



Université Mohamed Seddik BenYahia, Jijel
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de
l'Univers

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الأرض و الكون

Thèse

Présentée par

BAGHDAD Abdelmalek

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Filière : Science de la terre

Spécialité : Géologie

Thème

CARACTERISATION GEOLOGIQUE, GEOTECHNIQUE ET TECHNOLOGIQUE DES ARGILES DE LA WILAYA DE JIJEL (ALGERIE NORD ORIENTALE)

Soutenu publiquement le Mercredi 27/09/2017, devant le jury composé de :

Président :	MEBROUK .F	M. C A	Université Mohamed Seddik Benyahia-Jijel
Directeur de thèse :	BOUABSA. L	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba
Examineurs :	ZEHANI. F	Professeur	Université Mohamed Seddik Benyahia-Jijel
	CHOUABBI. A	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba
	BOUMEZBEUR. A	Professeur	Université Larbi Tébessi- Tébessa
Invité :	BOUFTOUHA. Y	Professeur	Université Mohamed Seddik Benyahia- Jijel

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, qui est le résultat de quelques années de recherche menées de 2012 à 2017 avec l'encadrement et le soutien de nombreuses personnes. Il m'est agréable d'exprimer ici ma reconnaissance à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

En premier lieu, j'adresse mes plus profonds remerciements et les témoignages de mes gratitudes à mon directeur de thèse Monsieur Bouftouha Youcef, professeur à l'université Mohamed Seddik Ben Yahia, qui a encadré mon parcours universitaire et qui a assuré avec son expérience et sa patience la direction de ce travail. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour ses conseils avisés et son soutien en toutes circonstances. Je remercie également Monsieur Bouabza Lakhdar, professeur à l'université Badji Mokhtar, Annaba, qui a accepté de s'engager dans la co-direction de cette thèse.

J'associe aussi toute ma reconnaissance à Nathalie Fagel, professeure et responsable de l'Unité de Recherche : Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs), Département de Géologie de l'Université de Liège, de m'avoir accepté et accueilli au sein de son laboratoire. Elle m'a guidé dans ce travail et a assuré un cadre et une ambiance académique enrichissante pendant mes séjours à Liège. Sa disponibilité, sa compétence professionnelle, sa rigueur, n'ont d'égal que la grandeur de ses qualités humaines « c'est dans la simplicité que demeure la grandeur ». Je lui exprime ma sincère gratitude.

Monsieur Frédéric Hatert, professeur et responsable du laboratoire de Minéralogie et de Cristallogénie (LMC), Département de Géologie de l'Université de Liège, pour m'avoir permis d'effectuer des analyses minéralogique par spectroscopie infrarouge (FT-IR). Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Je souhaite ensuite faire part de ma gratitude envers les rapporteurs et membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail en acceptant de le lire et de l'évaluer.

Je suis très reconnaissante envers mes parents, mes frères et sœurs pour m'avoir soutenu tout le long de mon parcours universitaire et pour avoir cru en moi, essentiellement mon père qui aurait tant apprécié voir ce travail terminé. A eux je dédie cette thèse avec tout mon amour et toute ma gratitude et à la mémoire de ma mère que Dieu aie son âme en sa sainte miséricorde,

Enfin, je sais combien la présence de mon épouse et de mes enfants à mes côtés a été importante pour surmonter les moments difficiles, ils ont fait preuve de beaucoup de patience et de résignation et qui m'ont donné le courage de mener ce travail à son terme. C'est à eux que je dédie particulièrement ce mémoire.

RESUME

La wilaya de Jijel (NE Algérie) renferme d'importants dépôts d'argiles et de gisements de kaolin, représentant la matière première pour l'industrie des produits rouges et céramique. Cependant, l'utilisation de ces argiles dans les applications industrielles est tributaire de la connaissance de leurs propriétés physico-chimiques, minéralogiques et technologiques. C'est dans cette optique qu'un certain nombre d'échantillons représentatifs de ces dépôts argileux a fait l'objet de différents traitements et analyses. Les propriétés physiques ont été identifiées par analyse granulométrique, limites d'atterberg, MEB, calcimétrie de Bernard et masse volumique des particules solides (ρ_s). Les propriétés chimiques et minéralogiques ont été étudiées respectivement par XRF, XRD, et spectroscopie infrarouge (FT-IR).

Les résultats de différentes analyses montrent que les argiles du bassin néogène de Jijel et de Settara et les argiles sou-numidiennes de Djimla-Tamentout et Tazoust, comportent des assemblages minéralogiques diversifiés avec une certaine abondance de quartz, de calcite, associés à de faible proportion en dolomite, plagioclase, feldspath-K. La fraction argileuse est dominée par la kaolinite et l'illite comme phase dominante, avec des proportions variables de chlorite, vermiculite, smectite et interstratifiés "10-14 Å" comme phases accessoires. Les deux premiers type de minéraux argileux sont responsable en grande partie des propriétés céramiques favorables des matériaux argileux étudiés. Les oxydes les plus abondants sont SiO_2 , Al_2O_3 , CaO et Fe_2O_3 . La quantité de CaO dans les argiles du bassin néogène de Jijel et de Settara est très abondante (0–17%). Le taux de Fe_2O_3 est appréciable et varie entre 1–9%, les autres oxydes représentent de faibles proportions (< 6%). Les propriétés physiques quant à elles montrent une granulométrie assez fine, ce qui les classe dans le groupe des argiles sableuses, avec une plasticité moyenne à élevée, et une masse volumique peu variable pour tous les échantillons étudiés.

Le kaolin traité de Tamazert est caractérisé par une concentration en minéraux argileux, quartz et feldspath-K. La fraction argileuse présente une forte teneur en kaolinite avec de l'illite. Contrairement au kaolin de Tamazert, la minéralogie du kaolin brut d'Adjarda est composé de feldspath sodique (albite) et potassique (microcline), de la muscovite, du quartz, de minéraux argileux et en trace de la calcite et de la dolomite. Les oxydes les plus dominants dans le kaolin de Tamazert sont : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et K_2O . Pour le kaolin d'Adjarda (Chekfa), SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O et Na_2O sont les oxydes les plus dominants. Le kaolin de Tamazert est moyennement plastique à plastique, pauvre en fraction sableuse et riche en fraction argileuse et limoneuse. A l'opposé, le kaolin d'Adjarda est moyennement plastique, riche en fraction sableuse et limoneuse et pauvre en fraction fine argileuse. Cette différence est liée aux différents processus d'enrichissement opérés sur le kaolin de Tamazert. Le kaolin d'Adjarda présente une meilleure aptitude à l'extrusion, contrairement au kaolin de Tamazert.

Les essais technologiques effectués sur des carreaux céramiques cuits à des températures comprises entre 800-1100°C, présentent des paramètres de cuisson (retrait linéaire, absorption d'eau et résistance à la flexion) très favorables pour un usage de ces argiles dans la fabrication des produits de terre cuite (briques et tuiles). Néanmoins, la présence de fissures observées sur les produits finis à partir de 1000°C, ne sont guère favorables pour leur usage en l'état surtout pour les argiles calcaire. On note aussi, que la présence de sulfates en faibles quantité dans quelques échantillons carbonatés conduits après cuisson à 1050°C à la formation de nodules blancs de sulfate de calcium (CaSO_4) à la surface des produits.

Quelques produits cuits ont présenté un retrait à la cuisson supérieure à 10% pour des températures de 1100°C, et des pertes en poids de l'ordre de 14% en moyenne, alors pour une bonne adaptation aux normes, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout de quantité optimale de dégraissant ou en effectuant des mélanges ou des formulations avec d'autres matériaux argileux. Les résistances à la flexion comprises entre 6-10 Mpa pour les kaolins de Tamazert et d'Adjarda, présente un facteur favorable pour l'incorporation de ces matériaux dans le domaine de la fabrication des produits sanitaires et même des carreaux de revêtement des sols.

Mot clés : Algérie, Jijel, argile, kaolinite, illite, minéralogie, céramique.

تزرخ ولاية جيجل (شمال شرق الجزائر) برواسب معتبرة من التوضعات الطينية ومناجم الكاولين، التي تمثل المادة الأولية لصناعة المنتجات الحمراء والسيراميك. لكن استخدام هذه المواد الطينية في التطبيقات الصناعية متوقف على معرفة خصائصها الفيزيائية، الكيميائية، المعدنية والتكنولوجية.

انطلاقاً من هذا الإطار، تم اخذ مجموعة من العينات المشكلة لهذه الرواسب الطينية والتي تمت عليها مجموعة من المعالجات والاختبارات. الخصائص الفيزيائية تم التعرف عليها من خلال تجارب تحليل حجم الحبيبات، درجة الليونة عن طريق حدود التبرغ، مجهر المسح الإلكتروني، تركيز كربونات الكالسيوم والكتلة الحجمية للحبيبات الصلبة. تم دراسة الخصائص الكيميائية والمعدنية على التوالي عن طريق مطياف الإصدار الفلوري للأشعة السينية (XRF) و حيود الأشعة السينية (XRD) والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FT-IR).

أظهرت نتائج التحليلات المختلفة أن عينات الطين المأخوذ من حوض النيوجين لجيجل والسطارة، إضافة للطين المأخوذة من منطقة جيملة، تامنتوت و تارزوزت، تشكل تجمعات معدنية متنوعة مع وفرة من الكوارتز، الكالسييت، إضافة إلى نسب منخفضة من الدولوميت والفلسبار البوتاسي. الجزيئات الطينية تتشكل أساساً من الكاولينيت والإليت، مع نسب متفاوتة من الكلوريت، الفرمكوليت، السمكتيت والمتطابقات (10-14 Å) كطور ثانوي. النوعين الأولين من المعادن الطينية هي المسؤولة إلى حد كبير عن خصائص السيراميك المواتية للمواد الطينية موضوع الدراسة. الأكاسيد الأكثر وفرة هي SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 . كمية أكسيد الكالسيوم CaO في المواد الطينية لحوض النيوجين لجيجل والسطارة وفيرة جداً (0-17%). معدل أكسيد الحديد Fe_2O_3 ذو قيمة مقبولة و يتراوح ما بين 1-9%، الأكاسيد الأخرى تمثل نسب منخفضة (> 6%). من ناحية أخرى، تظهر الخصائص الفيزيائية توزع حبيبي دقيق، والذي يمكن تصنيفه في فئة الطين الرملية، مع ليونة متوسطة إلى عالية، وكتلة حجمية قليلة التغير لجميع العينات المدروسة.

الكاولين المعالج لمنطقة تامازير يتميز بتركيز عالي من المعادن الطينية إضافة إلى الكوارتز والفلسبار البوتاسي. الجزيئات الطينية تظهر نسب عالية من الكاولينيت إضافة إلى الإليت. عكس كاولين منطقة تامازير، التركيبة المعدنية للكاولين الخام لمنطقة العجاردة (الشقة) يتكون من الفلسبار الصودي (أليت) و البوتاسي (المكروكلين)، الميسكوفيت، الكوارتز و المعادن الطينية، و بكمية قليلة الكالسييت و الدولوميت. الأكاسيد الأكثر بروز في كاولين منطقة تامازير هي: SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و K_2O . بالنسبة لكاولين العجاردة (الشقة)، SiO_2 ، Al_2O_3 ، K_2O و Na_2O هي الأكاسيد الأبرز. كاولين منطقة تامازير ذو ليونة متوسطة إلى عالية، فقير من الحبيبات الرملية و الطمي. خلافاً لكاولين العجاردة المتوسط الليونة، و الغني بالحبيبات الرملية و الطمي و الفقير من الحبيبات الدقيقة. هذا الاختلاف مرتبط أساساً بكون كاولين منطقة تامازير تم تنقيته عبر المرور بمختلف مراحل التخصيب و التركيز. يعتبر كاولين منطقة العجاردة الأكثر قابلية على التشكيل بعكس كاولين منطقة تامازير.

الاختبارات التكنولوجية التي تمت على بلاط السيراميك التي تم طهيها في درجات حرارة تتراوح بين 800-1100 درجة مئوية، تبرز إعدادات طهي (انكماش خطي، امتصاص الماء و مقاومة للطي) مقبولة إلى حد كبير في إمكانية استخدام هذه المواد الطينية في صناعة منتجات من الطين (الطوب و القرميد). لكن وجود بعض التشققات الملاحظة على المنتجات النهائية انطلاقاً من 1000 درجة مئوية، ليست مواتية بالكاد لاستخدامها في حالتها، خاصة بالنسبة للمواد الطينية الكلسية. ويلاحظ أيضاً أن وجود الكبريتات بكميات قليلة في بعض عينات الطين الكلسية تؤدي بعد الطهي عند 1050 درجة مئوية، لتشكيل عقيدات بيضاء من كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) على سطح المنتجات.

أظهرت بعض المواد بعد الطهي انكماش خطي تجاوز 10% لدرجة حرارة 1100 درجة مئوية، وفقدان للوزن بحوالي 14% في المتوسط، إذا و من أجل تكيف جيد مع المعايير، يمكن التقليل من هذه الانكماشات بإضافة كمية مدروسة من الرمل أو استخدام خليط أو تركيبات من مواد طينية أخرى. مقاومة الطي تتراوح بين 6-10 ميغا باسكال لكاولين منطقة تامازير و العجاردة، تمثل عاملاً ملائماً من أجل إدراج هذه المواد في ميدان صناعة المنتجات الصحية وحتى بلاط الأرضيات.

الكلمات الدلالية : الجزائر، جيجل، الطين، كاولينيت، أليت، التركيبة المعدنية، سيراميك.

ABSTRACT

The wilaya of Jijel (NE Algeria) contains important clays deposits and kaolin, representing the raw material for the red and ceramics industry. The use of these clays in industrial applications depends on the knowledge of their physico-chemical, mineralogical and technological properties. A number of representative samples of these clay deposits have been analyzed for their physical (grain-size analysis, Atterberg limits, SEM, calcimetry of Bernard and density of solid particles), chemical (major elements by X-Ray Fluorescence) and mineralogical (X-Ray Diffraction, infrared spectroscopy) properties.

The results of various analyzes show that the clays of the Neogene basin of Jijel and Settara and the sub-numidian clays of Djimla-Tamentout and Tarzoust, contain diversified mineralogical assemblages with a certain abundance of quartz, calcite, associated with a small proportion dolomite, plagioclase and feldspar-K. The clay fraction is dominated by kaolinite and illite as the dominant phase, with varying proportions of chlorite, vermiculite, smectite and interstratified "10-14 Å" as accessory phases. The first two types of clay minerals are largely responsible for the favorable ceramic properties of the clay materials studied.

The most abundant oxides are SiO₂, Al₂O₃, CaO and Fe₂O₃. The amount of CaO in the clays of the Neogene basin of Jijel and Settara is very abundant (0–17%). The Fe₂O₃ content is appreciable and varies between 1–9%, the other oxides represent small proportions (<6%). Physical properties show a fine particle size, which classifies them in the group of sandy clays, with moderately plastics to plastics, and a little variable density for all the samples studied.

Treated kaolin of Tamazert is characterized by a concentration of clay minerals, quartz and feldspar-K. The clay fraction has a high content of kaolinite with illite. Contrary to the kaolin of Tamazert, the mineralogy of the raw kaolin of Adjarda is composed of feldspar sodium (albite) and potassium (microcline), muscovite, quartz, clay minerals and traces of calcite and dolomite. The most dominant oxides in Tamazert kaolin are: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ et K₂O. For Adjarda kaolin (Chekfa), SiO₂, Al₂O₃, K₂O and Na₂O are the most dominant oxides.

The Tamazert kaolin is medium plastic to plastic, poor in sandy fraction and rich in clay and silty fraction. In contrast, Adjarda kaolin is moderately plastic, rich in sandy and silty fraction and poor in fine clay fraction. This difference is related to the different enrichment processes performed on the Tamazert kaolin. The kaolins of Adjarda present a better aptitude for extrusion, contrary to Tamazert kaolin.

The technological tests carried out on tiles ceramic, firing in the range of 800–1100°C, presents a very favorable firing parameters (linear shrinkage, loss of weight, water absorption and flexural strength), for use of these clays in the manufacture of clay products (bricks and tiles). Nevertheless, the presence of cracks observed on the finished products from 1000°C, are hardly favorable for their use in the state especially for the clay-limestone. It is also noted that, the presence of sulphates in small quantities in a few carbonated samples, leads after firing at 1050°C, to the formation of white grains of calcium sulphate (CaSO₄) on the surface of the products.

Some firing products, showed a firing shrinkage above 10% at 1100°C, and weight losses of around 14% on average. So for a good adaptation to the norms, these shrinkages can be minimized by the addition of optimum amount of degreaser or by mixing or formulations with other clay materials. The flexural strengths between 6-10 MPa for the Tamazert and Adjarda kaolins are a favorable factor for the incorporation of these materials in the field of the manufacture sanitary products and even floor covering tiles.

Keywords: Algérie, Jijel, clay, kaolinite, illite, mineralogy, ceramic.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Résumé	ii
المخلص	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Introduction	1
2. Problématique et objectifs de l'étude.....	3
3. Plan de travail	4
Chapitre I. Synthèse bibliographique	6
I.1. Introduction.....	6
I.2. Définition, origine, structure et classification	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Origine des minéraux argileux	6
I.2.3. Minéralogie, structure et propriétés des minéraux argileux	8
I.2.4. Classification des argiles	9
I.3. Principaux usages des argiles : Application dans le domaine de la céramique.....	19
I.3.1. Exigences technologiques	21
I.3.2. Procédés de fabrication	25
I.3.3. Phénomènes de transformations physico-chimiques lors de la cuisson	26
I.3.4. Evolution de la texture des produits céramiques au cours de la cuisson.....	27
I.4. Conclusion	27
CHAPITRE II. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE. 29	
II.1. Introduction.....	29
II.2. Cadre naturel de la région d'étude	29
II.2.1. Plan de situation	29
II.2.2. Le relief.....	29
II.2.3. Aperçu climatique	30
II.2.4. Population	31
II.2.5. Végétation	31
II.2.6. L'hydrographie.....	32
II.2.7. Carte des pentes.....	32
II.3. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL	34
II.3.1. Introduction.....	34
II.3.2. Les grands ensembles structuraux des Maghrébides en Algérie	35
II.3.3. Aspect structural.....	41
II.4. CADRE GEOLOGIQUE LOCAL	43
II.4.1. Lithologie des formations de la partie occidentale du massif de la Petite Kabylie	43
II.5. Aspect structural.....	53
CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES D'ETUDES	54
III.1. Introduction	54
III.2. Les matériaux argileux étudiés	54
III.2.1. Matériaux argileux des bassins néogènes de Jijel et de Settara (marnes post-nappes).....	55
III.2.2. Matériaux argileux des formations sous-numidiennes	58
III.2.3. Kaolins de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa).....	61
III.3. Méthodes analytiques	65

III.3.1. Analyse minéralogique	66
III.3.2. Analyse chimique par Fluorescence X (XRF)	73
III.3.3. Mesure du taux des carbonates (calcimétrie)	74
III.3.4. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	75
III.3.5. Analyse granulométrique	76
III.3.6. Masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre à eau) NF P94-054.....	77
III.3.7. Limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	77
III.3.8. Essai au bleu de méthylène d'un sol (NF P94-068)	79
III.4. Essais céramique	79
III.4.1. Préparation de la matière première.....	80
III.4.2. Le façonnage.....	80
III.4.3. Le séchage	80
III.4.4. La cuisson	80
CHAPITRE IV. CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX ARGILEUX DE LA WILAYA DE JIJEL	85
IV.1. Introduction	85
IV.2. Matériaux argileux du bassin néogène de Jijel	85
IV.2.1. Etude minéralogique par DRX.....	85
IV.2.2. Spectroscopie infrarouge (FT-IR).....	88
IV.2.3. Composition Chimique.....	89
IV.2.4. Analyse granulométrique.....	90
IV.2.5. Evaluation de la plasticité.....	93
IV.2.6. Caractérisation morphologique.....	94
IV.2.7. Evaluation de l'aptitude des matériaux argileux étudiés aux applications industriels	95
IV.3. Matériaux argileux des sites de Djimla-Tamentout et Tarzoust (argiles sous-numidiennes)	99
IV.3.1. Etude minéralogique par DRX.....	99
IV.3.2. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR.....	101
IV.3.3. Composition Chimique.....	103
IV.3.4. Analyse granulométrique.....	104
IV.3.5. Evaluation de la plasticité.....	106
IV.3.6. Observation par microscope à balayage électronique « MEB »	109
IV.4. Matériaux argileux du site de Settara	110
IV.4.1. Composition minéralogie par DRX.....	111
IV.4.2. Composition chimique	113
IV.4.3. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR.....	115
IV.4.4. Analyse granulométrique.....	117
IV.4.5. Evaluation de la plasticité.....	119
IV.4.6. Examen et analyse des échantillons d'argile de Settara par microscopie électronique à balayage (MEB).....	121
IV.5. KAOLINS DES SITES DE TAMAZERT (EL-MILIA) ET D'ADJERDA (CHEKFA)	123
IV.5.1. Etude minéralogique par DRX.....	123
IV.5.2. Composition Chimique.....	126
IV.5.3. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR.....	128
IV.5.4. Analyse granulométrique.....	130
IV.5.5. Evaluation de la plasticité.....	132
IV.5.6. Observation et analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	134
IV.6. Conclusion.....	136
CHAPITRE V. ETUDE DES PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX ARGILEUX	139
V.1. Introduction.....	139
V.2. Fabrication des carreaux céramiques.....	139
V.3. Caractéristiques technologiques	140
V.3.1. Coloration des produits.....	140
V.3.2. Retrait linéaire à la cuisson	141
V.3.3. Perte en poids à la cuisson	144
V.3.4. Absorption d'eau.....	147

V.3.5. Masse volumique apparente.....	150
V.3.6. Résistance à la flexion	152
V.4. Minéralogie des carreaux après cuisson	155
V.4.1. Argiles non-carbonatées (de la région de Djimla et Tarzoust).....	157
V.4.2. Argiles riches en carbonate (argiles du bassin néogène de Jijel et de Settara).....	160
V.4.3. Les kaolins des gisements de Tamazert et Adjarda.....	164
V.5. Conclusion	167
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	169
1. Les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel et de Settara.....	169
2. Les matériaux argileux de Djimla-Tamentout et Tarzoust (argiles sous-numidiennes)	171
3. Kaolins des gisements de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa)	172
4. Secteurs de valorisation et perspectives.....	174
Références bibliographiques.....	177
Annexes	185

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Distribution géographique du processus d'altération en fonction de la latitude (Velde et Meunier, 2008).....	7
Figure 2: Influence de la nature de la roche-mère sur la composition des minéraux secondaires (Velde, 1992).....	8
Figure 3 : Assemblage tétraédrique et octaédrique (d'après Eslanger & Peaver 1988).....	9
Figure 4: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1	10
Figure 5: Structure d'un feuillet de kaolinite (Cyril, 2005).....	11
Figure 6: Structure de l'illite (Grim, 1962).....	12
Figure 7: Structure d'une smectite et DRX de lame orientée correspondant (Bleu : DRX sec à l'air, rouge : DRX après solvataion à l'éthylène glycol) (Caner, 2011).....	13
Figure 8: Différents états d'hydratation et de solvataion à l'éthylène glycol.....	14
Figure 9: Structure d'une chlorite et DRX de lame orientée correspondant. Les rapports d'intensité des raies 00l sont fonction de la teneur en fer du feuillet (Caner, 2011).....	15
Figure 10 : Structure de la chlorite (Grim, 1962).....	16
Figure 11: Différentes possibilités d'interstratification au sein des phyllosilicates.....	17
Figure 12: Variation des proportions de l'illite et de la smectite dans un interstratifié	18
Figure 13 : Domaines d'application des argiles.....	19
Figure 14: Secteurs d'application du kaolin.....	20
Figure 15: Carte de localisation de la zone d'étude.....	30
Figure 16: Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est Algérien	31
Figure 17 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Jijel.....	32
Figure 18 : Carte des classes de pentes de la wilaya de Jijel.....	33
Figure 19: Schéma géologique de la chaîne des Maghrébides (d'après Durand Delga,	34
Figure 20: Carte géologique de la petite Kabylie (Extrait de la carte structurale au 1/500 000 ^{ème} de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens, Vila, 1980).....	36
Figure 21: Carte géologique de la Wilaya de Jijel (Extrait de la carte structurale au 1/500 000 ^{ème} de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens, Vila, 1980).....	45
Figure 22: Photos illustrant les micro-plissements caractérisant le flysch massylien.....	48
Figure 23: Images illustrant l'aspect général des formations molassiques de l'Oligo-Miocène Kabyle.....	51
Figure 24: Carte de localisation de la zone d'étude et carte géologique (d'après Raoult, 1982).....	55
Figure 25: Vue panoramique des principaux dépôts d'argile du bassin néogène de Jijel. (A) Photo des dépôts marneux de la région d'Azaouan (Emir Abdelkader). (B) Photographie d'argiles gris-bleu de la région de Taher (Bordj el Koudia), site qui a fait l'objet d'une exploitation durant les années 80 comme matière première de fabrication de brique rouge (briqueterie).....	56
Figure 26: Colonne lithologique du flysch Numidien (d'après H. Djellit, 1987).....	59
Figure 27: Photos illustrant les affleurements des formations argileuses sous-numidiennes au niveau de la région de Djimla et Tamentout.....	60
Figure 28: Vue des trois corps, constituant le gisement de Tamazert.....	62
Figure 29: Images illustrant l'exploitation et le traitement du kaolin de Tamazert. a) Extraction du kaolin au niveau du corps central. b) Stockage du kaolin au niveau de l'usine pour traitement et d'enrichissement. ..	63
Figure 30: Processus d'enrichissement et de traitement du Kaolin de Tamazert (SOALKA).....	64
Figure 31: Schéma de la méthodologie utilisée.....	66
Figure 32: Schéma du principe de la diffraction des rayons X par une famille.....	67
Figure 33: Diffractomètre de type Bruker D8 Advance (AGEs, ULg).....	68
Figure 34: Schéma de préparation du matériau argileux pour analyse par DRX.....	69
Figure 35: Spectromètre de type Nicolet Nexus 538 FT-IR (Laboratoire de minéralogie.....	73

Figure 36: Microscopie Electronique à Balayage de type Philips XL-30 ESEM-FEG	75
Figure 37: Appareil de métallisation de type "SPI-Module Carbon Coaster"	76
Figure 38: Appareil de Casagrande (NF P-94-051).....	78
Figure 39: Système de chargement dans la mesure de la résistance à la flexion	84
Figure 40: Spectres de diffraction de rayon X : (A) Poudre totale des échantillons étudiés ; (B) Poudre totale échantillon T03 ; (C) fraction argileuse échantillon T03 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.....	87
Figure 41: Composition minéralogique des échantillons étudiés par diffraction des rayons X	88
Figure 42: Spectres infrarouges, obtenus sur les échantillons T03 et E04.....	89
Figure 43: Courbes granulométrique des échantillons T1, T3, H02, H03, E01, E03, K01et K03.....	92
Figure 44: Position des échantillons étudiés dans le diagramme ternaire de McManus (1988).....	93
Figure 45: Position des formations argileuses analysées sur le diagramme de	94
Figure 46: Planche illustrant une vue au MEB de l'argile de l'échantillon E02 (K : Kaolinite, I : Illite, Chlo : Chlorite, Is : Interstatifié).....	95
Figure 47: Position des matériaux argileux étudiés sur les diagrammes de classification des matériaux argileux étudiés. A: Composition minéralogique de la fraction argileuse, d'après le diagramme ternaire: kaolinite/illite/chlorite; B: Diagramme ternaire d'après Winkler (1954); C: Diagramme ternaire d'après Strazzer et al. (1997); D: Diagramme ternaire d'après Fiori et al. (1989); E: Evaluation du comportement à l'extrusion d'après Marsigli and Dondi (1997).	98
Figure 48: Spectres de diffraction de rayon X : (a) Poudre totale de l'échantillon étudiés D01 ; (b) fraction argileuse échantillon D01 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.	100
Figure 49: Spectres FT-IR représentatifs de l'échantillon D02 et M01.....	102
Figure 50: Position des échantillons argileux de Djimla-Tamentout et tarzoust sur le diagramme ternaire de Shepard (1954).	106
Figure 51: Position des échantillons de Djimla-Tamentout et de Boutias dans le diagramme.....	107
Figure 52: Corrélation de l'indice de plasticité et la valeur du bleu du méthylène (IP-VBS).....	108
Figure 53 : Evaluation de l'extrusion à partir des limites d'atterberg (Marsigli et Dondi, 1997).	109
Figure 54: Image MEB des échantillons argileux d'El-Milia (Tarzoust) M02 (a et b).....	110
Figure 55: Spectres de diffraction de rayon X : (A) Poudre totale de l'échantillon ST06 ; (B) fraction argileuse échantillon ST06 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traité avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.	113
Figure 56: Spectres FT-IR représentatifs de l'échantillon ST5 et S03.....	116
Figure 57: Répartition granulométrique des matériaux argileux des sites de Settara, selon le diagramme ternaire de Shepard (1954).	118
Figure 58: Position des échantillons argileux de Settara sur le diagramme de plasticité.....	119
Figure 59: Corrélation de l'indice de plasticité (IP) en fonction de la fraction < 2µm et de la valeur du bleu de méthylène (VBS) pour les sites 1 et 2 de Settara.	120
Figure 60: Evaluation de l'extrusion des échantillons de la région de Settara selon.....	121
Figure 61: Image MEB des échantillons argileux de Settara ST6 (a, b et c) et S02 (d, e et f).	122
Figure 62: Spectres de diffraction de rayon X de l'échantillon de kaolin KT3 (gisement de Tamazert) : (A) Poudre totale; (B) fraction argileuse avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.....	125
Figure 63 : Spectres de diffraction de rayon X de l'échantillon de kaolin C01 (gisement d'Adjarsa) : (A) Poudre totale; (B) fraction argileuse avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.....	126
Figure 64: Spectres FT-IR représentatifs des échantillons de Kaolin KT2, KT3.....	129
Figure 65: Répartition granulométrique des échantillons de kaolin de Tamazert et Adjarda	132

