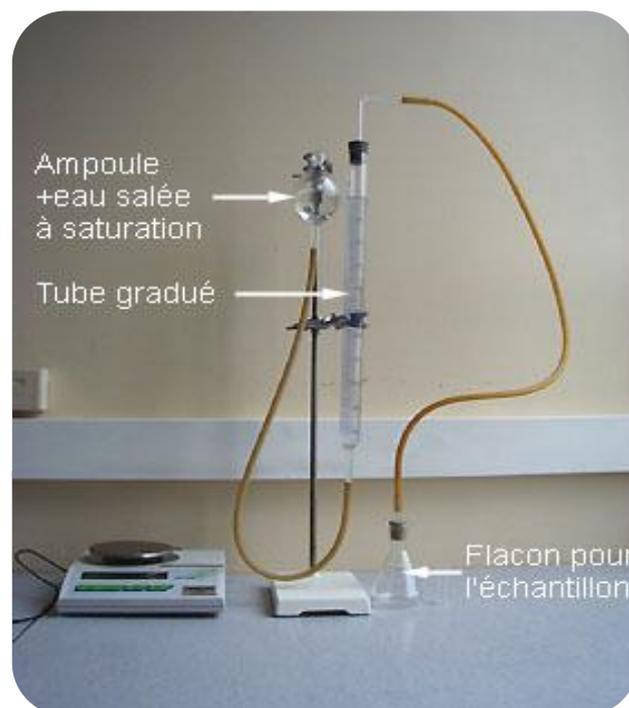


Figure 10 : Calcimètre de Bernard

2-3. Protocole expérimental :

La détermination de la teneur en CaCO_3 de tous les échantillons bruts est réalisée à l'aide du calcimètre de Bernard. Une masse de 0,250g de l'échantillon finement broyé, est attaquée par l'acide chlorhydrique (HCl 10%).

Le volume initial (V_i) correspond à celui à l'équilibre des deux volumes d'eau respectifs dans le tube en verre et l'ampoule mobile avant l'attaque acide. Le volume final (V_f) correspond à celui à l'équilibre des deux volumes d'eau après l'attaque acide.

Le volume de CO_2 dégagé correspond à la différence :

$$\Delta V = V_f - V_i$$

La manipulation s'est déroulée dans les conditions suivantes :

$$T = 25^\circ\text{C}, P = 1\text{Atm et } k = 0,432.$$

3. Analyse de la matière organique :

Cette technique est utilisée pour faire la détermination de la matière organique par incinération (perte au feu ou perte par calcination).

La perte au feu permet de mesurer directement la matière organique dans un matériau. On place les échantillons pendant 4 heures dans un four à moufle à 550°C . La perte de poids, après calcination, nous donne la matière organique.

Il faut éviter les températures plus élevées, car les carbonates présents dans le sol se fractionnent, augmentent la teneur en matière organique. Le pré-séchage des échantillons à 105°C réduit la variabilité du test en éliminant l'eau emprisonnée dans les feuillets de sol.

4. Diffraction des Rayons X :

4-1. Principe et appareillage :

4-1-1. Principe :

La diffraction des rayons X (DRX), est l'une des techniques les plus utiles et les plus répandues pour l'identification des minéraux argileux. Tout corps cristallisé peut être analysé par DRX ; un faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg: $n\lambda = 2d\sin\theta$

Dans cette équation, λ est la longueur d'onde de la source, d est l'espacement entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin, θ est l'angle entre le faisceau incident et le réseau de plans et n est l'ordre de la diffraction.

En somme, pour une source émettrice de rayons X, le balayage selon un angle d'incidence (θ) d'une préparation représentative d'un échantillon (**E**), permet d'accéder à tous les espacements réticulaires (**d**) de l'échantillon. La figure ci-dessous illustre la loi de Bragg et les conditions nécessaires à sa validité. Les points **S** (Source) et **F** (détecteur) appartiennent au cercle goniométrique. Ils doivent être strictement alignés avec le point **E** (échantillon) pour $\theta = 0$, et appartenir au cercle de focalisation, pour θ non nul.

La réflexion basale des minéraux argileux correspond à l'équidistance d , somme des épaisseurs du feuillet et de l'inter feuillet. Les réflexions harmoniques correspondent aux divisions successives par un nombre entier, de la valeur de l'équidistance basale.

4-1- 2. Appareillage :

L'appareil ayant servi à cette analyse est un diffractomètre Philips PW 1730 à radiation Cu-K α et à filtre en Ni. La **figure 11**, illustre le principe de son fonctionnement.

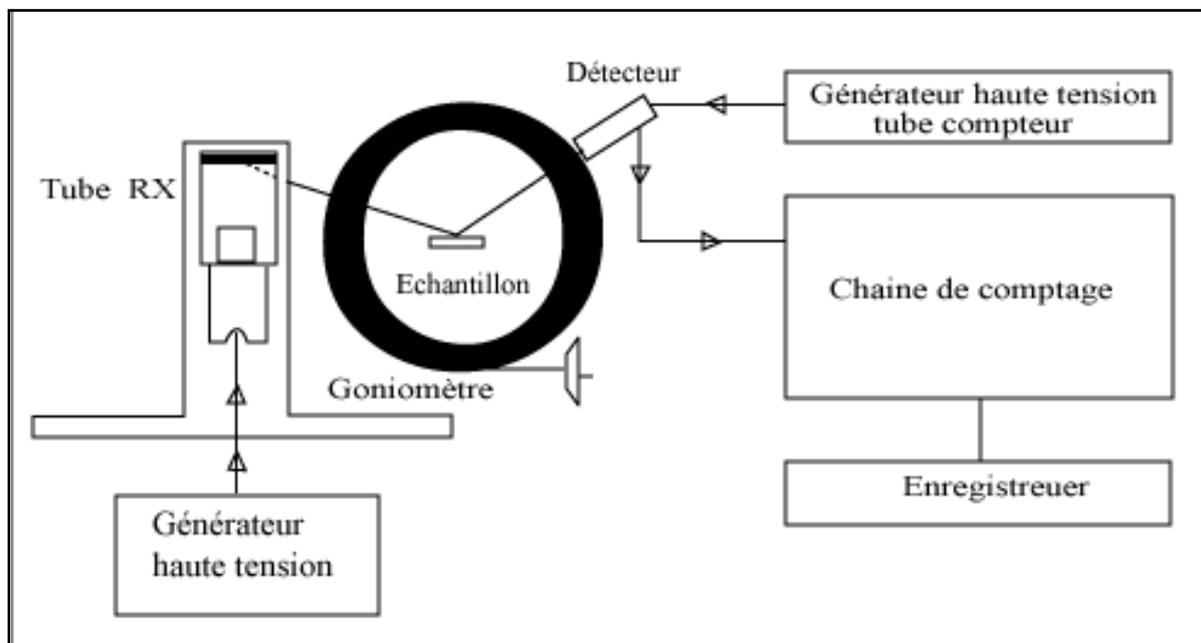


Figure 11 : Illustration du principe de la diffraction des rayons X.

4-2. Préparation des échantillons :

4-2-1. Extraction de la fraction argileuse :

La préparation des échantillons a été effectuée au laboratoire de sédimentologie à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech et a été faite selon la procédure adoptée par (Holtzapffel, 1985).

Cette technique consiste à extraire à partir des échantillons bruts (fractions totales), la fraction dont les particules ont un diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$ (fraction argileuse).

Six opérations successives sont nécessaires pour l'extraction de la fraction argileuse :

✚ Le broyage :

Il est utilisé pour les seules roches indurées. Cette opération ne doit pas aboutir à une poudre trop fine afin de ne pas atteindre les minéraux argileux ($<2\mu\text{m}$), dont les propriétés d'hydratation varient avec la taille des particules (Johns et Roberson, 1960 ; Stoll et al, 1964). Le broyeur utilisé est de type mortier en porcelaine.

✚ Le délitage :

Effectué dans un Erlenmeyer contenant une quantité suffisante de l'échantillon brut (fraction totale) broyé, à laquelle on ajoute de l'eau distillée (ou permutée). Ensuite une succession d'opérations : agitation manuelle-décantation permet d'éliminer le matériel grossier.

✚ La décarbonatation et le lavage :

Ces deux opérations sont rassemblées dans un même paragraphe car le lavage doit être effectué aussitôt que possible après décarbonatation.

L'acide chlorhydrique dilué (HCl N/5) est ajouté progressivement à la suspension d'argiles qui reste constamment sous agitation, afin d'éviter les surconcentrations locales.

Le pH est contrôlé tout au long de l'attaque acide, à l'aide du papier pH universel. Lorsque ce dernier vire au rose indiquant que les carbonates sont dissous, l'attaque est arrêtée et la suspension est aussitôt diluée dans de l'eau permutée qu'on laisse ensuite décanter dans l'Erlenmeyer. Le but du lavage est d'éliminer l'acide excédentaire et de permettre la défloculation des argiles. Pour cela, on effectue plusieurs cycles agitation-décantation-

élimination du surnageant et remise en suspension dans de l'eau distillée. La suspension est considérée comme défloculée lorsqu'un trouble persiste dans l'eau surnageante.

✚ La micro-homogénéisation et la sédimentation :

Juste avant la sédimentation, on agite fortement la suspension durant 1mn, afin de parfaire la défloculation. La sédimentation est basée sur la loi de Stokes :

$$t = 190x/d^2$$

Où : **t** : temps de sédimentation (mn)

d : diamètre des particules (μm)

x : profondeur de descente des particules de diamètre d (cm).

La fraction argileuse ($<2\mu\text{m}$) est extraite, par prélèvement à l'aide d'une pipette, du centimètre supérieur de la suspension après une décantation de 50 min. La suspension argileuse prélevée est conservée dans des piluliers.

4-2-2. Réalisation des pâtes et agrégats orientés :

La fraction argileuse est déposée sur une lame de verre lisse que l'on sèche, une fois extraite, sous la hotte aspirante. L'orientation des particules d'argiles se fait naturellement, par sédimentation des phyllithes, qui se déposent à plat sur la lame de verre (Holtzapffel, 1985).

Afin de distinguer certaines espèces argileuses, dont les espaces interfoliaires sont voisins dans les conditions naturelles, les agrégats orientés sont soumis à des traitements qui modifient leurs espaces interfoliaires de manière spécifique.

Deux traitements sont appliqués :

✚ la saturation par l'éthylène glycol,

✚ le chauffage à 490°C pendant deux heures.

Ces traitements sont effectués à l'Université de Liège, Belgique.

4-3. Traitement des données :

4-3-1. Analyse qualitative :

De nombreux ouvrages donnent les valeurs des réflexions caractéristiques des minéraux argileux (Dear et al., 1963 ; JCPDS, 1979 ; Caillère et al., 1982). D'autres

envisagent leur détermination en se basant sur la position des réflexions et leur variations après traitements (Lucas et al., 1959).

Généralement, l'analyse des diffractogrammes de préparations orientées, se fait en quatre étapes principales :

- ✚ Observation simultanée de la forme, du nombre et de la position des réflexions sur les trois diffractogrammes. Elle permet d'avoir une vision globale de l'échantillon.
- ✚ Recherche des réflexions basales qui caractérisent les différentes espèces argileuses (intensité 100, dans la plupart des cas, sur l'essai naturel).
- ✚ Recherche des réflexions harmoniques correspondant aux réflexions basales précédemment identifiées.
- ✚ Détermination du comportement d'une réflexion sur les essais glycolé et chauffé.

Pour l'interprétation des diffractogrammes des préparations orientées, on considère successivement les minéraux argileux simples, les interstratifiés (réguliers et irréguliers), puis les minéraux non argileux associés.

a. Détermination des minéraux argileux simples

La méthode consiste à observer d'abord les pics situés entre les plus grandes distances réticulaires (grands angles) et 7 \AA ($12,5^\circ 2\theta$ Cuka), sur l'essai naturel, puis de noter leur variation sur les essais glycolé et chauffé. La détermination est obtenue par lecture des tableaux **a**, **b** et **c** (tab. 4), qui correspondent respectivement aux équidistances de : 12 \AA 15 \AA , 9 \AA à $10,5 \text{ \AA}$ et 7 \AA à $7,5 \text{ \AA}$. Si aucune identification sûre ne peut être obtenue, le minéral n'est probablement pas un minéral argileux simple.

Tableau a		Position des réflexions dans les conditions naturelles				
		15Å	14,4Å	14 à 14,2 Å	12,5 Å	12 Å
Variations après traitements	Pas de variation	Chlorite d (001)				
	Variation gl.	17 Å				
		Chlorite gonflante d (001)				
	Variation ch.	10Å	Pic plus intense		10 Å	disparition
		Vermiculite d (001)	Chlorite ferrifère d (001)	Vermiculite à 12Å d (001)	Sépiolite d (110)	
	Variation gl.	17 à 18 Å	gonflement possible		17 Å	
	Variation ch.	9,5 à 10Å	10 Å		10 Å	
Smectite d (001)		Vermiculite s.l d (001)		Smectite à 12 Å d (001)		

Tableau b		Position des réflexions dans les conditions naturelles					
		10,4°	10,1Å	à	9,8 Å	9,3Å	9,2Å
Variations après traitements	Pas de variation	Illite Glauconite Celadonite d (001)			Talc d (001)	Pyrophyllite d (001)	
	Variation ch.	disparition	disparition	resserement du pic			
		Palygorskite d (110)	Halloysite d (001)	Illite ouverte 1v d (001)			
	Variation gl.	Ouverture du pic					
	Variation ch.	resserement du pic					
Illite ouverte 1s d (001)							

Tableau c		Position des réflexions dans les conditions naturelles			
		7,5 Å	7,2 à 7,3 Å	7,15 Å	7,07 Å
Variations après traitements	Pas de variation	chlorite d (002)			
	Variation gl.	8,5 Å			
		Chlorite gonflante d (002)			
	Variation ch.	disparition		disparition	
		Metahalloysite d (001)		Kaolinite Serpentines	
	Variation gl.	8,8 Å			
Variation ch.	5 Å				
	Smectite d (002)				

Tableau 4 : Méthode pratique de détermination des minéraux argileux simples (tableaux: a, b et c).

b. Détermination des interstratifiés réguliers :

Cette méthode consiste à identifier les pics dont la position, sur au moins un des essais, est intermédiaire entre celle de minéraux argileux simples (**tab.5**) (Holtzapfel, 1985). La position de la réflexion principale et ses variations après traitements permettent d'identifier la nature des feuillets qui composent le minéral (**fig.8**).

		Position des réflexions dans les conditions naturelles					
		12 Å			14 Å		
Variations après traitements	Pas de variation	10-14c					
	Variation gl.	10,5 Å			15,5 Å		
		10-14g			14c-14g		
	Variation ch.	10 Å			12 Å		
		10-14v			14-14v		
	Variation gl.	14 Å	13,5 Å	13,5 Å	15,5 Å	15,5 Å	15 Å
	Variation ch.	10 Å	10 Å	11,5 Å	12 Å	10 Å	11,5 Å
		10-14s	10-14v-14s	10-14c-14s	14c-14s	14v-14g	14c-14v-14s

Tableau 5: Tableau de détermination des minéraux argileux interstratifiés réguliers usuels.

c. Détermination des interstratifiés irréguliers

Les interstratifiés irréguliers sont déterminés à partir de la position et de la forme de leurs réflexions basales sur les trois essais. En effet, la position des réflexions est obligatoirement intermédiaire entre celles des feuillets élémentaires qui les composent. La figure III-2, illustre les positions des réflexions basales, des interstratifiés les plus courants et leur comportement après les traitements de routine (essais : glycolé et chauffé). En ce qui concerne la forme, elle est fonction de l'abondance relative des feuillets élémentaires qui composent ces édifices interstratifiés.

DENOMINATION DESCRIPTIVE	LUCAS (1962)	ESSAI NATUREL			ESSAI GLYCOLÉ			ESSAI CHAUFFÉ		
		7	10	14	7	10	14	7	10	14
I.1. KAOLINITE-SMECTITE	(7-14a)	7 Å 14 Å			= 0 Å			10 Å		
I.1. ILLITE-VERMICULITE	(10-14v)	$\frac{10+14}{2}$			$\frac{10+14}{2}$			$\frac{10+10}{2}$		
I.1. ILLITE-SMECTITE	(10-14a)	32 Å			32 Å			10 Å		
I.1. CHLORITE-VERMICULITE	(14c-14v)	$\frac{14+14}{2}$			$\frac{14+14}{2}$			$\frac{14+10}{2}$		
I.1. CHLORITE-SMECTITE	(14c-14a)	$\frac{14+14}{2}$			$\frac{14+17}{2}$			$\frac{14+10}{2}$		
I.1. CHLORITE-CHLORITE GONFLANTE	(14c-14g)	$\frac{14+14}{2}$			$\frac{14+17}{2}$			$\frac{14+14}{2}$		
I.1. VERMICULITE-SMECTITE	(14v-14a)	$\frac{14+14}{2}$			$\frac{14+17}{2}$			$\frac{10+10}{2}$		

Figure 8 : Positions des réflexions basales de différents édifices interstratifiés irréguliers sur les essais naturel, glycolé et chauffé.

4-3-2. Analyse semi – quantitative :

La méthode adoptée est basée sur la mesure de la hauteur et de la surface des pics principaux de l'essai glycolé ; elle consiste à exprimer en pourcentage les quantités relatives des différentes espèces argileuses contenues dans le mélange analysé. On effectue la somme des hauteurs des pics principaux (réflexions basales) mesurés sur le spectre de l'essai glycolé et on ramène cette somme à 100%, on arrondit ensuite à la classe de 5% la plus proche pour assurer une meilleure précision à la méthode (Holtzapffel, 1985).

5. Analyse de la Granulométrie :

5-1. Granulométrie par tamisage :

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules présentes au sein d'échantillons secs (poudres, farines, sables...) ou liquides (sirops, émulsions, suspensions...).

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis (**fig.9**), emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.



Figure 9 : Série de tamis

5-2. Granulométrie Laser :

5-2-1. Principe :

La technique de granulométrie à diffraction laser utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule.

Les particules passent à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multi-éléments (**fig.10**). L'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés (théorie de Mie ou théorie de Fraunhofer). Le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent).

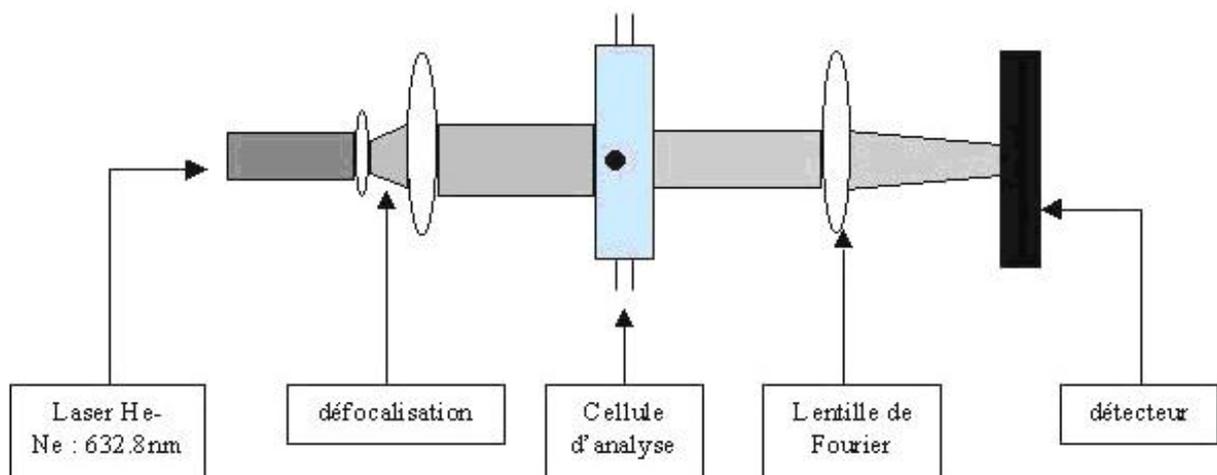


Figure 10 : Principe de la granulométrie laser

5-2-2. Appareillage :

L'appareil utilisé est le granulomètre laser HORIBA 300 Malvern Instruments (**fig.11**), du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Technique de Marrakech.

Le **tableau 6** représente les modules et gammes de mesures associées :

Mesure	Utilisation	Module	Gamme de mesure
voie sèche	poudres	SCIROCCO 2000	200 nm – 2 mm
voie liquide	particules en suspension	HYDRO 2000SM	20 nm – 2 mm

Tableau 6 : Mode opératoire du Granulomètre Laser

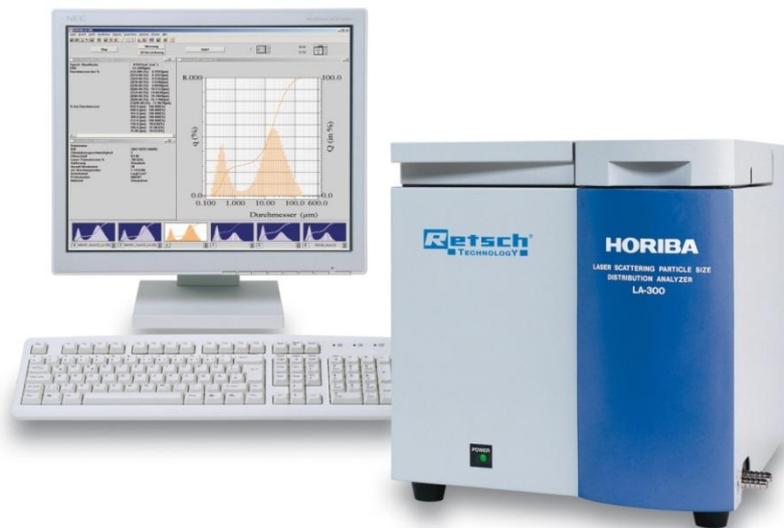


Figure 11 : Appareil de la granulométrie laser

CHAPITRE IV :

RESULTATS DE LA

CARACTERISATION

1. Observation in situ :

1-1. Le pisé :

Au niveau du Palais Badià, le pisé des murs est composé d'un mélange de tout venant et de chaux. Le tout venant représente l'agrégat, il est composé de terre provenant des lits d'Oued, celle-ci comporte des argiles, du sable, des graviers et des galets (**tab.7**). La chaux représente le liant.

Rôle	Mini	Appellation	Maxi
Liant		Argiles	2 μ m
	2 μ m	Chaux	20 μ m
Agrégat	20 μ m	Sables fins	0,2 mm
	0,2 mm	Sables grossiers	2 mm
	2 mm	Graviers	20 mm
	20 mm	Cailloux	200 mm
	200 mm	Galets	– mm

Tableau 7 : Classification des matériaux contenus dans le pisé

De première vue, les galets dans le pisé apparaissent plus nombreux dans la partie basse du mur par rapport à la hauteur (**fig.12**). Cette illusion visuelle est le résultat de l'effritement de l'enduit au niveau de la base du mur, dévoilant la surface intérieure. En hauteur, le mur est moins dégradé et les enduits sont plus conservés.

L'épaisseur du mur est toujours proportionnelle à la hauteur des banchées. Les murs intérieurs sont d'une épaisseur d'environ 0,80 m de même que la hauteur des banchées. Pour

les murs extérieurs, destinés à protéger le territoire du Palais, l'épaisseur est beaucoup plus importante, entre 1,90 et 2,00 m.

On remarque aussi souvent la présence de trous traversant l'épaisseur du mur. Ces trous étaient en fait remplis par des barres en bois pour servir à la fixation de l'échafaudage et des banches pendant la construction. Au long du toit de ces trous, on remarque la présence de briques chevauchantes qui servaient à faciliter la manœuvre de la banchée supérieure et éviter son tassement après séchage. De plus que leur utilité à la facilité de la manœuvre, ces trous au niveau du mur servent aussi à permettre l'aération du pisé et éviter les effets de l'humidité.