Figure 66: Position des échantillons de Kaolin (KT2, KT3, C01 et C02) de Tamazert et Adjarda dans le diagramme de plasticité (d'après Holtz et Kovacs, 1981).....	133
Figure 67: Evaluation de l'extrusion à partir des limites d'atterberg (Marsigli et Dondi, 1997).	134
Figure 68: Morphologie d'une kaolinite contenue dans l'échantillon de kaolin KT3 (Tamazert).	135
Figure 69: La morphologie d'une kaolinite contenue dans l'échantillon.....	136
Figure 70 : Coloration des carreaux céramiques après cuisson à température finale 1100°C.....	141
Figure 71 : Variation du retrait linéaire des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson. a : site du bassin néogène de Jijel ; b : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; c : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; d : site de Settara.	143
Figure 72 : Perte en poids des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson. a : site du bassin néogène de Jijel ; b : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; c : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; d : site de Settara.	146
Figure 73 : Résultats d'absorption d'eau des carreaux céramiques étudiés en fonction de la température de cuisson. a : échantillon du bassin néogène de Jijel ; b : échantillon de site de Djimla-Tamentout et Tarzoust ; c : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; d : échantillon site de Settara.	148
Figure 74 : Masse volumique apparente des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson des matériaux argileux étudiés. a : site du bassin néogène de Jijel ; b : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; c : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; d : site de Settara.	151
Figure 75 : Résultats de la résistance à la flexion des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson des matériaux argileux étudiés. a : argile du bassin néogène de Jijel ; b : site de Djimla-Tamentout et Tarzoust ; c : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; d : argile de Settara.....	154
Figure 76 : Transformations minéralogique des matériaux argileux de Tarzoust et Djimla (M01.....	158
Figure 77 : Les spectres de DRX des échantillons argileux M01 et D04 à différentes températures de cuisson (Q : quartz, K : kaolinite, I : illite, Cl : chlorite, P : plagioclase, FK : feldspath-K, Ph : phyllosilicates, Sp : spinelle, Cr : cristobalite, Di : diopside, R : rhodochrosite, Mu : mullite, H : hématite).	159
Figure 78 : Transformations minéralogiques des matériaux argileux du bassin néogène.....	161
Figure 79 : Spectres de la DRX des échantillons argileux des bassins néogène de Jijel et Settara (T01, S03 et H03) à différentes températures de cuisson (Q : quartz, K : kaolinite, I : illite, P : plagioclase, FK : feldspath-K, CO : chaux, Ph : phyllosilicates, Sp : spinelle, Cr : cristobalite, Di : diopside, G : géhlenite, Mu : mullite, H : hématite).	162
Figure 80 : Evolution de la silice dans les échantillons étudiés en fonction de l'évolution de la température, en nombre de coups (cps).....	163
Figure 81 : Spectres DRX des kaolins de Tamazert et Adjarda (KT3 et C02) à différentes températures de cuisson (Q : quartz, K : kaolinite, I : illite, M : muscovite, P : plagioclase, FK : feldspath-K, Ph : phyllosilicates, Sp : spinelle, Cr : cristobalite, Di : diopside, G : géhlenite, Mu : mullite, H : hématite).....	165
Figure 82: Transformations minéralogique des kaolins de Tamazert et Adjarda (KT3 et C02)	166

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des phyllosilicate 2:1 (McKenzie, 1975 et Brindley, 1966).....	16
Tableau 2: Principales espèces de minéraux argileux suivant leur équidistance basale.....	17
Tableau 3: Caractéristiques et utilisation des céramiques traditionnelles.....	21
Tableau 4 : Seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique.....	22
Tableau 5: Les principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile.....	23
Tableau 6: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique.....	24
Tableau 7: Statistiques relatives au facteur de pente.....	33
Tableau 8: Sites d'échantillonnage des matériaux argileux (bassin néogène de Jijel et Settara).....	57
Tableau 9 : Sites d'échantillonnage des matériaux argileux des argiles sous numidiennes.....	60
Tableau 10: Sites d'échantillonnage des Kaolins de Tamazert et Adjarda.....	65
Tableau 11: Position des raies (001 en Å) des principaux minéraux argileux.....	70
Tableau 12: Principaux minéraux déterminables dans les spectres des poudres (Thorez, 1976).....	71
Tableau 13: Composition minéralogique des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel.....	86
Tableau 14: Composition chimique, (en % en poids des oxydes) des matériaux argileux.....	91
Tableau 15: Distribution des particules solides, limites d'atterberg, pourcentage de CaCO ₃ et masse volumique des particules solides des échantillons étudiés.....	92
Tableau 16 : Composition minéralogique des matériaux argileux des sites de Tarzoust.....	99
Tableau 17: Positions des bandes IR des échantillons D02 et M01.....	103
Tableau 18: Composition chimique des matériaux argileux de Djimla-Tamentout.....	104
Tableau 19: Granulométrie, limites d'atterberg, valeur au bleu de méthylène (VBS) et masse volumique des particules solides des échantillons étudiés, des sites de Tarzoust et Djimla.....	105
Tableau 20: Composition minéralogique des matériaux argileux des deux sites de Settara.....	112
Tableau 21: Résultats des analyses chimiques des matériaux argileux des sites de Settara.....	114
Tableau 22: Positions des bandes IR et groupement fonctionnels correspondants observés pour les échantillons argileux ST5 et S03.....	117
Tableau 23: Granulométrie, limites d'atterberg et masse volumique des particules solides.....	118
Tableau 24: Composition minéralogique des kaolins des gisements de Tamazert.....	124
Tableau 25: Composition chimique, (en % en poids des oxydes) des kaolins de Tamazert.....	127
Tableau 26: Positions des bandes IR et groupement fonctionnels correspondants observés pour les kaolins étudiés (KT2, KT3 et C02).....	130
Tableau 27: Granulométrie, limites d'atterberg, valeur du bleu de méthylène et masse volumique des particules solides des échantillons de kaolins des gisements de Tamazert et d'Adjarda.....	131
Tableau 28 : Coloration des produits de cuisson en fonction de la température.....	140
Tableau 29 : Retrait à la cuisson des carreaux céramiques des différents matériaux argileux étudiés.....	144
Tableau 30 : Perte en poids à la cuisson des carreaux céramiques.....	147
Tableau 31 : Absorption d'eau des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.....	150
Tableau 32 : Masse volumique apparente des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.....	152
Tableau 33 : Résistance à la flexion des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.....	155
Tableau 34 : Liste et abréviation des minéraux primaires et néoformés, leurs formules chimiques et la valeur des pics caractéristiques par DRX.....	156

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

L'argile fut, pendant la préhistoire, le matériau le plus anciennement utilisé par l'homme. Elle est nécessaire pour la fabrication des objets utilisés dans la vie quotidienne. Du point de vue géologique, l'argile est une roche sédimentaire meuble, composée pour une large part de minéraux spécifiques, aluminosilicatés plus ou moins hydrates, eux-mêmes nommés argiles. Les argiles occupent une grande place dans la recherche scientifique. Elles peuvent donner des indications précieuses sur les milieux de dépôts et les paléoclimats (Duchaufour, 1984 ; Akodad, 1994). Les argiles, notamment celles qui sont riches en SiO_2 et Al_2O_3 , connaissent un nouvel essor dans la construction, la céramique industrielle et artisanale, l'industrie pharmaceutique et la poterie.

La majorité des produits céramiques sont fabriquées à base des matériaux argileux. Ils constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physico-chimiques sont très variables (Strazzera et al., 1997; Kabre et al., 1998; Celik, 2010; Ngun et al., 2011; Njoya et al., 2012). La qualité du produit céramique fini dépend de plusieurs paramètres qui sont liés principalement à la nature des matières premières utilisées et au comportement pendant les différentes étapes de la fabrication. La majorité des produits céramiques sont obtenus par frittage, généralement entre 900 et 1200°C.

L'étape du frittage est liée à la composition de la matière première, elle s'accompagne de transformations microstructurales des minéraux initiaux en fonction de la température et du temps de cuisson (Monteiro and Vieira, 2004; Djangang et al., 2008). Ces matériaux subissent des transformations physico-chimiques qui entraînent à la fois une modification de la structure cristalline des différentes phases (deshydroxylation, amorphisation, recristallisation, décarbonatation, etc.) et une modification de la microstructure du mélange (distribution et orientation des pores, grossissement des grains ou des cristaux, etc.). Ces transformations s'accompagnent aussi d'une modification des propriétés mécaniques (Jordan et al., 2008). Ce paramètre est important car les propriétés d'usage de nombreux matériaux céramiques issus de matières premières argileuses sont souvent liées à leur résistance mécanique en compression (briques, sanitaires, etc.) ou en flexion (tuiles, carreaux, vaisselle, etc.). Il s'agit de processus complexes, difficiles à appréhender en raison du caractère progressif et/ou transitoire de certaines transformations. L'étude et le suivi du frittage sont importants pour déterminer la température optimale pour atteindre la densification souhaitée. Actuellement, avec l'augmentation du prix de

l'énergie, la tendance des céramistes est de réduire au maximum la durée et la température du frittage des produits.

Dans la wilaya de Jijel, les terres cuites à base d'argile, sont essentiellement utilisées pour la confection des matériaux de construction traditionnelle et moderne (briques, tuiles, carreaux, sanitaire) ainsi que pour la confection de nombreux articles de poterie traditionnelle. La wilaya de Jijel présente d'importants réserves d'argile pouvant assurer totalement ou partiellement l'alimentation d'une industrie céramique.

En Algérie, la législation minière, notamment la loi de 1984 (Loi n° 84-06 du 7 janvier 1984 relative aux activités minières) maintenait la compétence pratiquement exclusive de l'état par l'intermédiaire de sociétés nationales publiques, pour toute activité de recherche ou d'exploitation. Elle excluait toute concession ou exploitation des gisements découverts à une entreprise étrangère même en cas d'association avec une entreprise publique. Le caractère quasiment monopolistique, restrictif et décourageant pour tout investisseur étranger selon la loi de 1984 a donc conduit le législateur algérien à l'abroger.

Pour conserver son patrimoine naturel exceptionnel et exploiter durablement ses ressources minérales, l'Algérie a publié, en janvier 2001, un nouveau code minier (Loi n° 01-10 du 03 juillet 2001 portant loi minière), qui vise d'une part, à attirer les investisseurs, et à limiter l'impact négatif des activités minières sur l'environnement. Il intervient dans un contexte de libéralisation de l'ensemble des activités économiques et industrielles avec la mise en place dans un délai maximum de deux années, de deux organes administratifs chargés d'accompagner la mise en œuvre de la loi minière à savoir : d'une part, l'Agence nationale du patrimoine minier (ANPM) chargée de la gestion des titres miniers, du cadastre minier et de la promotion de l'activité minière et, d'autre part, l'Agence nationale de la géologie et du contrôle minier (ANGCM) chargée du contrôle technique et de l'art minier et de la protection de l'environnement. Cette loi a été révisée en 2003, 2005, 2008 et 2014 avec la création de L'Agence Nationale des Activités Minières (ANAM).

Près de quinze ans après cette promulgation du code minier, on constate que la quasi-totalité des investissements des sociétés minières nationales ou multinationales œuvrant en Algérie est orientée vers les métaux de base et les substances minérales précieuses. La filière de la céramique, pourtant très prometteuse et qui utilise, comme matières premières, les substances minérales industrielles (peu exploitées et faiblement étudiées), compte parmi les secteurs les moins développés et/ou inexistant dans la majeure partie du pays.

Les travaux de recherche et de prospection sur les substances utiles en Algérie ont débuté en 1969. Durant cette période, les géologues de la firme BRGM ont mené des travaux de recherche et d'échantillonnage de la matière première pour céramique dans la partie Nord de l'Algérie du nord. Ainsi, une série d'indices a été mise en évidence sur le territoire de la wilaya de Jijel. D'autres substances ont fait l'objet des travaux de recherche et de prospection tels que :

- Prospection des kaolins de Tamazert (Mission Chinoise, 1967-1968)
- Réévaluation du gisement de kaolin de Tamazert (Sonarem, 1974-1976)
- Travaux de reconnaissance des matériaux de construction (Sonarem, 1977-1978)

Du point de vue géologique les principales formations argileuses de la région de Jijel qui présente un grand intérêt pratique dans l'industrie céramique sont :

- Les argiles marneuses du Burdigalien, formant le remplissage du bassin néogène de Jijel. Elles constituent, depuis longtemps, l'une des matières premières les plus recherchées pour les poteries traditionnelles et les briques
- Les argiles sous numidiennes, formant la base de la nappe numidienne, affleurant dans différents endroits de la région de Jijel (Mezghitane, Djimla, El Milia...).
- Le kaolin (argile blanche), résultant de l'altération chimique des intrusions de leucogranites, de lames d'orthoquartzites et des filons de pegmatites, intrudés dans les formations du socle Kabyle à l'exemple du gisement de Tamazert à El-Milia et celui d'Adjarda (Chekfa).

Ces différentes formations argileuses, caractérisées par une grande variation de composition minéralogique, offrent de grandes opportunités d'utilisation dans le domaine industriel (produits rouges, industrie céramique, papier... etc)

2. Problématique et objectifs de l'étude

Bien que la région de Jijel dispose d'un important potentiel en substances utiles, métalliques ou non métalliques, ces dernières n'ont pas été prises en considération par les différents plans de développement de la région. En effet, à l'instar de l'important gisement polymétallique (Pb-Zn-Cu) d'El Aouana et des concentrations de fer de la région de Sidi Marouf (SE de Jijel), la région de Jijel renferme d'importants dépôts d'argiles et des gisements de kaolin, représentant la matière première pour l'industrie des produits rouges et céramique. Cependant, l'utilisation de ces argiles reste tributaire d'études, pouvant mettre en relief leurs particularités sur le plan qualitatif et quantitatif.

Ce sujet de thèse constitue un apport scientifique important dans la connaissance et la caractérisation des substances minérales industrielles et plus particulièrement les matériaux argileux de la wilaya de Jijel. Le présent travail de thèse présente l'avantage de contribuer à la promotion et à la valorisation des matériaux locaux de construction tout en améliorant la qualité des céramiques artisanales et semi-industrielles et à inciter la création des Petites et Moyennes Entreprises (PME) dans la filière de la céramique.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont:

- Une meilleure identification des formations argileuses dans la wilaya de Jijel du point de vue génétique, minéralogique et gîtologique. Cette identification servira de support de base pour le lancement de nouveaux projets d'exploitation industrielle de matériaux argileux locaux ; ainsi que pour d'autres recherches.
- Une caractérisation des argiles comme matière première utilisé par les industriels, les artisans et les céramistes, ainsi que leurs aptitudes pour la fabrication des produits céramiques de grande diffusion.
- Une meilleure valorisation des ressources naturelles locales en vue de la production locale de matériaux céramiques de bonne qualité et de produits rouges dans la région de Jijel et ses environs. Cette valorisation constitue un des atouts importants du processus de développement local durable dans cette région.
- Etablir un diagnostic des défauts liés à l'utilisation de ces matières premières et/ou aux procédés de fabrication utilisés.
- Proposer des solutions en vue de réduire les défauts liés à la fois au séchage et à la cuisson et améliorer la qualité du produit fini.
- Limiter le cout énergétique de ces produits, par exemple en limitant les températures de cuisson à des degrés inférieurs à 1100°C.

3. Plan de travail

Pour mener à bien ce travail, deux démarches se sont avérées nécessaires, à savoir les travaux de terrain et les travaux de laboratoire. L'exploration, la description des affleurements et le prélèvement des échantillons représentatifs ont constitué les travaux de terrain. Les échantillons de matériaux prélevés du terrain ont été traités au laboratoire suivant les standards internationaux relatifs aux argiles pour matériaux de construction et de céramique. Ainsi, le travail effectué dans le cadre de cette thèse s'organise en cinq chapitres et est présenté comme suit.

Le premier chapitre a été consacré à des généralités, comportant une synthèse bibliographique sur les matériaux argileux et un rappel succinct de connaissances spécifiques sur les minéraux argileux, leur structure et leur classification ainsi, que leurs applications dans la fabrication des produits de terre cuite notamment les briques cuites, tuiles et la céramique. Le deuxième chapitre est une présentation succincte des cadres géographique et géologique de la zone d'étude. Le troisième a principalement porté sur la méthodologie utilisée sur le terrain et au laboratoire.

Le quatrième chapitre a été réservé à la caractérisation physico-chimique, minéralogique et géotechnique des matériaux argileux, dont une partie (matériaux argileux du bassin néogène de Jijel) a fait l'objet d'un article qui a été publié dans la revue internationale « *Applied Clay Science* ». Le cinquième chapitre a été consacré à l'étude des propriétés céramiques (technologiques) des produits cuits confectionnés à partir des matériaux argileux et cuits entre 800 et 1100 °C.

Enfin, une conclusion générale en guise de résumé des principaux résultats obtenus et la contribution de cette étude dans la caractérisation et la valorisation des argiles de la wilaya de Jijel dans le domaine de l'industrie céramique. Elle présente des perspectives pour une valorisation efficiente dans le domaine artisanal, industriel ou semi-industriel.

CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, seront présentées des généralités relatives à l'origine des minéraux argileux et à leurs propriétés (minéralogie, structure et classification), et leurs applications dans le domaine de la céramique, particulièrement la fabrication des produits de terre cuite.

I.2. Définition, origine, structure et classification

I.2.1. Définition

Le terme *ARGILE* trouve son origine dans le mot grec *ARGILOS* dérivé de *ARGOS* qui signifie blanc, puis sa traduction en latin : *ARGILLA*. Cette nomination par les anciens est semblable-t-elle due à la couleur du matériau utilisé en céramique. Actuellement, il n'existe pas de définition unique du terme argile. Le mot « argile » englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains ($< 2\mu\text{m}$) et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Pour les géologues (dictionnaire de géologie), une argile désigne soit un minéral argileux ou une roche composée pour l'essentiel de ces minéraux.

Une roche argileuse est une roche sédimentaire ou résiduelle meuble à grain très fin ($\leq 2\mu\text{m}$) contenant au moins 50 % de minéraux argileux, auxquels peuvent s'ajouter d'autres minéraux très divers, détritiques ou non, d'où des compositions très variées (dictionnaire de géologie). Ce sont des roches tendres et rayables à l'ongle, fragiles à l'état sec, faisant pâte avec l'eau, et durcissant à la cuisson. Les minéraux argileux proviennent majoritairement de l'altération de roche magmatique et/ou métamorphique plus rarement de roches sédimentaires et, après transport, donne des argiles détritiques (cas le plus fréquent). Leur transformation est en perpétuelle évolution sur des temps à l'échelle géologique, en passant d'un minéral argileux à un autre et en changeant ses propriétés initiales en fonction de l'environnement.

I.2.2. Origine des minéraux argileux

À l'origine de la formation des argiles, il y a l'action des conditions climatiques sur un relief (altération d'une roche préexistante) suivi de l'érosion (Millot, 1964) (Fig. 1). Cette action s'opère de façon mécanique (minéraux primaires) et/ou chimique (minéraux néoformés), et les produits résultant s'accumulent sur place sous forme de sol, ou sont transportés dans les bassins de sédimentation. Cette altération peut se faire :

- soit sur place (*in situ*) : dans ce cas l'argile obtenue est dite "argile primaire". Le plus souvent, elle est grossière (peu plastique) et présente les caractéristiques de la roche mère qui lui a donnée naissance (matériaux lithodépendants). On distingue deux processus d'altération : l'altération primaire résiduelle ou supergène (entre 5 et 25 °C de température) (Meunier, 2002) et l'altération hydrothermale (température supérieure à 50°C). Si l'argile résulte de la combinaison des ces deux processus d'altération, on parle alors de gisements primaires mixtes (Ekosse, 2010 ; Fernandez-Caliani et al., 2010) ;
- soit par transport (par l'eau ou le vent) suivi du dépôt ou sédimentation dans un environnement lacustre ou côtier (lac, lagune, estuaire...). L'argile obtenue est dite "secondaire".

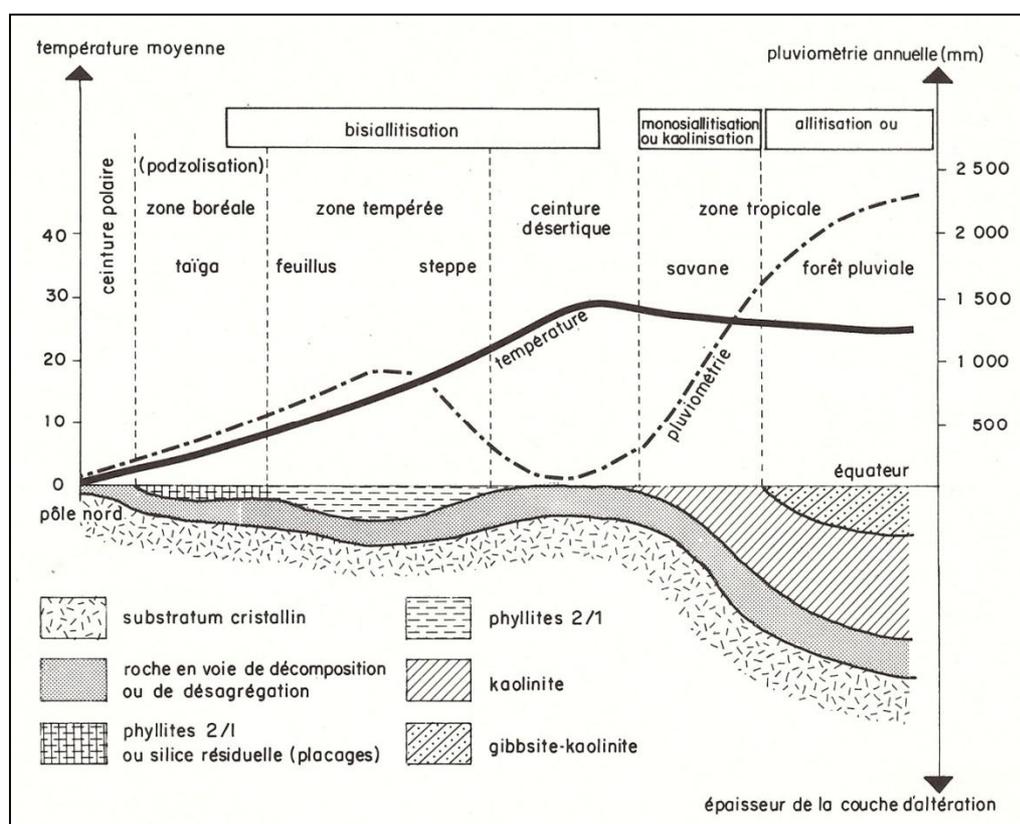


Figure 1 : Distribution géographique du processus d'altération en fonction de la latitude (Velde et Meunier, 2008).

Il est à noter que les propriétés et la composition des minéraux argileux diffèrent selon les conditions climatiques (héritage, néoformation et transformation), topographiques (allittisation, monosiallittisation et bisiallittisation) et la nature de la roche mère (acide ou basique) (Fig. 2). En milieu tropical chaud et humide se forme principalement la kaolinite sur roche acide (granite, rhyolite) et la smectite sur roche basique. Mais en climat tropical sec où le drainage est mauvais, la smectite peut se former par altération d'une roche acide comme le granite. La kaolinite résulte le

plus souvent de l'altération des feldspaths alors que l'illite et la chlorite sont les minéraux hérités provenant de l'altération des micas (biotite et muscovite). Les smectites quant à elles proviennent de l'altération des plagioclases. Les minéraux argileux sont en continuelle évolution minéralogique pour atteindre un état d'équilibre thermodynamique selon l'agent d'altération (Thorez, 2003).

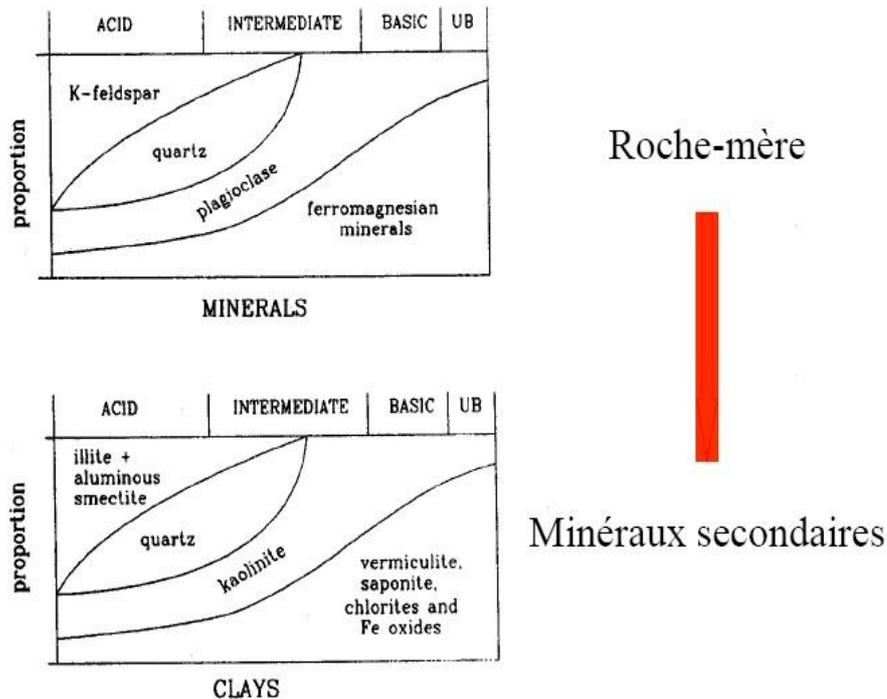


Figure 2: Influence de la nature de la roche-mère sur la composition des minéraux secondaires (Velde, 1992).

I.2.3. Minéralogie, structure et propriétés des minéraux argileux

Les minéraux argileux appartiennent à la famille des phyllosilicates ou communément appelés « silicates en feuillets ». Leur structure est un empilement de couches tétraédriques essentiellement siliciques et octaédriques essentiellement aluminiques qui forme les feuillets. Entre eux s'insèrent divers cations, tels que K^+ , Ca^{2+} , Na^+ plus ou moins hydratés, ou une couche d'oxyde de Mg^{2+} ou d' Al^{3+} formant une couche interfoliaire.

- Les couches tétraédriques (coordinance 4) sont composées par le motif élémentaire tétraédrique comportant un atome de silicium (SiO_4)⁴⁻ central et des atomes d'oxygène aux quatre sommets (trois planaires et un apical) (Fig. 3a). Par mise en commun d'atomes d'oxygène situés dans un même plan, on constitue un réseau-plan à maille hexagonale (Fig. 3b).
- Les couches octaédriques (coordinance 6) sont formées par des octaèdres (Fig. 3c) jointifs dont

les sommets sont soit des oxygènes soit des hydroxyles (OH) (Caillère et al, 1982). Ces anions sont liés à un cation central trivalent (Al^{3+} , Fe^{3+}) ou bivalent (Fe^{2+} , Mg^{2+}) (Fig. 3d). Si tous les sites octaédriques sont occupés, principalement par les cations bivalents, chaque anion est partagé entre trois octaèdres voisins. La couche est dite trioctaédrique. Si les cations des octaèdres sont principalement trivalents, deux sites sur trois sont occupés ; chaque anion est partagé entre deux octaèdres voisins. La couche est dite dioctaédrique.

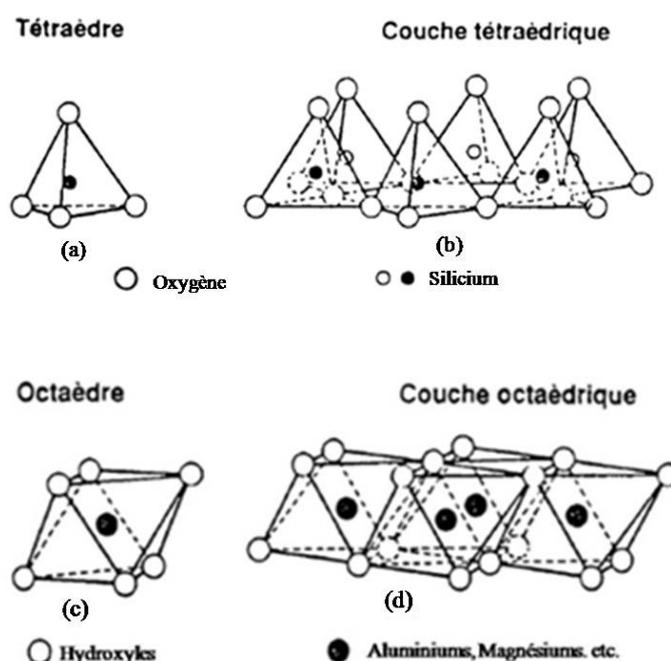


Figure 3 : Assemblage tétraédrique et octaédrique (d'après Eslanger & Peaver 1988).

Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques ($\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$, Fe^{3+}) et/ou octaédrique ($\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} , ou $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Li}^+$). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet au plus près par la charge du remplissage interfoliaire, soit par des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+),

I.2.4. Classification des argiles

Les phyllosilicates sont distinguées par le nombre de couches mises en commun dans le feuillet élémentaire et par la façon dont ces feuillets s'empilent (Fig.4). L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Les premières classifications, établie par l'A.I.P.E.A (Comité International de Classification et de Nomenclature des Minéraux argileux) (1966-1972), sont basées essentiellement sur la charge du feuillet, le nombre d'atomes et la localisation des substitutions, leur distribution et le type de cations compensateurs (Mering et Pedro, 1969).

Le Tableau 1 présente une classification déduite des travaux de Brindley (1966) et Mc Kenzie (1975) qui donne la valeur de la charge permanente du feuillet qui a servi comme critère pour établir une classification des phyllosilicates 2:1.

La classification la plus classique des minéraux argileux est basée sur l'épaisseur et l'agencement des couches tétraédriques et octaédriques de la structure du feuillet (espace interfoliaire) (Tab. 2). On distingue ainsi quatre groupes de minéraux (Jozja, 2003) :

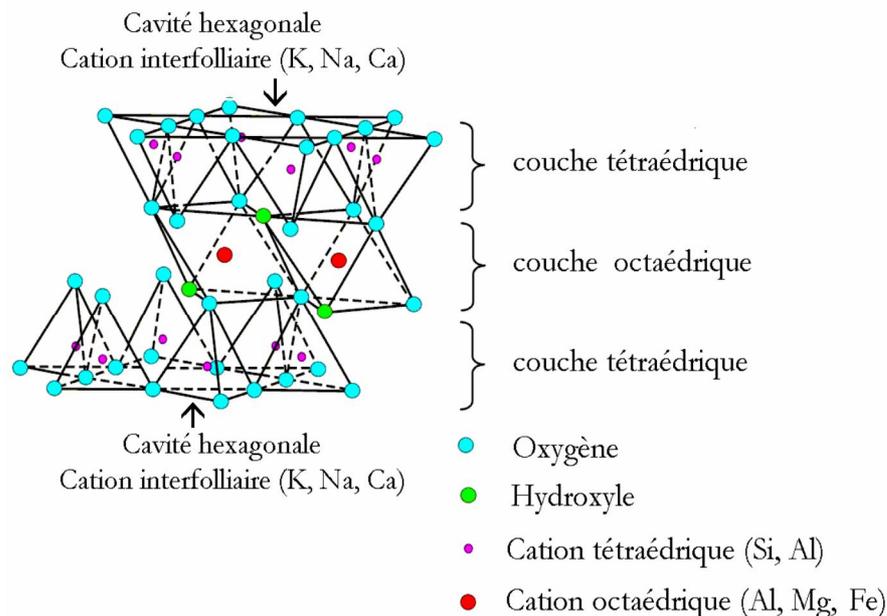


Figure 4: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1
(D'après Luckham et Rossi, 1999)

- Minéraux à 7 Å : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1. Son épaisseur est d'environ 7 Å.
- Minéraux à 10 Å : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1. Son épaisseur est variable entre 9 et 15 Å, suivant le remplissage ou non de l'espace interfoliaire.
- Minéraux à 14 Å : Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires. Il est qualifié de T:O:T:O ou de type 2:1:1. L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ ;
- Minéraux interstratifiés : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

I.2.4.1. Les minéraux à 7 Å (1:1 ou T-O)

La maille des phyllosilicates 1:1 contient 4 octaèdres occupés par Al^{3+} et par 4 tétraèdres occupés par Si^{4+} (Fig. 04). La majeure partie des phyllosilicates 1:1 rencontrés dans les sols sont dioctaédriques avec de l'aluminium en position octaédrique. Ces minéraux appartiennent à la famille des kaolinites dont la formule est $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8$.

Le feuillet de kaolinite est neutre car la charge négative de la charpente anionique est entièrement compensée par la charge positive des cations tétraédriques et octaédriques. Cette famille regroupe les kaolinites et les halloysites. La distance inter-réticulaire (d_{001}) de la kaolinite est de 7,15 Å (Fig. 5). Elle ne varie pas par hydratation ou solvataion à l'éthylène glycol. La structure et la composition chimique de l'halloysite est similaire à celle de la kaolinite, cependant une couche d'eau est présente dans l'espace interfoliaire (Churchman & Carr, 1975, Joussein et al., 2005).

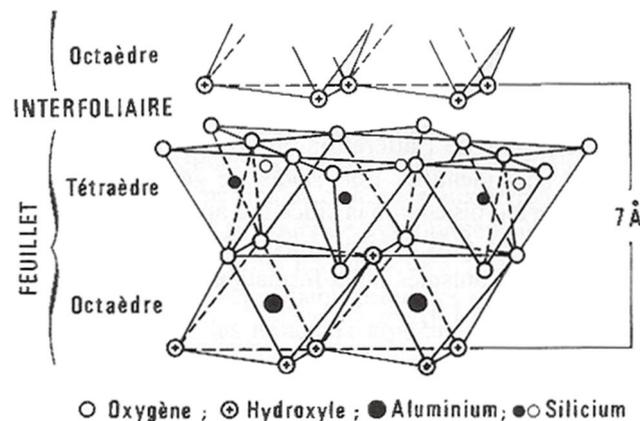


Figure 5: Structure d'un feuillet de kaolinite (Cyril, 2005).

La Halloysite est formée de feuillets de kaolinite séparés par des couches d'eau. La distance du grand espacement réticulaire devient 10Å, mais par chauffage, l'eau peut être chassée et on retrouvera celle de la kaolinite 7,2 Å. Cette halloysite déshydratée s'appelle la métahalloysite. Au microscope électronique, l'halloysite présente souvent l'aspect de tubes qui sont dus à l'enroulement des feuillets.

I.2.4.2. Les minéraux à 10 Å (2:1 ou T-O-T)

La charge négative de la charpente anionique du feuillet 2:1 peut être totalement compensée par les cations tétraédriques et octaédriques (Fig. 6). Les minéraux 2:1 à feuillet neutre sont

principalement des minéraux de haute température et sont peu communs dans les sols, la pyrophyllite $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Al}_4(\text{OH})_4$ pour le pôle dioctaédrique et le talc $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Mg}_6(\text{OH})_4$ pour le pôle trioctaédrique. La distance inter réticulaire (d_{001}) de la pyrophyllite est de 9,2 Å et celle du talc 9,35Å.

Cependant la plupart des phyllosilicates 2:1 rencontrés dans les sols présentent des substitutions cationiques dans les tétraèdres et les octaèdres. Dans les tétraèdres les principaux cations rencontrés sont Si^{4+} et Al^{3+} et parfois Fe^{3+} . Les substitutions octaédriques correspondent au remplacement d'un cation trivalent (R^{3+} ex. Al^{3+}) par un cation bivalent (R^{2+} ex. Mg^{2+}). Les possibilités de substitutions en couche octaédrique sont plus importantes (Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , ...) du fait de la plus grande taille de l'octaèdre. Les substitutions entraînent un excès de charges négatives du feuillet qui n'est pas compensé par les cations octaédriques et tétraédriques mais par une couche de cations interfoliaires qui peuvent se trouver sous forme de cations libres ou d'une couche octaédrique en position interfoliaire. Selon la charge du feuillet on différencie plusieurs types de minéraux.

➤ ***L'illite*** $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$

Les illites appartiennent à la famille des phyllosilicates 2:1. Le feuillet élémentaire est composé d'une couche octaédrique d'aluminium comprise entre deux couches tétraédriques de silicium (Fig. 6). Dans les couches tétraédriques de silicium un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé dans l'espace interfoliaire par des ions potassium K^+ qui assurent des liaisons fortes entre les feuillets.

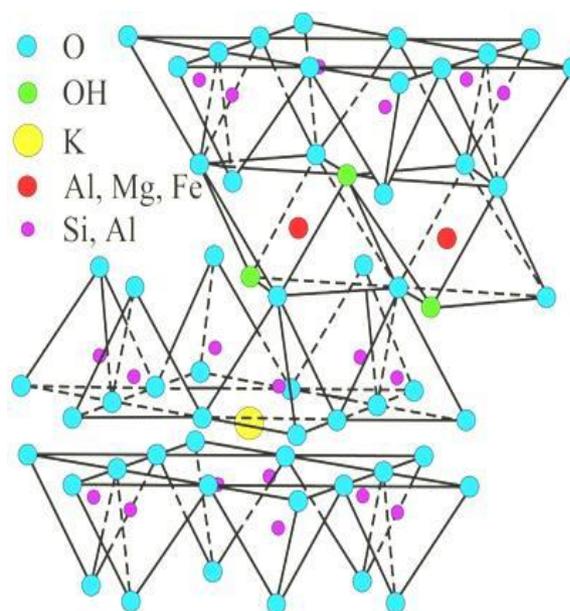


Figure 6: Structure de l'illite (Grim, 1962).

➤ *Les smectites*

Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite. La charge élevée de ces argiles est due pour l'essentiel à des substitutions isomorphiques. Les smectites ont, de par leur structure, la nécessité d'équilibrer leur charge dans l'espace interfoliaire par l'insertion de cations (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ou Na^+) dans cet espace. Des cations compensateurs viennent alors se placer dans l'espace interfoliaire pour combler le déficit de charge. Ces argiles ont une capacité d'échange cationique élevée. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace interfoliaire et le degré d'hydratation dépend de la nature du cation hydraté et de l'humidité relative (Fig. 7).

La distance inter réticulaire des smectites, dont le cation interfoliaire est le calcium, est comprise entre 9,8 Å (0 couche d'eau), 12,5 Å (1 couche d'eau) et 15,2 Å (2 couches d'eau) en fonction de l'humidité ambiante (Fig. 8). En présence d'éthylène glycol ces minéraux gonflent à 13,5 Å (1 couche EG) et 17,0 Å (2 couches EG) (Ferrage, 2004, Ferrage et al., 2005a,b, 2007). Cette possibilité de « gonflement » des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme d'« argiles gonflantes ».

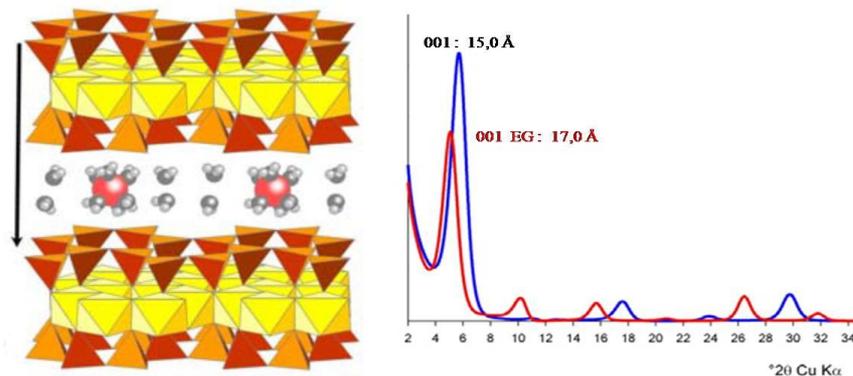


Figure 7: Structure d'une smectite et DRX de lame orientée correspondant (Bleu : DRX sec à l'air, rouge : DRX après solvatisation à l'éthylène glycol) (Caner, 2011).

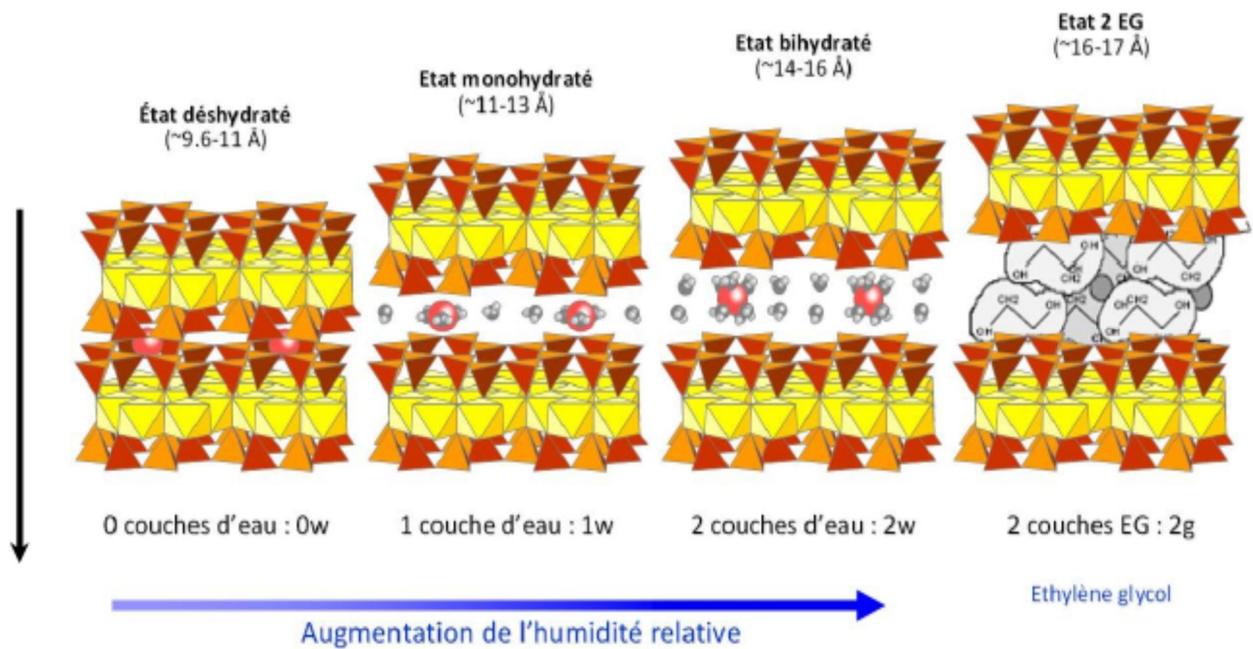


Figure 8: Différents états d'hydratation et de solvation à l'éthylène glycol d'une smectite (Caner, 2011).

➤ **Les vermiculites**

Les vermiculites appartiennent à la famille des phyllosilicates 2:1. Elles constituent une famille proche de celle des smectites, mais elles sont caractérisées par un déficit de charge plus important (charge comprise entre -0,6 et -0,7). Le déficit de charge est essentiellement dû aux substitutions tétraédriques et la compensation est assurée dans l'espace interfoliaire par des cations (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ou Na^+) et des couches d'eau. Le feuillet de vermiculite « haute charge » est théoriquement un feuillet non expansible après solvation à l'éthylène glycol. La distance inter-réticulaire des vermiculites est de 14,5 Å. Les vermiculites dioctaédriques résultent généralement de l'altération des micas (illite ou muscovite) et sont abondantes dans les sols. Les vermiculites trioctaédriques sont plutôt issues de l'altération des chlorites.

I.2.4.3. Les minéraux à 14 Å (2:1:1 ou T-O-T-O)

Pour ce groupe de phyllosilicates une couche octaédrique interfoliaire, qui ne partage pas de sommets (liaisons ioniques) avec les couches tétraédriques des feuillets 2:1 qui l'entourent, neutralise les charges du feuillet 2:1. Ces phyllosilicates correspondent aux feuillets 2:1:1. La couche octaédrique additionnelle peut être dioctaédrique $[Al(OH)_3]$ et dite gibbsitique ou trioctaédrique $[Mg(OH)_2]$ et dite brucitique.

La famille des minéraux 2:1:1 dans les sols est celle des chlorites et des intergrades hydroxyalumineux. Le feuillet 2:1 des chlorites est similaire à celui des minéraux 2:1 précédemment décrits et présente une gamme de charge variable suite à la substitution de Si^{4+} par Al^{3+} dans les tétraèdres. La couche octaédrique interfoliaire n'est pas échangeable et empêche l'expansion de l'espace interfoliaire, de ce fait la distance basale des chlorites est de 14,2 Å (Fig. 9).

➤ **Les chlorites $(\text{OH})_4 (\text{Si Al})_8 (\text{Mg, Fe})_6 \text{O}_{20}$**

L'espace interfoliaire des chlorites est occupé par un feuillet d'hydroxydes chargé positivement, à structure de brucite ou de gibbsite (Fig. 9 et 10). L'espace basal caractéristique atteint 14Å. Les chlorites sont stables à haute température. Leur stabilité thermique accrue par rapport aux vermiculites s'explique par la liaison forte, existant entre les hydroxyles.

Les chlorites présentent des chimies complexes suite aux nombreuses substitutions. Leur composition ressemble à celle des serpentines mais leur structure est complètement différente. Leurs origines sont variées : héritées de roches métamorphiques, formées par altération hydrothermale.

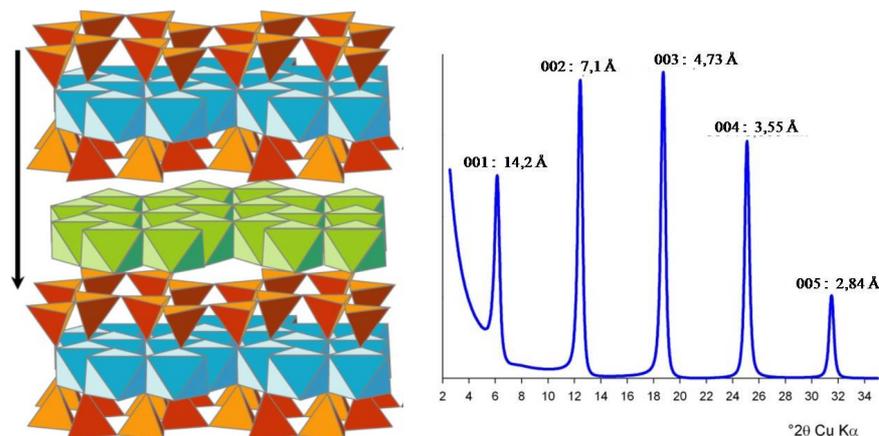


Figure 9: Structure d'une chlorite et DRX de lame orientée correspondant. Les rapports d'intensité des raies 00ℓ sont fonction de la teneur en fer du feuillet (Caner, 2011).

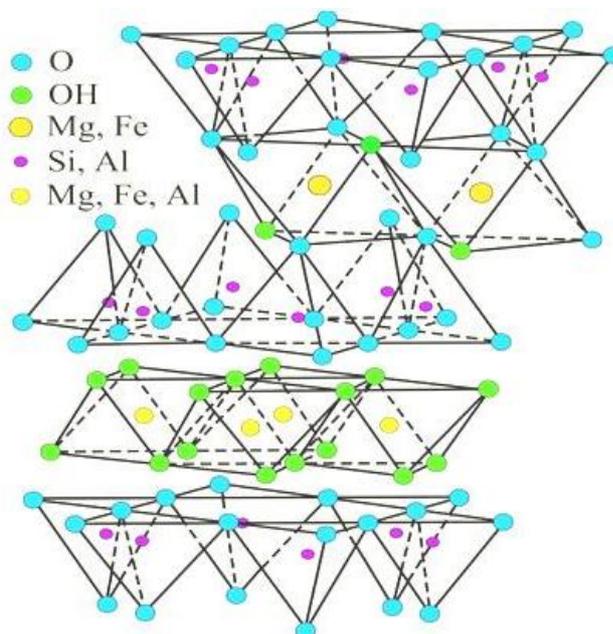


Figure 10 : Structure de la chlorite (Grim, 1962).

Tableau 1: Classification des phyllosilicate 2:1 (McKenzie, 1975 et Brindley, 1996).

Feuillet	Charge Par maille	Diocatédrigue	Trioctatédrigue	
1:1	0	Kaolinite (Si ₄)(Al ₄)O ₁₀ (OH) ₈	Antigorite (Si ₄)(Mg ₃)O ₁₀ (OH) ₈	
	≠ 0		Berthierines (Si _{4-x} Al _x)(Mg ⁺² _{6-x} M ⁺³ _x)O ₁₀ (OH) ₈	
	≠ 0	Pyrophyllite (Si ₄)(Al ₄)O ₁₀ (OH) ₈	Talc (Si ₈)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄	
SMECTITES				
2:1	0.4 à 1.2	Montmorillonite (Si ₈)(Al _{4-y} Mg _y)O ₂₀ (OH) ₄ , M ⁺ _y	Hectorite (Si ₈)(Mg _{6-y} Li _y)O ₂₀ (OH) ₄ M ⁺ _y	
	1.2	Beidellite (Si _{8-x} Al _x)Al ₄ O ₂₀ (OH) ₄ , M _x ⁺	Saponite (Si _{8-x} Al _x)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄ , M _x ⁺	
	1.2 à 1.8	Illites (Si _{8-x} Al _x)(Al _{4-y} M ⁺² _y)O ₂₀ (OH) ₄ K ⁺ _{x+y}	Vermiculites (Si _{8-x} Al _x)(Mg _{6-y} M ⁺³ _y)O ₂₀ (OH) ₄ K ⁺ _{x-y}	
	Micas			
	2	Muscovite (Si ₆ Al ₂)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ , K ₂ ⁺	Phlogopite (Si ₆ Al ₂)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ , K ₂ ⁺	
4	Margarite (Si ₄ Al ₄)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ , Ca ₂ ⁺²	Clintonite (Si ₄ Al ₄)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ , Ca ₂ ⁺²		

Tableau 2: Principales espèces de minéraux argileux suivant leur équidistance basale.

1:1	sans interfoliaire	Kaolinite	d(001)	7.1 Å
	avec interfoliaire (H ₂ O)	Halloysite	d(001)	10.1 Å
2:1	sans interfoliaire Talc	Pyrophyllite	d(001)	9.2 Å - 9.3 Å
	avec interfoliaire (cations)	Illite, Micas	d(001)	10Å
	avec interfoliaire (cations + eau)	Vermiculite, Smectite	d(001)	14Å-15Å
2:1:1	avec interfoliaire (couche d'oxyde)	Chlorite	d(001)	14Å

I.2.4.4. Les minéraux interstratifiés

Ce terme désigne les minéraux formés par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de minéraux argileux simples. Les minéraux argileux interstratifiés reconnus dans les sols sont composés de l'empilement d'au moins deux types de feuillets 1:1/2:1, 2:1/2:1, 2:1/2:1:1 (Fig. 11), ils sont fréquemment rencontrés dans les sols et les séquences d'altération de phyllosilicates primaires. Trois grands facteurs gouvernent la nature des interstratifiés, notamment : le type de feuillets associés, leur proportion, leur mode d'interstratification. On distingue deux grands groupes : les interstratifiés réguliers et les interstratifiés irréguliers.

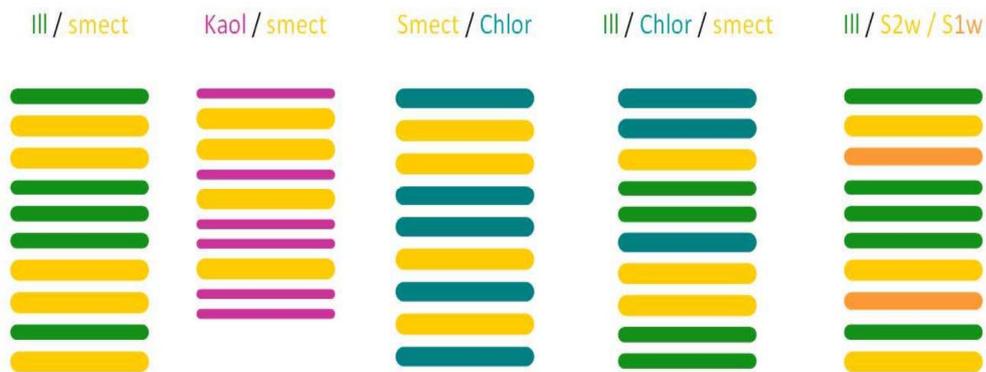


Figure 11: Différentes possibilités d'interstratification au sein des phyllosilicates avec deux ou trois composants (Caner, 2011).

➤ Les minéraux interstratifiés réguliers

Les interstratifiés réguliers présentent une structure, correspondant à la succession régulière des deux types de feuillets, identifiable en DRX lorsqu'ils s'approchent de la régularité. S'ils

comportent deux feuillets élémentaires de composition différente (ex : illite 10Å et smectite 15,2Å), la régularité signifie que la composition est proche de 50% illite - 50% smectite. La réflexion de premier ordre, correspond à la somme des deux équidistances naturelles des minéraux qui composent l'édifice interstratifiés [$d_{IS(001)} = d_{I(001)} + d_{S(001)}$]. Dans ce cas, le pic de diffraction d_{001} correspond à la somme des deux feuillets (25,2 Å) et réflexions suivantes correspondent aux harmoniques successives de cette réflexion $d(001)$.

➤ Les minéraux interstratifiés irréguliers

Un minéral interstratifié est dit irrégulier si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire s'il n'existe aucune séquences répétitive dans le réseau et si aucune loi ne gouverne l'alternance. Dans ces conditions, chaque feuillet diffracte de façon indépendante. La seule réflexion basale (habituellement la (d_{002})) est directement liée au taux d'interstratification des deux composants. Les diffractogrammes des interstratifiés sont très différents des espèces simples qui les constituent et dépendent de la nature, de la proportion (Fig. 12) et des séquences d'empilement des différents feuillets.



Figure 12: Variation des proportions de l'illite et de la smectite dans un interstratifié illite/smectite (Caner, 2011)

Les minéraux argileux interstratifiés à deux composants les plus couramment décrits dans les sols sont :

- Illite/smectite (I/S) et kaolinite/smectite (K/S) qui correspondent à l'empilement de deux espèces dioctaédriques.
- Mica (biotite)/vermiculite ; chlorite/vermiculite et chlorite/smectite qui correspondent à des espèces trioctaédriques ou di/trioctaédriques. Les interstratifiés mica/vermiculite et chlorite/vermiculite sont en général ordonnés. Ils se forment par l'altération de phyllosilicates préexistants comme la biotite dans les roches cristallines (Wilson, 1966, 2004, Banfield & Eggleton, 1990, Meunier, 2005).

I.2.4.5. Les minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux

Ces minéraux appartiennent à la famille de la sépiolite ou de la palygorskyte. Leurs structures ont des caractères communs avec celles des phyllosilicates, car leur faciès fibreux résulte d'une discontinuité du feuillet dans le sens de la largeur. Les couches T sont continues et constituées de tétraèdres qui n'ont pas tous la même disposition (Duchaufour, 1984). Les couches octaédriques, elles, sont discontinues. Cette rupture donne naissance à des lacunes qui forment des canaux structuraux entre des rubans. La largeur de ces rubans est caractéristique de chaque famille.

I.3. Principaux usages des argiles : Application dans le domaine de la céramique

Les principales propriétés des argiles entraînent leur utilisation dans plusieurs domaines industriels (Fig.13) (Murray, 1991 ; Murray and Keller, 1993 ; Konta, 1995 ; Harvey and Murray, 1997 ; Murray, 2000) parmi lesquels se trouve l'industrie céramique.

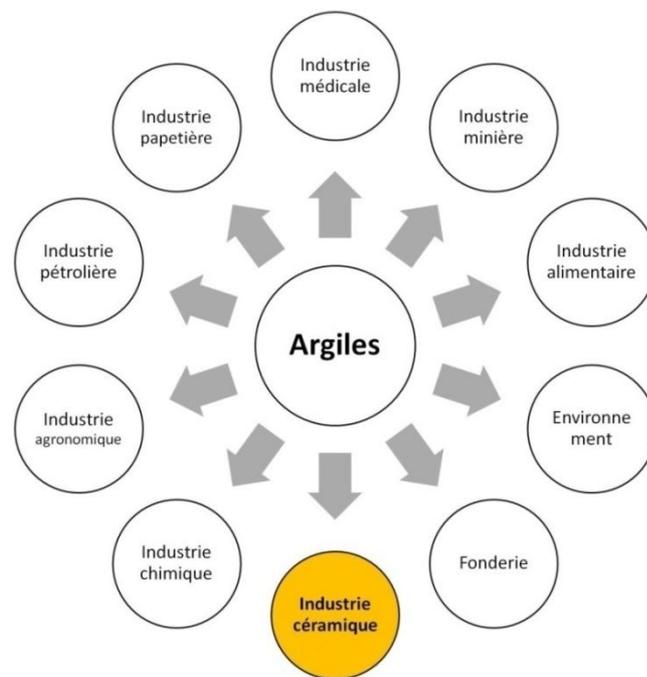


Figure 13 : Domaines d'application des argiles.

Le terme céramique est dérivé du mot « keramos » qui signifie « terre cuite » et s'emploie pour désigner les matières utilisées dans l'industrie de la poterie. Traditionnellement, les différents secteurs de la céramique se classent en deux groupes : le groupe de la céramique « grossière » ou « de construction » qui comprend les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée et le groupe de la « céramique fine » ou de la « céramique traditionnelle et industrielle », qui regroupe les secteurs des carreaux pour sols et murs,

des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques (Fig. 14).