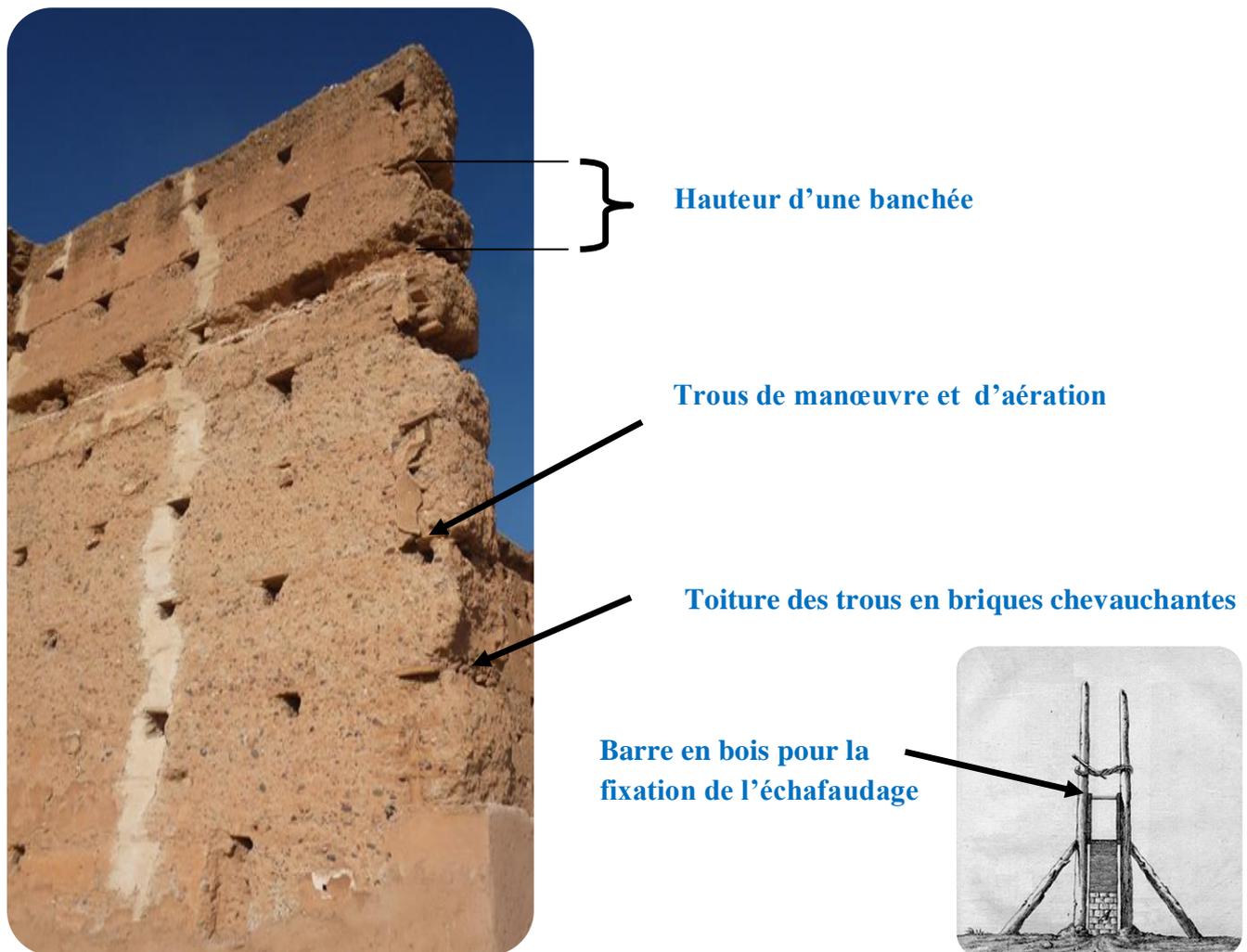


Figure 12 : Technique de construction des banchées du pisé

1-2. La Brique cuite :

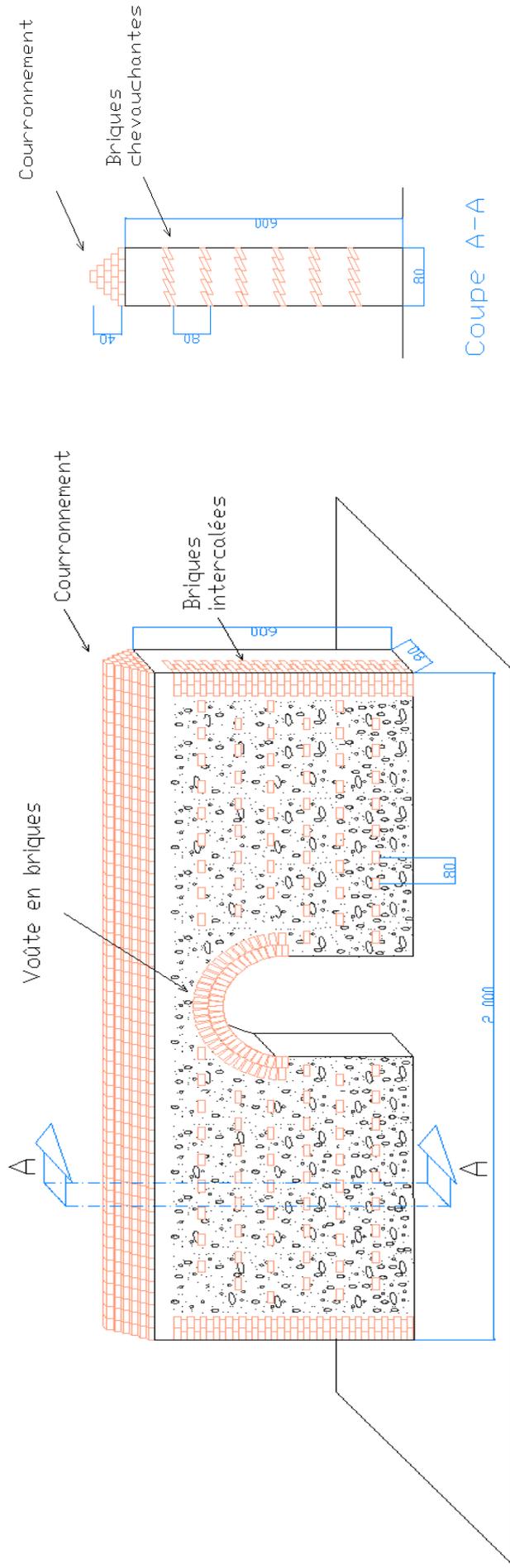
Au Palais Badià, la brique cuite a une dimension de 3.5 cm d'épaisseur, 10.5 cm de largeur et 17 cm de longueur, celle-ci joue plusieurs rôles dans la construction :

- ✚ Elle est utilisée dans le couronnement des murs, pour assurer le rôle d'un chaînage supérieur qui permet la stabilité de l'ossature. La pose des briques est faite de façon intercalée, la hauteur du couronnement est de 40cm ;
- ✚ Elle est utilisée aussi pour la réalisation des coins des murs pour maintenir la liaison perpendiculaire entre deux murs ;
- ✚ La brique est aussi utilisée dans les parements de mur pour la décoration.

1-3. Les carreaux de céramique:

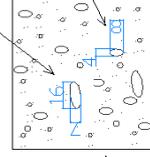
Auparavant, le Palais Badià était complètement orné de carreaux de céramiques, ceux-ci servaient de revêtement de sol aussi bien que de revêtement mural. Actuellement, les carreaux de sol ne sont conservés que dans quelque pavillons comme l'Héliotrope ou encore celui des Audiences. Pour les carreaux muraux, on ne peut observer que rarement quelques pièces encore défiant le temps.

Afin de résumer toutes ces observations, on a procédé à la réalisation d'une illustration (**fig.13**) représentant un exemple de mur du Palais Badià à l'aide du Logiciel AutoCad.



Mur du Palais Badiâ

Taille moyenne des
grands galets



Taille moyenne des
petits galets

Mélange de chaux et
de tout venant

Détail du mur

Figure 13 : Illustration représentative d'un exemple de mur du palais Badiâ

2. Analyse du pisé :

2-1. Analyse de la Calcimétrie :

2-1-1. Résultats :

N° d'échantillon	m	V1	V2	DV	% CaCO ₃
PIS1	0.638	41	75	34	23.02
PIS2	0.573	40	65	25	18.85
PIS3	0.643	41.5	75	33.5	22.51
PIS4	0.618	40.5	86.5	46	32.15
PIS5	0.415	41	75	34	35.39
PIS6	0.606	40.5	60	19.5	13.90
PIS7	0.819	40	86.5	46.5	24.53
K2	0.849	41	67	26	13.23
S3	0.695	41	81.5	40.5	25.17

Tableau 7 : Résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans le pisé

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (**fig.14**) :

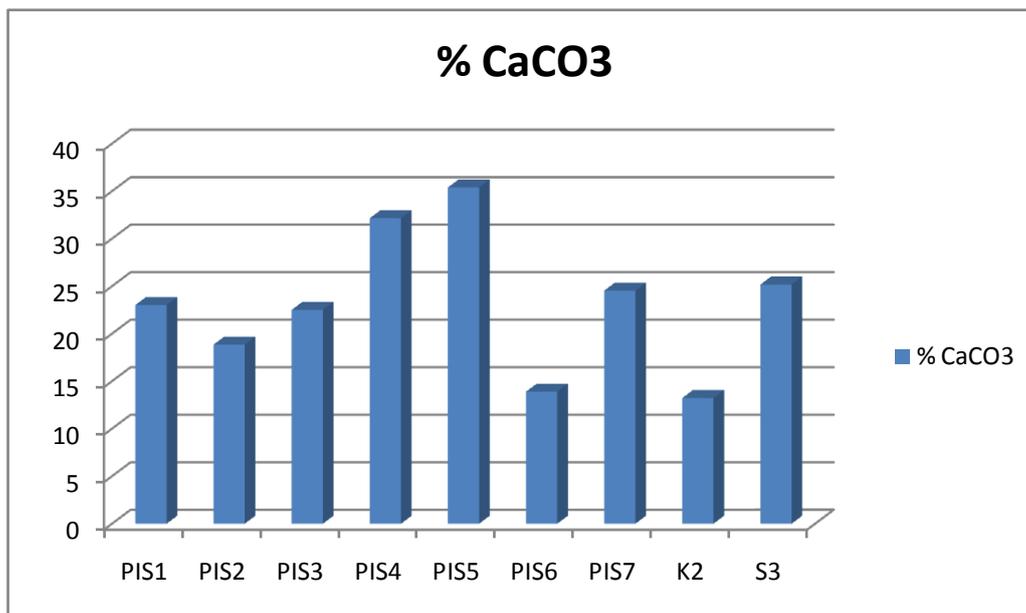


Figure 14 : Histogramme des pourcentages de CaCO₃ dans le pisé

2-1-2. Commentaire :

D'après les résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans les échantillons de pisé, on remarque que les échantillons les plus carbonatés sont PIS4 et PIS5 et les moins carbonatés sont PIS6 et K2 (échantillon de la koutoubia).

Les pourcentages élevés de carbonate dans les échantillons peut être expliquée, soit par le fait que le tout venant utilisé dans la confection du pisé est d'origine de roche calcaire, ou bien que la chaux contenue dans le mortier est mal cuite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas une calcination totale de la CaCO_3 .

2-2. Diffraction des rayons X :

Les résultats des analyses par diffraction des rayons X, effectuées sur la fraction totale sont représentés sous forme de diffractogrammes respectivement dans les **figures (15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23)**.

2-2-1. Présentation des diffractogrammes :