Cependant, le terme « terres cuites » est de plus en plus utilisé pour désigner les briques et les tuiles à base d'argiles et lesquelles servent de matériaux dans de nombreuses branches du bâtiment et de la construction. Le plus souvent, les briques et les tuiles ont une appellation qui désigne non pas la technique de façonnage utilisée, mais l'usage auquel elles sont destinées : briques de parement, de pavage, (pleines, perforées ou creuses) ou de cheminées et des tuiles extrudées ou pressées.

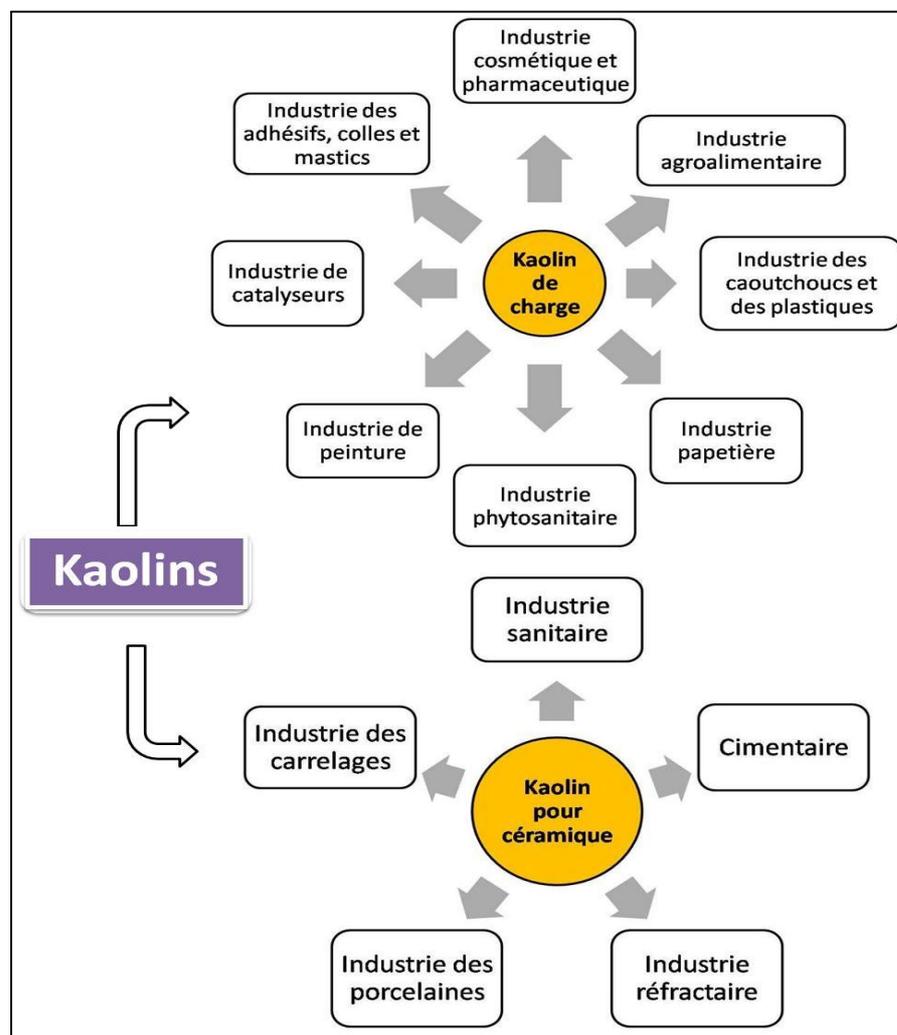


Figure 14: Secteurs d'application du kaolin

Les céramiques traditionnelles ou silicatées sont des produits obtenus à partir de mélanges, constitués de matières minérales pulvérulentes à base d'argiles et/ou de la chamotte. Les argiles les plus utilisées dans la fabrication de ces produits céramiques (Tab.3) sont généralement regroupées

en quatre types qui sont (GALTIER L. et al., 1992 ; ELFIL H. et al., 1995 ; BAÏLON J.P., DORLOT J.M., 2000 ; PIALY P., 2009) :

- les argiles grésantes (exemple illito-kaolinitique) ;
- les argiles pour produits blancs (exemple la kaolinite, avec teneur en Fe_2O_3 inférieure à 1%) ;
- les argiles réfractaires (exemple la kaolinite : Al_2O_3 supérieure à 25%) ;
- les argiles pour terre cuite et faïence (kaolinite, illite, et autres : $TiO_2 + Fe_2O_3$ supérieure à 3%).

Tableau 3: Caractéristiques et utilisation des céramiques traditionnelles.

Type	Caractéristiques générales	Exemples d'utilisation
Terres cuites	Porosité : 15-30 % Émaillées ou non Opaques et colorées	Briques, tuiles, conduits de fumés, tuyaux de drainage, revêtement de sols et de murs, poteries culinaires et ornementales
Faïences	Porosité : 10-15 % Surface émaillée, opaques et peu colorées	Equipements sanitaires, vaisselles, carrelage (mur et sol), pièces de décoration
Grès	Porosité : 0,5-3 % Surface vitrifiée ; Blanchâtres ou colorés ; Grains fins à grossier ; opaque.	Carreaux de sols, tuyaux, appareils de chimie et équipements sanitaires.
Porcelaines	Porosité : 0-2 % ; Surface vitrifiée ou non ; Translucides et blanches ;	Vaisselle, appareils de chimie et isolateurs électriques.
Vitreous	Peu poreuses et non Translucides	Vaisselle, articles culinaires et sanitaires.

I.3.1. Exigences technologiques

L'aptitude des matériaux argileux pour une éventuelle utilisation dans la fabrication de produits céramiques est fonction de la composition minéralogique, chimique et des propriétés physiques. Ces facteurs vont déterminer le comportement du mélange argileux lors du façonnage ou moulage, séchage et cuisson.

I.3.1.1. La granulométrie

L'étude granulométrique d'un matériau naturel, terre ou sol, devant servir dans le secteur de la céramique est d'une importance capitale car c'est d'elle que dépendent grandement les caractéristiques des produits finis qui en dérivent. La composition granulométrique des argiles

intervient donc pour une part importante sur leurs aptitudes au façonnage, au séchage et à la cuisson.

En effet, la terre (ou un sol donné) est constituée, généralement, par des mélanges en proportions variables de quatre fractions : graviers, sables, limons et argiles (CERATEC, 1987). Le tableau 4 présente la composition granulométrique idéale de la terre et les limites recommandées pour une stabilisation adéquate et l'obtention de produits finis de qualité acceptable (EL YAKOUBI N. et al., 2006 ; Wetshondo, O., 2012, El ouahabi, M., 2013).

Tableau 4 : Seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique
(Wetshondo Osomba, 2012).

Produits finis	Fractions granulométrique	Stabilisants (principaux)
Briques crues stabilisées	15% argile et limon 30 % sable fin 30 % sable grossier 25 % gravier fin	Ciments (4-6% ou 8%)
	35% argile et limon 25 % sable fin 25 % sable grossier 15 % gravier fin	Chaux (5-8% ou 12%)
Briques cuites	40% argile	-
Tuiles	40% argile ou 70% sable (0,2-0,5 mm)	-
Céramique fine	Diamètre (d) < 50µm	-

I.3.1.2. La composition chimique et minéralogique

La composition minéralogique de l'argile peut avoir certaines conséquences sur les propriétés du produit final et sur le procédé de fabrication. Le tableau 5 présente les principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile.

La composition chimique et les proportions des éléments chimiques des argiles jouent un rôle primordial dans la qualité des produits finis. Parmi les éléments indésirables dans la matière première, surtout si celle-ci est destinée à la production des briques et tuiles, on peut citer notamment:

- la craie en gros grains qui se transforme après cuisson en chaux vive; ces nodules font éclater le produit en présence de l'humidité ;
- les sulfates qui cristallisent en surface, diminuent de volume a la cuisson et déforment la surface des produits finis suite à l'échappement du gaz sulfurique;
- la matière organique qui brule a la cuisson, laissant des vides dans la masse et créant des produits poreux et des taches sombres.

Les limites admissibles d'utilisation des matières premières argileuses en céramique sont données dans le tableau 6.

Tableau 5: Les principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile
(Kornmann, 2005).

Minéral	Plasticité, cohésion, susceptibilité aux feuillements	Difficulté de séchage	Cuisson
Kaolinite	Augmente la plasticité	Limitée	Rend plus réfractaire, élargit la zone de vitrification
Illite	Possède une bonne plasticité	Moyenne	Agit comme flux grésant/fondant
Smectite	Possède une très grande plasticité et grande cohésion	Grande, retrait important et rétention capillaire	Améliore la compacité
Muscovite	Réduit la plasticité, favorise les feuillements, effet dégraissant.	Limitée	
Quartz	Réduit la plasticité et la cohésion, effet dégraissant, favorise les feuillements.	Limitée	Rend plus réfractaire, apport sensibilité au refroidissement (point de quartz).
Feldspath	Réduit la plasticité, effet dégraissant	Limitée	Agit comme flux grésant au dessus de 1000 °C.
Carbonates	Effet dégraissant	Limitée	Action sur la couleur, augmente la porosité.
Oxyde de fer	Limitée	Limitée	Action sur la couleur, agit comme flux grésant.

Tableau 6: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique
(Kornmann, 2005; Wetshondo, O., 2012).

Nature des éléments	Formulation	Tolérances (%)	Effets sur produits finis
Silice	SiO ₂	35 - 85	Réfractarité, contraction de la masse, ...
Alumine	Al ₂ O ₃	9 - 45	Réfractarité, résistance mécanique, couleur blanche
Magnésie	MgO	0 - 5	Porosité
Chaux	CaO	0 - 25	Porosité
Oxyde de manganèse	MnO	-	Couleur noir
Sesquioxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0 - 9	Couleur rougeâtre, fondant
Oxyde de titane	TiO ₂	0,3 - 2	Couleur jaune
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 - 5	Fondants
Gaz carbonique	CO ₂	0 - 13	Volume
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 - 3	Volume/Toxicité
Eau de combinaison	H ₂ O	5 - 11	Volume/Poids

I.3.1.1. La plasticité

Dans le domaine de la céramique, la plasticité est une des propriétés recherchées car elle facilite la fabrication (surtout le façonnage) des produits céramiques dont elle assure la cohésion en crue. C'est une des mesures conventionnelles communément appelées limites d'Atterberg qui expriment les différences de comportement mécanique des sols, différences essentiellement liées aux variations de la teneur en eau. Elles sont susceptibles de fournir des indications sur la facilité plus au moins grande de travail du sol (indicateur quantifiant la plasticité d'un sol). Ces limites ont été mises au point par l'Agronome Suédois ATTERBERG en 1911 (HOLTZ R.D., KOVACS W.D., 1991 ; CALLAUD M.J., 2004).

Les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) correspondent aux seuils de passage d'un matériau de l'état solide à l'état plastique (W_P) et de l'état plastique à l'état liquide (W_L). La limite de plasticité représente donc la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à des faibles charges.

L'intervalle entre les limites de liquidité et de plasticité définit l'étendue du domaine de la plasticité qui s'exprime par la relation :

$$I_P = W_L - W_P$$

Il y a lieu de souligner de ce qui précède que la plasticité d'un matériau naturel est une propriété caractéristique des éléments fins en l'occurrence les argiles en relation avec l'existence des couches d'eau adsorbées. Ainsi, les limites d'Atterberg et en particulier l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

I.3.2. Procédés de fabrication

Malgré le large assortiment des céramiques, la diversité de leurs formes et leurs propriétés physico-mécaniques et le type d'argile utilisé, les étapes de fabrication des produits céramiques sont similaires. Elles comprennent la préparation, le façonnage, le séchage et la cuisson (CERATEC, 1987 ; CERAME-UNIE, 2003 ; Wetshondo, O., 2012).

I.3.2.1. Préparation de la pate

La préparation de la pate a pour but d'éliminer les cailloux et les impuretés, doser les composants, homogénéiser et humidifier le mélange pour obtenir la bonne plasticité de la pate. Pour cela, des moyens simples consistent à piétiner ou à battre la terre. Aujourd'hui la matière première est obtenue par mélange des argiles ou terre et des dégraissants dans un broyeur qui rend les grains plus fins.

I.3.2.2. Façonnage

Le façonnage donne à la pate une cohésion suffisante, grâce à l'élimination de l'air occlus dans l'argile et à l'amélioration de l'état plastique de la pate, soit par mouillage additionnel, soit par une injection de vapeur d'eau. Deux procédés sont principalement utilisés dans l'industrie de terre cuite : le filage (moulage ou extrusion) et le pressage.

Le procédé de mise en forme le plus couramment appliqué aux pates plastiques est l'extrusion. Elle permet d'obtenir un produit de forme définitive.

I.3.2.3. Séchage

Les industries de la céramique traditionnelle comme les unités de fabrications modernes adoptent les mêmes techniques d'élaboration. Le séchage des produits façonnés avant frittage a pour but d'éliminer l'eau d'humidité qui a été rajoutée au cours de façonnage, avant de procéder à la cuisson. C'est une phase délicate et importante de la fabrication qui doit être minutieusement contrôlée pour éviter des fissurations, des retraits différentiels importants et des distorsions des produits

céramiques. Le séchage est réalisé progressivement en contrôlant deux paramètres: la température et l'humidité. On distingue deux phases :

- le départ de l'eau colloïdale qui sépare les différentes micelles d'argile et intervient dans la plasticité. Le volume de retrait correspond au volume d'eau retiré;
- le départ de l'eau d'interposition qui se trouve libre dans les pores de l'argile. Le départ de l'eau est totalement compensé par la création de porosité (sans retrait). L'argile dans cette phase perd complètement sa plasticité.

I.3.2.4. Cuisson

En fabrication de produits de terres cuites comme dans tout autre processus d'élaboration de produits céramiques, la cuisson doit être considérée comme une phase fondamentale puisqu'elle confère aux produits finis leurs caractéristiques définitives et leur plus ou moins bonne aptitude à l'emploi.

Il s'agit donc de contrôler plusieurs paramètres qui influencent la phase de cuisson tels que la température, la durée de cuisson et l'atmosphère à l'intérieur du four. L'action de la chaleur sur les pâtes plastiques obtenues par mélange de plusieurs constituants, conduit à une série de transformations physico-chimiques réversibles ou irréversibles. Ces transformations modifient la texture et la structure du matériau pour obtenir un produit qui possède un certain nombre de qualités propres à l'usage demandé.

On comprend dès lors que le processus de cuisson présente des conséquences pratiques importantes, liées principalement aux variations :

- pondérales (pertes en poids) ;
- dimensionnelles (dilatations et retraits) ;
- structurales qui conditionnent étroitement les caractéristiques du tesson cuit.

I.3.3. Phénomènes de transformations physico-chimiques lors de la cuisson

Plusieurs phénomènes physiques et chimiques peuvent se produire lors de la cuisson, ce qui provoque des modifications de porosité, de dimensions et de propriétés mécaniques du produit final. Jusqu'à 450 °C, il se produit un dégagement de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation. La matière organique est détruite suite à l'oxydation par l'air circulant dans les pores. Si le milieu n'est pas oxydant, des résidus carbonés se décomposent et du carbone persiste à l'intérieur de la céramique.

De 400 à 680 °C, des minéraux argileux sont détruits (kaolinite à 550 °C) avec le départ d'eau de structure (dehydroxylation) (Cultrone et al., 2001). Des composés très fins et désordonnés (metakaolin) se forment. Un début de retrait de cuisson est observé à ce stade. A 573 °C le quartz change de forme cristallographique. De 750 à 850 °C, le carbonate CaCO_3 se décompose en chaux vive (CaO) avec dégagement de CO_2 (Cultrone et al., 2001; Cuevas et al., 2009). Au-delà de 850 °C, deux phénomènes sont observés selon la minéralogie des argiles. Les argiles non-calcaires développent un frittage liquide donnant aux produits finaux une structure liée par une phase vitreuse (Khalfaoui et al., 2006). En revanche, les argiles calcaires ne développent pratiquement pas de phase vitreuse et la cristallisation des produits céramique s'effectue en phase solide (Riccardi et al., 1999; Cultrone et al., 2001). Le CaO disparaît et de nouvelles phases commencent à se former comme les silicates de calcium et les aluminosilicates de calcium (anorthite : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; gehlenite: $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$).

I.3.4. Evolution de la texture des produits céramiques au cours de la cuisson

L'action de la chaleur sur la matière argileuse provoque les différents phénomènes décrits précédemment, et crée un retrait (retrait à la cuisson). La consolidation sans fusion totale du matériau céramique s'accompagne souvent d'une densification (élimination des pores) et d'un grossissement des grains (diminution du nombre de grains). D'une manière générale, la densification réduit la porosité (El ouahabi, M., 2013). Si la température continue d'augmenter, la densification se poursuit. La porosité ouverte devient nulle tandis que la porosité fermée se développe avec augmentation des diamètres des alvéoles. Enfin, si la température devient trop élevée, il y a excès de phase vitreuse. Le développement exagéré des alvéoles détériore le matériau, on dit qu'il y a scorification (Thevenot, 1992).

I.4. Conclusion

Les minéraux argileux comptent parmi les substances minérales industrielles les plus abondantes et les plus sollicitées de nos jours. Chaque groupe minéralogique se caractérise par une structure particulière en couches avec divers matériels remplissant l'espace interfoliaire. Les trois principales structures sont :

- les minéraux 1/1 ou T-O avec un espace basal de 7Å (kaolinite) ;
- les minéraux 2/1 ou T-O-T avec un espace basal très variant : 9,5Å pour le talc et la pyrophyllite ; 10Å pour l'illite et l'halloysite ; 10,4Å pour la palygorskite ; 12Å pour la sépiolite et de 14 à 15Å pour les smectites et les vermiculites ;

- les minéraux 2/1/1 ou T-O-T-O avec un espace basal de 14Å (chlorite).

En plus des minéraux argileux phylliteux, fibreux et interstratifiés, les argiles naturelles renferment, dans la plupart des cas, plusieurs impuretés. Il s'agit essentiellement des matières organiques, des gels des minéraux (ferrifères, alumineux, siliceux), des composés de manganèse et de carbonates qui peuvent être cristallisés ou amorphes. Les hydroxydes en particulier cimentent les argiles et les transforment en agrégats. La présence de ces impuretés peut modifier les propriétés physico-chimiques des argiles. Du point de vue économique, ces substances argileuses sont disponibles et présentent de multiples propriétés physico-chimiques qui justifient leur rôle important dans plusieurs secteurs de l'industrie (céramique, papetière, cimenterie, cosmétique, métallurgie, pharmacologie, agroalimentaire, pétrolière, ...) ou dans la protection de l'environnement.

Les matériaux argileux constituent donc des matières premières de base dans la fabrication des produits céramiques manufacturés dont les principaux secteurs sont: les briques et les tuiles ; les carreaux pour sols et murs ; la céramique ornementale ou domestique ; les produits réfractaires ; les appareils sanitaires ; les céramiques techniques (isolants, condensateurs, filtres, produits biomédicaux,...) ; les tuyaux en grès ; les granulats d'argile expansée et les abrasifs inorganiques. En technologie céramique, les argiles employées doivent répondre aux exigences granulométriques, chimiques et minéralogiques afin d'obtenir des produits de bonne qualité. Les argiles kaolinitiques par exemple sont recherchées du fait de leurs propriétés assez bien connues, leur plasticité appréciable, leur faible retrait au séchage, l'absence de gonflement interfoliaire et la coloration peu marquée des tessons.

Malgré l'existence de la diversité des produits céramiques, les procédés de fabrication industrielle sont très similaires et comprennent les opérations de : préparation, façonnage, séchage, traitements de surface et décorations éventuels ainsi que la cuisson (frittage). La cuisson demeure une opération délicate et fondamentale car elle confère aux produits finis leurs caractéristiques définitives et leurs plus ou moins bonnes aptitudes à l'emploi. C'est au cours de ce procédé que se forment des nouveaux composés cristallins et des phases vitreuses.

CHAPITRE II. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre sont traités, les traits majeurs correspondant à la wilaya de Jijel. Il s'agit de la localisation géographique, la population et habitat, l'orographie, le climat, l'hydrographie, la végétation et le contexte géologique régional et local.

Ces éléments de base sont nécessaires à la compréhension de l'importance de certaines problématiques abordées dans le cadre de cette étude.

II.2. Cadre naturel de la région d'étude

II.2.1. Plan de situation

La wilaya de Jijel, dont fait partie la zone d'étude est située à l'Est de l'Algérie, à environ 360 km à l'Est de la capitale Alger (Fig. 14), plus précisément entre la latitude 36.30° – 36.55° Nord et la longitude 5.20° – 6.22° Est. Elle couvre une superficie de 2398,69 km², 82% de cette surface se situe dans des zones montagneuses avec une façade maritime de 120 km.

Elle est limitée au nord par la mer Méditerranée à l'ouest par la wilaya de Bejaïa, à l'est par la wilaya de Skikda, au sud-ouest la wilaya de Sétif, au sud par la wilaya de Mila et enfin au sud-est par la wilaya de Constantine. Notre étude a touché particulièrement la commune de Kaous, Taher, Chekfa, Emir Abdelkader, Djimla, Benyadjis et El-Milia.

II.2.2. Le relief

La Wilaya de Jijel est caractérisée par un relief montagneux. Bien que l'altitude moyenne soit de 600 à 1000 m, on distingue principalement deux régions physiques (Fig. 15) :

- Les zones de plaines : Situées au nord, le long de la bande littorale allant des petites plaines de Jijel, les plaines d'El-Aouana, la plaine d'oued Mencha, oued Djendjen, oued Nil, Bellara, Belghimouz et Beni Belaid, ainsi que les vallées d'oued Kébir, oued Boussiaba et les petites plaines de oued Z'hor.
- Les zones de montagnes : Elles constituent l'essentiel du territoire de la wilaya (82 %) et sont composées de deux zones :

- des zones, correspondant à des monticules d'altitudes moyennes surplombant les plaines, et formant des promontoires de direction Nord-Sud.
- Zones de montagnes formant les reliefs de la région, situées à la limite sud de la wilaya. Elles comportent les plus hauts sommets de la wilaya dont les principaux sont : Tamasghida, Tababour, Bouazza et Seddat.

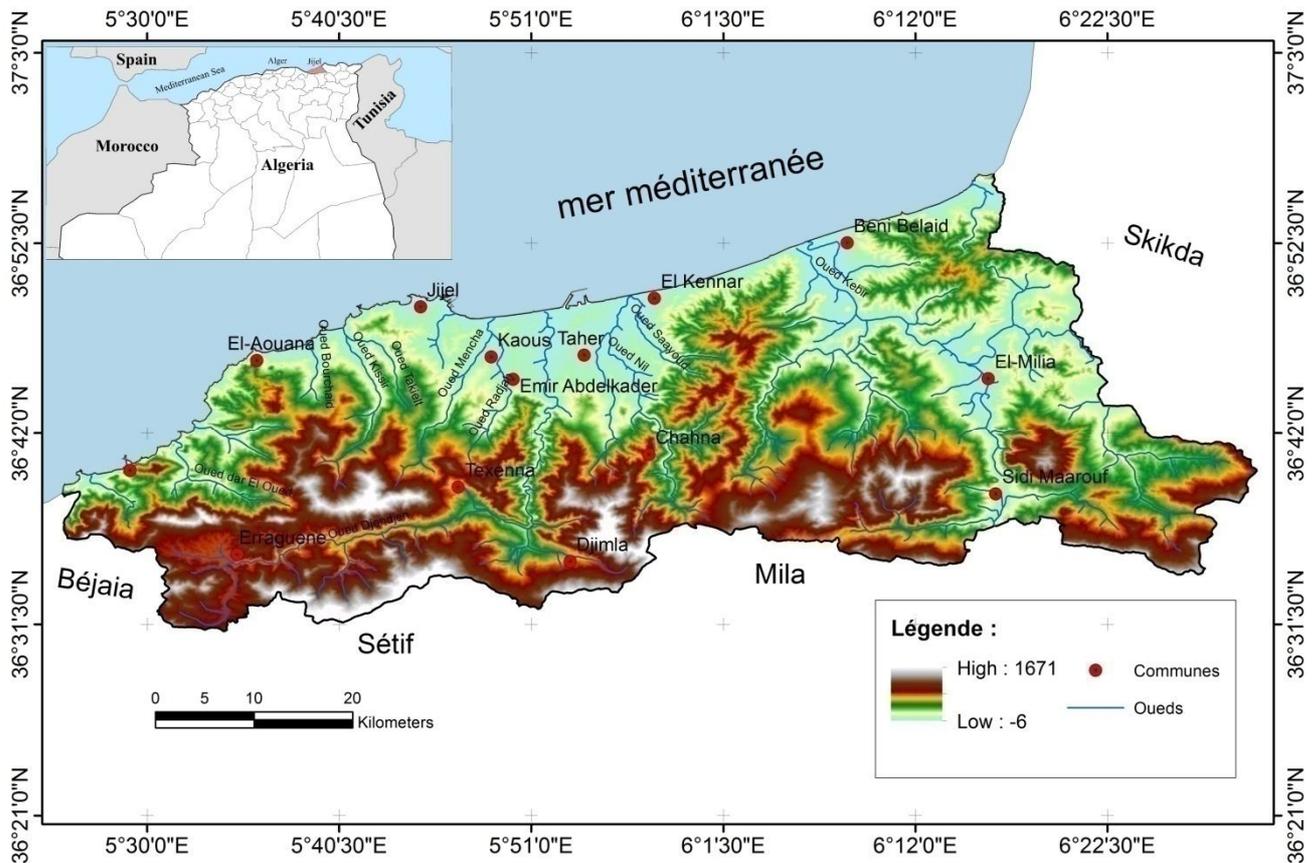


Figure 15: Carte de localisation de la zone d'étude.

II.2.3. Aperçu climatique

Sur le plan climatologique, la région de Jijel comme toutes les régions du littoral Algérien, est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par un Hiver froid et pluvieux avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 961 mm/an (Fig. 16) et un été chaud et humide avec des températures moyennes de 18,32 °C. Elle est considérée parmi les régions les plus pluvieuses d'Algérie. L'intensité pluviométrique de la région constitue un facteur d'altérabilité pour les sols de surface.

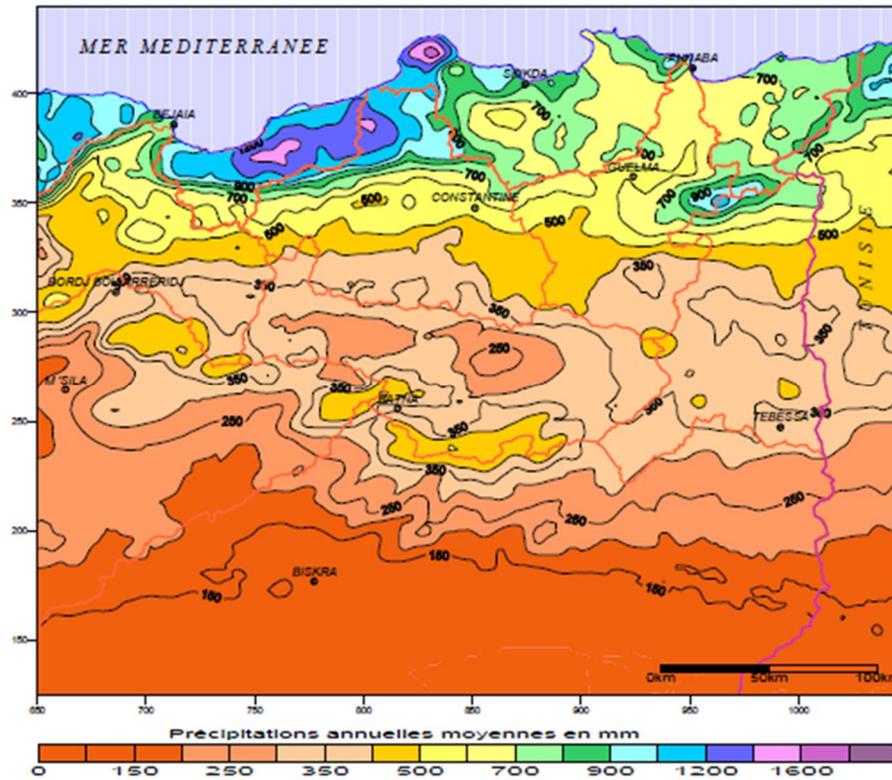


Figure 16: Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est Algérien
(D'après A.N.R.H., 1993)

II.2.4. Population

La Wilaya de Jijel compte au dernier recensement général de la population et de l'habitat « RGPH » d'Avril 2008 une population de 636.948 habitants. Au 31/12/2009, cette population est estimée à 653,272 habitants, Soit un volume additif de 16.324 habitants. Les taux brut de natalité, de mortalité et d'accroissement naturel sont respectivement de 19,20%, 04,14% et 1,40%.

La population de la wilaya se trouve concentrée en grande partie dans le Nord. A titre indicatif, les communes de Jijel, Taher et El-Milia regroupent 297.771 habitants soit 45,58 % de la population totale.

II.2.5. Végétation

La région de Jijel est caractérisée par une couverture végétale assez dense. Cette dernière est favorisée par l'importance des précipitations. Les conditions climatiques et la nature des terrains de la région ont permis le développement de forêts très denses. Ces forêts sont représentées essentiellement par du chêne-liège, du chêne-zéen, des broussailles, et autres arbres fruitiers. En général, ce potentiel forestier confère à la région une vocation agricole et sylvicole.