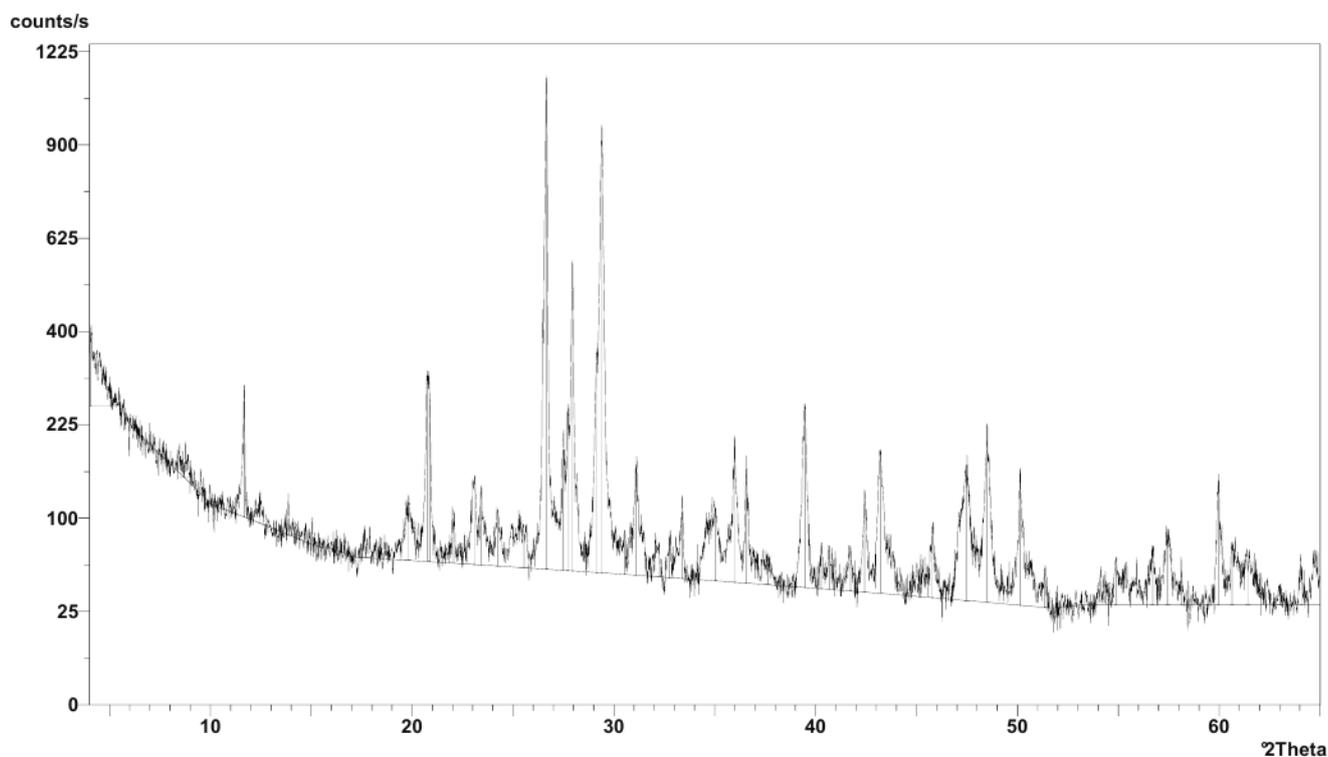


Figure 15 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 1

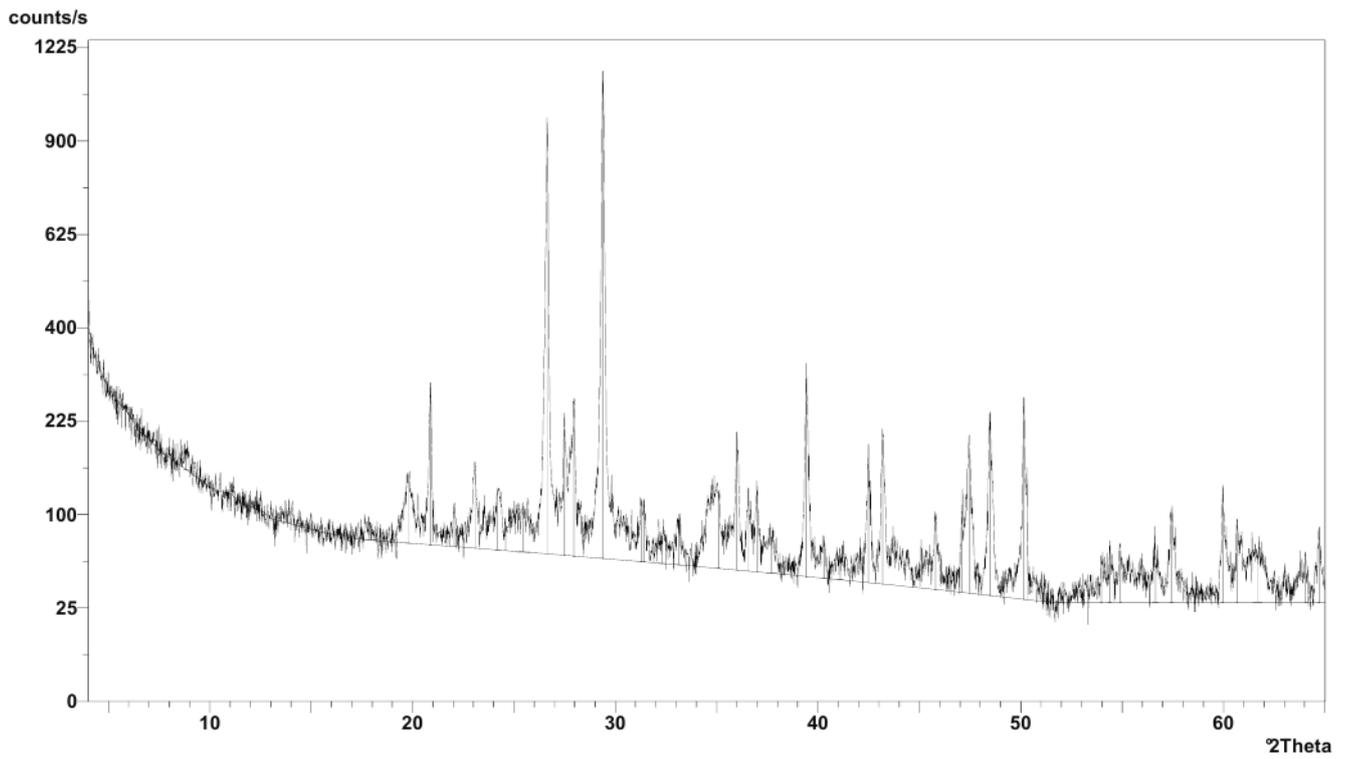


Figure 16 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 2

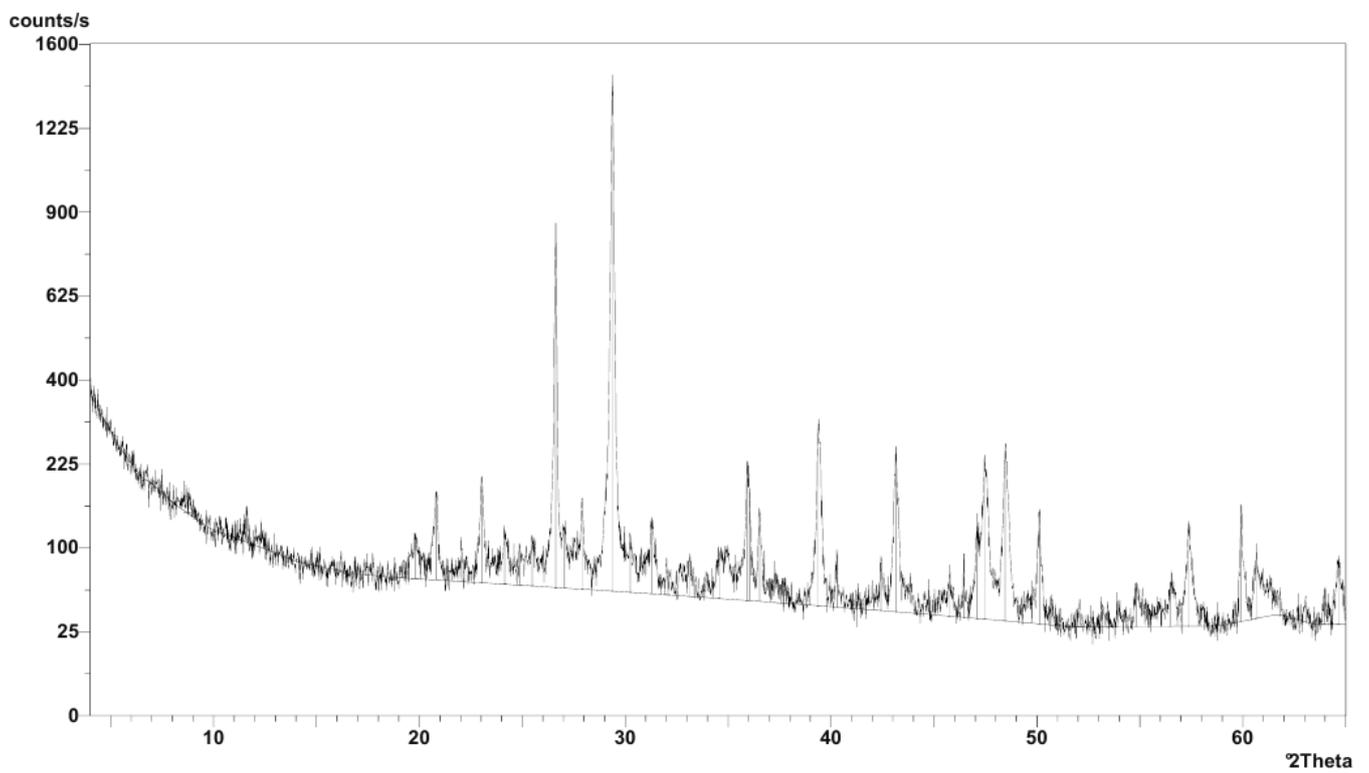


Figure 17 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 3

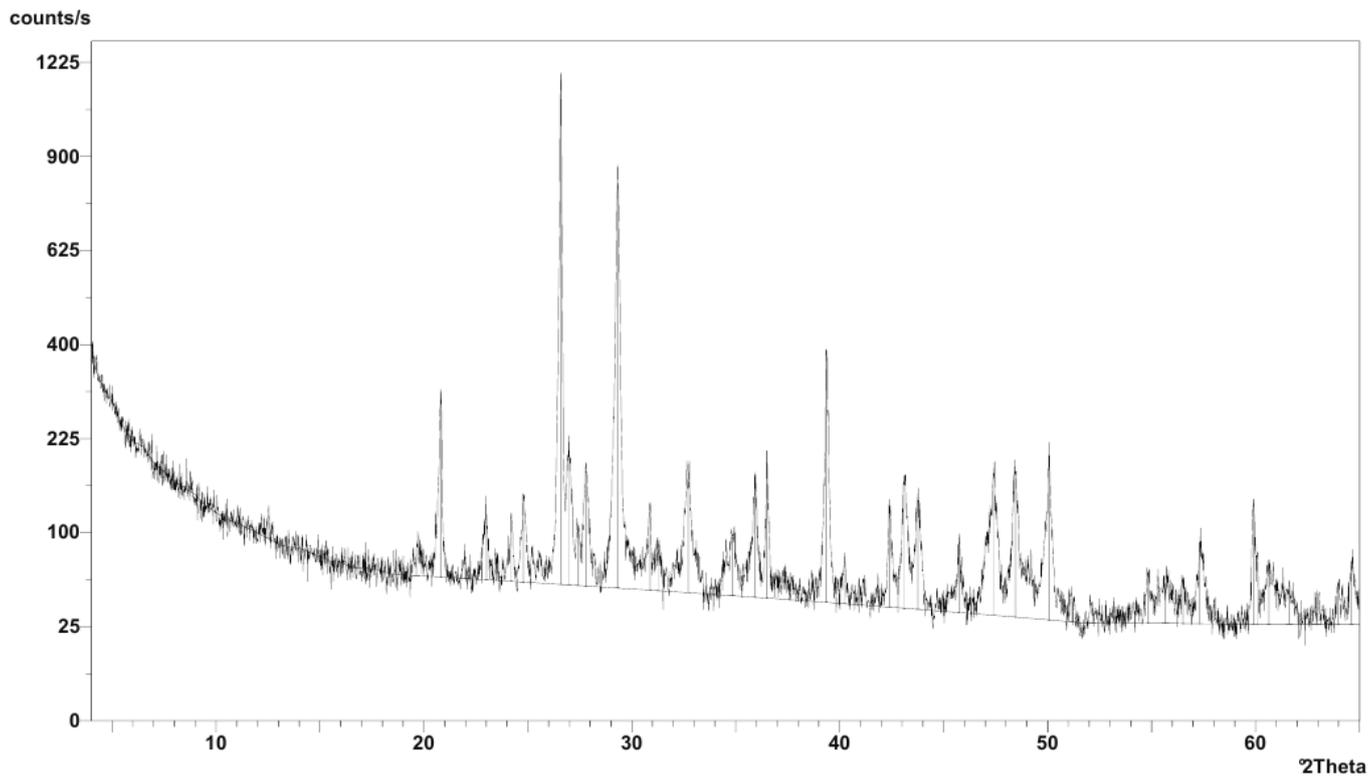


Figure 18 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 4

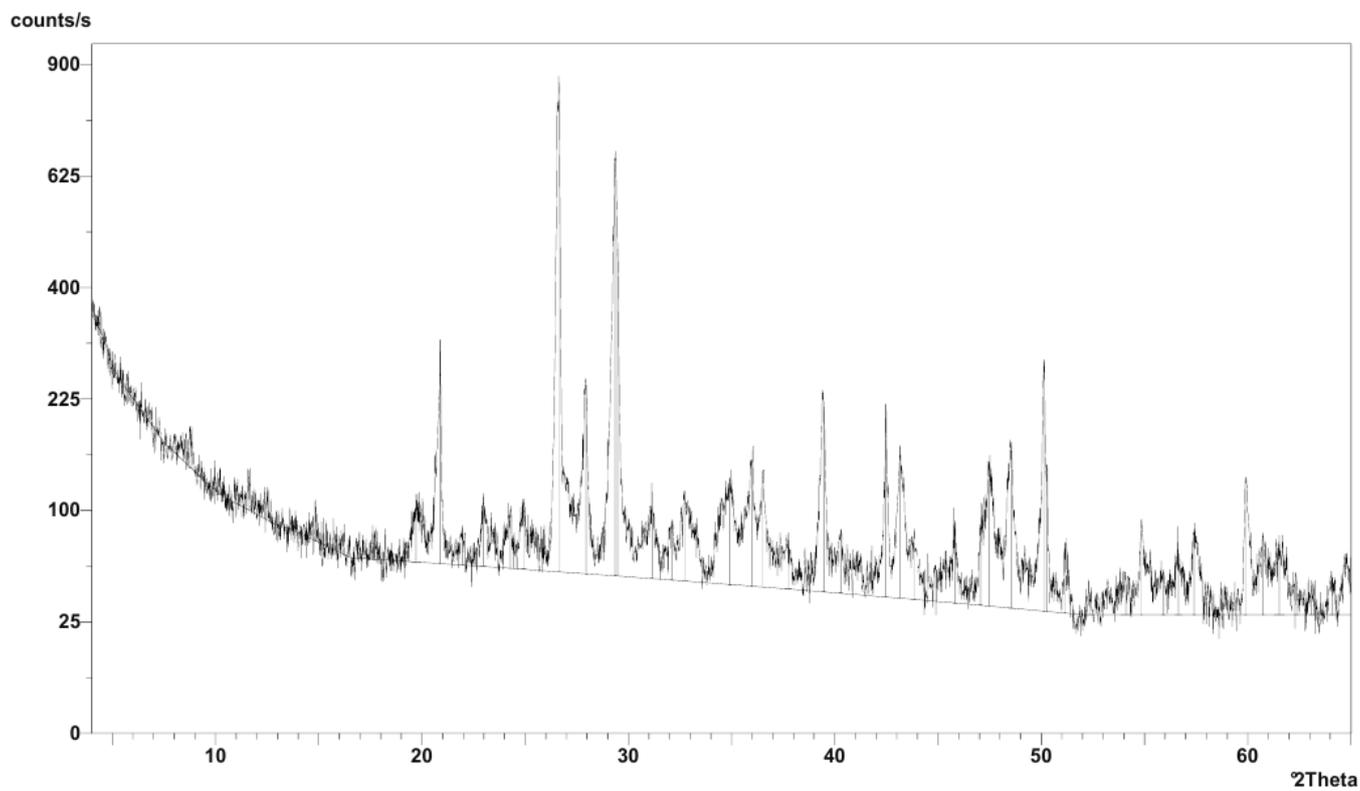


Figure 19 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 5

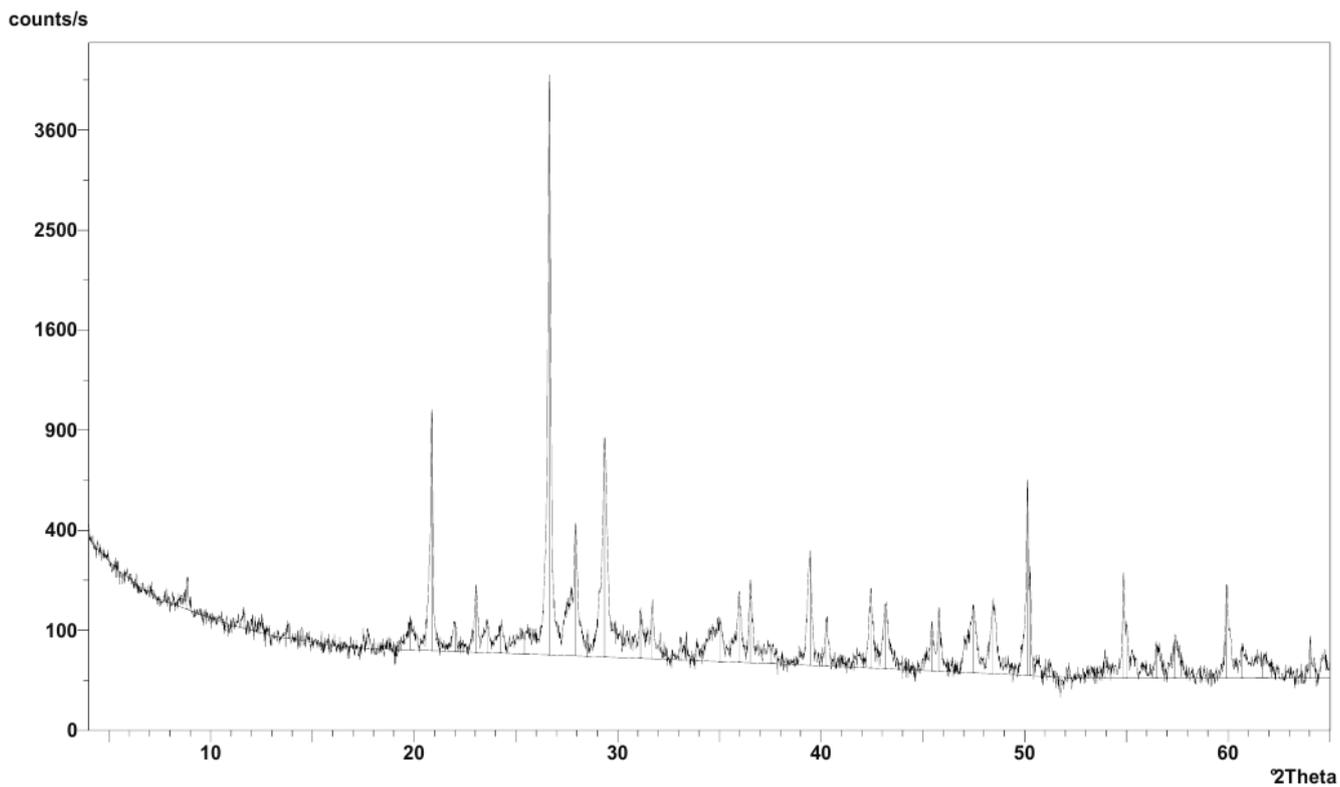


Figure 20 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 6

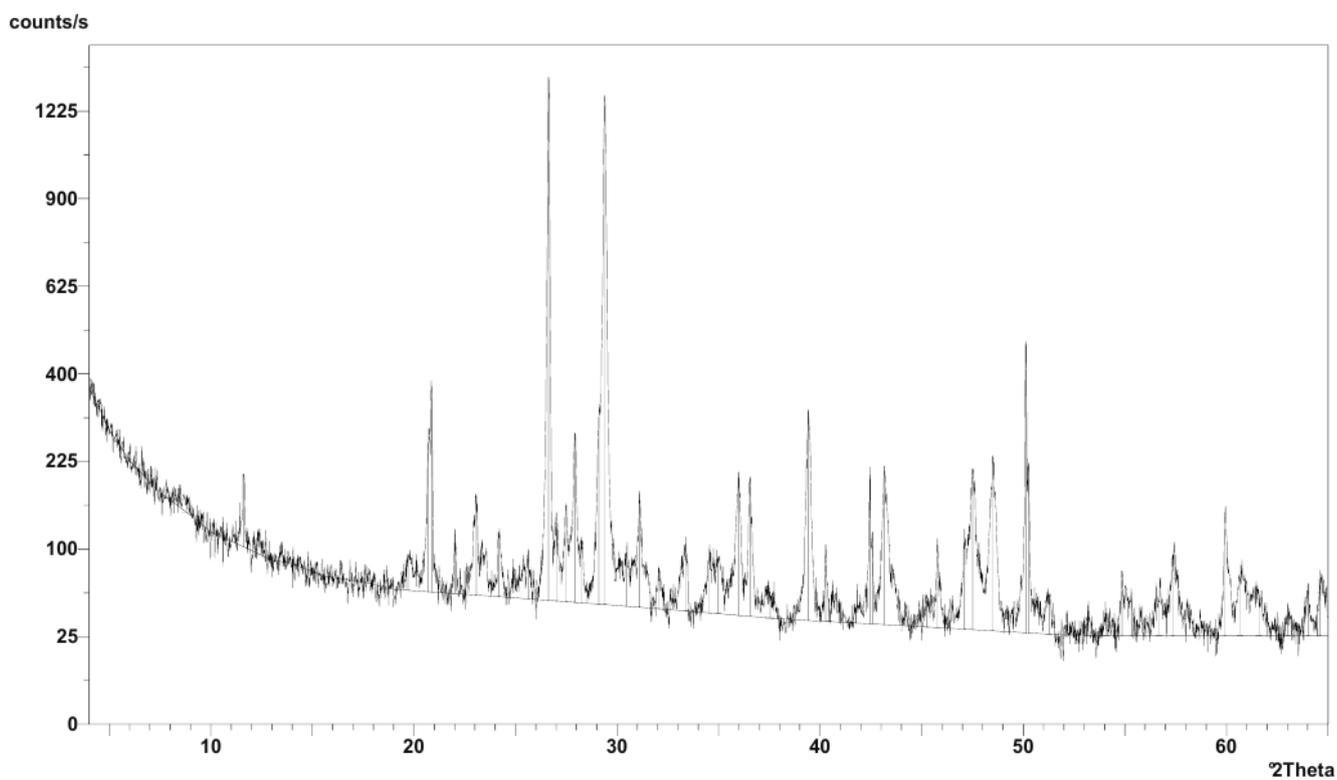


Figure 21 : Diffractogramme de l'échantillon PIS 7

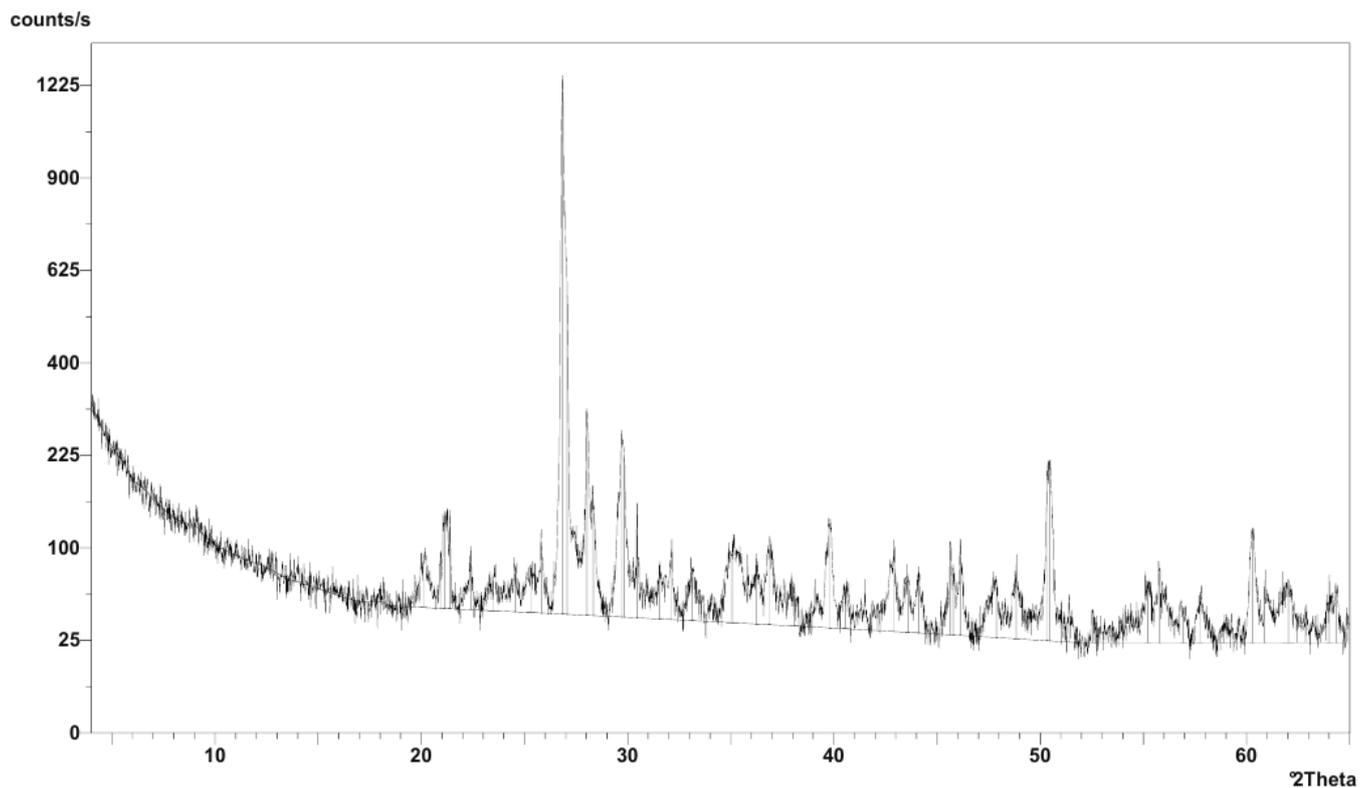


Figure 22 : Diffractogramme de l'échantillon K2

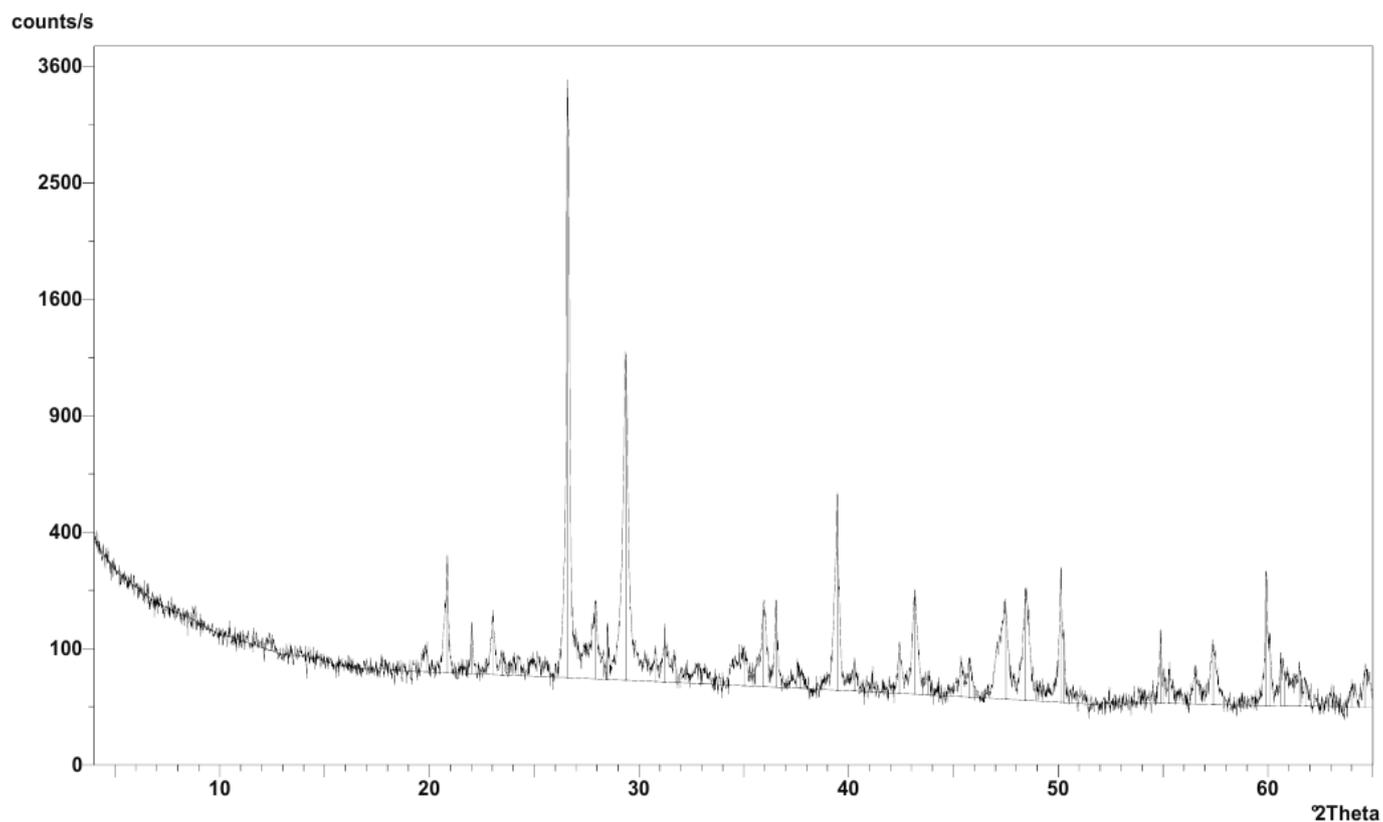


Figure 23 : Diffractogramme de l'échantillon S3

2-2-2. Commentaire :

A partir du dépouillement des spectres et l'identification des pics différenciés entre 10° et 50° en 2 θ , les différentes phases minérales présentes dans l'ensemble des échantillons de pisé sont les suivantes : Apatite, Anhydrite, Aragonite, Augite, Calcite, Dolomite, Géothite, Gypsum, Hematite, K-Feldspar, Mica, Philipsite, Plagioclase, Quartz, Rhodochrocite et Tridymite.

2-2-3. Tableau des pourcentages :

%Minéraux	N° d'échantillons								
	PIS1	PIS2	PIS3	PIS4	PIS5	PIS6	PIS7	K2	S3
Anhydrite	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Apatite	-	-	-	-	-	-	-	+++	-
Aragonite	-	+++	-	-	+++	+++	-	+++	-
Augite	-	-	-	-	-	-	-	-	+++
Calcite	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-	-
Dolomite	-	-	-	+	-	-	-	++	+++
Géothite	+++	++	-	-	+++	+++	+++	-	-
Gypsum	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Hematite	-	-	-	-	-	-	+	-	-
K-Feldspar	+++	+++	-	+++	-	-	-	-	-
Mica	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Philipsite	-	-	-	-	-	-	-	++	++
Plagioclase	+++	++	++	-	++	+++	++	+++	+++
Quartz	++	++	+++	+++	++	+++	++	-	-
Rhodochrocite		++	+++	++	+	-	-	-	-
Tridymite	++	-	-	-	-	-	+++	-	-
+ : Présence de phase - : Absence de phase									

Tableau 8 : Proportions relatives aux différents minéraux du pisé

D'après les résultats du tableau 8, on remarque que les phases minérales dominantes dans la composition du pisé sont la Calcite et le Quartz. On remarque aussi que la composition minérale du pisé des différents échantillons du Badià est généralement semblable. Par ailleurs, les phases minérales présentes dans le pisé de la Koutoubia et dans

celui des tombeaux Saâdiens connaissent certaines différences (Présence de l'apatite, la dolomite et la phillipsite). Cette observation permet de dire que l'origine des matériaux avec lesquelles est confectionné le pisé du Badià est différente de celle des matériaux avec lesquelles est confectionné le pisé Koutoubia et le pisé des Tombeaux Saâdiens.

2-3. Analyse Granulométrique :

2-3-1. Résultats :

Dans le but de séparer les phases sableuse, limoneuse et argileuse, qui composent les échantillons bruts (roches totales), nous avons d'abord procédé à un tamisage en voie humide, répondant à la norme AFNOR pour séparer la fraction sableuse (diamètre > 0.063mm) de la fraction limono-argileuse (diamètre < 0.063mm). Ensuite, par la technique de la Granulométrie Laser, nous avons pu séparer les fractions limoneuse et argileuse.

Le **tableau 9** regroupe les résultats obtenus par tamisage de la fraction sableuse des différents échantillons.

N° d'échantillons	% > 2 mm	2 mm à 80 µm %	80 à 20 µm %	20 à 2 µm %	% < 2 µm
	(grave)	(sable)	(limon)	(limon)	(argile)
PIS1	84	6	4	3	3
PIS2	75	7	8	3	7
PIS3	29	8	18	15	30
PIS4	52	14	15	9	10
PIS5	44	14	15	11	16
PIS6	90	3	3	2	2
PIS7	37	14	21	11	17
K2	23	10	34	14	19
S3	36	23	20	11	10

Tableau 9 : Classification granulométrique des échantillons de pisé

Les résultats de la composition des différents échantillons sont représentés dans la **figure 24**.

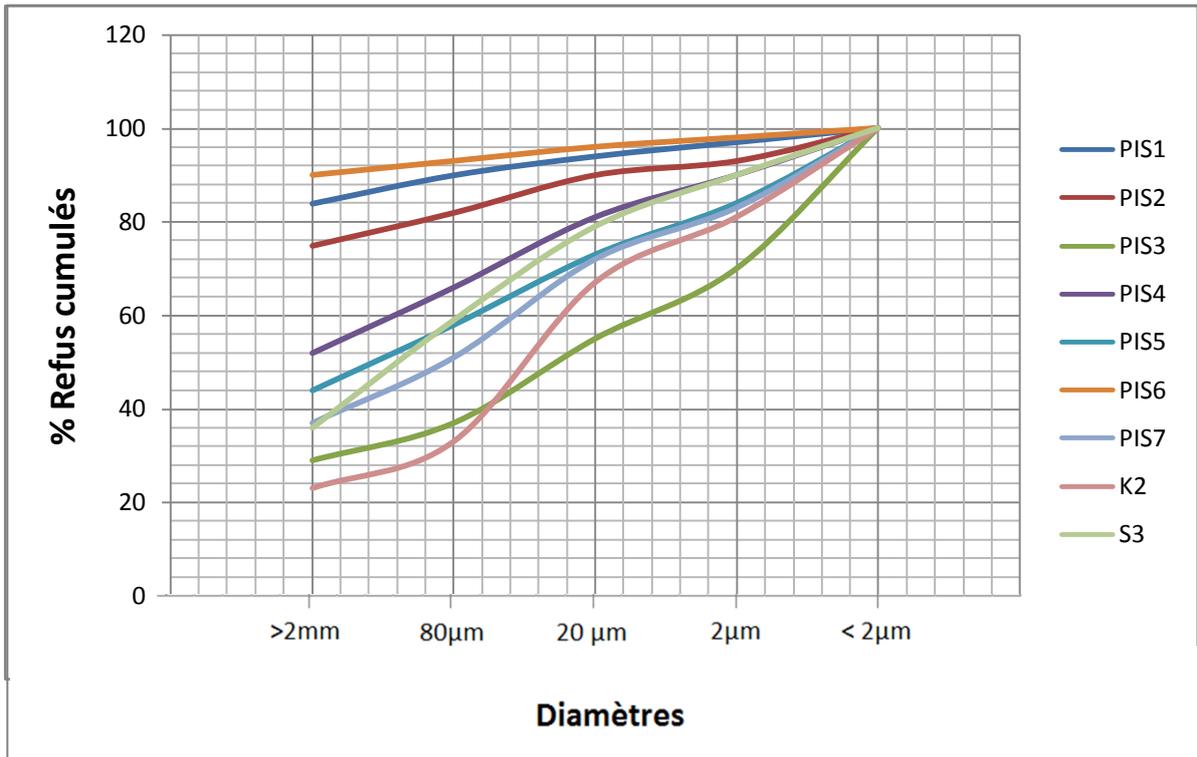


Figure 24 : Distribution granulométrique des échantillons de pisé

2-3-2. Commentaire:

D'après les résultats du tableau des classes granulométriques des différents échantillons de pisé, on constate que dans la majorité des échantillons, la fraction dominante est la fraction >2mm et la fraction sableuse. Par contre au niveau de l'échantillon PIS3 on remarque que le pourcentage de la fraction argileuse est beaucoup plus important comparé aux autres échantillons.

D'après les résultats de la distribution granulométrique de la figure 24, on constate qu'il y a une certaine ressemblance dans l'allure de la courbe des échantillons PIS1 PIS6 et PIS2. On remarque aussi cette ressemblance entre les échantillons S3, PIS7, PIS5 et PIS4. Les courbes échantillons PIS3 et K2 par contre, portent une allure très différente de celle des autres.

Il est ici important de mentionner que l'échantillonnage du pisé ne permet pas d'avoir des échantillons totalement représentatifs granulométriquement, ceci à cause de l'impossibilité de casser de grands fragments à analyser, pendant que les murs sont essentiellement composés de graves et de galets avec des diamètres très variables. De ce fait, il est possible de dire que cette différence observée entre la distribution granulométrique des différents échantillons, soit principalement dû à ce problème.

2-4. Analyse de la matière organique :

2-4-1. Résultats :

N° d'échantillon	Masse tare	Masse tare + éch. sec(105°C)	Masse tare + éch. sec(550°)	% M.O.
PIS1	22.183	27.512	27.114	7
PIS2	21.816	28.243	27.737	8
PIS3	22.074	32.676	31.633	10
PIS4	23.586	29.895	29.147	11
PIS5	21.842	28.204	27.554	10
PIS6	22.927	25.265	25.146	5
PIS7	24.539	28.522	28.238	7
K2	23.092	26.723	26.505	6
S3	23.284	31.246	30.584	8

Tableau 11 : Résultats des pourcentages de la matière organique dans le pisé

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.25) :

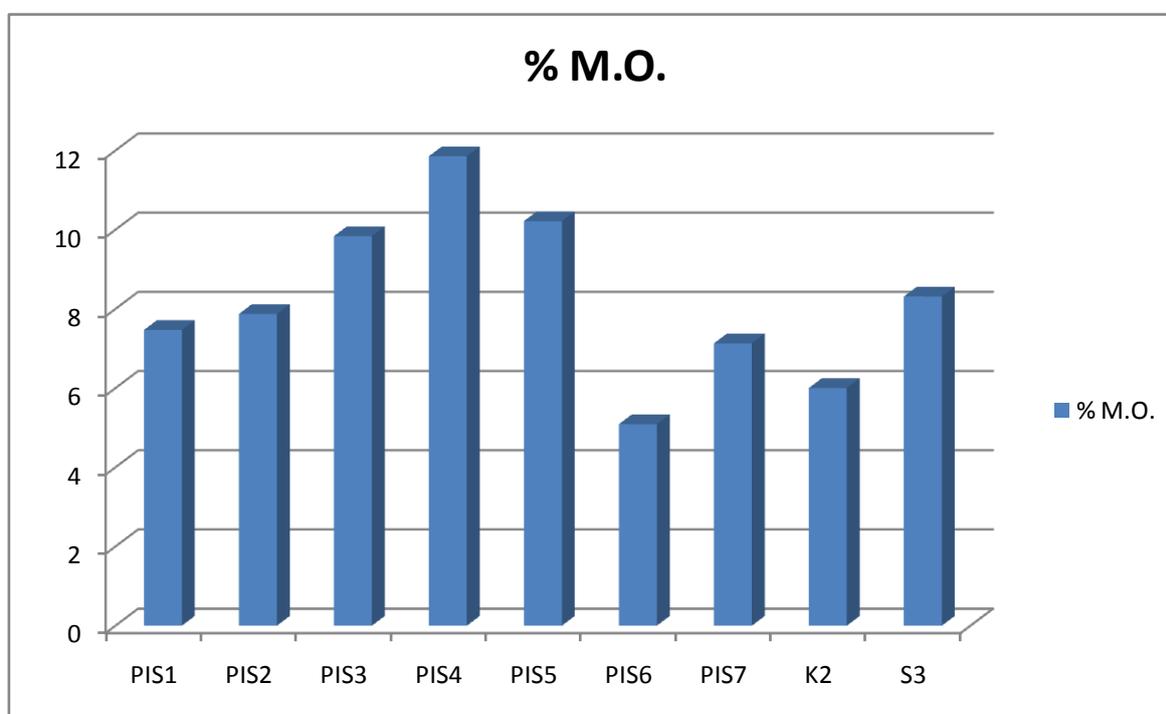


Figure 25 : Représentation graphique des pourcentages de la matière organique dans le pisé

2-4-2. Commentaire :

D'après le résultat de l'analyse du pourcentage de la matière organique, on remarque que les échantillons qui portent les plus grandes teneurs en matière organique sont PIS3, PIS4 et PIS5 (de 10% à 11%). Les teneurs les plus faibles sont observées dans les échantillons PIS6 et K2 (échantillon de pisé de la Koutoubia) avec des valeurs de 5% à 6%. Pour le reste des échantillons, le pourcentage de la matière organique a pour moyenne 7%.

3. Analyse de la brique en céramique :

3-1. Analyse de la Calcimétrie :

3-1-1. Résultats :

N° d'échantillon	m	V1	V2	DV	% CaCO ₃
BR1	0.763	41	46.5	5.5	3.11
BR1 Milieu mal cuit	0.448	40	52.5	12.5	12.05
BR2					Pas de réaction à l'HCL
BR3					Pas de réaction à l'HCL
BR4					Pas de réaction à l'HCL
BR5					Pas de réaction à l'HCL
BR6	0.938	39.5	41	1.5	0.69
S1	0.859	41.5	56	14.5	7.29

Tableau 12 : Résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans la brique en céramique

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.26) :

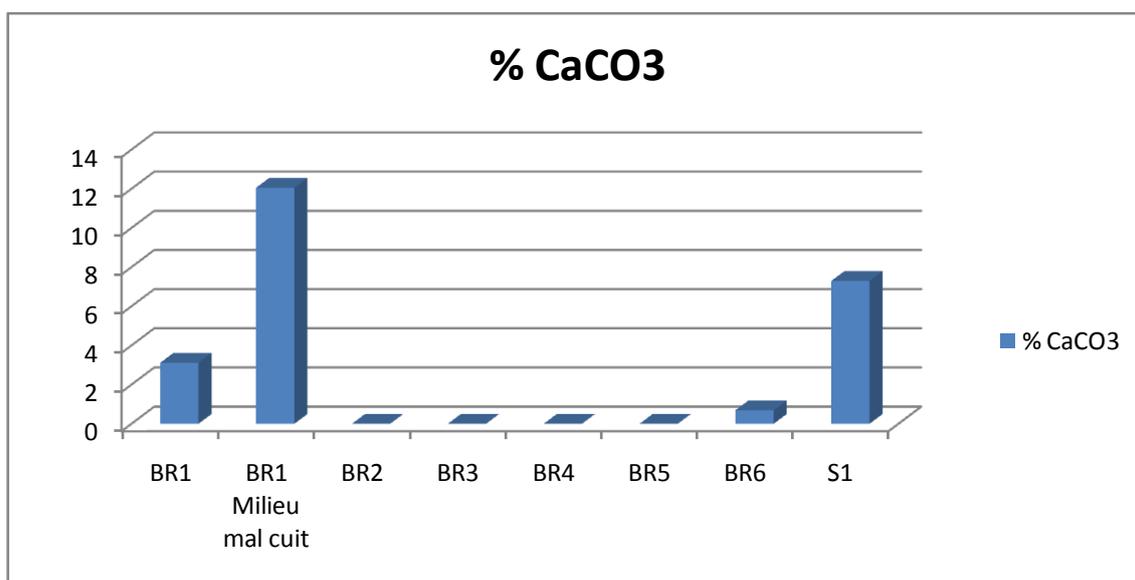


Figure 26 : Histogramme des pourcentages de CaCO₃ dans la brique en céramique

3-1-1. Commentaire :

3-1-2. Commentaire :

Les échantillons BR2, BR3, BR4 et BR5 n'ont pas de réaction à l'HCL, ces derniers n'ont pas eu besoin de subir l'analyse calcimétrique.

D'après les résultats de l'histogramme des pourcentages de la CaCO₃, on remarque que l'échantillon BR6 et S1 (échantillon de brique des tombeaux Saâdiens) comporte toujours de la calcite, malgré que la brique doit normalement être cuite à une température de 700°C, c'est-à-dire qu'il doit y avoir une calcination totale de la CaCO₃.

Pour l'échantillon BR1, on a pu remarquer que le milieu de la brique est mal cuit vue sa couleur très foncée par rapport aux extrémités, c'est pourquoi on a effectué l'analyse sur les extrémités de la brique à part et le milieu à part. Le résultat a pu confirmer cette supposition car le pourcentage de la CaCO₃ au milieu de la brique est très élevé (12.05%) par rapport à celui de l'extrémité (3.11%).

3-2. Diffraction des Rayons X :

Les résultats des analyses par diffraction des rayons X, effectuées sur la fraction totale et la fraction argileuse, sont représentés sous forme de diffractogrammes respectivement dans les **figures (27, 28, 29, 30, 31, 32 et 33)**.

3-2-1. Présentation des diffractogrammes :