II.2.6. L'hydrographie

Le réseau hydrographique de la wilaya de Jijel est très dense. Il est constitué essentiellement, de plusieurs oueds principaux tel que Oued Mencha, Oued Djendjen, Oued Nil, Oued el Kébir, Oued Zhou et leurs affluents (Fig. 17). Ce réseau hydrographique joue un rôle important dans l'érosion et le transport de solide vers la mer.

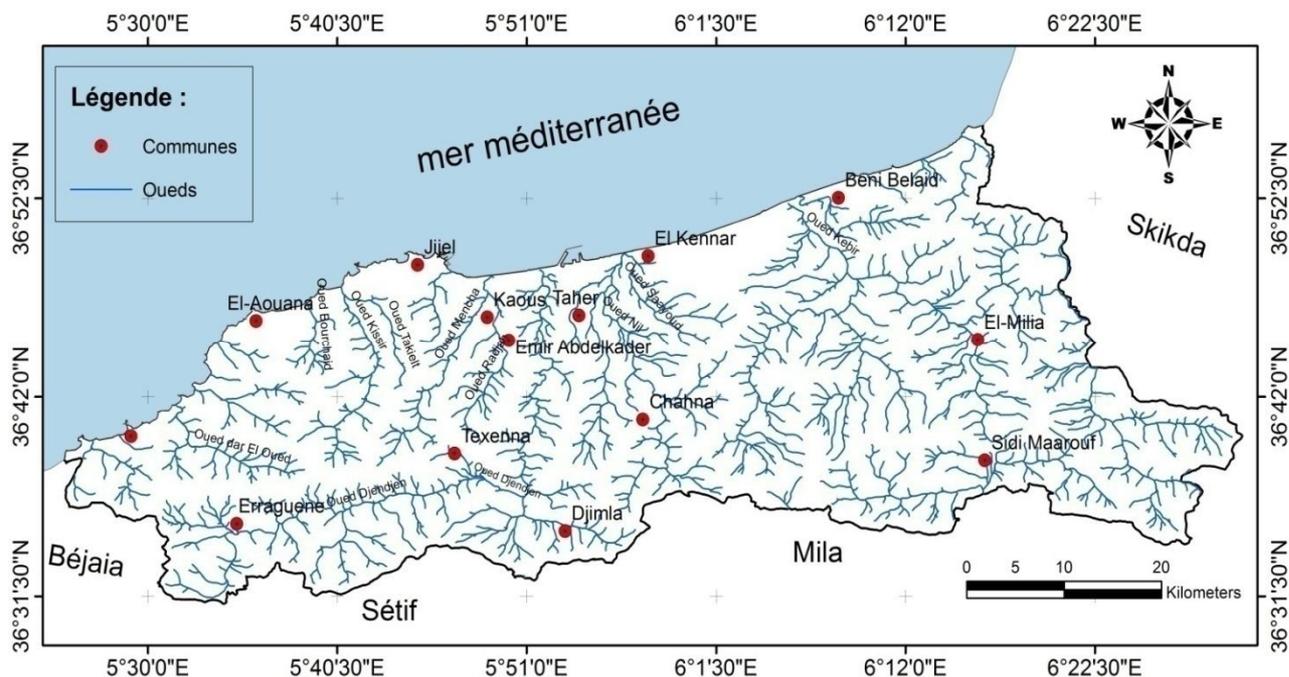


Figure 17 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Jijel.

II.2.7. Carte des pentes

La pente topographique est un paramètre capital dans la commande du drainage des eaux de surfaces. Sur une pente, là où le drainage et le lessivage sont efficaces, la formation de la kaolinite est favorisée. Dans une cuvette où la pente est très faible (milieu confiné où se concentrent les solutions), se forme plutôt des smectites. En effet, elle contrôle d'une façon directe par son intensité les phénomènes d'infiltration, de ruissellement et d'érosion.

La carte des pentes de la wilaya de Jijel a été établie à partir du MNT de la région étudiée (Fig. 18). Elle montre que les pentes les plus abruptes (très fortes à fortes), se concentrent dans la partie Sud et Ouest où prédominent les terrains paléozoïques et mésozoïques. Les pentes faibles à très faibles se développent dans les plaines occupées par les formations d'âge Mio-Plio-Quaternaires dans la partie Nord de la carte (bassin néogène, les plaines d'oued El-Kebir et El-Milia) (Fig. 18). La carte des pentes montre que plus de 61% de la topographie de la wilaya de Jijel présente une

pente comprise entre 10-30% et le reste de cette topographie, soit 29% de la superficie présente une pente qui varie entre 0 et 10%. La classe de pentes les plus fortes (> 30%) ne couvre que 8,9 % (Tab. 7 et Fig. 18).

Ces valeurs de pente sont à mettre en relation avec la structure géologique et surtout la lithologie des terrains qui déterminent leur comportement vis à vis de l'érosion. Les fortes valeurs de pente des versants sont liées à deux causes géologiques : la lithologie et la tectonique. La cause lithologique est la plus importante car elle est liée à l'existence de formations lithologiques de résistance ou de vulnérabilité différentes à l'altération et l'érosion.

Tableau 7: Statistiques relatives au facteur de pente.

Facteur de pente		
Classes	Surface (km ²)	%
0-5 %	286.88	11.89
5-10 %	428.26	17.75
10-20 %	945.07	39.17
20-30 %	537.80	22.29
>30 %	214.73	8.90
Total	2412.75	100

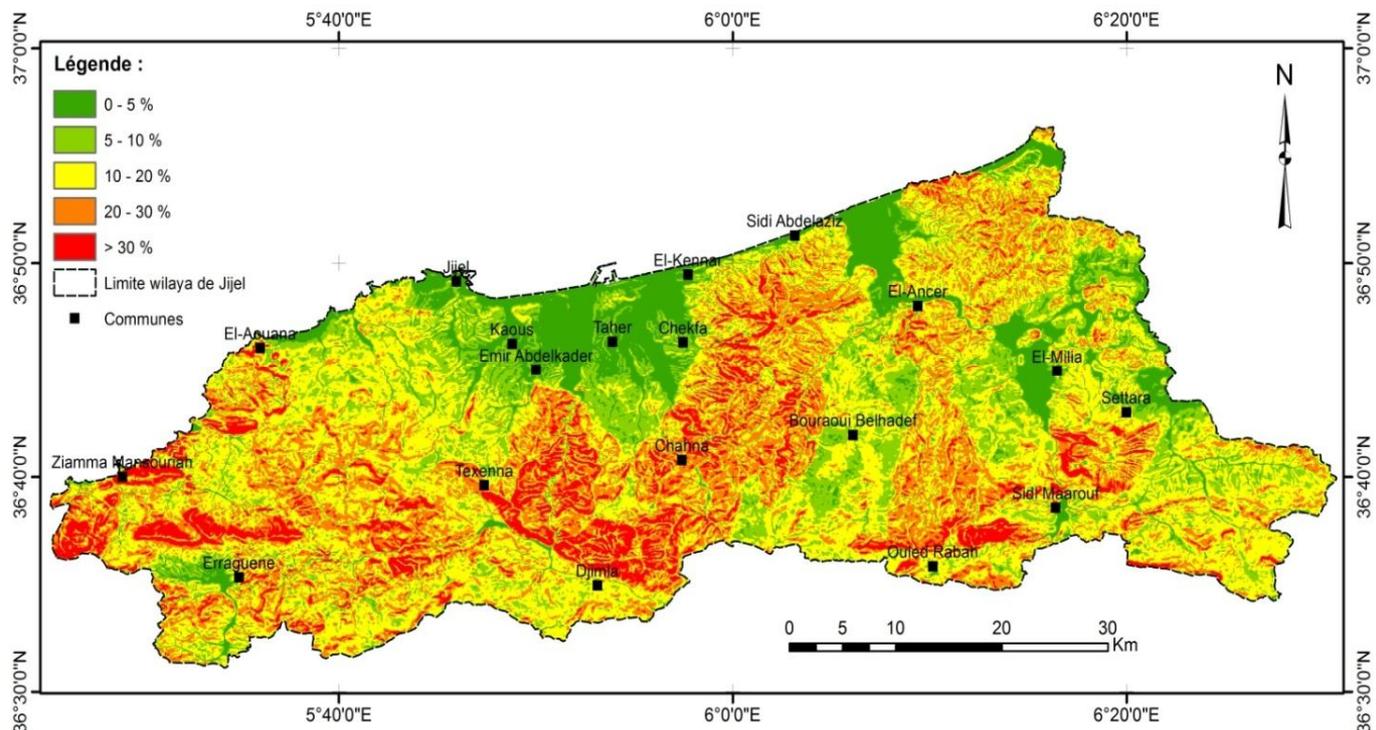


Figure 18 : Carte des classes de pentes de la wilaya de Jijel.

II.3. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

II.3.1. Introduction

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand Delga, 1969) d'âge tertiaire qui s'étend d'Ouest en Est sur 2000 km, depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien en passant par le Rif marocain et le Tell algérien et tunisien. En Algérie, cette tranche Sud de cette chaîne est représentée par les massifs de petite Kabylie et grande Kabylie (Fig. 19).

Le domaine de la chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformations méso-cénozoïques aboutissant au dépôt de séries sédimentaires dans des bassins dont la paléogéographie a évolué dans le temps, puis affectées par des charriages sous forme de nappes pelliculaires. Elles ont été affectées par des épisodes métamorphiques et ont connu plusieurs événements magmatiques. L'histoire tectonique les a structurées en un édifice constitué d'une multitude d'unités tectoniques dont l'organisation est loin d'être parfaitement comprise et nombreux sont les points qui sont toujours sujets à débats (Durand Delga, 1969 ; Villa, 1980).

En Algérie, la chaîne des Maghrébides est généralement subdivisée du Nord au Sud en trois domaines paléogéographiques (Durand Delga, 1969 ; Villa, 1980) (Fig.19) :

- le domaine interne ;
- le domaine des flyschs;
- le domaine externe (tellien).

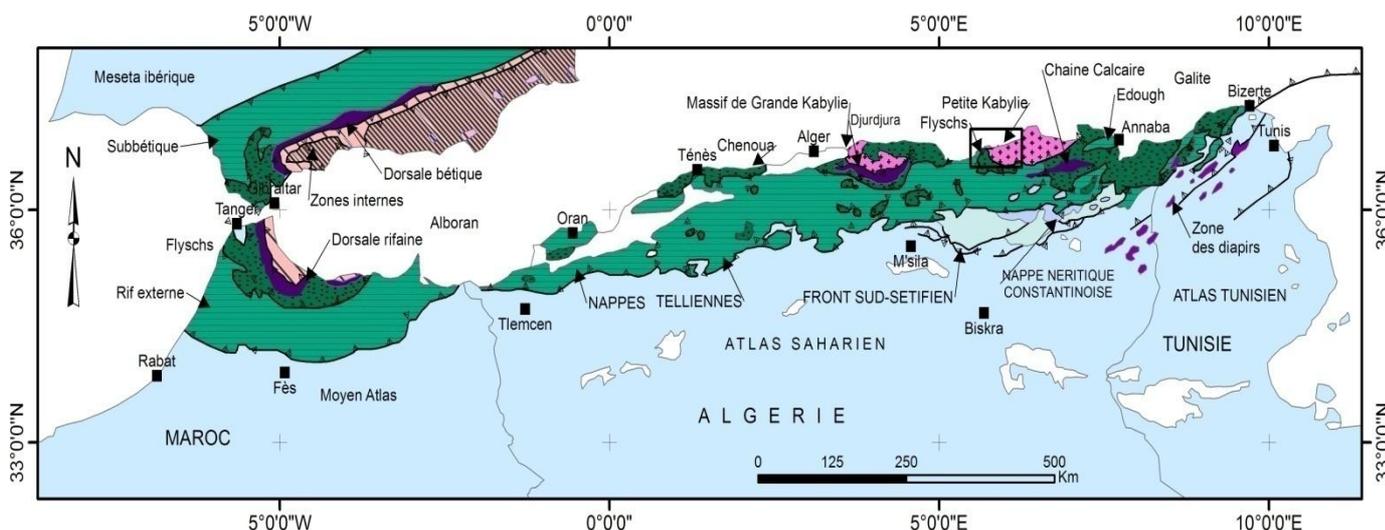


Figure 19: Schéma géologique de la chaîne des Maghrébides (d'après Durand Delga, 1969 in Vila 1980).

II.3.2. Les grands ensembles structuraux des Maghrébides en Algérie

II.3.2.1. Le domaine interne

Le domaine interne est représenté principalement par les massifs cristallins, parfois appelés aussi socles kabyles, composés par des roches métamorphiques (gneiss, marbres et schistes) et sont bordés au Sud par des formations sédimentaires de couverture en écailles appelées dorsale kabyle (Durand Delga, 1969).

a) Le socle kabyle

On le trouve dans les massifs du Chenoua à l'Ouest d'Alger, de Grande Kabylie au centre et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda) à l'Est (Fig. 20). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement des formations cristallogéniques en Algérie.

Il est par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge Oligocène supérieur et Miocène inférieur appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK).

Le socle kabyle comporte deux ensembles :

- ⇒ un ensemble supérieur : essentiellement phylladique, il est surmonté en discordance par des formations non métamorphiques transgressives d'âge silurien (Durand Delga, 1955) ;
- ⇒ un ensemble inférieur : essentiellement gneissique, constitué de paragneiss, d'orthogneiss et de gneiss fins ou ocellés. Il admet par endroit de puissantes intercalations de marbres et d'amphibolites.

b) La dorsale Kabyle

Le premier affleurement en Algérie est situé au cap Ténès. On la retrouve dans le massif du Chenoua puis au Sud Est d'Alger ainsi qu'en grande Kabylie où elle constitue d'importants reliefs. Elle apparaît ensuite au Nord de Constantine (Djebel Sidi Driss, El-Kentour et Toumiat) (Fig. 20) et au Sud d'Annaba (Djebel Safia). Elle se présente sous forme d'écailles constituées de formations d'âge allant du Permo-Trias à l'Eocène moyen.

En petite Kabylie, la "chaîne calcaire" ou "dorsale kabyle" a été subdivisée du Nord au Sud en trois unités : interne, médiane et externe (Durand Delga, 1969 ; Raoult, 1974 ; Vila, 1980).

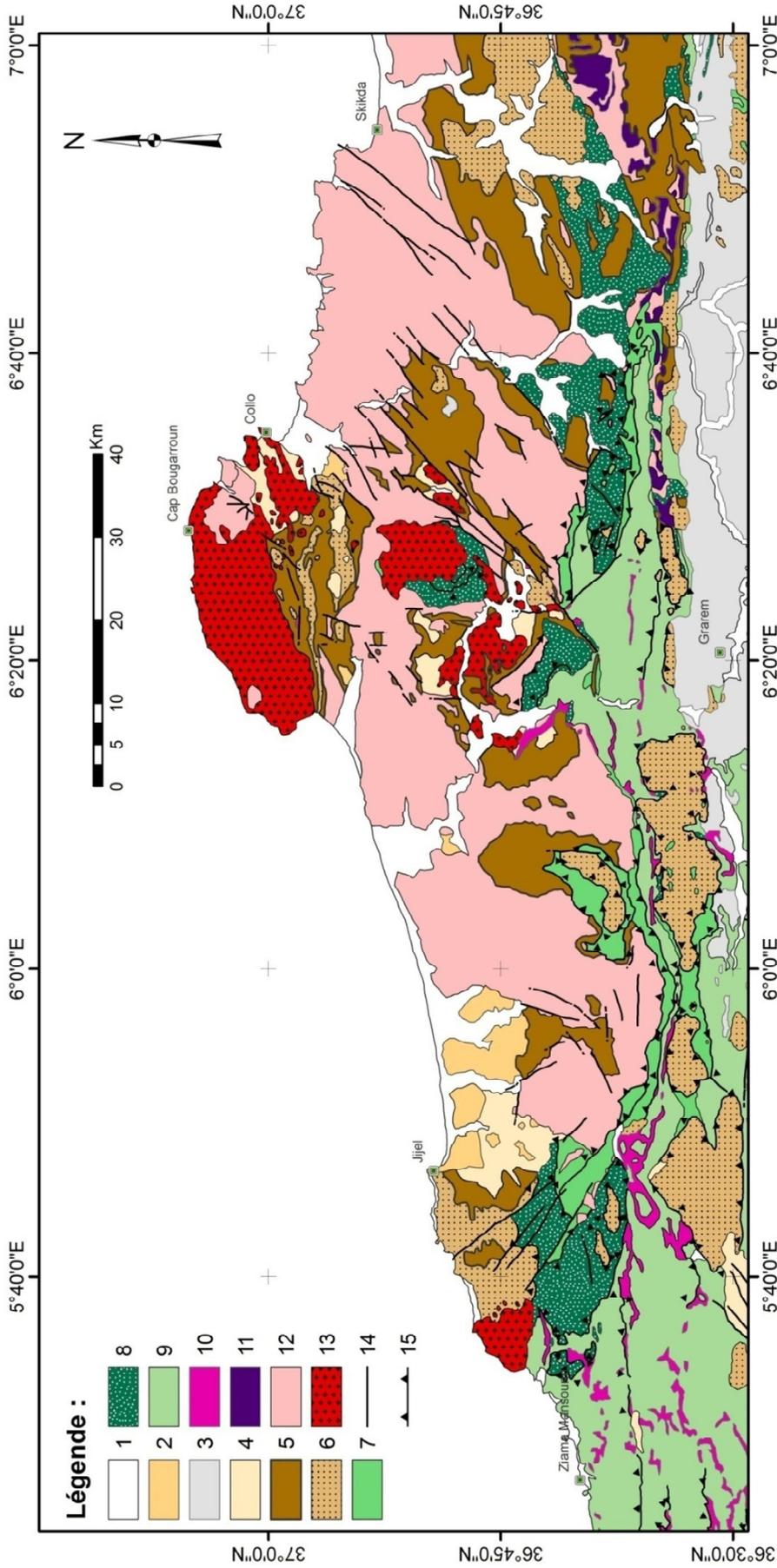


Figure 20: Carte géologique de la petite Kabylie (Extrait de la carte structurale au 1/500 000^{ème} de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens, Vila, 1980)

Légende :

- 1 : Quaternaire, 2 : Pliocène, 3 : Mio-Pliocène continental, 4 : Miocène post-nappe, 5 : Oligo-Miocène Kabyle 6 : Flysch Numidien ; 7 : Série tellienne ; 8 : Flysch massylien ; 9. Flysch Maurétanien ; 10. Trias ; 11 : Dorsale Kabyle ; 12 : Socle cristalloyhllien ; 13 : Roche magmatique ; 14 : Contacts stratigraphiques (faïlles visibles ou supposées) ; 15 : Chariages et chevauchements.

➤ **Dorsale interne**

Elle est caractérisée par une série sédimentaire conglomératique à la base et calcaire au sommet d'âge allant du Permo-Trias au Néocomien. Depuis elle est restée émergée jusqu'au Paléocène puis, à partir de l'Eocène se sont déposés des calcaires néritiques massifs.

➤ **Dorsale médiane**

Elle montre, à la base, la même série que la dorsale interne qui peut cependant atteindre le Barrémien. Le Crétacé supérieur, le Paléocène, l'Eocène (Jusqu'au Lutétien) sont représentés par des marno-calcaires à microfaunes pélagiques. Au Lutétien supérieur apparaissent des faciès à microfaune benthique (Nummulites).

➤ **Dorsale externe**

Elle est caractérisée par des formations détritiques du Crétacé et de l'Eocène.

Les unités externes et médianes se sont désolidarisées de leur substratum. Elles ont ensuite été plissées et chevauchées par le socle kabyle et la dorsale interne.

II.3.2.2. Le domaine des flyschs

Il est constitué par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long entre Mostaganem (Algérie) et Bizerte (Tunisie). Selon leur constitution et leur bassin de dépôt, deux grands types de séries crétacées ont été distingués avec au Nord le flysch de type maurétanien (Gélard, 1969) et au Sud, le flysch de type massylien (Raoult, 1969, 1972). A ces deux types s'ajoute un troisième groupe de flysch plus récent, le flysch numidien d'âge Oligocène supérieur-Burdigalien inférieur (Durant Delga, 1969).

a) Les flyschs maurétaniens

Ils sont relativement épais et occupent une position interne dans le bassin de dépôt des flyschs (Bouillin, 1977). Selon J.-P. Gélard (1969), ils forment des séries variées allant du Néocomien au Lutétien et regroupent particulièrement, le flysch albo-aptien de Guerrouch.

Les flyschs maurétaniens montrent dans les séries médianes les plus typiques, de bas en haut (Vila, 1980) :

- un complexe de base flyshoïde à petits bancs de micrites du Néocomien ;
- un flysch argilo-gréseux qui atteint l'Albien moyen ;
- un Vracono-Cénomano-Turonien calcaire, conglomératique ou micro-conglomératique.

Localement la série commence par des radiolarites rouges du Dogger-Malm et se termine par des niveaux conglomératiques du Paléocène.

b) Les flyschs massyliens

Le terme de flysch massylien a été proposé par J. F. Raoult (1969), pour caractériser les formations détritiques schisto-quartzitiques. Ces flyschs occupent une position externe dans le bassin de dépôt des flyschs (Bouillin, 1977) et comporte une série allant du Néocomien au Lutétien terminal et regroupe trois ensembles qui sont du bas en haut :

- Des argiles et grès quartzitiques, des grès légèrement calcaires et localement des niveaux conglomératiques de l'Albo-Aptien.
- Des marnes et calcaires fins du Vraconien, des microbrèches et des conglomérats du Sénonien inférieur et moyen auxquels sont associées des phanites noires.
- Des bancs calcaires à microfaunes pélagiques du Turonien-Cénomaniens.

II.3.2.3. Le domaine externe

Le domaine externe représente la marge téthysienne du continent africain. En Algérie orientale, il est représenté par :

- les séries telliennes ;
- les séries de l'avant pays allochtone ;
- les séries de l'avant pays atlasique autochtone.

a) Les séries telliennes

Selon les données de la littérature les séries telliennes sont représentées par un ensemble de séries allochtones, en nappes pelliculaires, caractérisées par le développement de faciès marno-calcaires d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud (Vila, 1980 ; Wildi, 1983). Ces séries ont été découpées par les phases tectoniques tertiaires en trois grandes unités du Nord au Sud (Vila, 1980):

➤ les unités ultra-telliennes

Elles comportent un Crétacé inférieur clair strictement marneux ou micritique à ammonites, Crétacé moyen et supérieur analogues, respectivement à rotalipores et à globotruncana, un Eocène à trois termes : marnes sombres à boules jaunes Dano-Paléocène, Yprésien-lutétien inférieur claire à silex noirs et cassures grise ou noire, Lutétien supérieur marneux sombre.

Les séries ultra-telliennes septentrionales (Vila, 1980) possèdent des caractères proches de ceux du flysh massylien : intercalation de phtanites cénomano-Turoniennes et de microbèches sénoniennes.

➤ **les unités telliennes sensu-stricto**

Ces unités comportent au Lias des dolomies puis des calcaires à silex ; le Dogger montre un faciès siliceux de faible épaisseur et le Malm, des calcaires fins et de minces radiolarites verdâtres.

- Le Néocomien-Barrémien, sous forme de marno-calcaire à ammonites pyriteuses est discordant.
- L’Aptien-Albien à faciès pélitique, argileux et gréseux et à partir de l’Albien supérieur, les séries deviennent exclusivement marneuses et marno-calcaires et présentent localement de fortes épaisseurs jusqu’au Lutétien terminal ou au début du Priabonien.

➤ **les unités péni-telliennes**

Elles sont caractérisées par des faciès néritiques du Crétacé à l’Oligocène et sont carbonatées et marneuses. Elles présentent des caractères proches de ceux du néritique constantinois. Généralement elles sont surmontées tectoniquement par les nappes de l’unité tellienne *sensu stricto*.

Des unités encore plus externes et d’allochtonie notable, mais moindre, structurées au Miocène moyen qu’on appelle séries de l’avant-pays allochtone et qui se placent entre les nappes telliennes au Nord et l’autochtone atlasique au Sud.

b) Les séries de l’avant pays allochtone

Ce sont des séries localement écaillées qui supportent les nappes du tellien externe au Nord, et qui surmontent l’autochtone Nord-aurésien. Ces séries ont été regroupées en trois grandes familles (Vila, 1980):

- **les unités sétifiennes** : Elle présente un caractère de plate-forme subsidante et ne présentent de variations significatives qu’à leurs parties méridionales ;
- **les unités de l’avant-pays allochtone Constantinois** : Présentent une différenciation remarquable avec au nord, les séries néritiques constantinoises et au sud, les séries de type Sellaoua ;
- **les unités des confins algéro-tunisiens** : Elles montrent une sédimentation analogue à celle des nappes telliennes ou à celles des séries septentrionales de type Sellaoua.

c) Les séries de l'avant pays atlasique autochtones

Ce sont des séries mésozoïques très épaisses, très homogènes de plate-forme subsidente envahie par une sédimentation gréseuse au Berriasien- Albien (Vila, 1980).

II.3.2.4. Les séries postérieures à la phase fini-lutétienne

a) L'Oligo-Miocène Kabyle (OMK) et les Olistostromes

Les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle (OMK) formant la couverture sédimentaire transgressive et discordante du socle kabyle. Elles comportent des grès micacés, admettant des conglomérats à leur base d'âge Oligocène supérieur, et des silexites à leur sommet qui atteint l'Aquitaniens (Miocène inférieur) (Bouillin, 1977). A cet Oligo-Miocène kabyle succèdent des Olistostromes, formations tectono-sédimentaires à débris de flyshs, dont l'âge de mise en place s'étale de l'Oligocène supérieur à l'Aquitaniens inférieur (Raoult, 1974 et Bouillin; 1971, 1974, 1977).

Ces Olistostromes montrent dans une matrice marneuse à passées gréseuses molassiques dilacérées de couleurs jaunes et vertes où l'on n'observe pas de stratification, des blocs de taille, d'âge et de nature variés. Certains, formés par des éléments de la série grés-micacée. D'autres correspondent au classique Numidien « aquitano-burdigalien ». D'autres enfin sont suffisamment volumineux pour constituer de véritables nappes et présentent l'intérêt de comporter un flysch albo-aptien : ce sont l'unité du flysch dissocié et la nappe de Guerrouch (H. Djellit, 1987).

b) Le Nummulitique II

Ce sont des formations grés-micacées, d'âge Lutétien à Oligocène supérieur qui constituent la couverture des séries de la chaîne calcaire et des flyschs maurétaniens. (Raoult, 1969; Bouillin, 1977).

c) Les flyschs Numidiens

Le flysch Numidien désigne une puissante formation gréseuse et argileuse d'âge Oligocène terminal à Miocène inférieur occupant la position structurale la plus haute dans l'édifice alpin. Il comporte de bas en haut :

- Des argiles varicolores appelées argiles sous-numidiennes et/ou argiles à tubotomaculum (d'âge oligocène moyen à supérieur) à intercalations calcaro-gréseuses et à glauconie.
- Des grés à dragées de quartz en banc épais et à grains hétérométriques à caractère numidien de fluxo-turbidites d'âge Aquitaniens à Burdigalien inférieur (Lahondère et al, 1979).

- Formations supra-numidiennes, comportant des argiles et des marnes claires, admettant des silixites qui atteignent le Burdigalien basal (Lahondère et al; 1979).

La nappe numidienne dont les sédiments sont postérieurs à la tectonique tangentielle fini-éocène forme un étage supérieur nettement moins tectonisé et recouvre indifféremment toutes les unités géologiques. Elle s'est désolidarisée de son substratum et se trouve dans une position structurale élevée (Vila, 1980).

II.3.2.5. Les formations post-nappes

Les formations post nappe développées sur tout le domaine du socle kabyle, comportent deux cycles, l'un marneux (à la base), l'autre grés-conglomératique (au sommet). L'âge de ces formations va du Burdigalien moyen-supérieur au Langhien supérieur (Durand Delga, 1955 ; Bouillin, 1977).

Le Mio-Pliocène continental affleure sur de vastes espaces dans le secteur des plaines côtières en remplissage de bassin à l'exemple du bassin Néogène de Jijel.

II.3.2.6. Le magmatisme

Dans la partie Nord de l'Algérie, on peut distinguer un magmatisme ancien qui a donné lieu à des roches basiques et ultrabasiques et des granites, leucogranites, pegmatites et aplites (Texenna et El-Milia et collo), et un magmatisme récent d'âge Miocène, qui adonnée lieu à des granites, microgranites, granodiorites, microdiorites et des laves volcaniques (Cap de fer, Filfila, Collo, El Aouana, El-Milia et Amizour) (Semroud et al., 1992).

II.3.3. Aspect structural

La phase pré-tectogénique de la chaîne alpine d'Algérie du Nord a débuté dès le Trias, et depuis, le domaine entre la plaque eurasiennne au Nord et la plaque africaine au Sud n'a cessé de s'élargir pour atteindre son apogée au Crétacé inférieur formant ainsi le bassin maghrébin qui a reçu la sédimentation flyschöide caractéristique de cette époque. Après cette période distensive, les prémices de l'inversion tectonique ont commencé à s'exprimer dès l'aurore du Crétacé supérieur et le rapprochement des deux plaques africaine et européenne s'est poursuivi jusqu'aux paroxysmes des compressions alpines au néogène qui ont abouti à la fermeture complète de la Téthys maghrébine générant ainsi les reliefs et les différentes unités qui constitue la chaîne des Maghrébides. Ainsi, la genèse de la chaîne alpine de l'Algérie du Nord a été marquée par les phases suivantes :

II.4.1.1. Les phases tectoniques mésozoïques

La période du Trias correspond à une période de distension généralisée, accompagnée d'un volcanisme basique contemporain à une sédimentation argilo-gypseuse dominante (Bureau, 1970 ; Guiraud, 1973). La distension est marquée par une subsidence différentielle au Jurassique inférieur, qui s'est poursuivie jusqu'à la fin du Crétacé inférieur avec une orientation E-W, caractéristique des bassins maghrébins.