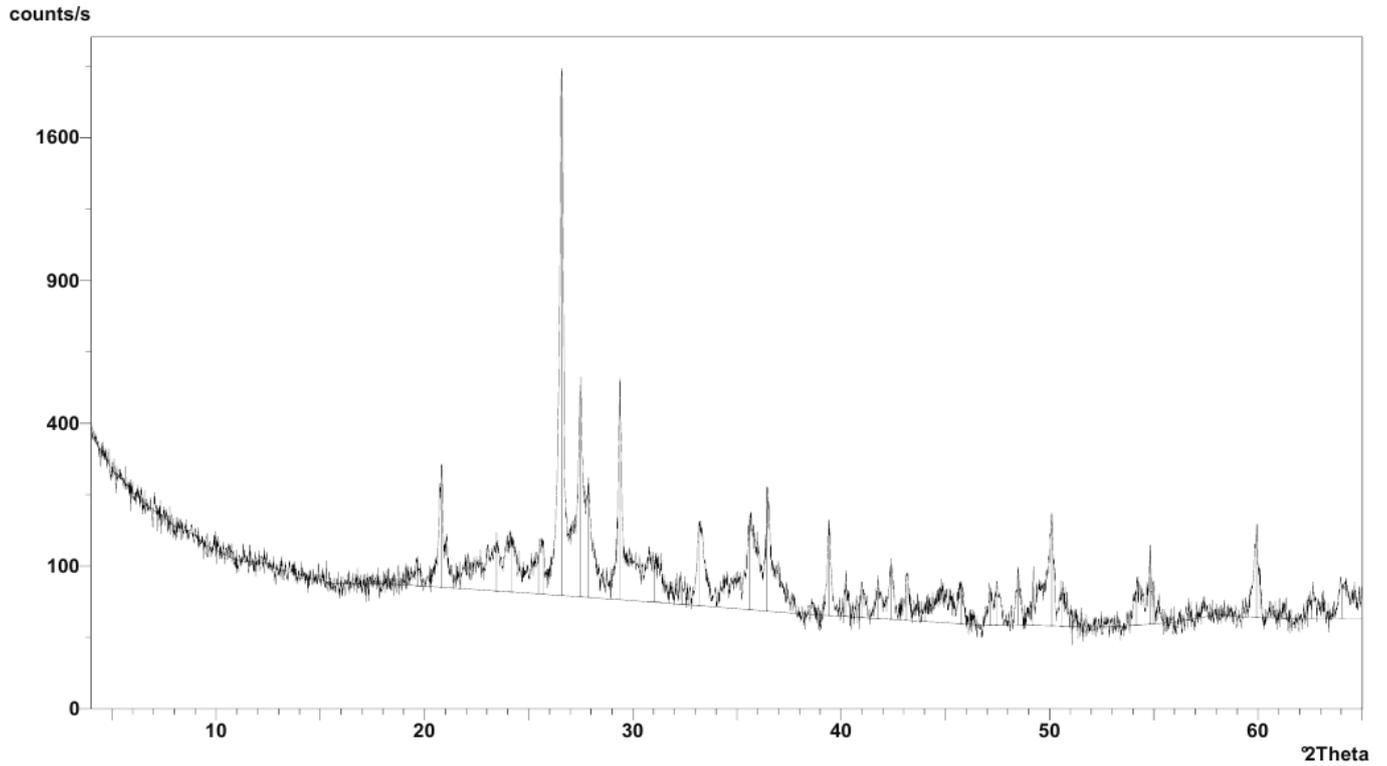


Figure 27 : Diffractogramme de l'échantillon BR2

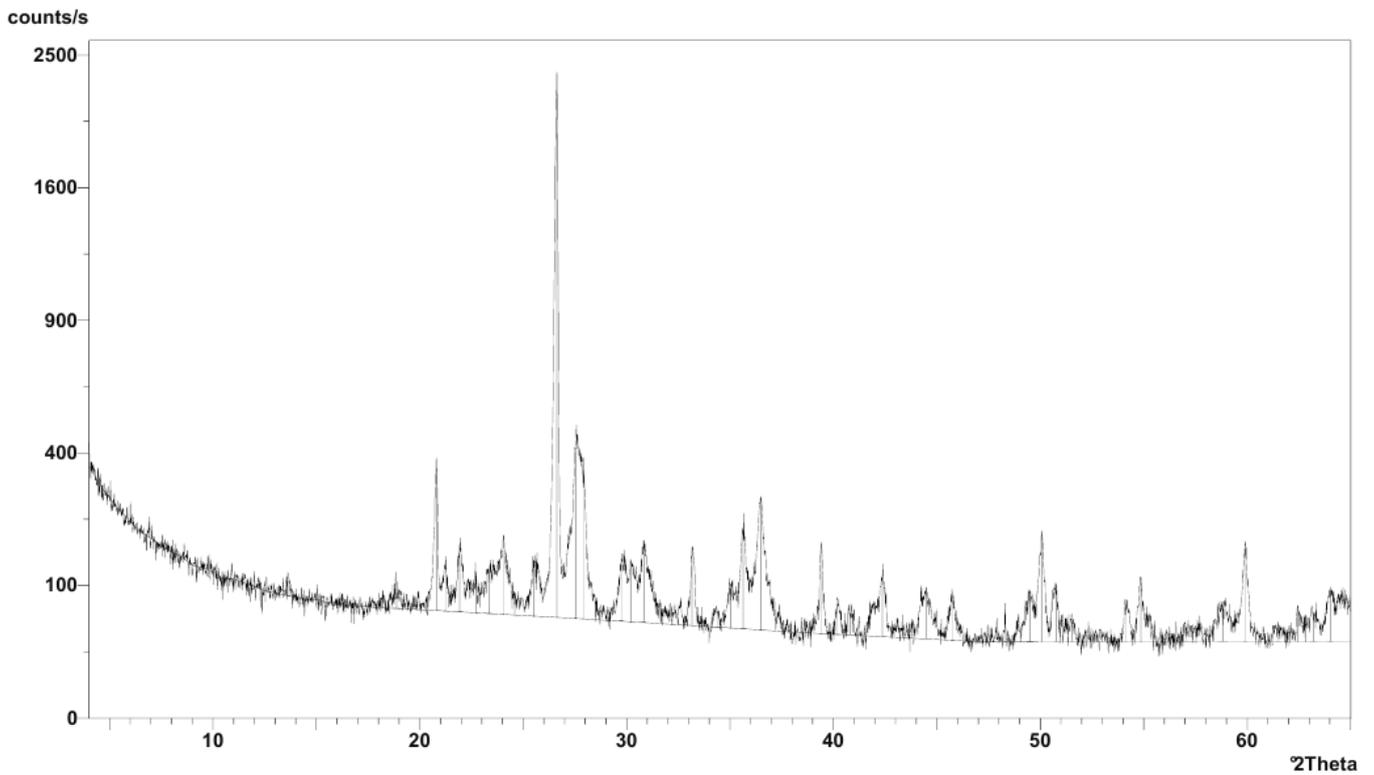


Figure 28 : Diffractogramme de l'échantillon BR2

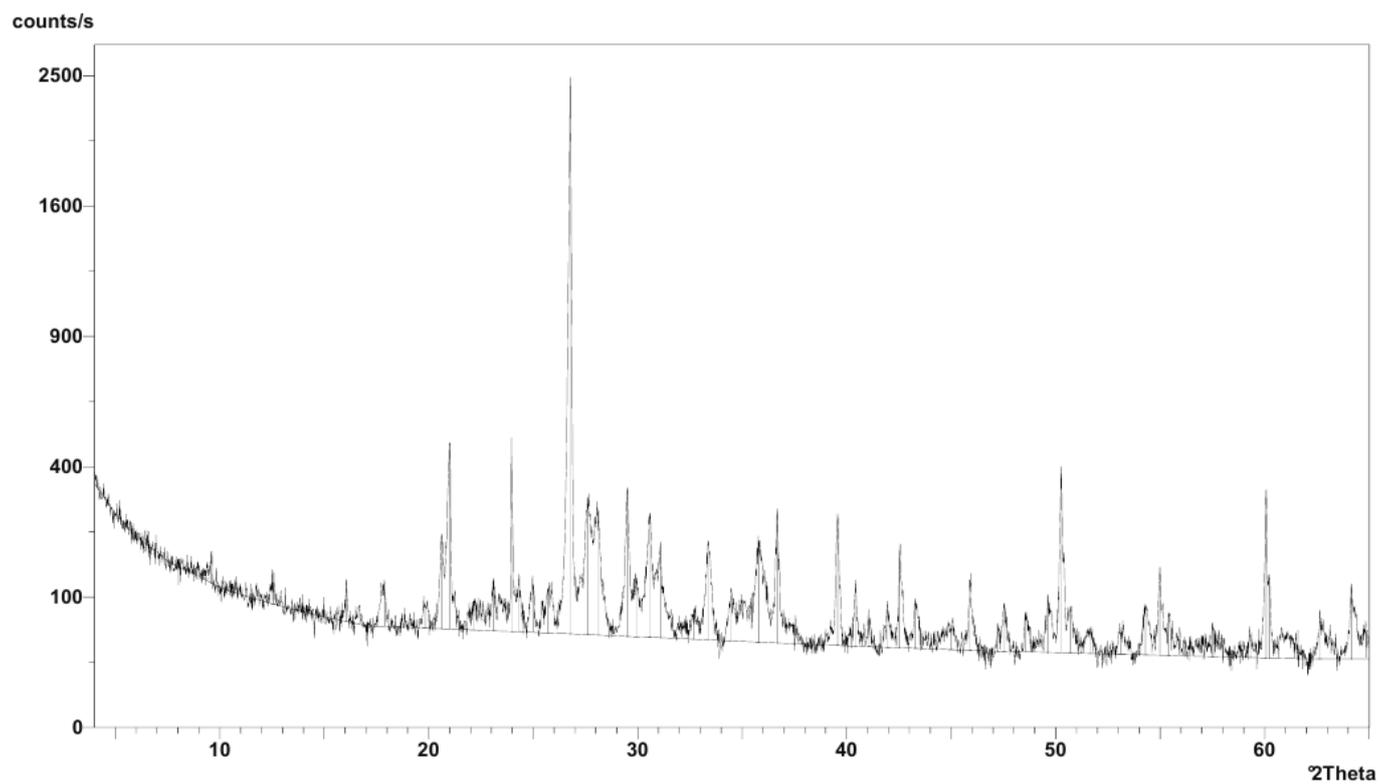


Figure 29 : Diffractogramme de l'échantillon BR3

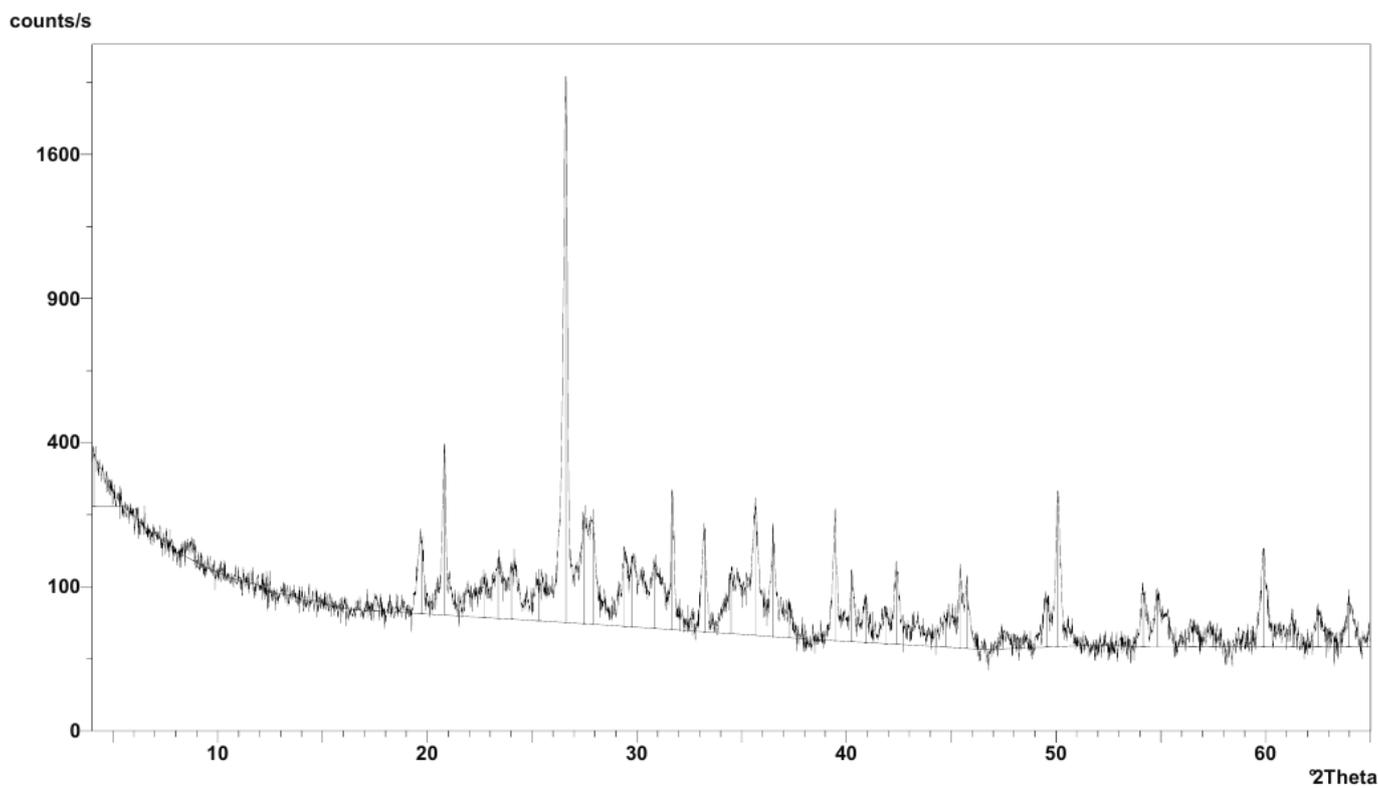


Figure 30 : Diffractogramme de l'échantillon BR4

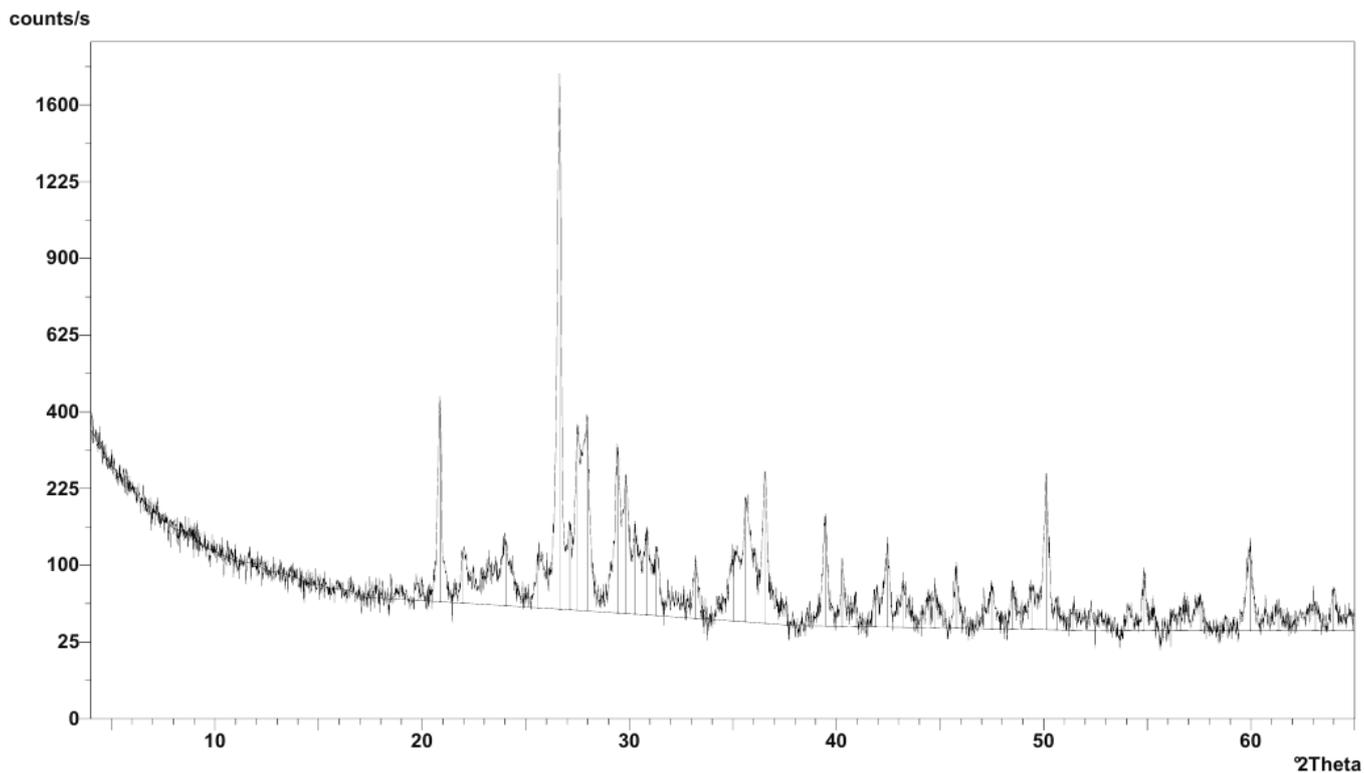


Figure 31 : Diffractogramme de l'échantillon BR5

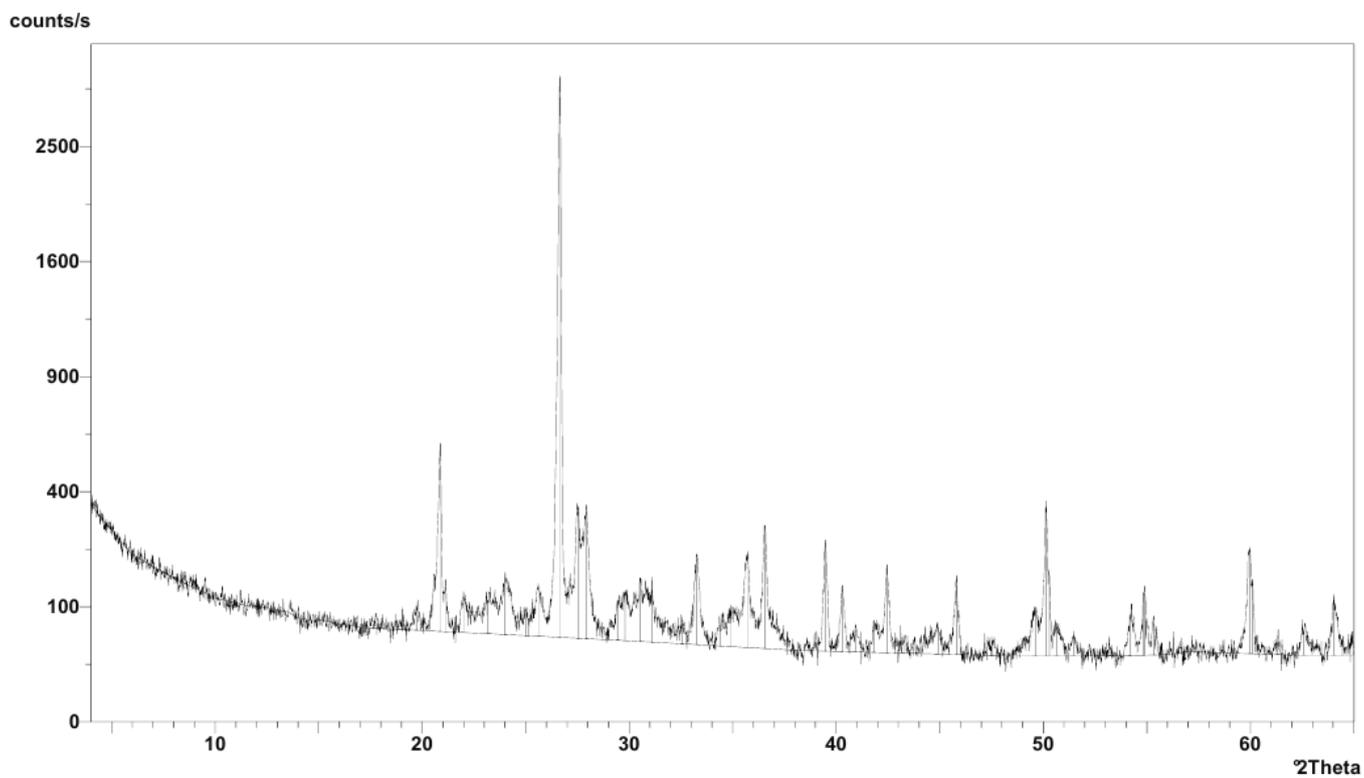


Figure 32 : Diffractogramme de l'échantillon BR6

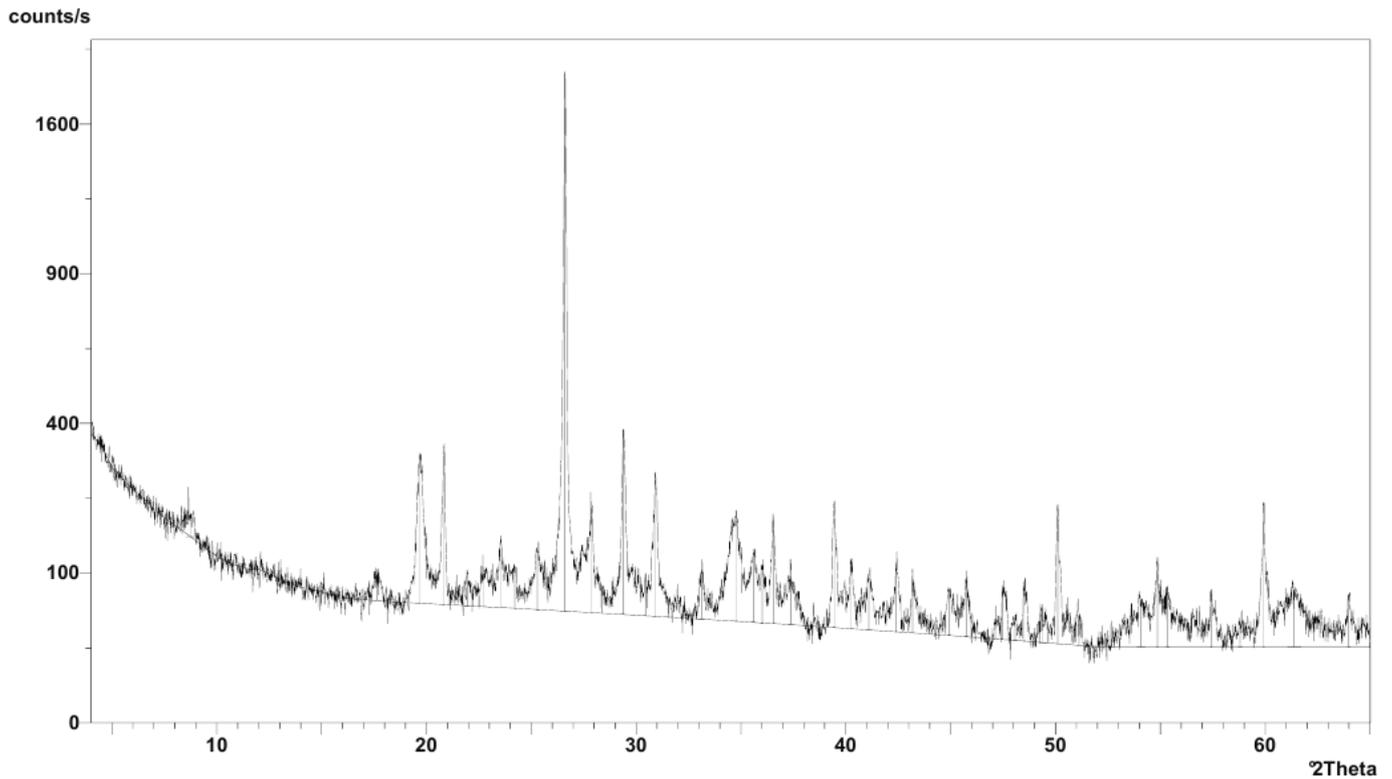


Figure 33 : Diffractogramme de l'échantillon S1

3-2-2. Commentaire :

A partir du dépouillement des spectres et l'identification des pics différenciés entre 10° et 50° en 2 θ , les différentes phases minérales présentes dans l'ensemble des échantillons de pisé sont les suivantes : Aragonite, Augite, Calcite, Dolomite, Géothite, Gistobalite, Hematite, K-Feldspar, Mica, Philipsite, Plagioclase, Quartz et Tridymite.

3-2-3. Tableau des pourcentages :

%Minéraux	N° d'échantillons						
	BR1	BR2	BR3	BR4	BR5	BR6	S1
Aragonite	-	-	-	-	++	+++	-
Augite	-	+	-	++	++	++	-
Calcite	++	-	+	-	+	-	++
Dolomite	-	-	-	-	-	-	+
Géothite	++++	++++	+++	+++++	++++	++++	+++
Gistobalite	-	+++	-	-	-	-	-
Hematite	+	+	-	++	-	+	-
K-Felspar	++++	+++	+++++	+++	+++	+++	-
Magnetite	+	+	-	-	-	-	+
Mica	-	-	-	-	-	-	+
Phillipsite	-	-	++	-	-	-	+++
Plagioclase	+	+	+	++	++	++	++
Quartz	+++	++	++	+++	++	++	+++
Tridymite	-	-	+	-	-	-	-

+ : Présence de phase - : Absence de phase

Tableau 13 : Proportions relatives aux différents minéraux des briques

D'après les résultats du **tableau 13**, on remarque que les phases minérales dominantes dans la composition des briques en céramique du Palais Badià sont la Géothite, le K-feldspar et le Quartz. On remarque aussi que les briques BR5 et BR6 contiennent particulièrement de l'aragonite et de l'augite. Il est aussi remarquable que la brique des tombeaux Saadiens est composée essentiellement de Géothite, Phillipsite et Quartz.

4. Analyse des carreaux de céramique :

4-1. Analyse de la Calcimétrie :

4-1-1. Résultats :

N° d'échantillon	m	V1	V2	DV	% CaCO ₃
REV6	0.617	41	65	24	16.80
REV7	0.869	41.5	45	3.5	1.74
REV8	0.918	40.5	60	19.5	9.18
S2	0.368	41	49	8	9.39

Tableau 15 : Résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans les carreaux de céramique

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.34) :

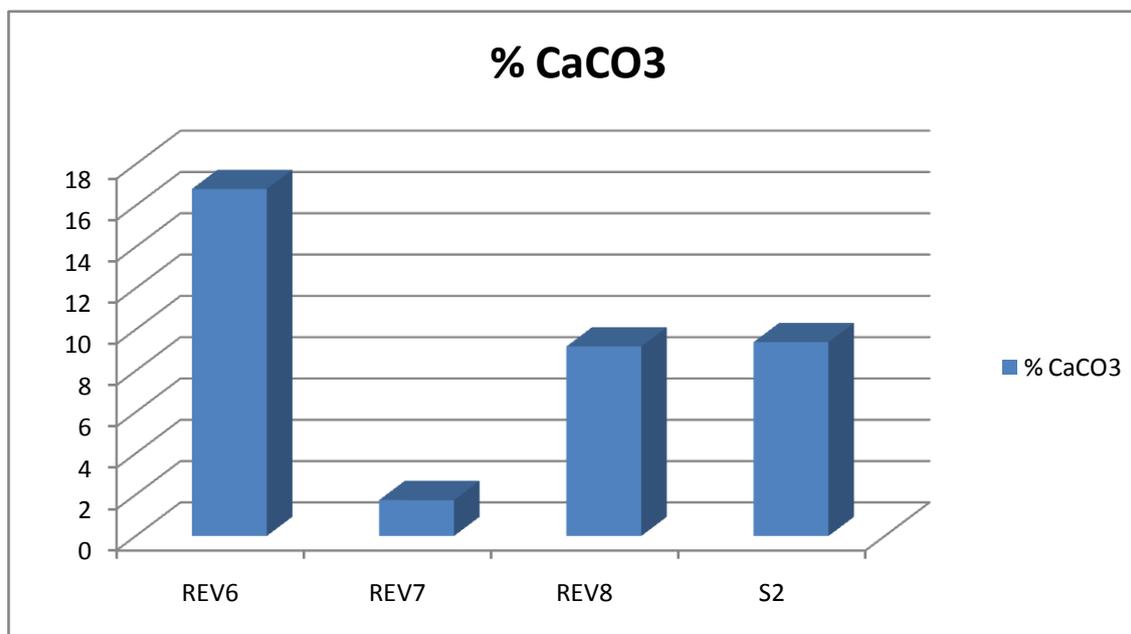


Figure 34 : Histogramme des pourcentages de la CaCO₃ dans les carreaux de céramique

4-1-2. Commentaire :

D'après les résultats de l'histogramme des pourcentages de la CaCO₃ dans les carreaux de céramique, on remarque que l'échantillon REV6 contient beaucoup de calcite (16.8%), malgré que la brique doit normalement être cuite à une température de 700°C, c'est-à-dire qu'il doit y avoir une calcination totale de la CaCO₃. De même pour les autres échantillons REV8, S2 et REV7.

4-2. Diffraction des Rayons X :

Les résultats des analyses par diffraction des rayons X, effectuées sur la fraction totale et la fraction argileuse, sont représentés sous forme de diffractogrammes respectivement dans les **figures (35, 36, 37 et 38)**.

4-2-1. Présentation des diffractogrammes:

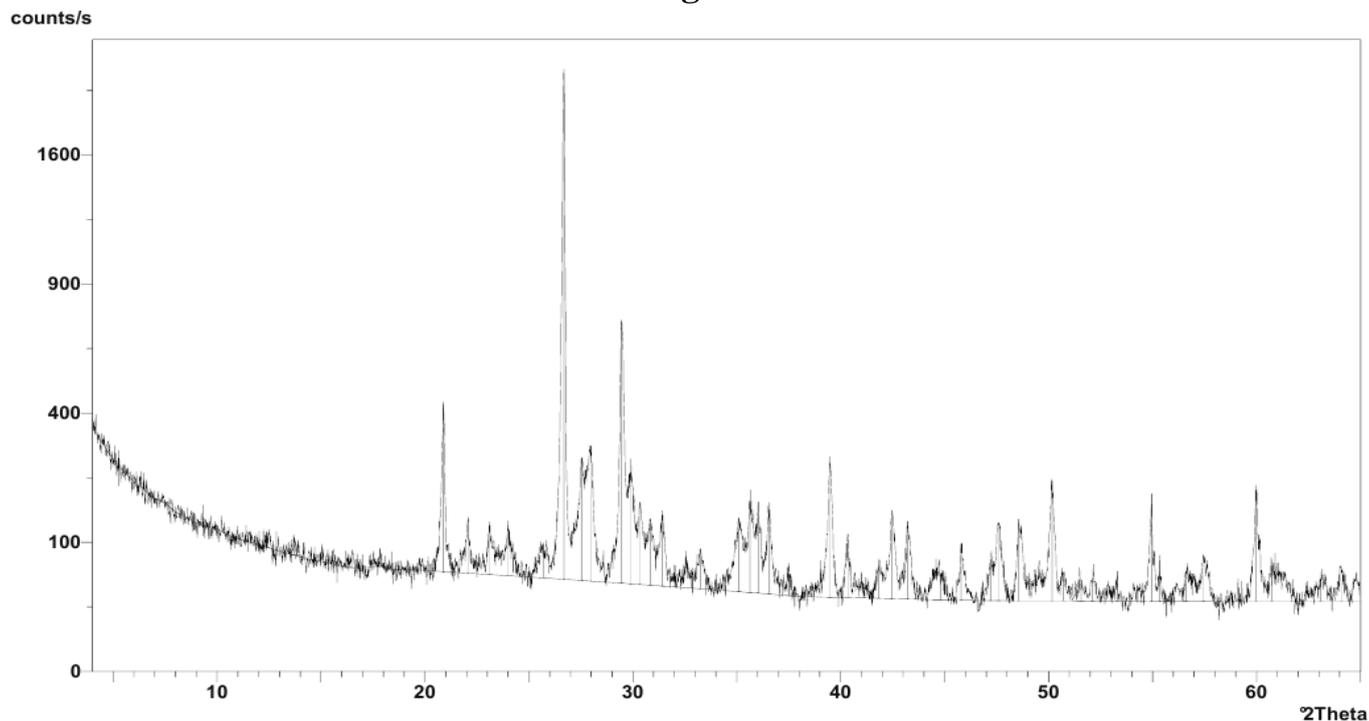


Figure 35 : Diffractogramme de l'échantillon REV6

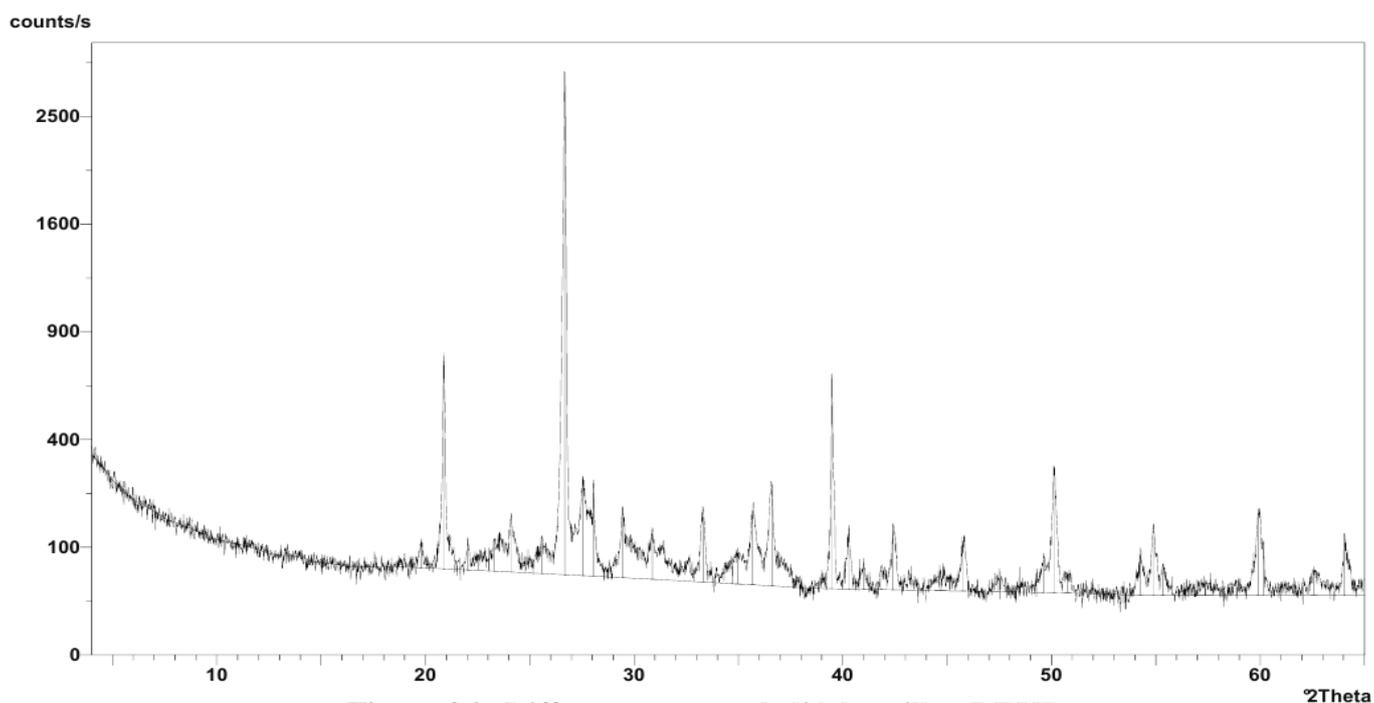


Figure 36 : Diffractogramme de l'échantillon REV7

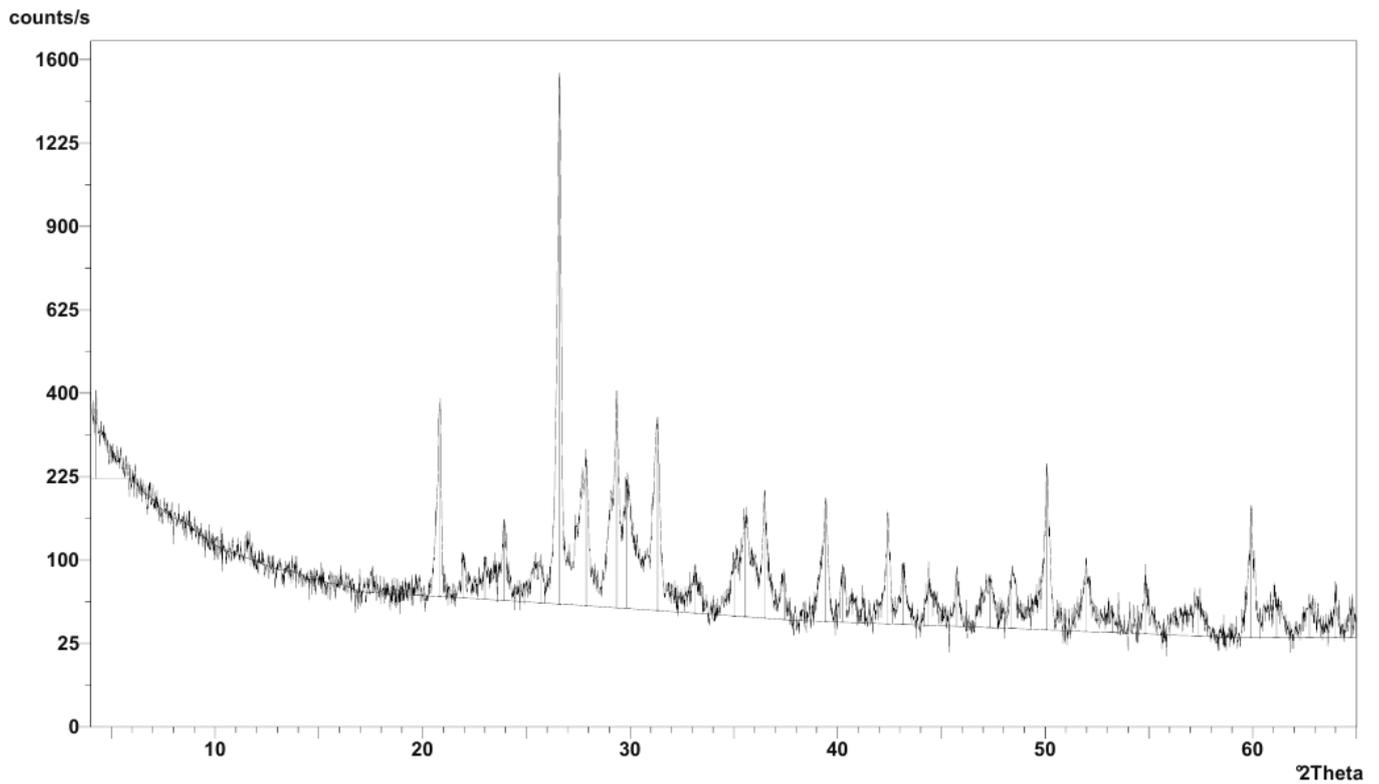


Figure 37 : Diffractogramme de l'échantillon S2

4-2-2. Commentaire :

A partir du dépouillement des spectres et l'identification des pics différenciés entre 10° et 50° en 2θ , les différentes phases minérales présentes dans l'ensemble des échantillons de pisé sont les suivantes : Anhydrite, Aragonite, Augite, Calcite, Géothite, Hematite, K-Feldspar, Magnetite, Plagioclase, Quartz et Rhodochrocite.

4-2-2. Tableau des pourcentages :

%Minéraux	N° d'échantillons		
	REV6	REV7	S2
Anhydrite	-	-	+
Aragonite	++++	-	-
Augite	++	-	++++
Calcite	+	-	++
Géothite	++	+++++	++++
Hematite	-	+++	-
K-Felspar	++	+++	-
Magnetite	-	++	+
Plagioclase	+	++	++
Quartz	++	++++	+++
Rhodochroite	+	-	-

**Tableau 14 : Proportions relatives aux différents minéraux des carreaux de
céramique**

5. L'analyse des enduits :

5-1. L'analyse de la Calcimétrie :

5-1-1. Résultats :

N° d'échantillon	m	V1	V2	DV	% CaCO3
REV1	0.65	40.5	55	14.5	9.64
REV2	0.574	41	65	24	18.06
REV3	0.457	40.5	58	17.5	16.54
REV4	0.878	40	74.5	34.5	16.97
REV5	0.62	41.5	78	36.5	25.43
REV9	0.452	40.5	62.5	22	21.03
REV10	0.887	40	40.5	0.5	0.24

Tableau 19 : Résultats des pourcentages de la CaCO3 dans les enduits

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.38) :

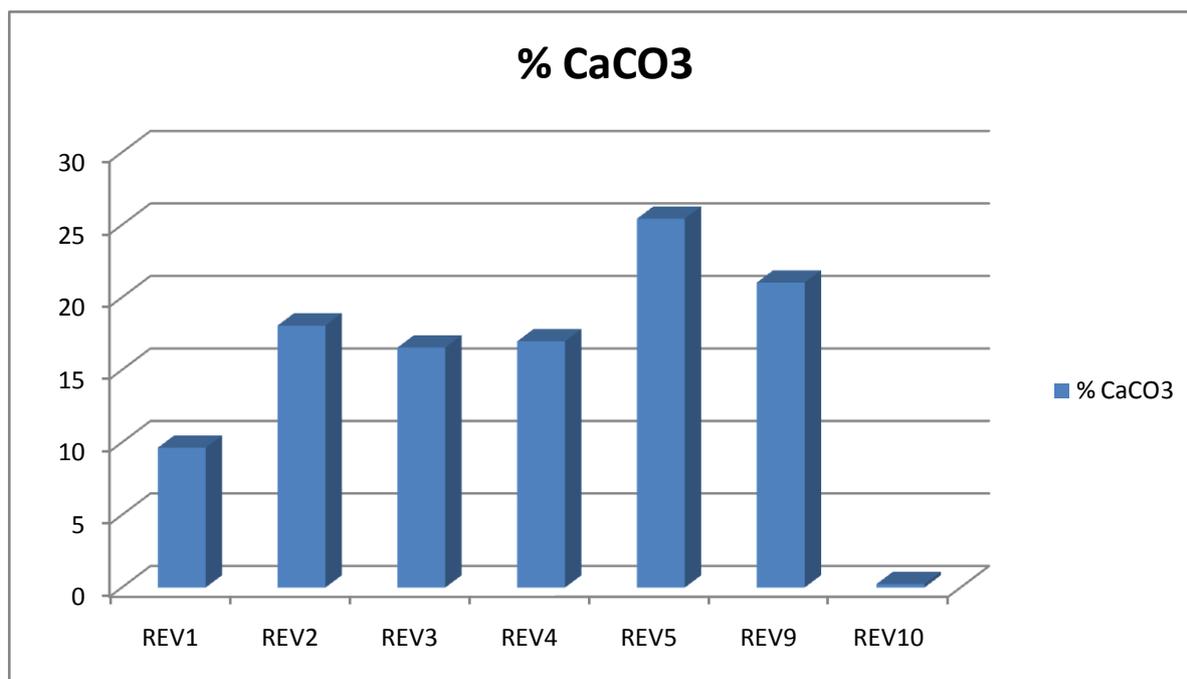


Figure 38 : Histogramme des pourcentages de la CaCO3 dans les enduits

5-1-2. Commentaire :

Les résultats obtenus par les pourcentages de CaCO3 dans les enduits, affirment que l'échantillon REV1 (restauration ancienne) qui se trouve totalement décollé du mur contient un pourcentage considérable de CaCO3 (9.64%).

En ce qui concerne les revêtements de la restauration la plus récente REV3 et REV4 qui ont été échantillonnés respectivement de la base du mur altéré par les venues d'eau et de la hauteur non altéré, on constate qu'ils ont tous les deux le même pourcentage très élevé de CaCO_3 (16%). Cette teneur très élevée en calcite peut être la cause de la fragilité de ce revêtement aux venues d'eau et donc de son altération très rapide. De même pour les revêtements REV2 et REV5.

Pour le revêtement REV9, celui-ci représente la chaux avec laquelle s'est faite la restauration récente et celle qu'on mélange à l'enduit et au mortier. On remarque d'après les résultats que celle-ci contient un pourcentage très élevée de CaCO_3 (21%), tout en sachant que cette chaux est censée être totalement calcinée à 900°C . D'où on peut déduire qu'elle a été mal cuite.

Concernant le revêtement REV10, celui-ci représente le sable avec lequel s'est faite la restauration récente et celui qu'on mélange à l'enduit et au mortier. Ce revêtement comporte un très faible pourcentage de CaCO_3 presque nul (0.24%). D'où on constate sa validité d'utilisation dans la restauration.

5-2. Diffraction des Rayons X :

Les résultats des analyses par diffraction des rayons X, effectuées sur la fraction totale et la fraction argileuse, sont représentés sous forme de diffractogrammes respectivement dans les **figures (39, 40, 41, 42 et 43)**.

5-2-1. Résultats :

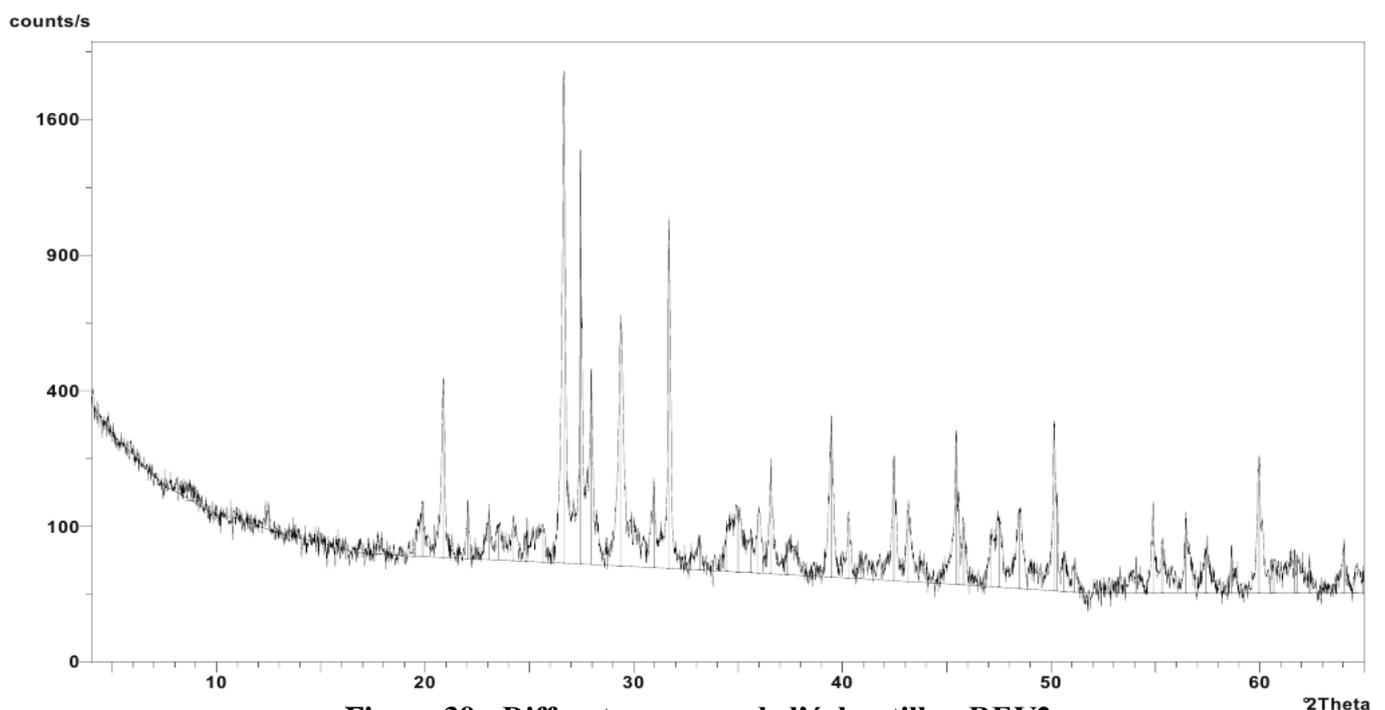


Figure 39 : Diffractogramme de l'échantillon REV2

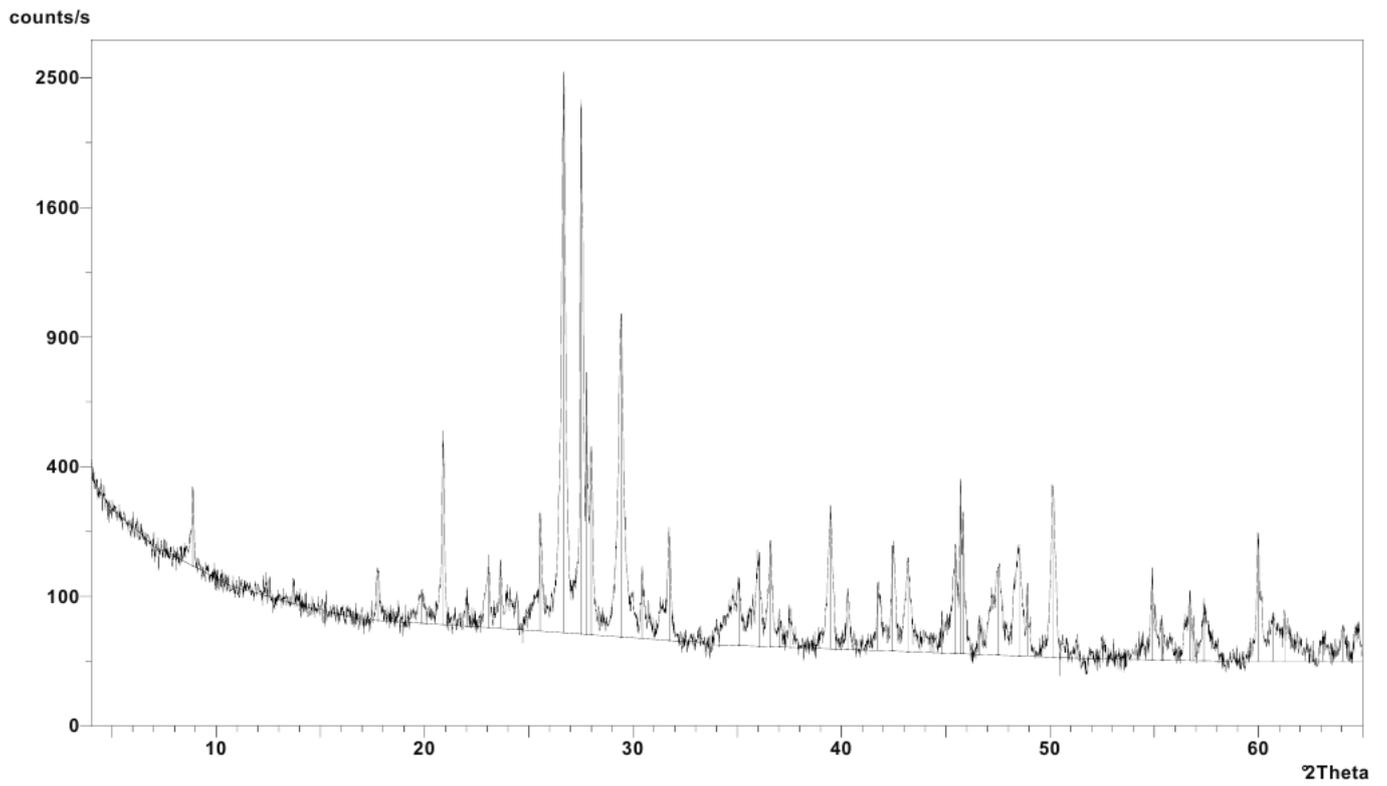


Figure 40 : Diffractogramme de l'échantillon REV3

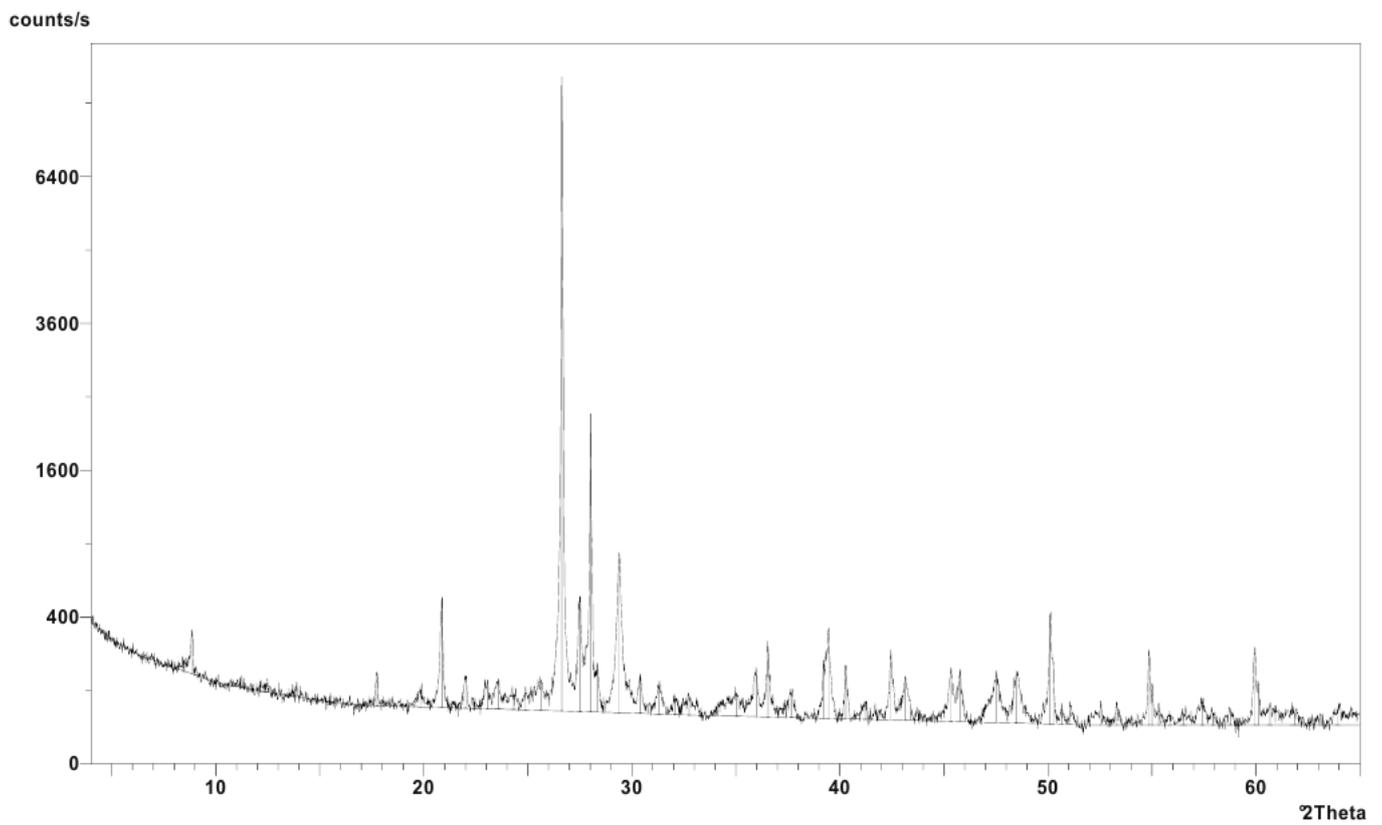


Figure 41 : Diffractogramme de l'échantillon REV4

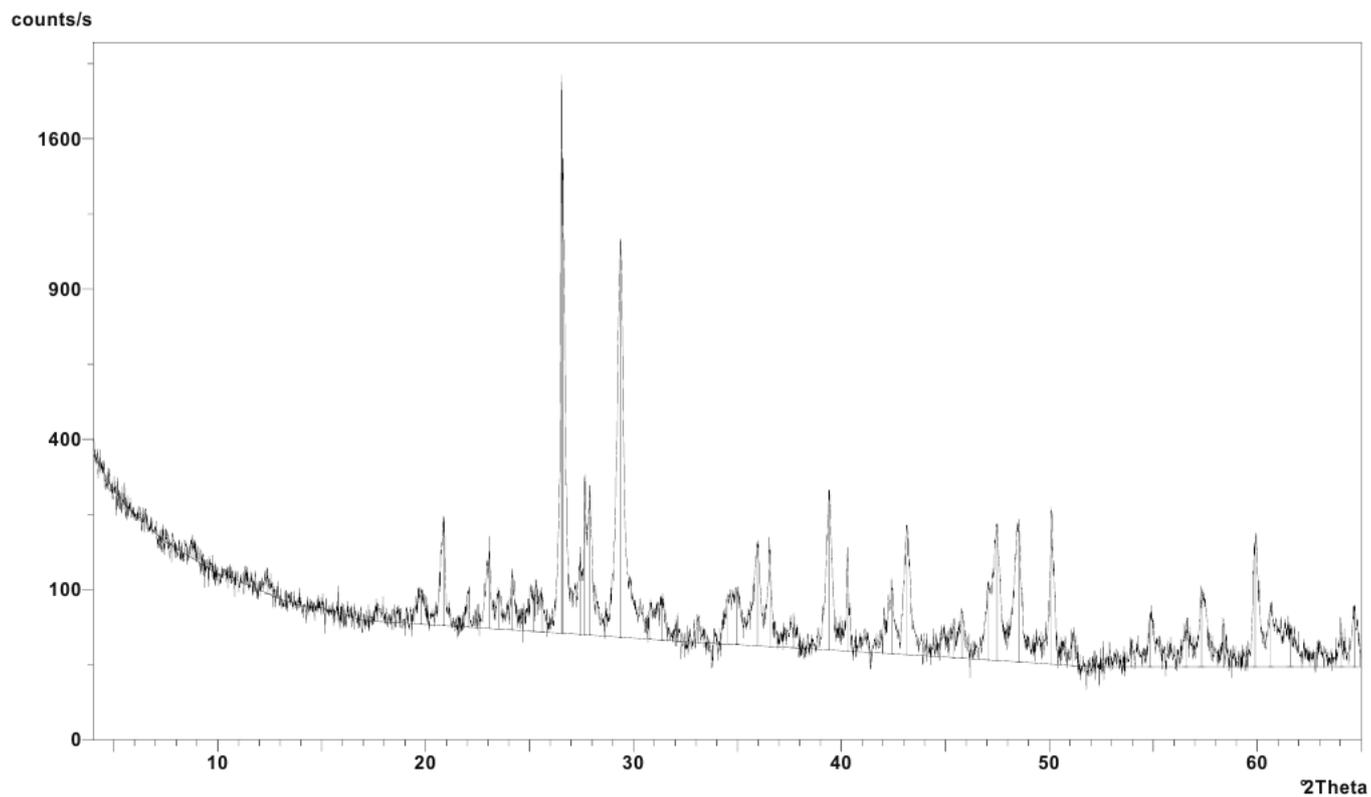


Figure 42 : Diffractogramme de l'échantillon REV5

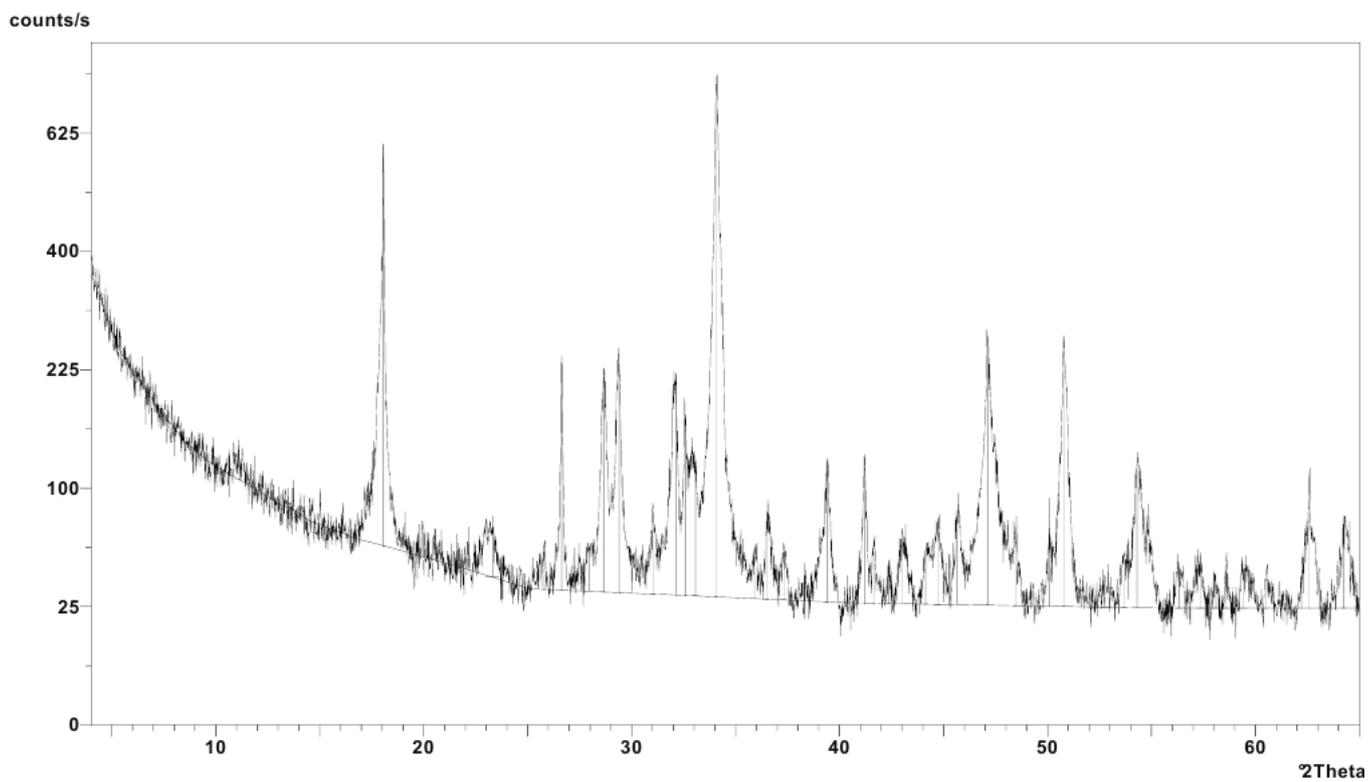


Figure 43 : Diffractogramme de l'échantillon REV9

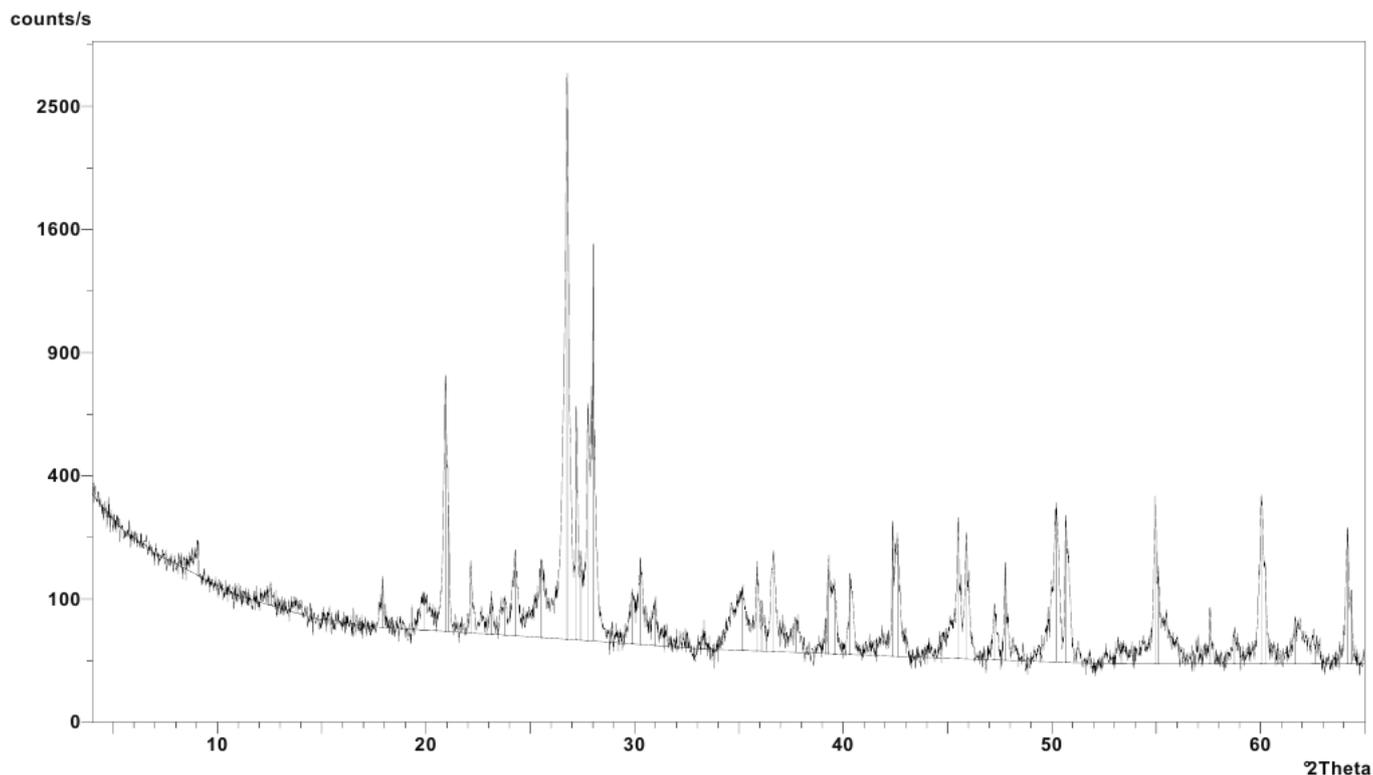


Figure 44 : Diffractogramme de l'échantillon REV10

5-2-2. Commentaire :

A partir du dépouillement des spectres et l'identification des pics différenciés entre 10° et 50° en 2θ, les différentes phases minérales présentes dans l'ensemble des échantillons de pisé sont les suivantes : Aragonite, Calcite, Dolomite, Géothite, K-Feldspar, Phillipsite, Plagioclase et Quartz.