C'est à partir du début du Crétacé supérieur que l'inversion tectonique a commencé à s'exprimer avec des plis et des discordances localement décrits dans la chaînes numidique et les Babors (Durand Delga, 1955 ; Obert, 1986).

II.4.1.2. Les phases tectoniques tertiaires

a) La phase fini-lutétienne

Une phase assez générale se place vers la fin du Lutétien, la phase compressive fini-lutétienne (Raoult, 1974 ; Durand Delga, 1969) et/ou phase atlasique (Guiraud, 1973) ou encore priabonienne (Vila, 1980) s'est manifestée vers la fin de la période éocène.

C'est une phase qui a commencé à structurer progressivement l'édifice atlasique dès la seconde moitié de l'Eocène. Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias supérieur, et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations tectoniques locales enregistrées avant le Cénomaniens (D. Obert, 1974). Elle aurait structuré la chaîne calcaire (ou dorsale Kabyle), les flyschs et les séries telliennes en grandes lames ou en plis couchés à vergence Sud, avec les unités les plus internes en position plus haute.

La tectonique burdigalienne se manifeste par un bombement à l'aplomb du domaine Kabyle méridional. Ce bombement permet l'alimentation en Olistolithes du bassin de sédimentation de l'Oligo-Miocène Kabyle au Nord et la mise en place de la nappe Numidienne au Sud. En petite Kabylie, cette déformation est matérialisée par des déplacements tangentiels vers l'Est et qui sont responsable de la mise en place des unités de flyschs et de la nappe du socle de petite Kabylie.

b) Les phases miocènes

Caractérisée par une direction de raccourcissement Nord-Sud, elle aurait débuté plus tôt dans les zones septentrionales (Burdigalien moyen) que dans les contrées méridionales (Langhien inférieur) (M.D. Courme-Rault, 1985). La période miocène est marquée par l'existence de deux phases compressives :

Au Miocène inférieur c'est la tectogenèse du Burdigalien à vergence Nord et la naissance de la préMéditerranée (Vila ,1980). Cet épisode correspond à l'écoulement tectono-sédimentaire des olistolites et au glissement vers le Nord des nappes maurétanienne et massylienne, de lambeaux d'unités telliennes et de grands « radeaux » de la nappe numidienne ;

Au Miocène supérieur c'est la tectogenèse et tortonienne correspondant à dernière phase impliquant la mise en place des nappes de charriage. Pour J.M.Vila (1980) c'est cette phase tortonienne majeure, à vergence Sud, qui serait responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble «sud-sétifien» et des «unités méridionales à nummulites».

II.4. CADRE GEOLOGIQUE LOCAL

La partie occidentale du massif cristallophyllien de la Petite Kabylie, dont fait partie la wilaya de Jijel, se particularise d'une part, par un dispositif structural assez complexe, formé par la superposition de plusieurs nappes, dont la plus importante est celle du socle kabyle et d'autre part, par une configuration morfo-structurale, représentée par des reliefs et des dépressions ou bassins. Les reliefs de la région sont principalement occupés par les formations cristallophylliennes du socle kabyle et les formations sédimentaires de type flyschs et les dépressions sont comblées par les dépôts néogènes post-nappes.

II.1.1. Lithologie des formations de la partie occidentale du massif de la Petite Kabylie

II.4.1.1. Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle

Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle occupent la majeure partie de la région de Jijel. Ils s'étalent de la région de Texenna à l'Ouest jusqu'à la limite Est de la wilaya de Jijel avec celle de Skikda (Fig. 21). Parmi les études qui se sont intéressées à ces roches métamorphiques on peut citer celles de M. Durand Delga (1955), J.P. Bouillin (1977), H. Djellit (1987), A. Afalfiz (1990) et Y. Mahdjoub (1991). Les principaux affleurements du socle kabyle se répartissent d'Ouest en Est comme suit (Fig. 21) :

- Les affleurements les plus occidentaux du socle métamorphique sont localisés dans la région de Texenna. Ces affleurements ont été principalement étudiés par M. Durand Delga (1955) et H. Djellit (1987) ;
- Les affleurement Nord du socle kabyle s'étendent le long du littoral, entre la localité d'El Kennar et El Djenah et se prolongent vers le Sud à travers les massifs de Seddat, Chahna,

Ouled Askeur et Djebel Bouaza. ces affleurements ont fait l'objet d'études par M. Durand Delga (1955) et A. Afalfiz (1990).

- Les affleurements du socle kabyle de la partie Est de la wilaya de Jijel sont représentés par les affleurements du littoral de Béni Belaïd et de Oued Zhour et qui se prolongent vers le Sud à travers les massifs de Machat et d'El Milia. Ces affleurements ont été étudiés entre autres par M. Durand Delga (1955) et J.P. Bouillin (1977).
- Les affleurements appartenant au massif de Moule Ed Demamène situé au Sud d'El-Milia et étudiés par M. Durand Delga (1955), J.P. Bouillin (1977) et Y. Mahdjoub (1991).

Dans la partie occidentale du massif cristallophyllien de Petite Kabylie, les formations du socle sont représentées, essentiellement, par des phyllades (région de Chahna), des schistes, des micaschistes et des gneiss, auxquels sont associés des lentilles de marbres (Chekfa, Chahna et Sidi Bouaza), des intrusions de roches magmatiques basiques et ultrabasiqes, de granite, d'aplite, de leucogranite et de pegmatites (région de Texenna, Chekfa et El Milia).

Certaines roches du socle kabyle présentent un intérêt économique, à l'exemple des intercalations de roches carbonatées qui ont donné lieu par métamorphisme à des cipolin (gisement de Sidi Bouaza et de Chehna) et des intrusions de roches granitiques (granite, apélite, leucogranite, pegmatites et orthogneiss) qui ont donné par altération chimique du kaolin (gisement de Tamazert de la région d'El-Milia et d'Adjarda, région de Chekfa Chekfa).

II.4.1.2. Les formations du Trias

Les formations triasiques représentent les terrains mésozoïques les plus anciens de la région. Les plus importants affleurements triasiques de la partie occidentale du massif cristallophyllien de Petite Kabylie se trouvent dans la partie Sud et Sud-Est. Ces affleurements de Trias jalonnent les grands accidents de socle, à l'exemple de l'affleurement de la région de Djimla –Ben Yadis et de la de la région du Sud d'El Milia (Sidi Marouf, Kef Darja, Beni-Haroun, Amrioune et Bordj Ali) (Fig. 21).

Le complexe triasique est constitué de gypse, de dolomie, d'argilites et de marnes bariolées à gypse. Au sud de Texenna, le Trias se présente sous forme d'une bande le long de l'oued Djimla et se poursuit, vers l'Ouest jusqu'au Sud de Ziama. Le long de ce contact, les formations triasiques soulignent le contact entre les formations telliennes au Sud et les formations des flyschs au Nord (Fig. 21).

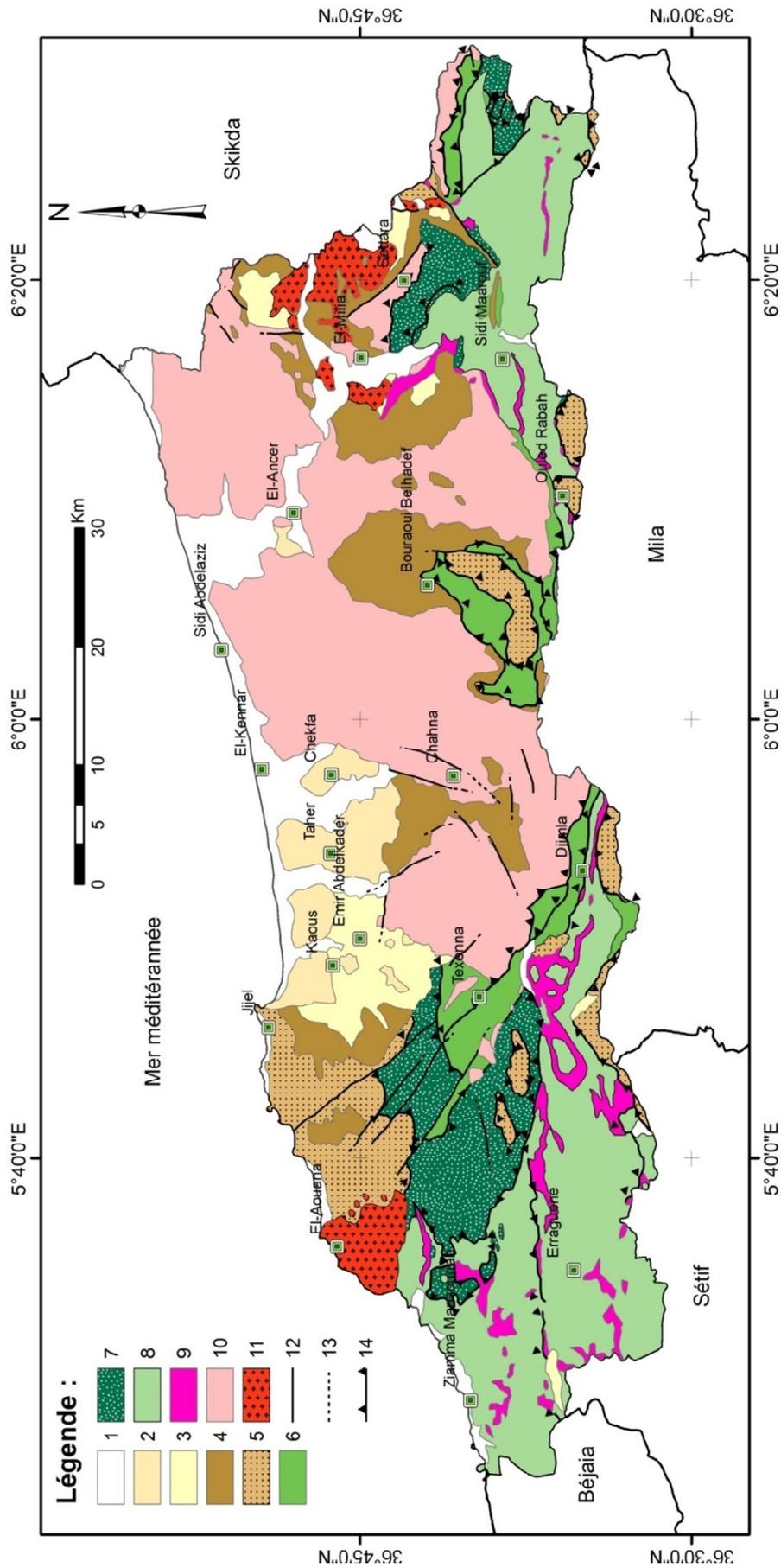


Figure 21: Carte géologique de la Wilaya de Jijel (Extrait de la carte structurale au 1/500 000^{ème} de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens, Vila, 1980)

Légende:

1 : Quaternaire, 2 : Pliocène, 3 : Miocène post-nappe ; 4 : Oligo-Miocène Kabyle (OMK) 5 : Flysch Numidien ; 6 : Série tellienne ; 7 : Flysch Massylien ; 8. Flysch Maurétanien ; 9 : Trias ; 10 : Socle cristalloyllien ; 11 : Roche magmatique ; 12 et 13 : Contacts stratigraphiques (failles visibles ou supposées) ; 14 : Charriages et chevauchements.

II.4.1.3. Les formations du Jurassique

Les formations du Jurassique de la petite Kabylie affleurent, principalement dans sa partie orientale (région de Sidi Maarouf) et dans sa partie occidentale (région comprise entre de Ben Yadjis et Ziamma Mansouriah) (Fig. 21).

Dans la partie occidentale les formations Jurassiques sont très réduites et sont principalement représentés, par des paquets de roches carbonatées, redressés à la verticale par la remontée diapirique du Trias (massif du Kef Sidi Mansour). Dans la partie orientale, les formations du Jurassique sont représentées par les massifs de la région de Sidi Maarouf (Kef Boulehname, Moul-ed-Demamene, Kef Sidi Maarouf, El Feddous, Kef Dardja, Kef Hammam Béni Haroun) (Boulkroune Y., & Zaibet H., 2016).

Les formations carbonatées du Lias constituent un caractère orographique très marquant des régions où elles affleurent ; alors que les formations du Dogger et du Malm sont moins carbonatées et plus marneuses et sont moins fréquentes.

a) Lias basal, dolomitique (infra-Lias)

Sur le plan lithologique, et d'après les travaux de M. Durand Delga (1955), à l'Est du village de Beni Yadjis au niveau de Dj. Sidi-Mansour à 912 m d'altitude, permettent de distinguer un Lias basal constitué de calcaires compacts, en grandes dalles, de teinte assez claire, montrant parfois des grains de quartz, plus loin à 500 m de l'ouest à l'Est, ils sont totalement transformés en une dolomie grise, où la stratification a entièrement disparu. Ces calcaires et dolomies sont attribuables au Lias inférieur- Pliensbachien (Durand Delga, 1955).

A l'Ouest de ce relief, le Dj. Sidi-Oussaf (929 m) est constitué par des calcaires, subhorizontaux, qui montrent, en contact anormal au-dessus du Trias diapir (Durand Delga, 1955), des calcaires à silex, en tout petits bancs, des calcaires compacts, à litage plus ou moins net couronnés parfois par une assise de calcaires à fins grains de quartz et des calcaires plus ou moins marneux, un peu jaunâtres, puis calcaires à silex, lités.

b) Dogger et Malm

Au niveau de Dj. es Daki (NE du Dj. el-Kalaa), situé sur la rive Sud de l'oued Djendjene, M. Durand Delga (1955), a décrit une série datée du Dogger subhorizontale, séparée du Sénonien plus septentrional par une cassure injectée de Trias (Durand Delga, 1955), composée par :

- calcaires en bancs (60 à 80 m visibles) à lits de silex noirs. Vers le haut, les dalles calcaires augmentent d'épaisseur et les silex diminuent de fréquence.
- calcaires marneux grisâtres, de patines jaunâtres, et calcaires en minces dalles à cassure claire et à silex clairs (environs 10 m au total),
- marne-calcaires bleuâtres (20 m),
- série marneuse fortement décalcifiée, admettant des lits discontinus de calcaires à cassure foncée ou de marne-calcaires.

D'autre part, aux environs du Dj. Sidi-Mansour, plus exactement à l'Est du Kef Bou-Hanni, un rocher jurassique est amené au jour, au milieu du Crétacé, par le Trias diapir, on y trouve des calcaires à lits siliceux et des calcaires marneux jaunâtres, les uns et les autres en petits bancs verticaux, alignés suivant une direction Est-Ouest, attribué par Durand Delga (1955) au Malm.

II.4.1.4. Les formations du Crétacé

Le début de la période crétacée est marqué sur le plan paléogéographique par l'individualisation du bassin des flyschs (Bouillin, 1977). Ce bassin séparait un domaine septentrional interne représenté par les terrains métamorphiques du socle kabyle et de sa couverture sédimentaire représentée par la « dorsale kabyle » ou « chaîne calcaire » d'un domaine méridional, externe, représenté par les formations telliennes de la marge téthysienne nord-africaine.

Dans la partie occidentale de la Petite Kabylie, les formations de la dorsale kabyle n'affleurent pas, les plus proches affleurements appartenant à cette unité se trouvent dans le massif de Sidi Driss. Les formations de la période crétacé affleurent dans la région de petite Kabylie, consistent donc en deux types de sédimentations (Boukkroune Y., & Zaïbet H., 2016) :

- une sédimentation détritique de type flysch, d'environnement bathyal à abyssal plus ou moins profond, ayant caractérisé le bassin maghrébin ou bassin des flyschs (Bouillin, 1977) limité au Nord par la marge sud-européenne et au Sud par la marge nord-africaine ;
- une sédimentation dominée par les marnes et les marno-calcaires, d'environnement néritique moins profond, ayant caractérisé le domaine tellien de la marge nord-africaine.

a) Les formations crétacées du type « flysch »

Les formations crétacées du type « flysch » sont représentées, notamment dans le Crétacé inférieur, d'une part par le flysch schisto-gréseux albo-aptien (Durand Delga, 1955) ou flysch

massylien (Raoult, 1969) et d'autre part par le flysch de Guerrouch (Durand Delga et Lambert, 1955) ou flysch maurétanien (Gélard, 1969).

Les formations du flysch massylien affleurent sous forme d'une étroite bande orientée Est-Ouest depuis la région de Sidi Maarouf à l'Est jusqu'à la région de Texenna à l'Ouest (Fig. 21). Le long de cette bande, partout où ils affleurent, ces flyschs occupent une position structurale inférieure car toujours engagés par sous charriage sous les terrains métamorphiques du socle kabyle. Cependant, au Sud de Texenna, ces flyschs massyliens sont engagés sous les formations d'une série grésocalcare-pélique épimétamorphique, associée à un complexe de roches magmatiques basiques et ultrabasiques. Les formations du flysch maurétanien affleurent principalement dans la région comprise entre le méridien passant par Texenna et Ben Yadjis à l'Est et les proches abords des Aftis à l'Ouest (Fig. 20) (Boukroune Y., & Zaibet H., 2016).

Sur le plan lithologique, les formations du flysch massylien comportent une série allant du Néocomien au Lutétien terminal et regroupe trois ensembles qui sont du bas en haut (Djellit, 1987):

- des argiles et grès quartzitiques, des grès légèrement calcaires et localement des niveaux conglomératiques de l'Albo-Aptien.
- des marnes et calcaires fins du Vraconien, des microbrèches et des conglomérats du Sénonien inférieur et moyen auxquels sont associées des phanites noires.
- des bancs calcaires à microfaunes pélagiques du Turonien-Cénomaniens. Il est caractérisé par des schistes, des grès quartzitiques surmontée par des microbrèches à éléments calcaires et à ciment pélique et des marnes, allant du Néocomien à l'Albien supérieur (Raoult, 1969).

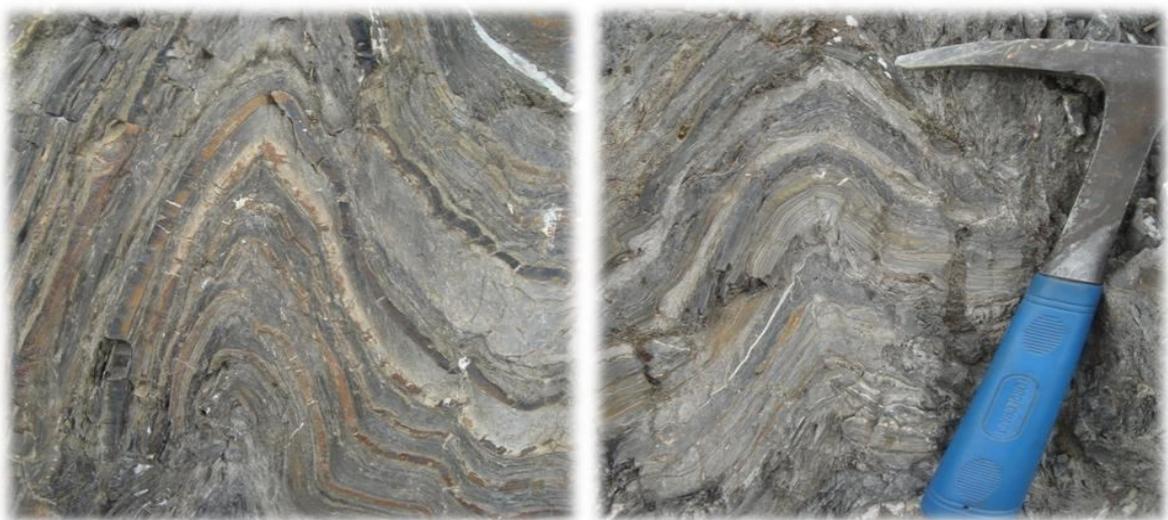


Figure 22: Photos illustrant les micro-plies caractérisant le flysch massylien.

Dans la région d'étude, l'affleurement le plus visible et le plus étendu du flysch Massylien et au sud de Texenna le long de l'oued Djendjen et l'oued Djimla, marquant le contact anormal avec les formations du socle kabyle au Nord et les formations telliennes au Sud. Il est caractérisé par une alternance de marnes schisteuses et de bancs de grés quartzitiques, d'épaisseur décimétrique, parfois centimétrique, surmontées par des microbrèches calcaires à ciment pélitique et des marnes, présentant parfois des micro-plissements très spectaculaire (Fig. 22).

Le flysch maurétanien est représenté à la base par une alternance argilo-gréseuses du flysch de Guerrouch et au sommet par une puissance assise gréseuse. Les bancs de grés épais sont à grains homométriques à cassure verdâtre (patine verdâtre). Il occupe largement la région de M'cid-Echta au Sud-Ouest de Texenna. L'âge Eocène supérieur-Oligocène est attribué à ces formations (Djellit, 1987).

b) Les formations crétacées de type « tellien »

Les principaux affleurements des formations telliennes sont observés dans la partie occidentale de la Petite Kabylie entre Ben Yadjis et Ziama Mansouria, où elles couvrent de larges surfaces du domaine tellien de cette région. Elles sont représentées par des marnes et marno-calcaires du Crétacé inférieur (Néocomien-Barrémien) et des marnes du Crétacé supérieur (Sénonien) (Vila, 1980 ; Bouillin, 1977).

II.4.1.5. Les formations du Paléocène-Eocène

Les principales formations du Paléocène sont constituées par des marnes noires à boules calcaires jaunes. Vers les parties supérieures, elles surmontent, en continuité stratigraphique les formations crétacées de type tellien, constituant ainsi le complexe marneux du Crétacé supérieur-Paléocène. Les principaux affleurements du Paléocène se trouvent dans la région de Sidi Marouf à l'Est et dans la région comprise entre Ben Yadjis et Ziama Mansouria à l'Ouest.

Les formations de l'Eocène sont constituées par des marnes noires à boules jaunes en continuité stratigraphique avec les marnes du paléocène voir sénoniennes. Suivi de calcaire compacts, lités, de patine blanchâtre mais à cassure noirâtre ou grisâtre, avec souvent des silex noirs surmontant en parfaite continuité les marnes noires précédente. Il s'agit du classique faciès des calcaires (Suessonien) à Globigérines, datés de l'yprésien et du Lutétien inférieur ((Durand Delga, 1955). Le Lutétien supérieur est caractérisé par des marnes noires identiques à celle de l'éocène basal. Les principaux affleurements se trouvent étroitement associés à ceux du Paléocène et du Crétacé du type « tellien ».

II.4.1.6. Les formations de l'oligocène

Les formations de l'Oligocène terminal constituent avec celles du Miocène inférieur deux types de formations : les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle (OMK) d'un part et les formations du flysch Numidien d'autre part.

A. Les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle

Les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle sont transgressives et discordantes sur les terrains métamorphiques du socle Kabyle. Elles occupent une grande surface dans les parties centrales et orientales de la petite Kabylie (Fig. 20). Sur le plan lithologique, les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle sont constituées par :

- Les conglomérats de base (d'âge oligocène)

Ces dépôts largement détritiques, sont constitués par des galets de socle métamorphique remaniés de taille parfois pluri centimétriques, polygénique à dominance de galets de schiste, phyllades quartz et parfois gneissique. Ce terme de base est bien visible au contact du socle kabyle au Sud de la localité de Ouadjana. L'épaisseur de cet ensemble dépasse les 150 m.

- La Molasse

Elle est constituée par une matrice marneuse dilacérée, de couleur grise, avec des passées fines d'argiles jaunâtres, parfois blanchâtres à varicolores et à passées gréseuses micacées décimétriques à métrique de couleur brun-tabac (Fig. 23). Cette matrice à caractère molassique peut évoluer vers d'autres faciès à tendance flyschoïdes.

Dans cette matrice, on peut trouver des fragments de grès non roulés à bords anguleux, ainsi que des grands blocs de grès qui présentent des caractéristiques flyschoïdes noyés dans la molasse l'Oligo-Miocène Kabyle. Cette unité dite Tectono-sédimentaire, représentée par des blocs de type flysch (maurétanien, numidien et massylien), ayant glissés dans le bassin de sédimentation à la faveur des mouvements tectoniques méridionaux, datés de l'Oligocène supérieure (H. Djellit, 1987).



Figure 23: Images illustrant l'aspect général des formations molassiques de l'Oligo-Miocène Kabyle.

B. Les formations du flysch Numidien

Le flysch numidien occupe une position structurale la plus haute dans l'édifice Alpin. Cette formation est bien représentée au niveau de Djebel Bouafroune (1353 m), Djebel Tamesguida (1623 m) au sud de Djimla, Djebel Mezghitane (380 m) et la région de Kissir à l'Ouest de la ville de Jijel et Dj. El-Hadjra à l'Est d'El-Milia. Elle est composée de trois termes qui sont en continuité stratigraphique de haut en bas :

- un terme supérieur comportant une assise gréseuse épaisse à dragée de quartz ;
- un terme médian formé d'une alternance argilo- gréseuse ;
- un terme de base comportant des argiles sous numidiennes, dites argiles à tubotomaculum ;

Le terme supérieur, constitué de grès à dragées de quartz, dits « grès numidiens » qui sont des roches consistantes et dures, c'est pourquoi, ils se rehaussent surtout sur le relief par sa plus grande résistance à l'altération et à l'érosion, formant clairement des pointes de roches sur le relief. L'épaisse assise gréseuse, en bancs épais et réguliers, massifs, présente un grès quartzueux à teinte jaune-blanc, rouille à l'altération, à grains hétérométriques, à cassure blanche riche en grains de quartz plus ou moins arrondis (dragée de quartz). Ces bancs gréseux sont souvent fortement tectonisés, diaclasés, avec la présence occasionnelle d'intercalations d'argilites schisteuses vertes et d'argilites à nodules calcaireux de patine jaune.

L'assise argileuse, souvent verdâtres, parfois rougeâtres, marquant la base du flysch numidien dites argiles sous-numidiennes dans lesquelles nous avons réalisés nos prélèvements, sont riches en Tubotomaculum.

II.4.1.7. Les formations du Miocène

La période Miocène est caractérisée par deux types de formations :

- Les formations sédimentaires du Miocène post-nappes ;
- Les roches magmatiques ;

Les formations marneuses marines du Miocène post-nappes se trouvent principalement en remplissage des dépressions ou petits bassins de la partie occidentale (région de Jijel) et orientale (région d'El-Milia). Elles affleurent largement dans le bassin Néogène de Jijel et sont représentées par une série marneuse essentiellement composée de marnes bleues à rare passées calcareuses discontinues et plus ou moins arrondies. Que l'on peut rapporter au Tortonien moyen-Messinien (H. Djellit, 1987). La série marneuse repose en discordance aussi bien sur les formations du socle Kabyle que sur les formations et l'Oligo-Miocène kabyle et des grès numidiens. Les plus importants affleurements de cette série marneuse sont observés au Sud de Jijel au niveau des localités de Harrathène et Beni Ahmed et dans les régions de Taher, Emir Abdelkader et Rekkada Metletine.

Dans la région de Rekkada Metletine, cette série est plutôt grise à bleue très épaisse avec présence de gypse en fer de lance. Elle est fortement ravinée et présente une puissance qui peut atteindre environ 300 mètres par endroit (H. Djellit, 1987).

II.4.1.8. Les formations du Pliocène

Les formations du Pliocène sont constituées, essentiellement, par des conglomérats des graviers et de sables jaunes d'au moins 50 mètres d'épaisseur. Le terme conglomératique du Pliocène comportent des blocs anguleux, mal classés à granoclassement bien visible et de nature et de taille variable, empruntées en totalité soit au socle kabyle, soit aux unités à matériel flysch. (H. Djellit, 1987).

Les dépôts de microconglomérats et de grès sableux, surmontant en discordance les marnes miocènes affleurent largement dans la partie Sud du village de Kaous, notamment, au niveau du quatorzième kilomètre, de Mrayedj et de Metelatine et au Sud de la ville de Taher, dans la région de Dakkara et de Tahar Oussaf.

II.4.1.9. Les dépôts détritiques du Quaternaire

Les dépôts récents, datant du Quaternaire sont représentés par plusieurs faciès généralement à caractères détritiques, formés par des alluvions anciennes, récentes et actuelles. Les recouvrements les plus vastes occupent les zones basses, comme le littoral de la ville de Jijel, les berges des cours

d'eau importants comme l'Oued Djendjen, Oued Nil, Oued El Kebir, oued Kissir où les terrasses récentes constituent de vastes plaines alluviales cultivables.

Les alluvions ou terrasses anciennes sont constituées de dépôts détritiques essentiellement de graviers à matrice sableuse avec parfois des intrications limoneuses et argileuses. Les alluvions récentes forment les dépôts des oueds actuels, et constitués de graviers, de sables et d'argiles. Les dépôts récents du Quaternaire sont également représentés par les dunes sableuses anciennes et récentes qui longent le littoral ainsi que les argiles de recouvrements.