5-2-3. Tableau des pourcentages :

%Minéraux	N° d'échantillons				
	REV2	REV3	REV4	REV5	REV10
Aragonite	-	+++	-	-	+++++
Calcite	+	++	+	++++	-
Géothite	+++	+	+++	++++	-
K-Feldspar	+++++	+++	+++	++++	-
Plagioclase	++	++	+++++	++	+++++
Quartz	++	++	+++++	+++	+++
Phillipsite	-	+++	-	-	-

Tableau 15 : Proportions relatives aux différents minéraux des enduits

D'après les résultats du **tableau 15**, on remarque que les phases minérales dominantes dans la composition des enduits de restauration récente REV2, REV3, REV4 et REV4 sont la Géothite, le K-feldspar et le Quartz. Pour le sable de restauration REV10, on remarque les phases minérales dominantes sont le Plagioclase et l'Aragonite.

5-3. L'analyse de la Granulométrie :

5-3-1. Résultats :

Dans le but de séparer les phases sableuse, limoneuse et argileuse, qui composent les échantillons bruts (roches totales), nous avons d'abord procédé à un tamisage en voie humide, répondant à la norme AFNOR pour séparer la fraction sableuse (diamètre > 0.063mm) de la fraction limono-argileuse (diamètre < 0.063mm). Ensuite, par la technique de la Granulométrie Laser, nous avons pu séparer les fractions limoneuse et argileuse.

Le **tableau 16** regroupe les résultats obtenus par tamisage de la fraction sableuse des différents échantillons.

N° d'échantillons	% > 2 mm	2 mm à 80 µm %	80 à 20 µm %	20 à 2 µm %	% < 2 µm
	(grave)	(sable)	(limon)	(limon)	(argile)
REV1	14	20	24	19	23
REV2	31	23	17	13	16
REV3	24	29	25	10	12
REV4	25	21	29	11	14
REV5	3	45	26	11	15
REV10	6	32	19	17	26

Tableau 16 : Classification granulométrique des échantillons d'enduit

Les résultats de la composition des différents échantillons sont représentés dans la **figure 45**.

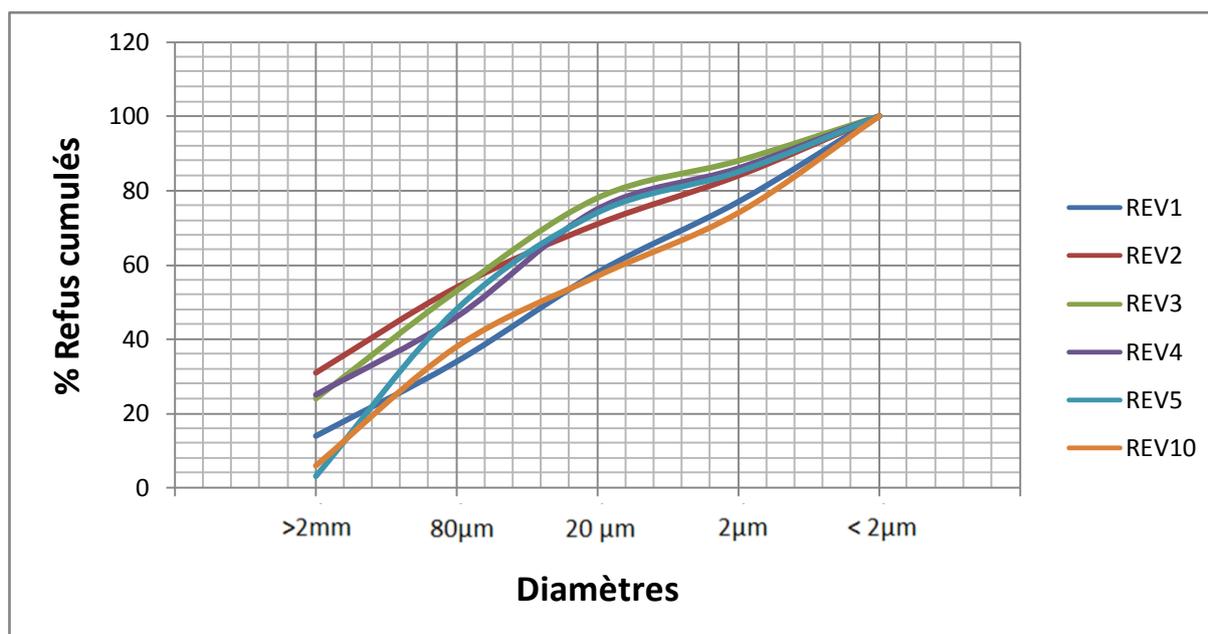


Figure 45 : Distribution des classes granulométrique des échantillons d'enduit

5-3-2. Commentaire :

D'après les résultats obtenus dans la classification granulométrique des échantillons d'enduit, on déduit que la distribution des échantillons de la restauration récente REV3, REV4 et REV2 sont presque les mêmes, ici les fractions les plus dominantes sont les fractions limoneuse, sableuse et graveuse.

Pour l'échantillon REV5, on remarque que sa distribution ressemble beaucoup plus à celle du revêtement REV10 de sable utilisé dans l'enduit de restauration, vu qu'il comporte tout les deux un faible pourcentage de fraction graveuse (3% à 6%) et une grande quantité de sable. Par contre, au niveau de la fraction argileuse on remarque que le REV10 se dote d'un pourcentage beaucoup plus fort (26%) que celui du REV5 (15%).

Concernant le revêtement de restauration ancienne décollé REV1, a beaucoup de point commun avec le sable de restauration récent. Il sont semblables au niveau de la fraction fine et différents dans la fraction sableuse et grossière.

5-4. L'analyse de la Matière organique :

5-4-1. Résultats :

N° d'échantillon	Masse tare	Masse tare + éch. sec(105°C)	Masse tare + éch. sec(550°)	% M.O.
REV1	22.487	30.492	29.921	7
REV2	23.244	33.557	32.972	6
REV3	22.922	28.774	28.465	5
REV4	21.846	24.115	23.97	6
REV5	21.825	23.535	23.422	6
REV9	22.479	30.469	29.795	8
REV10	23.158	42.953	42.523	2

Tableau 23 : Résultats des pourcentages de la matière organique dans les échantillons d'enduit

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.46) :

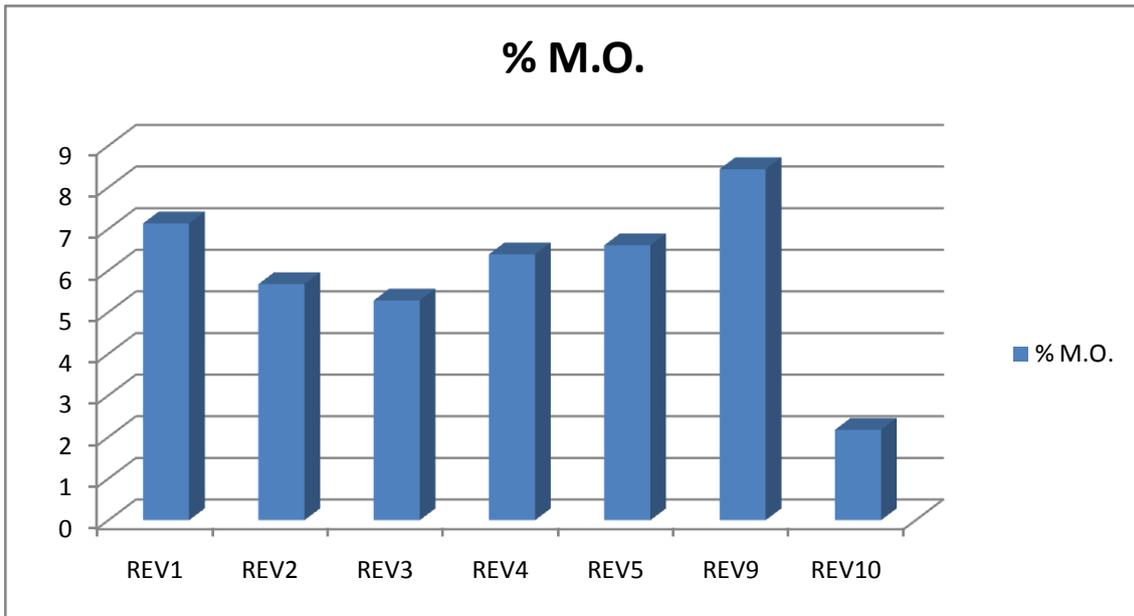


Figure 46 : Histogramme des pourcentages de la matière organique dans les échantillons d'enduit

5-4-2. Commentaire :

D'après les résultats des pourcentages de la matière organique dans les enduits, on remarque que les teneurs en matière organique dans les échantillons REV1, REV2, REV3, REV4 et REV5 sont moyennement élevés et semblables.

En ce qui concerne l'échantillon de sable de restauration REV10, on remarque que celui-ci contient la plus faible teneur en matière organique (2%), d'où on peut déduire que c'est un sable propre et valide à la restauration.

Par contre, au niveau de la chaux de restauration REV9, on remarque que la teneur en matière organique est la plus élevée (8%), sachant que la chaux est normalement censée être cuite à 900°C, température qui doit éliminer totalement la matière organique contenue. D'où on peut déduire que la chaux est mal cuite et donc elle doit sûrement être la source de la teneur élevée de matière organique dans les enduits de restauration.

6. L'analyse des mortiers :

6-1. L'analyse de la Calcimétrie :

6-1-1. Résultats :

N° d'échantillon	m	V1	V2	DV	% CaCO ₃
MOR1	0.73	41.5	85.5	44	26.11
MOR2	0.80	40.5	85	44.5	23.76
K1	0.77	41	75	34	19.05

Tableau 24 : Résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans les mortiers

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.47) :

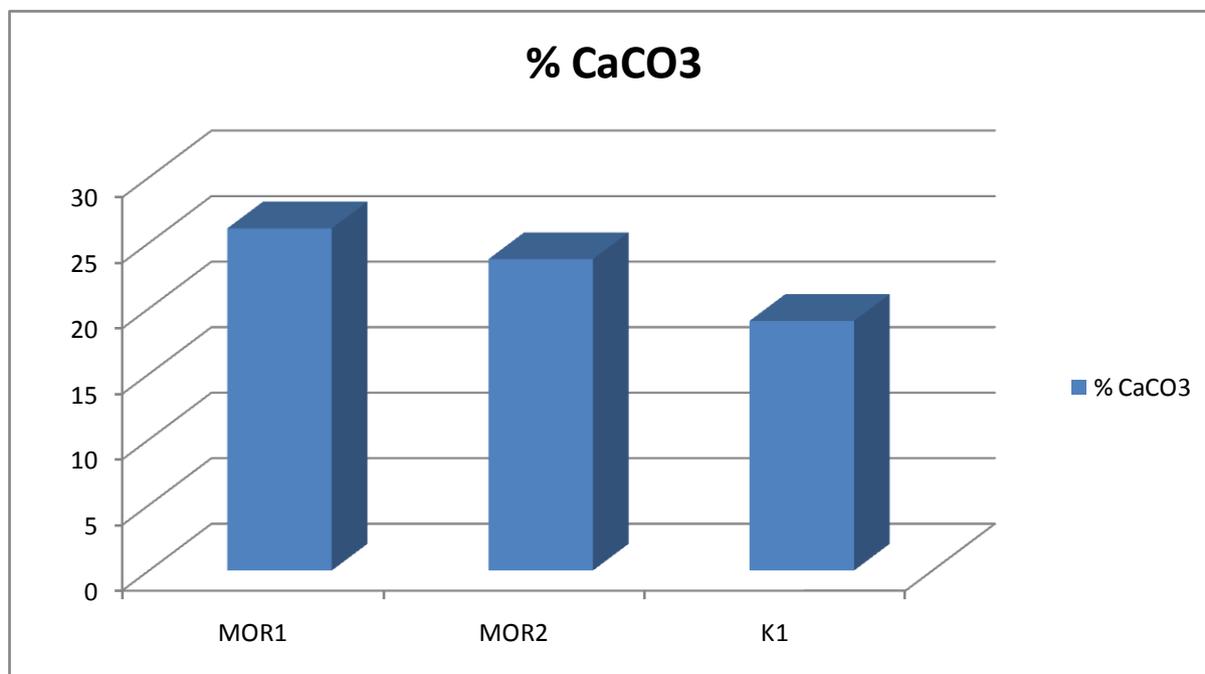


Figure 47 : Résultats des pourcentages de la CaCO₃ dans les mortiers

6-1-2. Commentaire :

D'après les résultats, on remarque que les pourcentages de CaCO₃ dans les mortiers MOR1 remontant à la restauration de l'époque de la colonisation française et MOR2 (mortier originel de soubassement), sont très élevés (23% à 26%). Celui de la Koutoubia est moins élevé avec une valeur de 19%. Ce pourcentage important de calcite dans les mortiers est soit dû à une chaux mal cuite ou à un sable impure.

6-2. Diffraction des Rayons X :

Les résultats des analyses par diffraction des rayons X, effectuées sur la fraction totale et la fraction argileuse, sont représentés sous forme de diffractogrammes respectivement dans les figures (48, 49 et 50).

6-2-1. Résultats :

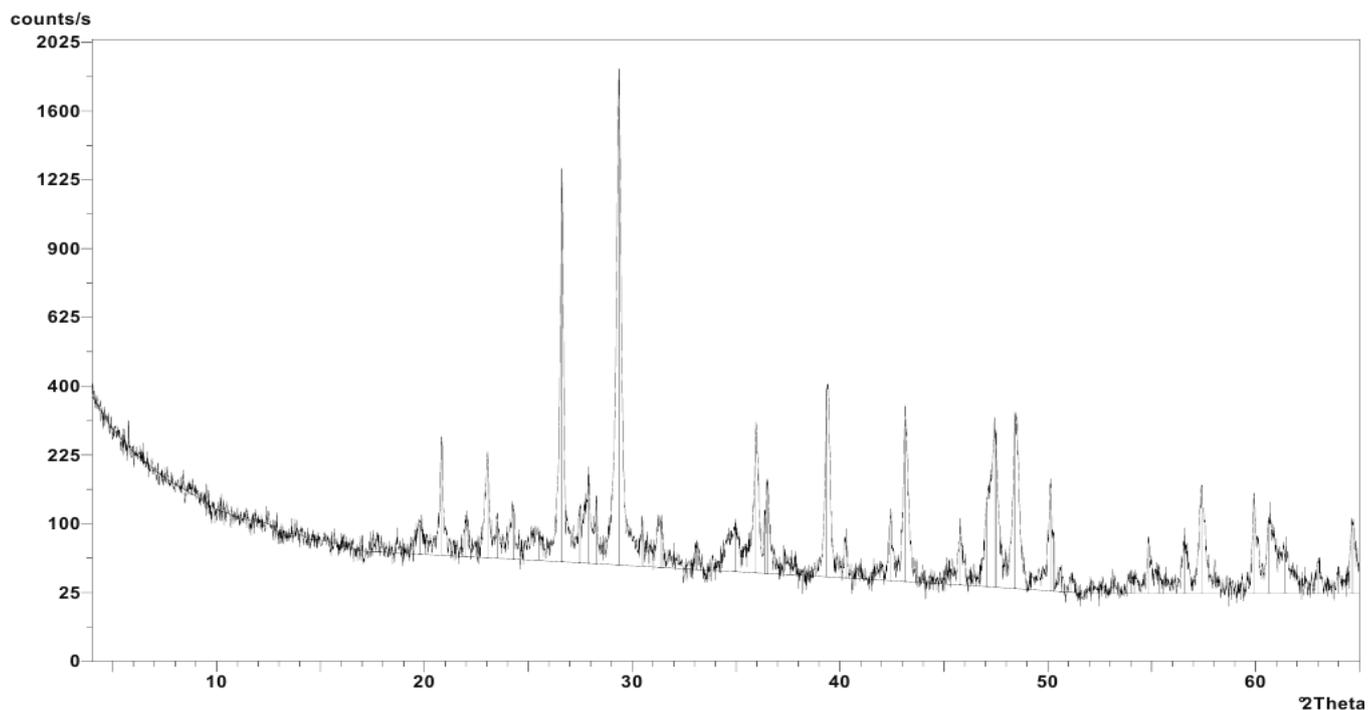


Figure 48 : Diffractogramme de l'échantillon MOR1

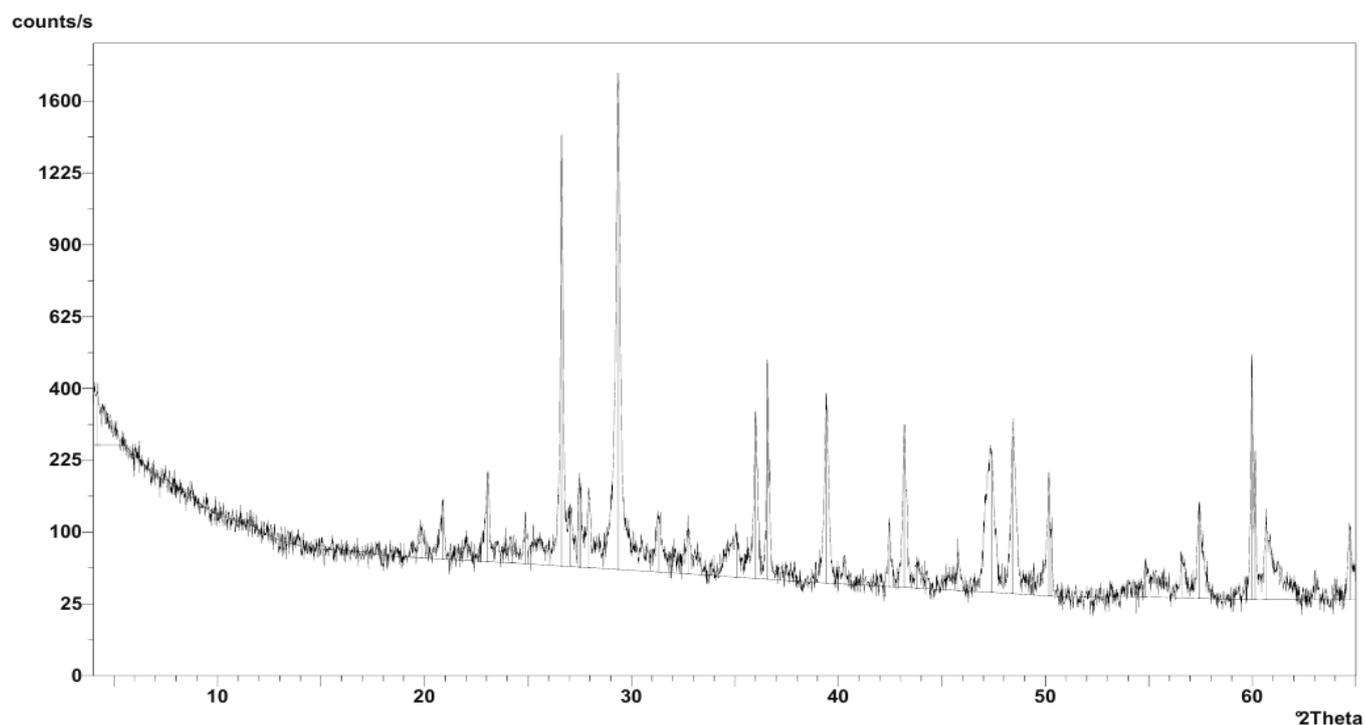


Figure 49 : Diffractogramme de l'échantillon MOR2

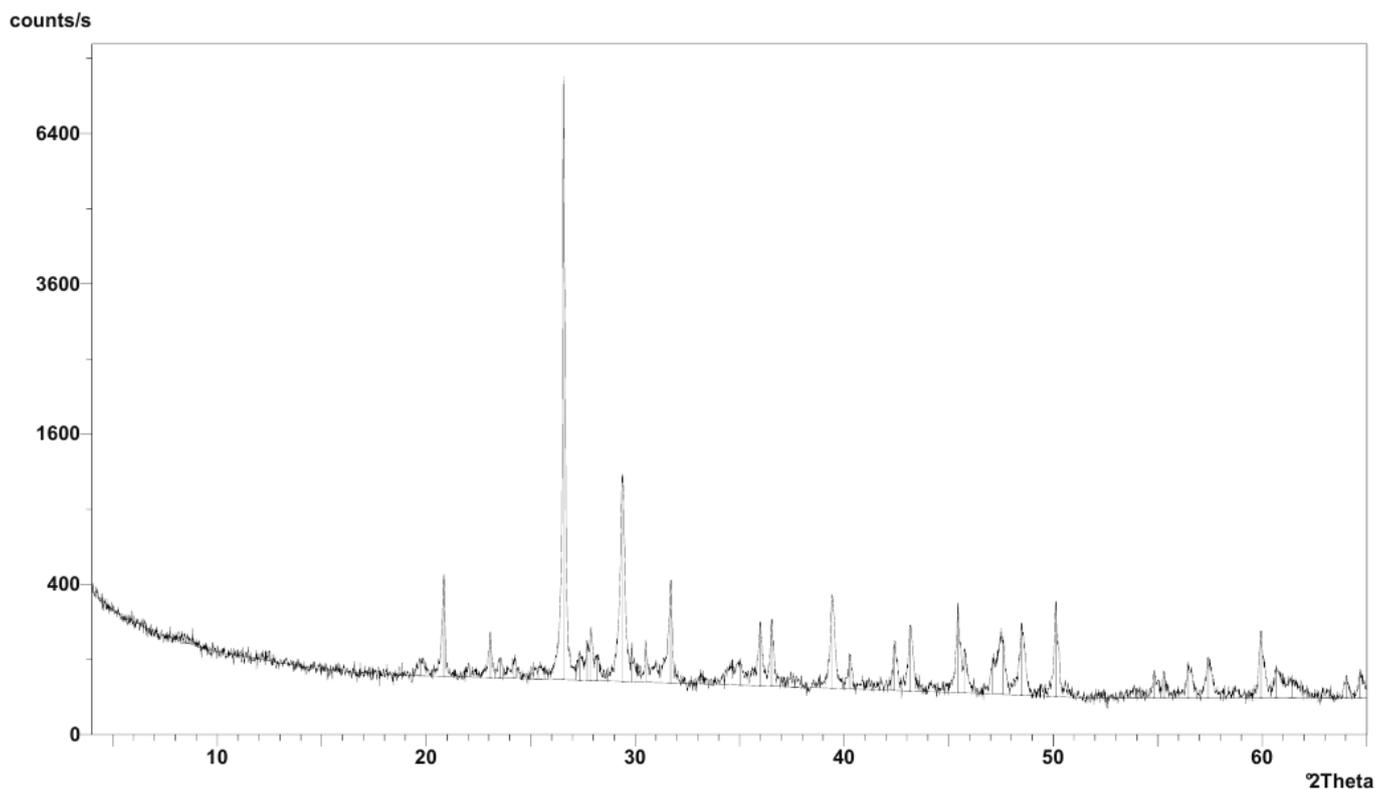


Figure 50 : Diffractogramme de l'échantillon K1

6-2-2. Commentaire :

A partir du dépouillement des spectres et l'identification des pics différenciés entre 10° et 50° en 2θ, les différentes phases minérales présentes dans l'ensemble des échantillons de pisé sont les suivantes : Calcite, Dolomite, Géothite, Hematite, Apatite, K-Feldspar, Plagioclase et Quartz.

%Minéraux	N° d'échantillons		
	MOR2	MOR1	K1
Calcite	++	+++++	+++
Géothite	+	++	+
K-Felspar	++++	+++	+
Plagioclase	-	+	+
Quartz	+++	+++	+++++
Apatite	-	-	+++
Hematite	-	-	+

Tableau 25 : Proportions relatives aux différents minéraux des mortiers

On remarque que les phases minérales dominantes sont la calcite, le K-feldspar et le Quartz.

6-3. Analyse de la Granulométrie :

6-3-1. Résultats :

Dans le but de séparer les phases sableuse, limoneuse et argileuse, qui composent les échantillons bruts (roches totales), nous avons d'abord procédé à un tamisage en voie humide, répondant à la norme AFNOR pour séparer la fraction sableuse (diamètre > 0.063mm) de la fraction limono-argileuse (diamètre < 0.063mm). Ensuite, par la technique de la Granulométrie Laser, nous avons pu séparer les fractions limoneuse et argileuse.

Le **tableau 17** regroupe les résultats obtenus par tamisage de la fraction sableuse des différents échantillons.

N° d'échantillons	% > 2 mm	2 mm à 80 µm %	80 à 20 µm %	20 à 2 µm %	% < 2 µm
	(grave)	(sable)	(limon)	(limon)	(argile)
MOR1	88	3	4	2	3
MOR2	58	14	13	8	7
K1	19	14	33	16	18

Tableau 26 : Classification granulométrique des échantillons de mortier

Les résultats de la composition des différents échantillons sont représentés dans la **figure 51**.

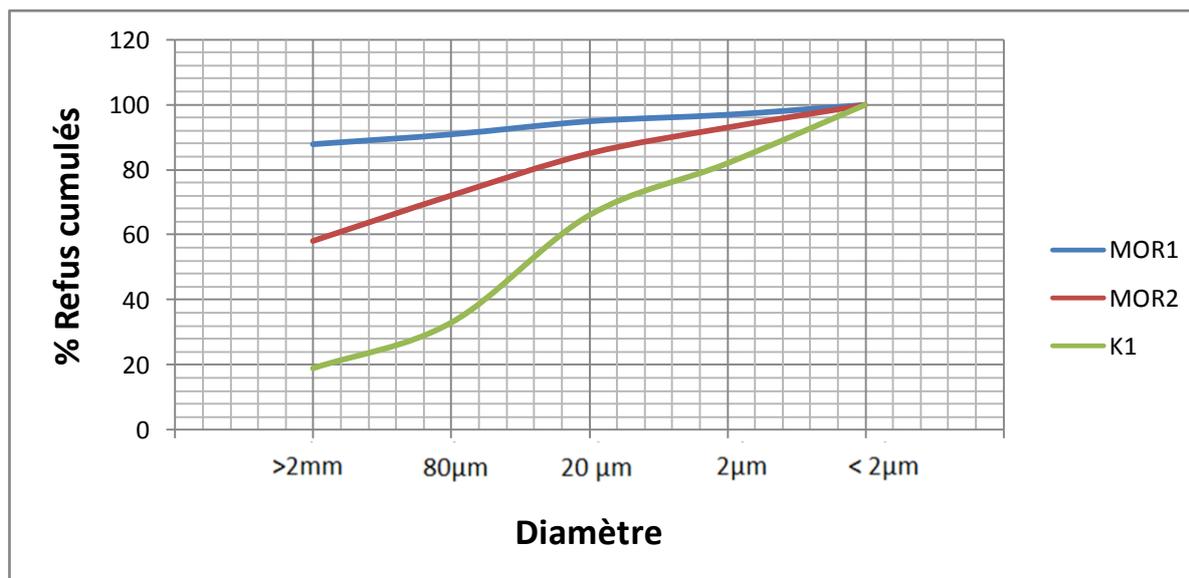


Figure 51 : Distribution des classes granulométrique des échantillons de mortier

6-3-2. Commentaire :

D'après les résultats obtenus, on remarque que les mortiers du Badià contiennent beaucoup de particules grossières et de très faibles quantités de particules argileuses (3% à 7%). Le mortier de la Koutoubia par contre contient beaucoup de Limon (33%) que d'argile et de grave.

6-4. Analyse de la matière organique :

6-4-1. Résultats :

N° d'échantillon	Masse tare	Masse tare + éch. sec(105°C)	Masse tare + éch. sec(550°)	% M.O.
MOR1	20.766	30.279	29.581	7.33
MOR2	24.086	29.356	28.862	9.37
K1	23.098	31.19	30.64	6.79

Tableau 28 : Résultats des pourcentages de la matière organique dans les échantillons de mortiers

Ces résultats sont représentés graphiquement par l'histogramme suivant (fig.52) :

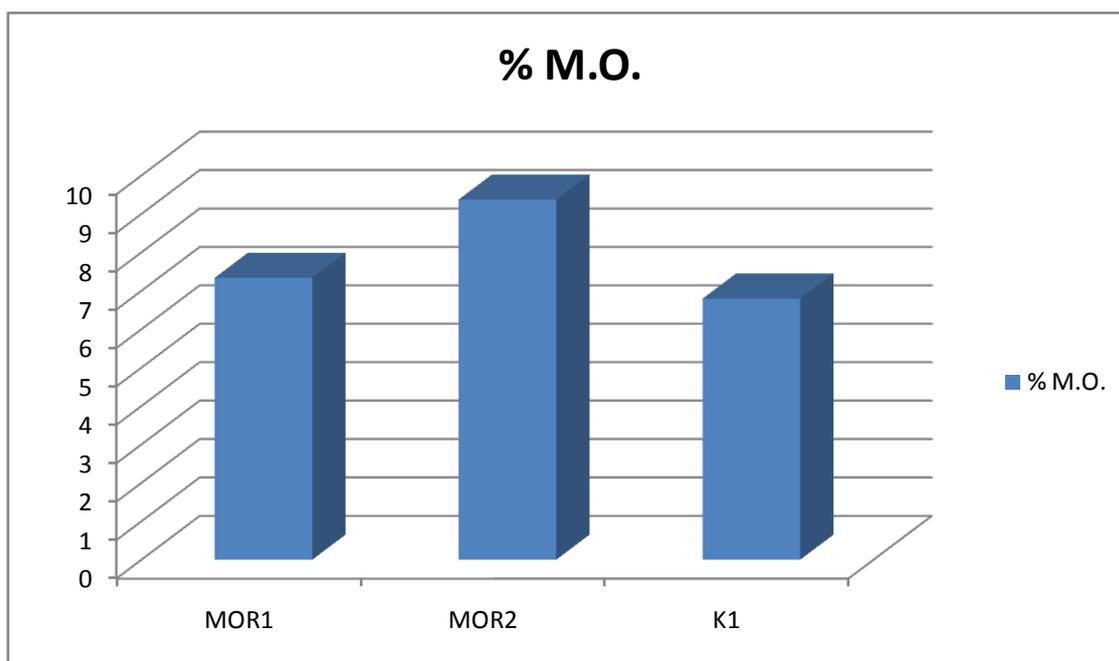


Figure 52 : Histogramme des pourcentages de la matière organique dans les échantillons de mortiers

6-4-2. Commentaire :

D'après les résultats obtenus, on remarque tous les échantillons de mortiers se dotent d'un pourcentage de matière organique moyennement élevé. Cette teneur importante en matière organique est soit dû à une mauvaise cuisson de la chaux utilisée soit à l'utilisation d'un sable impure.

CHAPITRE V : DISCUSSION DES RESULTATS

1. Validité des matériaux de restauration actuels :

1-1. La brique en céramique :

1-1-1. Comparaison physico-chimique :

En comparant les résultats des pourcentages de CaCO_3 dans la brique de restauration utilisée actuellement BR2 et ceux de la brique utilisée dans la construction originelle (BR1 par exemple) (tab. 29), on constate que la brique de restauration est mieux fabriquée que celle originel, vue qu'elle ne contient pas de calcite. La présence de calcite traduit une mauvaise cuisson de la brique.

N° d'échantillon	% CaCO_3
BR1	3.1
BR2	0

Tableau 29 : Comparaison des pourcentages de CaCO_3 des briques BR1 et BR2

1-1-2. Comparaison minéralogique :

En comparant les pourcentages des phases minérales présentes dans l'échantillon BR1 et BR2 (tab.30), on remarque que les deux échantillons sont presque semblables. Par ailleurs, on peut dire que la présence de la calcite dans BR1 et son absence dans BR2 confirme les résultats obtenus dans la comparaison physico-chimiques.

%Minéraux	BR1	BR2
Augite	-	+
Calcite	++	-
Géothite	++++	++++
Gistobalite	-	+++
Hématite	+	+
K-Felspar	++++	+++
Magnetite	+	+
Plagioclase	+	+
Quartz	+++	++

Tableau 30 : Comparaison des pourcentages de minéraux présents dans les briques BR1 et BR2

1-2. Le sable utilisé pour la fabrication des enduits:

1-2-1. Comparaison physico-chimique :

En comparant les résultats des pourcentages de CaCO₃ et de la matière organique dans le sable utilisé pour la fabrication des enduits de restauration actuelle (REV10), et ceux présents dans les enduits de la restauration récente (REV3 par exemple) (**tab.31**), on constate que l'enduit restauré récemment, comporte un grand pourcentage de CaCO₃ qui est de 16.54 alors que le sable avec lequel il a été fabriqué ne comporte presque pas de calcite. De même pour la matière organique, l'échantillon d'enduit porte un pourcentage plus grand que celui de l'échantillon de sable.

N° d'échantillon	% CaCO ₃	% Matière organique
REV10	0.24	2
REV3	16.54	5

Tableau 31 : Comparaison des pourcentages de CaCO₃ des revêtements REV10 et REV3

1-2-2. Comparaison minéralogique :

En comparant les pourcentages des phases minérales présentes dans l'échantillon REV10 et REV3 (**tab.32**), on remarque que les deux échantillons sont un peu différents, vue la présence du K-Feldspar et de la Phillipsite dans l'enduit REV3 et son absence dans le sable REV10. Par ailleurs, on peut dire que la présence de la calcite dans REV3 et son absence dans REV10 confirme les résultats obtenus dans la comparaison physico-chimique.

%Minéraux	REV3	REV10
Aragonite	+++	+++++
Calcite	++	-
Géothite	+	-
K-Felspar	+++	-
Plagioclase	++	+++++
Quartz	++	+++
Phillipsite	+++	-

Tableau 32 : Comparaison des pourcentages de minéraux présents dans les revêtements REV10 et REV3

1-3. La chaux utilisée pour la fabrication des enduits:

1-3-1 Comparaison physico-chimique :

En comparant les résultats des pourcentages de CaCO₃ dans la chaux de restauration utilisée actuellement REV9 et ceux de l'enduit de la restauration récente REV3 (**tab. 33**), on constate que le pourcentage CaCO₃ et celui de la matière organique sont très élevés. D'où on déduit que la chaux de restauration est mal cuite. Ces pourcentages sont de la même façon très élevés dans l'enduit REV3.

N° d'échantillon	% CaCO ₃	% Matière organique
REV9	21.03	8
REV3	16.54	5

Tableau 33 : Comparaison des pourcentages de CaCO₃ et de matière organique des revêtements REV10 et REV3

1-4. Conclusion :

La comparaison physico-chimique est minéralogique des matériaux de la restauration récente a permis de déduire les conclusions suivantes :

-  La brique utilisée est correctement cuite d'où sa validité pour la restauration.
-  Le sable utilisée dans la fabrication de l'enduit est propre et ne contient d'impureté d'où sa validité pour la restauration.

- ✚ La chaux utilisée dans la fabrication de l'enduit est mal cuite et est la cause de l'effritement rapide des enduits récents lors des remontées capillaires. Ceci parce qu'elle contient un pourcentage très élevé de calcite qui fragilise l'enduit et de la matière organique qui réduit la compacité des particules de sable.



Figure 53 : Matériaux de restauration actuels

2. Compatibilité de l'enduit et du mortier de restauration avec le pisé originel :

2-1. Comparaison physico-chimique :

En comparant les résultats des pourcentages de CaCO_3 et de la matière organique dans le pisé originel PIS7 avec ceux présents dans les enduits de la restauration antérieure et récente (REV1, REV3 et REV4), (**tab.34**), on constate que tous les échantillons contiennent le des pourcentages élevés de calcite et de matière organique. De même pour les mortiers, le mortier de soubassement originel MOR2 et le mortier de restauration de l'époque française contiennent tous les deux des pourcentages élevés de calcite et de matière organique.

N° d'échantillon	% CaCO_3	% Matière organique
PIS7	24.53	7
REV1	9.64	5
REV3	16.54	5
REV4	16.97	6
MOR1	26.11	7
MOR2	23.76	9

Tableau 34 : Comparaison des pourcentages de CaCO_3 et de matière organique du pisé, des mortiers et des enduits

2-2. Comparaison minéralogique :

En comparant les résultats des pourcentages des phases minérales du pisé originel PIS7 avec ceux présents des enduits de la restauration récente REV3, (**tab.35**), on remarque que les deux échantillons sont un peu différents. On remarque tout d'abord, la présence de K-Feldspar, et de Phillipsite dans l'enduit REV3 et son absence dans pisé originel PIS7. En revanche, on remarque que le pourcentage élevé de Géothite et de Trydimite dans le pisé est très réduit dans l'enduit REV3. Concernant le mortier originel MOR1, on remarque qu'il est d'une composition très similaire à celle du pisé originel. Le mortier MOR2 (époque française) par contre, contient moins de Géothite et beaucoup plus de Quartz et Phillipsite.

%Minéraux	PIS7	REV3	MOR1	MOR2
Aragonite	-	+++	-	-
Calcite	++++	++	+++++	++
Géothite	++++	+	++	+
Hematite	+	-	-	-
K-Feldspar	-	+++	+++	+++++
Plagioclase	++	++	+	+
Quartz	++	++	+++	+++++
Phillipsite	-	+++	-	+++
Trydimite	+++	-	-	+

Tableau 35 : Comparaison des pourcentages de minéraux du pisé originel, de l'enduit et du mortier de restauration

2-3. Conclusion :

Le pourcentage élevé de CaCO₃ et la présence essentielle de la phase minérale de la calcite dans le pisé originel est à l'origine de la mauvaise cuisson de la chaux.

La composition minérale de l'enduit de restauration actuelle n'est pas compatible à cent pour cent la composition du pisé originel, d'où la probabilité d'un éventuel rejet de l'enduit à long terme.

La composition minérale aussi du mortier de restauration de l'époque française n'est pas compatible à celle du pisé originel, ceci est la cause de son décollement du mur.

3. Origine des matériaux de construction du Palais Badià :

Pour pouvoir s'assurer de l'origine des matériaux de construction originels du Palais Badià, on a pu comparer entre les résultats d'analyse obtenus et ceux établies par des études effectuées sur quelques échantillons de différentes régions à proximité de la ville de Marrakech (fig.25), à savoir la région d'Ourika représentés par les échantillons (ORK), Tensift noté (TENS), N'Fis noté (NFS) et Zaraba noté (ZAR).



Figure 54 : Carte topographique de Marrakech

3-1. Comparaison physico-chimique :

En comparant les résultats des pourcentages de CaCO₃ et de la matière organique dans le pisé originel PIS7 avec ceux des échantillons des régions de Marrakech (**tab.26**), on constate que le pisé contient le des pourcentages élevés de calcite et de matière organique. Par rapport ORK, TENS, NFS et ZAR. Ce résultat ne traduit pas forcément une incompatibilité car la source de ce taux élevé de calcite et de matière organique peut être la chaux mal cuite auquel est mélangé le matériau de terre.

N° d'échantillon	% CaCO ₃	% Matière organique
PIS7	24.53	7
ORK1	0	3
ORK2	2.5	4
TENS	5	2
NFS	12	2
ZAR	8	4

Tableau 26 : Comparaison des pourcentages de CaCO₃ et de matière organique du pisé originel et des échantillons de terre des régions de Marrakech

3-2. Comparaison granulométrique :

N° d'échantillons	% > 2 mm	2 mm à 80 µm %	80 à 2 µm %	% < 2 µm
	(grave)	(sable)	(limon)	(argile)
PIS7	37	14	32	17
ORK1	0	2	50	48
ORK2	9	27	34	30
TENS	0	1	21	78
NFS	0	1	62	37
ZAR	0	2	51	47

Tableau 26 : Comparaison granulométrique entre le pisé originel et les échantillons de terre des régions de Marrakech

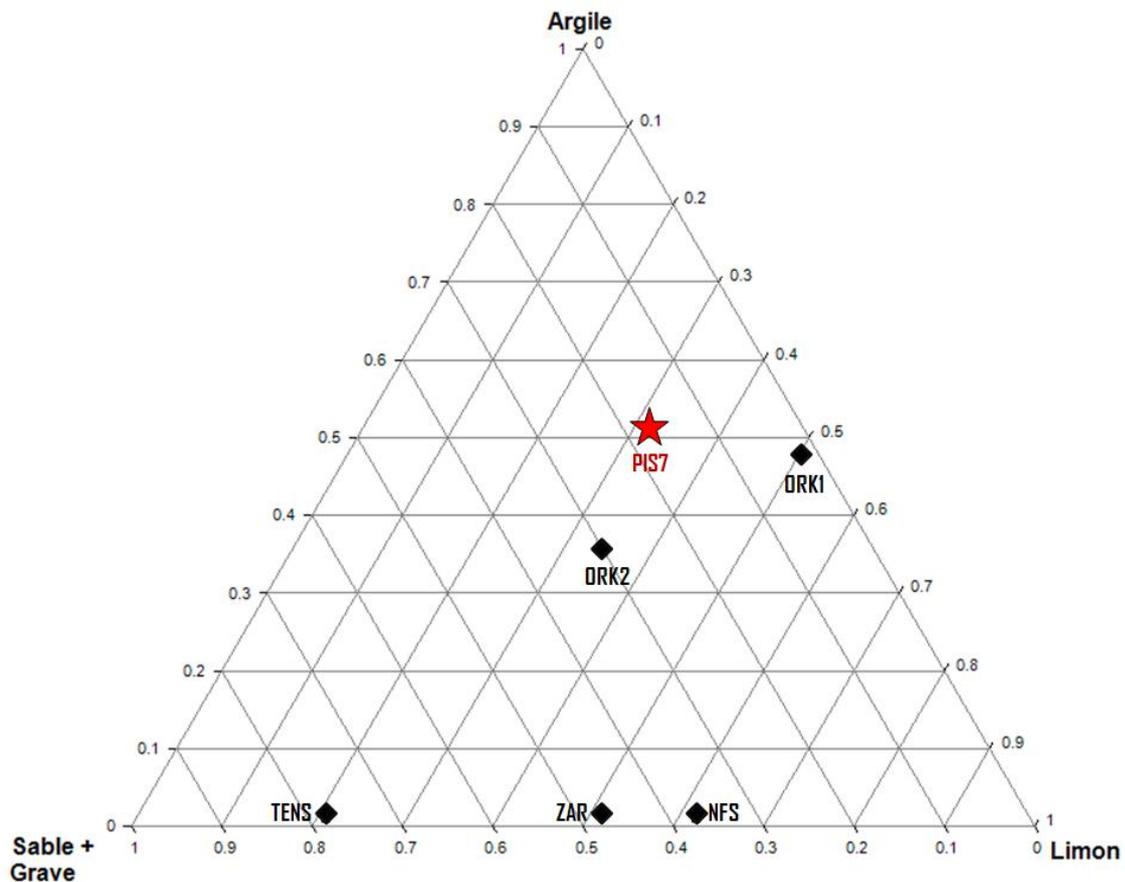


Figure 55 : Diagramme illustrant la composition granulométrique l'échantillon de pisé originel et les échantillons de terre des régions de Marrakech

D'après les résultats de la comparaison entre la composition granulométrique l'échantillon de pisé originel et les échantillons de terre des régions de Marrakech (**tab.26 et fig.55**), on constate que les échantillons les proches granulométriquement au pisé sont ceux de la région d'Ourika. Par ailleurs, ces résultats ne permettent pas de dire qu'il y est une ressemblance entre les matériaux d'Ourika et les matériaux avec lesquels est construit le palais. D'où la nécessité de réaliser un échantillonnage dans d'autres régions approximatives.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES :

Le présent travail a été axé sur l'identification et la caractérisation des matériaux de construction et de restauration du Palais Badià. Les observations faites sur le terrain ainsi que les analyses physico-chimiques, granulométriques et minéralogiques ont permis de mettre en évidence les conclusions suivantes :

- ✚ Le pisé est le matériau principal utilisé dans la construction du palais. Il s'agit d'un mélange de terre et de chaux, compacté à l'état humide sous forme de bandes successives. Le bâti est ensuite protégé par un enduit à base de terre et de chaux. Le Palais comprend aussi des ornements de sol et des ornements muraux en carreaux de zellige.
- ✚ La brique utilisée dans la restauration actuelle est correctement cuite d'où sa conformité d'utilisation.
- ✚ Le sable utilisée dans la fabrication de l'enduit de la restauration actuelle est propre, ne contient pas d'impureté et est valide pour la restauration. Il reste à voir si sa composition minérale, pas totalement compatible au pisé originel, ne peut produire un rejet à long terme.
- ✚ La chaux utilisée dans la fabrication de l'enduit de restauration actuelle est mal cuite (température <500°C) et est la cause de l'effritement rapide des enduits récents lors des remontées capillaires. Ceci parce qu'elle contient un pourcentage très élevé de calcite qui fragilise l'enduit et de la matière organique qui réduit la compacité des particules de sable.

Toutefois, nous nous persuadons qu'une cuisson de la chaux à une température conforme (température >900°C), ainsi que l'extraction des terres, destinées à la manœuvre du

pisé, à proximité des régions d'Ourika, pourront certainement donner des résultats de restauration plus favorables et durables.

Comme perspectives à ce travail, on peut projeter de réaliser des analyses chimiques sur les enduits permettant de quantifier leur pourcentage en chaux et en sable, pour pouvoir étudier les proportions les plus convenables à une protection maximale du mur en pisé. Il serait aussi nécessaire de bâtir, sur les mêmes conditions spatiales et avec les mêmes conditions climatiques, un mur restreint en pisé et l'enduire en se basant sur les résultats cités dans cette étude, pour pouvoir évaluer à l'aide des analyses scientifiques et à long terme, leur résistance et leur durabilité.