II.4.1.10. Les roches magmatiques

Au niveau de la partie occidentale de la Petite Kabylie, L'épisode magmatique miocène a engendré la mise en place d'importantes masses de granite, microgranite et granodiorite (région d'El Milia) et de microdiorite et de roches volcaniques (région d'El Aouana).

II.5. Aspect structural

En plus des déformations souples (plissements) et des charriages, la partie occidentale du massif de Petite Kabylie est affectée par une tectonique cassante, marquée par de grands accidents tectoniques d'ampleur régionale, affectant aussi bien les formations du socle kabyle que les formations de la couverture sédimentaire. Ces grands accidents de direction N-S, E-W, NE-SW et NW-SE sont à l'origine de la configuration morpho-structurale de la région, caractérisée par des reliefs, culminant à des altitudes assez importantes et des dépressions, comblées par les dépôts post-nappes mio-pliocènes. Par ailleurs, ces accidents ont joué un rôle important dans la remontée diapirique des formations évaporitiques du Trias, qui a bouleversé les structures géologiques.

CHAPITRE III.

MATÉRIELS ET MÉTHODES D'ETUDES

III.1. Introduction

Dans ce chapitre sont présentés, les lieux de prélèvement et les types de matériaux argileux servant de supports aux travaux menés au cours de cette thèse et les techniques utilisées pour la préparation des échantillons étudiés. Ce chapitre porte également sur la description des différentes méthodes expérimentales employées pour la caractérisation minéralogique, chimique, physique et mécanique de ces matériaux argileux.

III.2. Les matériaux argileux étudiés

Du point de vue géologique les principales formations argileuses de la région de Jijel qui présente un grand intérêt pratique dans l'industrie céramique et qui ont fait l'objet de notre d'étude sont :

- Les argiles marneuses du Burdigalien, formant le remplissage du bassin néogène de Jijel. Elles constituent, depuis longtemps, l'une des matières premières les plus recherchées pour les poteries traditionnelles et les briques ;
- Les argiles sous numidiennes, formant la base de la nappe numidienne, affleurant dans différents endroits de la région de Jijel (Mezghitane, Djimla, El Milia...) ;
- Le kaolin (argile blanche), résultant de l'altération chimique des intrusions de leucogranites, des lames d'orthoigneiss et des filons de pegmatites, intrudés dans les formations du socle Kabyle à l'exemple du gisement de Tamazert à El-Milia et celui d'Adjarda (Chekfa).

Ces différentes formations argileuses, caractérisées par une grande variation de composition minéralogique, offrent de grandes opportunités d'utilisation dans le domaine industriel (produits rouges, industrie céramique, papier...etc).

III.2.1. Matériaux argileux des bassins néogènes de Jijel et de Settara (marnes post-nappes)

Le bassin Néogène de Jijel d'où proviennent les matériaux argileux, présente une superficie de 150 km². Ce dernier est limité au Nord par la Méditerranée, à l'Est et au sud par les reliefs montagneux, des formations cristallophylliennes du socle Kabyle et à l'Ouest par le massif volcano-sédimentaire d'El Aouana. Les dépôts néogènes du bassin de Jijel, correspondant aux formations post-nappes, reposent en discordance sur un empilement de nappes de charriage, dont la dernière est représentée par la nappe du flysch numidien (Durand Delga et Magné, 1952).

Les plus importants affleurements des marnes miocènes du bassin de Jijel sont surtout observés au Sud de la ville de Jijel (région de Harratène et de Beni Ahmed), et au niveau des localités de Kaous, Emir Abdelkader et Taher (Fig. 24). La partie supérieure de ces argiles miocènes se particularise par la présence de miches calcaires de couleur jaune.

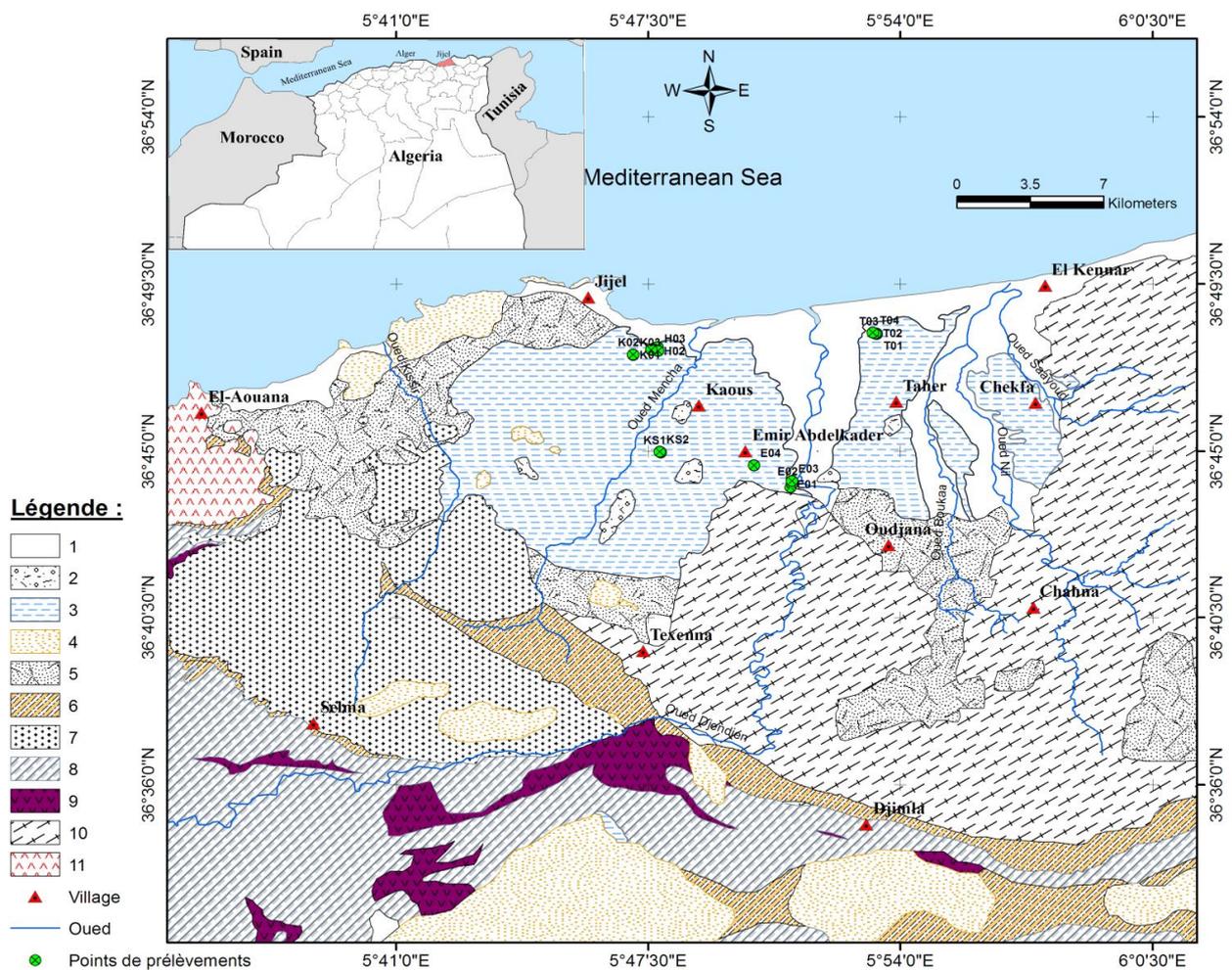


Figure 24: Carte de localisation de la zone d'étude et carte géologique (d'après Raoult, 1982).

Légende :

1. Quaternaire : alluvions, dunes actuelles et anciennes, éboulis 2. Pliocène : microconglomérats, graviers et sable 3. Burdigalien-langhien (post-nappe) : marnes grises-bleuâtre, miches calcaire 4. Série Numidienne (Aquitano-Burdigalien) : argile et grès 5. Oligo-Miocène kabyle (OMK) : molasse, grès micacé 6. Flysch Massylien (Albo-Aptien) : schisteux gréseux 7. Flysch maurétanien (Néocomien-Lutétien) : grès et marnes 8. Série Tellienne (Lias-Eocène) : marnes et marno-calcaire 9. Trias : argileux-gréseux, gypsifère 10. Socle kabyle : schistes, mica-schistes, gneiss, porphyroïde et cipolin 11. Roches magmatiques d'El-Aouana : microdiorite et laves volcanique.

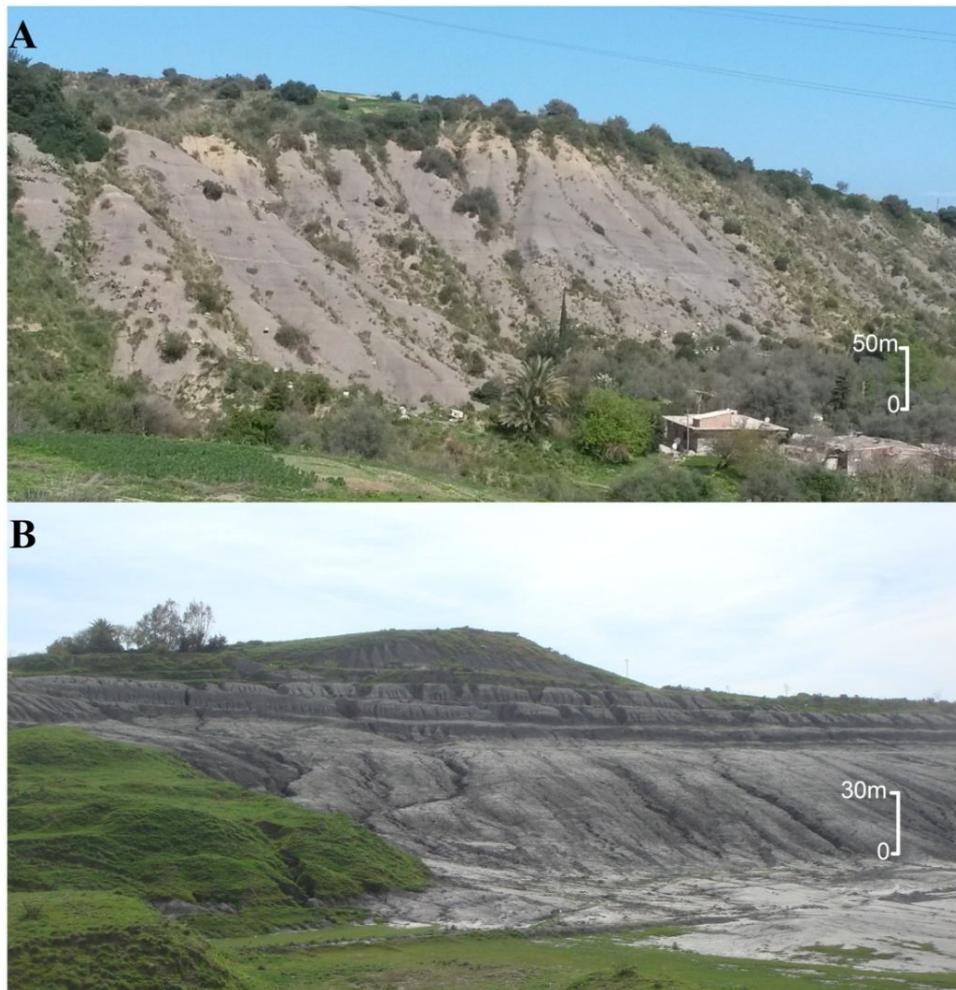


Figure 25: Vue panoramique des principaux dépôts d'argile du bassin néogène de Jijel. (A) Photo des dépôts marneux de la région d'Azaouan (Emir Abdelkader). (B) Photographie d'argiles gris-bleu de la région de Taher (Bordj el Koudia), site qui a fait l'objet d'une exploitation durant les années 80 comme matière première de fabrication de brique rouge (briqueterie).

Dans la région de Settara, Chekfa et au Sud de la localité d'Emir Abdelkader affleurent des argiles marneuses de couleur bleue dites marnes sahéliennes (Durand Delga, 1955). Ce type de marnes argileuses à été daté par Durand Delga (1955), du Miocène marin terminal. Les argiles miocènes du bassin de Jijel sont surmontées par les dépôts du Pliocène continental, représentés par des cailloutis, galets, poudingues, graviers, sables et argiles. L'épaisseur maximum des dépôts

pliocènes varie entre 30 et 50 mètres. Ces dépôts pliocènes occupent une bonne partie des plaines alluviales de la région de Jijel et forment l'aquifère principal de ces dernières. Par ailleurs, les formations du Pliocène continental affleurent en lambeaux au-dessus des marnes Burdigaliennes dans les régions de Kaous, Rekkada Metlatine et Taher.

L'assise marneuse des différents sites touchés par la présente étude est composée de marnes argileuses de couleur gris-bleu et d'une épaisseur dépassant les 150 mètres (Fig. 25). Cette assises marneuse, correspondant aux matériaux utiles se termine au sommet par une couche d'argile sableuse à graveleuse d'une épaisseur variable de 0.2–2.5 m. Les échantillons d'argile ont été prélevés de 10 à 15 m d'intervalle et jusqu'à une profondeur totale moyenne de 1.5 m, en utilisant une foreuse manuelle (terrière).

Tableau 8: Sites d'échantillonnage des matériaux argileux (bassin néogène de Jijel et Settara).

N°	Code échantillon	Site	Coordonnées géographiques	
			Longitude	Latitude
1	T01		5.89001	36.80266
2	T02	Taher	5.88972	36.80279
3	T03	(Bordj el Koudia)	5.88932	36.80281
4	T04		5.88832	36.80324
5	E01		5.85299	36.73361
6	E02	E.A.K	5.853511	36.73547
7	E03	(Azaouan)	5.853557	36.73669
8	E04		5.837262	36.74382
9	H01		5.794303	36.79614
10	H02	Harratène	5.795869	36.79673
11	H03		5.796035	36.79512
12	H04		5.793167	36.79549
13	K01		5.785276	36.79327
14	K02	El-Akabi	5.78527	36.79337
15	K03	(T'horat)	5.78527	36.79346
16	S01		6.344836	36.71020
17	S02		6.344852	36.71064
18	S03	Settara	6.344656	36.71703
19	S04	(Site 1)	6.344683	36.71713
20	S05		6.344545	36.71706
21	ST1		6.347296	36.71952
22	ST2		6.347312	36.71950
23	ST3	Settara	6.347254	36.71953
24	ST4	(Site 2)	6.347309	36.71961
25	ST5		6.347357	36.71964
26	ST6		6.347459	36.71949

Pour chaque échantillon, deux (02) kg de matière ont été recueillies et les coordonnées géographiques des points de prélèvement ont été relevées en utilisant un GPS (Tab. 8, 9 et 10). Tous les échantillons ont été étuvés à 35°C pendant 48 h, puis broyés à l'aide d'un mortier en agate.

Vingt six échantillons au total de matériaux argileux représentatifs ont été recueillis au niveau du bassin néogène de Jijel et de Settara au niveau d'affleurement de marnes argileuses Miocènes (Fig. 24), au niveau de six (06) sites : Taher (Bordj el Koudia), Emir Abdelkader (Azaouan), El-Akabi (T'hourat), Harratène et Settara (El-Milia).

III.2.2. Matériaux argileux des formations sous-numidiennes

Les argiles sous numidiennes sont parmi les formations les plus répandues dans la région de Jijel. Elles affleurent dans différents endroits, notamment dans les régions de Djimla, Tamentout et Ben Yadjis, El-Milia et Mazghitane. Deux zones ont faits l'objet d'investigation, la première est celle située dans le périmètre de Djimla, Tamentout et Ben Yadjis, où les argiles sous numidiennes présente de grands affleurements en relation avec l'extension de la nappe numidienne et la deuxième zone est celle située dans la région d'El-Milia plus précisément dans la localité de Tarzoust et ses environs.

Les argiles sous numidiennes forment la base de la nappe numidienne, cette dernière occupe une position structurale la plus haute dans l'édifice structural Alpin. Elle est constituée d'une épaisse formation argilo-gréseuse d'âge Oligocène-Miocène inférieur, affleurant largement en différents points, de la petite Kabylie.

Au niveau de la région de Djimla, cette formation est bien représentée au niveau du Djebel Bouafroune (1353 m) et Djebel Tamesguida (1623 m) au sud et Sud-Ouest de Djimla. Elle est composée de trois termes qui sont en continuité stratigraphique de haut en bas (Fig. 26) :

- un terme supérieur comportant une assise gréseuse épaisse à dragée de quartz ;
- un terme médian formé d'une alternance de niveaux argileux et de bancs de grès ;
- un terme de base comportant des argiles sous numidiennes, ou argiles à Tubotomaculum ;

La région de Djimla et le chaînon de Tamesguida doivent leurs hauts sommets aux formations du flysch numidien essentiellement, gréseuses. Entre le col Fedoulès et Tamentout et le long de la route nationale N°77 se trouve un premier grand affleurement (forêt de Djimla). Le substratum en est formé par le Flysch marno-microbréchique du Sénonien (formation tellienne), les assises argileuses souvent verdâtres, parfois rougeâtres, marquant la base du flysch numidien dites argiles

sous-numidiennes au niveau desquelles des prélèvements ont été réalisés. Ces affleurements d'argiles sous numidiennes se particularisent par leur richesse en *Tubotomaculum* et leur importante épaisseur (Fig. 27).

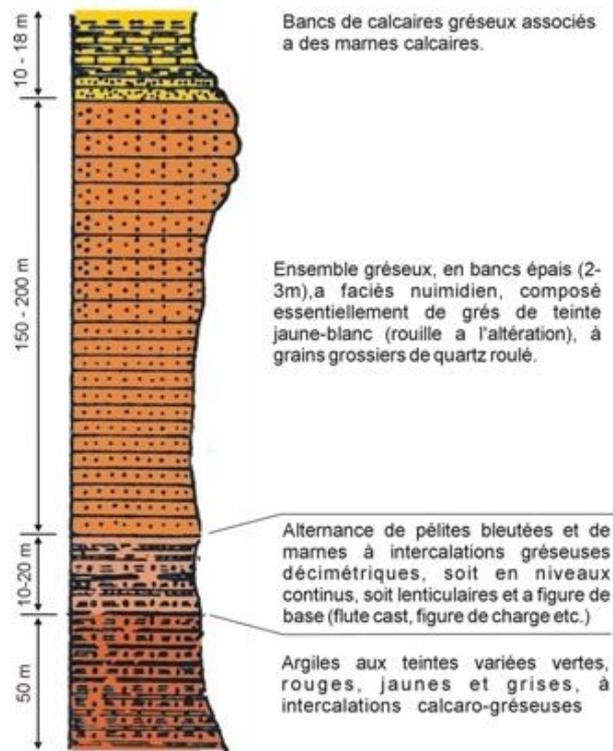


Figure 26: Colonne lithologique du flysch Numidien (d'après H. Djellit, 1987)

Au niveau de la région d'El-Milia, les prélèvements ont été effectués au niveau de Tarzouzt, situées à 5 Km à l'ouest de la ville d'El-Milia. La morphologie des sites d'échantillonnage est caractérisée par un versant à déclivité moyenne comprise entre 10 et 15%, d'orientation générale Nord-Ouest/Sud-Est.

Les formations de nappe numidienne sont bien représentées au niveau du site de Djabel El-Hadjra, elle comprend un ensemble supérieur gréseux, constitué de bancs de grès massifs, de couleur blanchâtre parfois beige à patine jaunâtre avec des dragées de quartz bien visibles et de la glauconie. Par endroits, ces bancs de grès d'une épaisseur variant entre 3 et 8 m, montre une fracturation importante et des altérations. Ces bancs de grès diminuent d'épaisseur au fur et à mesure qu'on se déplace vers le nord, où une alternance de grès et d'argile bleus et grises cendrées à passés de flammes rougeâtres commence à apparaître.

Un ensemble inférieur au niveau duquel ont été effectués nos prélèvements, constitué d'argiles dites sous numidienne, de couleur grise à verdâtre voir varicolores, microplissées et débitées parfois

en plaquettes et à Tubotomaculum. Cet ensemble, renferme parfois des niveaux carbonatés et siliceux assez minces. Les affleurements les plus visibles de ces argiles sont observés au niveau de Chaabet Bou Hadjba et Mechta Tarzoust.



Figure 27: Photos illustrant les affleurements des formations argileuses sous-numidiennes au niveau de la région de Djimla et Tamentout.

Tableau 9 : Sites d'échantillonnage des matériaux argileux des argiles sous numidiennes.

N°	Code échantillon	Site	Coordonnées géographiques	
			Longitude	Latitude
1	D01	Djimla, Tamentout Beni Yadjis	5.86967	36.57348
2	D02		5.86159	36.57065
3	D03		5.83850	36.54686
4	D04		5.83537	36.55602
5	D05		5.82309	36.55946
6	M01	El-Milia	6.22299	36.76100
7	M02	(Tarzoust)	6.23073	36.73339

III.2.3. Kaolins de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa)

Les gisements de Kaolin de Tamazert et d'Adjarda sont situés au Nord-Est de l'Algérie, respectivement dans les daïras d'El Milia et de Chekfa. Du point de vue géologique, ces gisements font partie intégrante du socle kabyle, composé pour l'essentiel de formations cristallophylliennes (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes).

Pour le gisement de Tamazert, il a été connu depuis 1925 et a fait l'objet d'une exploitation par une société française en 1932 puis abandonné 3 mois plus tard, en raison de la teneur élevée en hydroxydes de fer et en séricite qui ne pouvaient être éliminée par les procédés de traitement de cette époque. Il a fait l'objet de diverses campagnes de prospections et d'essais, par une mission chinoise, le B.R.G.M. et la SONAREM. Ainsi que des prélèvements d'échantillons pour essais techniques et analytiques par le laboratoire de Zurich Bouz Allen, laboratoire Roumain Venot pic et le laboratoire Américain Bravo corporation.

Le gisement de kaolin du lieu Tamazert, fait partie de l'édifice structural des Béni Ferguene (Y. Mahdjoub, 1991). Il montre un dispositif en apparence simple mais présente des caractères structuraux et métamorphiques complexes. Les roches encaissantes sont composées essentiellement de gneiss, de micaschistes et, accessoirement, des granites plus ou moins gneissifiés. Le kaolin de Tamazert est un gisement primaire où la kaolinite représente le résultat direct de l'altération sans transport ultérieur. En témoigne la présence de quartz abondant, de muscovite et de reliques de feldspaths. La zone kaolinisée correspond à l'altération de gneiss feldspathiques intercalés par des schistes micacés. Deux principaux faciès constituent la zone kaolinisée. Ils sont caractérisés par leurs taux de minéraux argileux. Ce sont : le kaolin sableux plus riche en kaolin, sous forme de couche superficielle d'épaisseur de 30 mètres en moyenne et le gneiss kaolinique situé en profondeur. Ces deux faciès sont traversés par des passées ferrugineuses situées le long des failles et des fissures.

Le gisement de kaolin de Tamazert est divisé en trois principaux corps à savoir (Fig. 28) :

- le corps central c'est le plus important en réserves.
- le corps nord en deuxième position.
- le corps Sidi-Kader c'est le moins important en réserves mais celui qui présente la meilleure qualité, mais n'est pas en exploitation actuellement.

Ces trois (03) corps se présentent sous forme de lentilles qui s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres avec une épaisseur moyenne de 20 m.



Figure 28: Vue des trois corps, constituant le gisement de Tamazert (El-Milia, NE Algérien) (Image Google, 2017).

III.2.3.1. Description du processus de traitement

Le schéma d'épuration adopté par l'entreprise SOALKA des Kaolins d'EL-Milia est relativement complexe et comprend de nombreuses étapes de "traitement" (Fig. 29). Elles se déroulent toujours en présence d'eau pour éviter que l'argile ne s'agglomère, et comprend : criblage, cyclonage, décantation, centrifugation, tamisage (Fig. 30).

Toutes ces opérations convergent vers un même but : concentrer les particules les plus fines (kaolinite) et éliminer les plus grossières (quartz et micas). Le traitement industriel est plus ou moins poussé suivant la qualité que l'on cherche à obtenir (les industries du papier et de la céramique sont plus exigeantes).

a) Homogénéisation et stockage

L'opération consiste à effectuer plusieurs tas de minerai brut provenant de la carrière à l'aide d'une bande navette de manière à rendre la matière homogène du point de vue granulométrie. En cas de panne de cette bande navette l'homogénéisation se fera par chargeuse.

b) Séparation par voie humide

Le minerai est ensuite chargé dans une trémie de réception, puis transféré par une bande transporteuse vers un débourbeur à voie humide. Il subit par la suite un criblage et un broyage.

c) Décantation et épaissement

Après le passage de la matière par plusieurs étapes de cyclonage, suivi par une opération de tamisage des sous verses provenant des hydrocyclones, le mélange issu de cette étape est transféré à l'aide de pompe à volute vers les deux bassins de décantation pour y subir une opération d'épaissement et de décantation des boues.



Figure 29: Images illustrant l'exploitation et le traitement du kaolin de Tamazert. **a)** Extraction du kaolin au niveau du corps central. **b)** Stockage du kaolin au niveau de l'usine pour traitement et d'enrichissement.

d) Blanchiment chimique

Un traitement chimique est effectué pour le type de kaolin destiné à l'industrie du papier (produit KT3B).

e) Filtration- séchage

Après l'étape de décantation la matière est pompée vers l'atelier pour y subir respectivement une filtration à l'aide de filtre à bande et filtre à presse de manière à éliminer le maximum d'eau, puis transféré par bande transporteuse vers le séchage au niveau du sécheur .

f) Transport expédition

La matière passe par un malaxeur et un déchiqueteur pour obtenir en fin du processus des galettes de Kaolin représentant le produit final.

Le produit final est soit stocké en vrac ou bien il est emballé dans des big-bags au niveau de l'atelier avant d'être livré aux divers clients.

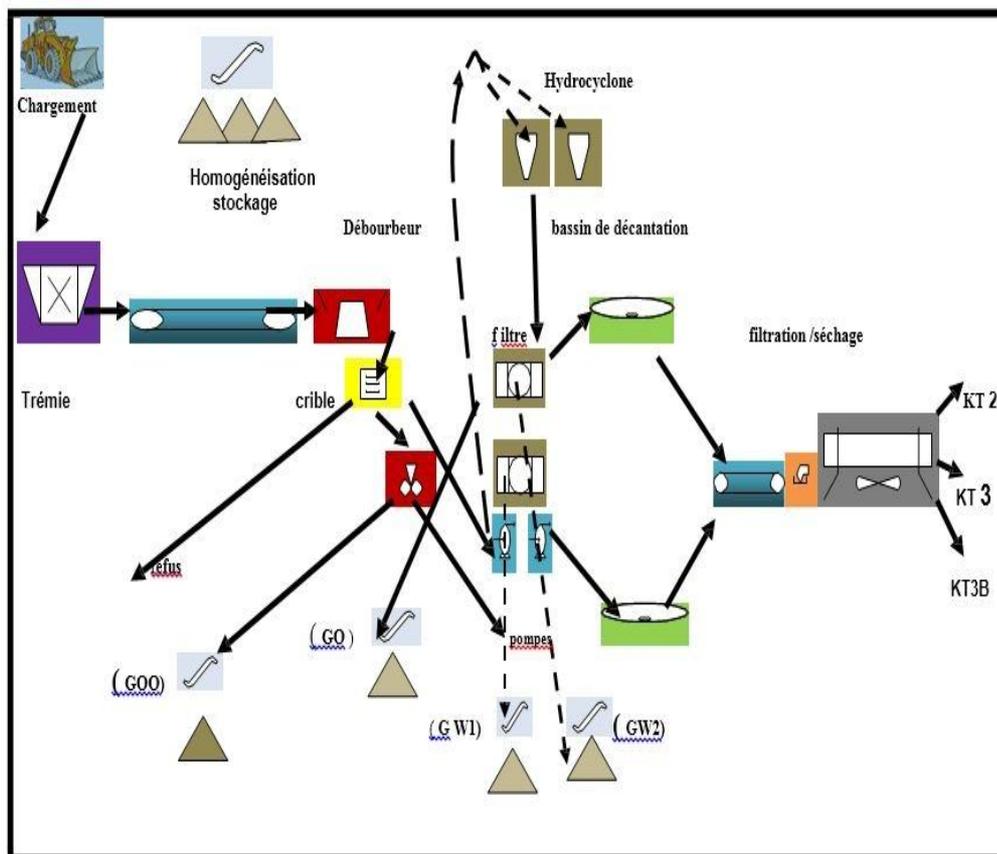


Figure 30: Processus d'enrichissement et de traitement du Kaolin de Tamazert (SOALKA).

Le gisement de kaolin d'Adjarda est le résultat de l'altération des corps de pegmatite encaissés dans les formations cristallophylliennes du socle. Ces corps de pegmatites se caractérisent par un contenu minéralogique primaire comportant : du quartz, du plagioclase, du feldspath potassique, et

de la muscovite et comme minéraux accessoires le grenat, tourmaline, apatite, zircon et barytine. Ces pegmatites sont affectées, par endroits par des phénomènes métasomatiques de feldspathisation et d'albitisation. Ces transformations métasomatiques s'accompagnent généralement par un certain enrichissement en minéraux argileux résiduels (kaolinite). Le kaolin est à l'origine de l'altération des feldspaths et plagioclase contenus dans les corps de pegmatite, facilitée par le degré de fracturation du massif à travers lesquels circulent les fluides hydrothermaux.

Tableau 10: Sites d'échantillonnage des Kaolins de Tamazert et Adjarda.

N°	Code échantillon	Site	Coordonnées géographiques	
			Longitude	Latitude
1	KT2	Tamazert	6.255205	36.841514
2	KT3	(El-Milia)	6.250573	36.846204
3	C01	Adjarda	5.995618	36.782295
4	C02	(Chekfa)	5.996295	36.782518

III.3. Méthodes analytiques

Pour atteindre les objectifs visés dans ce travail, la méthodologie utilisée pour l'ensemble des travaux de terrain et de laboratoire, est résumé dans le schéma de la figure 31. Les analyses de caractérisation des matériaux argileux ont été effectuées en collaboration avec de nombreux laboratoires, à savoir le laboratoire « Argile, Géochimie et Environnement sédimentaires « AGEs » (Faculté des sciences, département de Géologie, ULg), le laboratoire de minéralogie et cristallographie (Fac. des sciences, départ. de Géologie, ULg), Département de chimie (Fac. des sciences, départ. de Chimie, ULg), le laboratoire Australian Laboratory Services « ALS Geochimistry » Seville, Espagne.

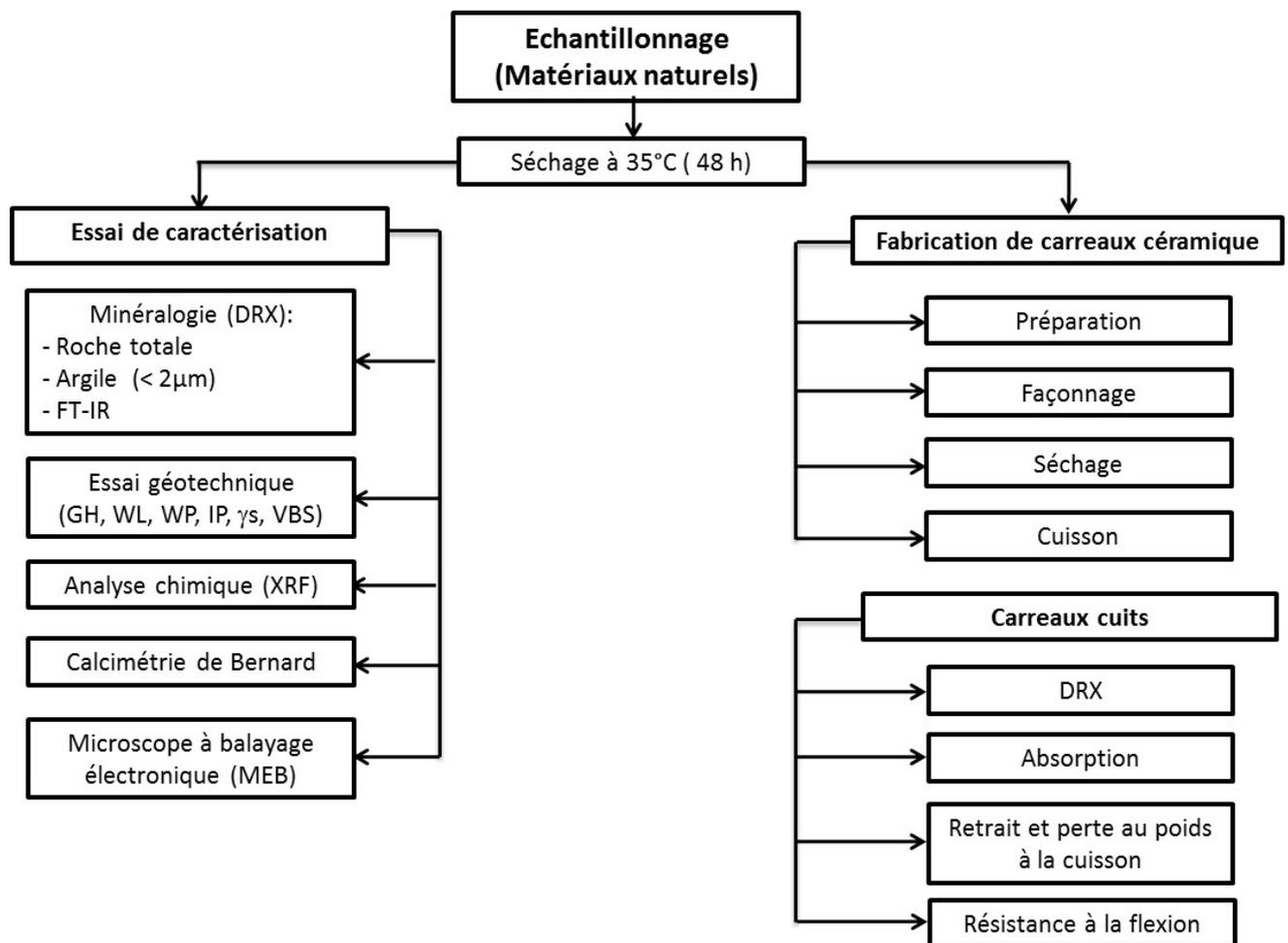


Figure 31: Schéma de la méthodologie utilisée.

DRX : Diffraction des rayons X ; FT-IR : Spectroscopie infrarouge ; GH : Granulométrie ; W_L : Limite de liquidité ; W_P : Limite de plasticité ; IP : Indice de plasticité ; γ_s : masse volumique des grains solides ; XRF : analyse chimique par spectroscopie de fluorescence X.

III.3.1. Analyse minéralogique

III.3.1.1. Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique très utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés (cristaux, minéraux, argiles...) du fait que leurs atomes sont arrangés selon des plans cristallins spécifiques. Le principe de la méthode repose sur la diffraction des rayons X par une famille de plans réticulaires (hkl) favorablement orientée sous un angle θ par rapport au faisceau incident (Fig. 32). Ceci se traduit dans le diffractogramme, représentant l'intensité en fonction de l'angle de diffraction θ , par l'observation de raies à partir desquelles peuvent être déterminées les distances interréticulaires d_{hkl} , caractéristiques d'un composé cristallin donné, à l'aide de la loi de Bragg :

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

où λ : longueur d'onde du faisceau de rayons X incident.

n : ordre de diffraction.

d : distance interréticulaires.

θ : angle d'incidence des rayons X.

L'indexation des différents pics de diffraction du diagramme des rayons X permet de déterminer les phases cristallines présentes en se référant aux fiches ATSM (American Society for Testing Materials) appelées aussi JCPDS.

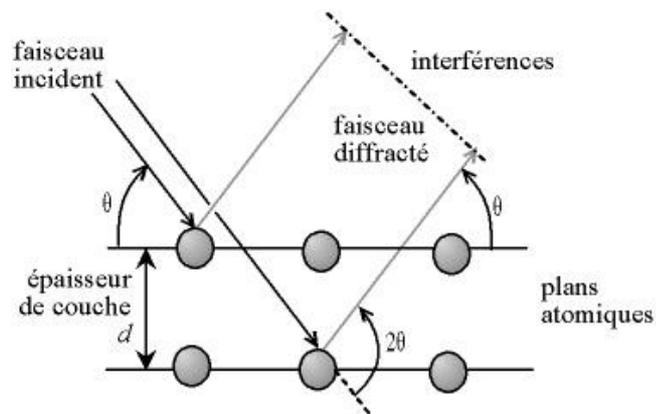


Figure 32: Schéma du principe de la diffraction des rayons X par une famille de plans réticulaires (hkl).

Les analyses minéralogiques ont été effectuées à l'aide d'un diffractomètre de type Bruker D8 Advance, utilisant une anticathode en Cu ($\lambda_{Cu} = 1,5406 \text{ \AA}$) sous une tension de 40 kV et une intensité de 25 mA (Département de Géologie, Laboratoire Argile, Géochimie et Environnement sédimentaires « AGEs », Liège Belgique) (Fig. 33). Pour l'analyse de la poudre totale désorientée, 1g d'échantillon brut tamisé à $250 \mu\text{m}$, est installé sur un porte échantillon puis compacté régulièrement et délicatement afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux (Moore and Reynolds, 1989). L'abondance relative des minéraux a été estimée à partir de la hauteur du pic principal, multiplié par des facteurs de correction (Cook et al., 1975).

L'analyse des minéraux argileux a été effectuée sur agrégats orienté, préparés à partir de la fraction $< 2 \mu\text{m}$, obtenu par suspension dans l'eau distillée de 1 à 2 g d'échantillon brut tamisé à $63 \mu\text{m}$. Les échantillons carbonatés ont subi une décarbonatation avec attaque à l'acide chlorhydrique

dilué HCl (0.1 mol/l), sous agitation, puis un lavage par centrifugation jusqu'à obtention d'une suspension stable. La fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$) a été isolée après un temps de décantation par une sédimentation par gravité, calculé suivant la loi de Stokes. Le premier centimètre de la suspension est placé à l'aide d'une pipette sur une lame de verre et séché pendant une nuit à température ambiante (Moore and Reynolds, 1989) (Fig. 34).



Figure 33: Diffractomètre de type Bruker D8 Advance (AGEs, ULg)

Pour chaque échantillon trois diagrammes sont enregistrés afin de pouvoir appliquer les trois tests diagnostiques classiques : agrégat orienté séché à l'air ou à l'état naturel (N), après solvataion à l'éthylène glycol pendant 24 h (EG) et chauffage à 500°C pendant 4 h (H) (Fig. 34). L'identification qualitative a été faite en se référant à l'espace interfoliaire (Brown & Brindley, 1980) et les valeurs des intensités des réflexions principales entre les trois spectres de rayons X, caractéristiques de chaque minéral.

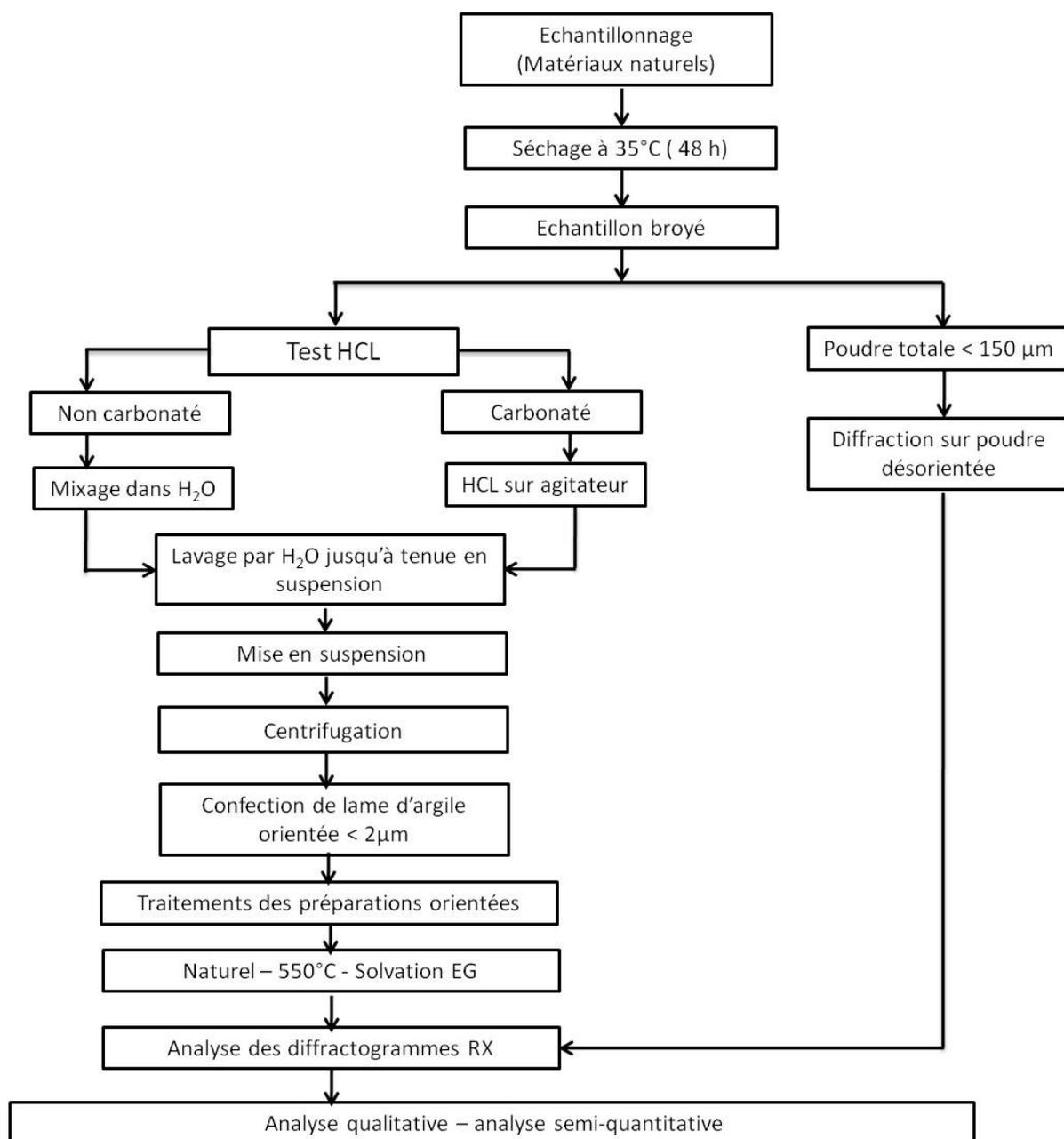


Figure 34: Schéma de préparation du matériau argileux pour analyse par DRX.

L'estimation semi-quantitative des minéraux argileux est basée sur la hauteur de réflexions spécifiques mesurées, en général, sur les raies EG, multipliée par des facteurs correctifs (Marsigli et Dondi, 1997; Fagel et al., 2007; Fagel et Boës, 2008). Le pourcentage de minéraux argileux est estimé en utilisant le logiciel DIFFRAC^{Plus}.EVA, selon les étapes suivantes :

- Soustraction du bruit de fond (background curvature : 0 ou 0,1) dû à l'instrument ;
- Lissage du spectre afin de faire disparaître les aspérités dues à la haute résolution instrumentale (Smooth factor : 0,1) ;

- Repérage automatique des pics caractéristiques (Peak search) correspondant aux espèces minérales des préparations. Une base de données minéralogiques internationale a été consultée et a permis de détecter de façon automatique les minéraux présents dans chaque préparation. Au cas où un ou plusieurs pics ne sont pas attribués à un des minéraux de la base de données internationale, une recherche plus approfondie est menée sur les valeurs de ces pics dans d'autres documentations notamment la liste des 34 minéraux les plus fréquemment rencontrés et déterminables dans les spectres des poudres (COOK et al., 1975 ; Tabl. 57).

La connaissance et les observations géologiques de terrains d'où proviennent les échantillons ont été aussi d'un apport important pour l'identification des espèces minérales en présence ;

- La superposition des trois spectres classiques des préparations orientées (N-EG-CH500) permet, par l'observation à la fois de la forme, du nombre et de la position des réflexions, d'avoir une vision globale de l'échantillon en vue d'en déterminer aisément les minéraux argileux selon les positions des pics des raies (001) et leurs harmoniques correspondants (Tab. 11 et 12). Les positions de ces raies (001) des principaux minéraux argileux et non argileux sont reprises dans le tableau n°12 (THOREZ J., 1976).

Tableau 11: Position des raies (001 en Å) des principaux minéraux argileux.

Spectres			Minéraux
N	EG	H 500	
7	7	-	Kaolinite (K)
10	10	10	Illite (I)
14	14	14	Chlorite (C)
14	16	14	Chlorite (Cg)
14	14	10	Vermiculite (V)
12-14	17	10	Smectite (Sm) Montmorillonites
10,4	10,4	10	Palygorskite (Pal)
12	12	10	Sépiolite (Sep)

Tableau 12: Principaux minéraux déterminables dans les spectres des poudres (Thorez, 1976).

Minéraux	2θ° (CuKα)	d (Å)	Facteur de correction
Amphibole	10,30 - 10,70	8,59 - 8,27	2,50
Analcite	15,60- 16,20	5,68 - 5,47	1,79
Anatase	25,17 - 25,47	3,54 - 3,50	0,73
Anhydrite	25,30 - 25,70	3,52 - 3,46	0,90
Apatite	31,80 - 32,15	2,81 - 2,78	3,10
Aragonite	45,65 - 46,00	1,96 - 1,97	9,30
Augite	29,70 - 30,00	3,00 - 2,98	5,00
Barite	28,65 - 29,00	3,11 - 3,08	3,10
Calcite	29,25 - 29,60	3,04 - 3,01	1,65
Chlorite	18,50 - 19,10	4,79 - 4,64	4,95
Clinoptilolite	9,70 - 9,99	9,11 - 8,84	1,56
Cristobalite	21,50 - 22,05	4,13 - 4,05	9,00
Dolomite	30,80 - 31,15	2,90 - 2,87	1,53
Erionite	7,50 - 7,90	11,70 - 11,20	3,10
Feldspath- K	27,35 - 27,79	3,26 - 3,21	4,30
Gibbsite	18,00 - 18,50	4,93 - 4,79	0,95
Goethite	36,45 - 37,05	2,46 - 2,43	7,00
Gypse	11,30 - 11,80	7,83 - 7,50	0,40
Halite	45,30 - 45,65	2,00 - 1,99	2,00
Hématite	33,00 - 33,40	2,71 - 2,68	3,33
Kaolinite	12,20 - 12,60	7,25 - 7,02	2,25
Magnétite	35,30 - 35,70	2,54 - 2,51	2,10
Micas	8,70 - 9,10	10,20 - 9,72	6,00
Montmorillonite	4,70 - 5,20	18,80 - 17,00	3,00
Palygorskite	8,20 - 8,50	10,70 - 10,40	9,20
Phillipsite	17,50 - 18,00	5,06 - 4,93	17,00
Plagioclase	27,80 - 28,15	3,21 - 3,16	2,80
Pyrite	56,20 - 56,45	1,63 - 1,62	2,30
Quartz	26,45 - 26,95	3,37 - 3,31	1,00
Rhodochrocite	31,26 - 31,50	2,86 - 2,84	3,45
Sépiolite	7,00 - 7,40	2,60 - 11,90	2,00
Sidérite	31,90 - 32,40	2,80 - 2,76	1,15
Talc	9,20 - 9,55	9,61 - 9,25	2,56
Tridymite	20,50 - 20,75	4,33 - 4,28	3,00

La détermination des interstratifiés réguliers a consisté à identifier les pics dont la position, sur au moins un des trois essais est intermédiaire entre celle des minéraux argileux simples. La position de la réflexion principale et ses variations après traitements permettent donc d'identifier la nature des feuillets qui composent le minéral (HOLTZAFFEL T., 1985).

III.3.1.2. Spectrométrie infrarouge (FT-IR)

Le principe de base de la spectrométrie infrarouge (IR) repose sur l'interaction du rayonnement électromagnétique IR avec la matière à différentes fréquences. Dans le spectre général des rayonnements électromagnétiques, le domaine du rayonnement IR est compris entre 12800 et 10 cm^{-1} qui se décompose en trois parties : le proche, le moyen et le lointain IR. Nous nous intéressons plus particulièrement à la région du moyen infrarouge (MIR) qui correspondent aux intervalles de nombres d'onde [4000 – 400 cm^{-1}].

Lors de l'irradiation d'une molécule par le rayonnement IR, celle-ci peut absorber partiellement et sélectivement ce rayonnement. De ce fait, elle se trouve dans un état excité et son énergie vibrationnelle et rotationnelle sont modifiées avec une augmentation de leurs amplitudes. De ce fait, l'énergie du rayonnement IR incident se retrouve diminuée après l'interaction, ce qui conduit à l'apparition d'une bande d'absorption à cette fréquence. L'énergie absorbée (ν_0) est donc caractéristique de chacune des liaisons chimiques du minéral analysé. Le spectre IR se compose ainsi de plusieurs bandes d'absorption. Comme tout minéral possède une signature qui lui est propre, la spectroscopie IR est très souvent utilisée pour caractériser des échantillons formés de plusieurs composants, tels que des roches ou des sols.

Les bandes d'absorption dans le MIR (400 – 4000 cm^{-1}) résultent des modes de vibration des groupements fonctionnels fondamentaux. L'identification des différentes bandes d'absorption se fait en référence aux données bibliographiques. Dans le domaine des phyllosilicates, une étude complète de leurs spectres d'absorption a été réalisée par Farmer (Farmer, 1974) et enrichie par la suite par plusieurs auteurs (Madejová, 2003). La position d'une bande dépend à la fois de la nature du vibreur (c'est à dire la liaison) mais aussi de son environnement. Par ailleurs, l'intensité d'une bande est tributaire de la concentration, mais aussi de la nature et de la polarité de la liaison.



Figure 35: Spectromètre de type Nicolet Nexus 538 FT-IR (Laboratoire de minéralogie et cristallographie, ULg)

Dans notre cas, les spectres IR des matériaux étudiés ont été enregistrés par un spectromètre à transformée de Fourier Nicolet Nexus 538 FT-IR en mode transmission (Laboratoire de minéralogie et cristallographie, Liège-ULg), avec une résolution de 4 cm^{-1} , couplé au système Omnic d'acquisition et de traitement des données (Fig. 35). Le domaine d'étude est $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$. Des pastilles ont été préparées à partir d'un mélange de 140 mg de KBr, avec 2 mg d'échantillon, puis mis sous une pression de 5 t.cm^{-2} .

III.3.2. Analyse chimique par Fluorescence X (XRF)

La spectrométrie de fluorescence X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Lorsque l'on bombarde de la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

Les analyses chimiques quantitatives ont été effectuées par spectrométrie de fluorescence X. Les échantillons ont été séchés ($37 \text{ }^\circ\text{C}$) puis broyés à $< 80 \text{ }\mu\text{m}$. Les teneurs en éléments majeurs, exprimées en pourcentages d'oxydes, ont été établies par spectrométrie de fluorescence X sur un appareil de type Panalytical "PW 4600" (Axios fast).

Les poudres sont préalablement chauffées entre 1050-1100 °C pendant 2 h afin de mesurer la perte au feu puis (0,9 g) sont mélangées à 9 g du borate de lithium (LiBO₂) et du tétraborate de lithium (Li₂B₄O₇) et fondues pour former des perles (pastilles) offrant une surface suffisante (quelques cm²) à la source de rayons X primaires. Les analyses ont été effectuées avec une tension d'accélération de 3 kV.

En vue de déterminer la perte au feu (LOI), environ d'1 g d'échantillon en poudre est mis dans un creuset en céramique, puis calciné à 1000 °C. La perte au feu (LOI) est déterminée par la relation suivante :

$$\text{LOI \%} = \frac{(\text{Poids sec avant calcination} - \text{Poids après calcination})}{\text{Poids sec avant calcination}} \times 100$$

III.3.3. Mesure du taux des carbonates (calcimétrie)

Tout matériau contenant du carbonate de calcium (CaCO₃) fait effervescence au contact d'un acide tel que HCl. celle-ci correspond au dégagement de dioxyde de carbone (CO₂), selon la réaction chimique suivante :



La connaissance du volume de CO₂ dégagé permet de calculer le % de CaCO₃ contenu dans le matériau, selon la formule suivante :

$$\% \text{ CaCO}_3 = \Delta V / (M.k)$$

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

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

M = masse de l'échantillon (en g).

La détermination de la teneur en CaCO₃ de tous les échantillons bruts est réalisée à l'aide du calcimètre de Bernard. Pratiquement, une masse de 250 mg d'échantillon finement broyé est attaquée par l'acide chlorhydrique (HCl 10%).

Le volume initial (V_i) correspond à celui de 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 de l'équilibre des deux volumes d'eau après l'attaque acide.

Le volume de CO₂ dégagé correspond à la différence :

$$\Delta V = V_f - V_i$$

Les essais de calcimétrie de Bernard se sont déroulés dans les conditions suivantes : T = 25°C, P = 1 atm et k = 0,432.

III.3.4. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Le principe de cette technique repose sur l'interaction entre un faisceau d'électron engendré par un "canon à électrons" et une matrice cristalline ou non. Le faisceau d'électrons secondaires ou celui des électrons rétrodiffusés quittant la surface, sous l'impact de la sonde électronique, est attiré par le collecteur. Le balayage de la sonde sur l'échantillon est utilisé pour en obtenir une image point par point, ligne par ligne, selon un processus séquentiel. Cette technique donne des informations sur le relief de l'échantillon, la morphologie des grains et leur agencement. En complément, un spectre de dispersion en énergie (EDAX) donne une information semi-quantitative sur la composition chimique du matériau examiné.

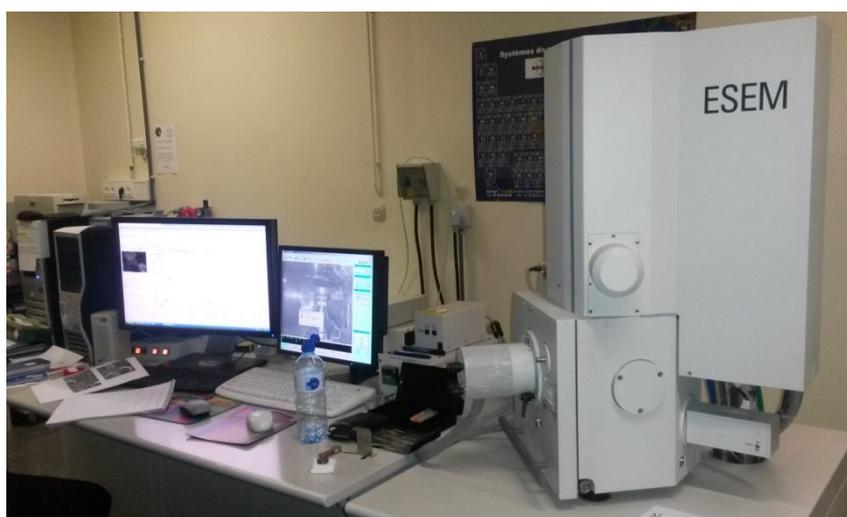


Figure 36: Microscopie Electronique à Balayage de type Philips XL-30 ESEM-FEG
(Département de chimie, ULg)

Le MEB utilisé dans la caractérisation de nos échantillons (Fig. 36) est de type Philips XL-30 ESEM-FEG (Département de chimie, Université de Liège, Belgique). Les images ont été obtenues par un détecteur d'électrons secondaires, après métallisation avec du carbone par la méthode de pulvérisation cathodique au moyen d'un métalliseur de type "SPI-Module Carbon Coaster" (Fig.

37). La tension d'accélération des électrons est 10 kV, le grandissement peut atteindre x 100 000 et la résolution théorique de l'appareil est de 4,5 nm.



Figure 37: Appareil de métallisation de type "SPI-Module Carbon Coaster"
(Département de chimie, ULg)

III.3.5. Analyse granulométrique

Le sol est un mélange de grains, de formes et de tailles différentes. L'analyse granulométrique a pour objet de déterminer la distribution en poids des particules suivant leurs dimensions, elle comprend deux étapes :

- Le tamisage (NF P 18-560) pour les grains d'un diamètre supérieur à 80 μm .
- La sédimentation (NF P 94-057) pour les grains de diamètre inférieur à 80 μm .

La distribution dimensionnelle des particules a été déterminée par tamisage humide pour la fraction $\geq 80 \mu\text{m}$ et par sédimentométrie pour la fraction $< 80 \mu\text{m}$, conformément à la norme française NF P 94-056 et NF P 94-057. Les particules $< 80 \mu\text{m}$ sont mises en suspension dans de l'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10\text{H}_2\text{O}$), suivi d'une agitation mécanique afin de disperser l'échantillon. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil, en utilisant la loi de Stokes pour la détermination de la distribution dimensionnel des particules en fonction du temps de décantation (Gee et Bauder, 1986).

III.3.6. Masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre à eau) NF P94-054

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse de ces particules solides (m_s) par leur volume (V_s).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre. L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides. La masse volumique des particules solides est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_1 - m_3)$$

Avec :

- m_1 : masse du pycnomètre vide ;
- m_2 : masse du pycnomètre contenant la prise d'essai ;
- m_3 : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau ;
- m_4 : masse du pycnomètre plein d'eau ;
- P_w : masse volumique de l'eau conventionnellement prise égale à 1 000 kg/m³ ;

La masse volumique des particules solides est la moyenne arithmétique de deux mesures effectuées sur deux prises d'essai provenant du même échantillon de sol. Les masses volumiques s'expriment en t/m³, en kg/dm³ ou en gr/cm³.

La masse volumique des particules solides du sol (poids spécifique du sol) est déterminée en utilisant la méthode du pycnomètre à eau, selon les procédures décrites dans la norme française NF P94-054.

III.3.7. Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Cet essai a pour but de déterminer la consistance d'un sol fin, qui varie de façon continue selon la teneur en eau. Lorsque celle-ci augmente, le sol passe successivement de l'état solide à l'état plastique, puis à l'état liquide. L'essai définit conventionnellement les limites entre ces états.

La limite de liquidité WL est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique. La limite de plasticité est la teneur en eau d'un sol remanié au point de

transition entre les états plastique et solide. L'indice de plasticité I_P , correspondant à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité ($I_P = W_L - W_P$), il définit l'étendue du domaine plastique. Un sol, dont l'indice I_P est grand, est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus I_P est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.

L'indice de plasticité est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité ($I_P = W_L - W_P$). Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.

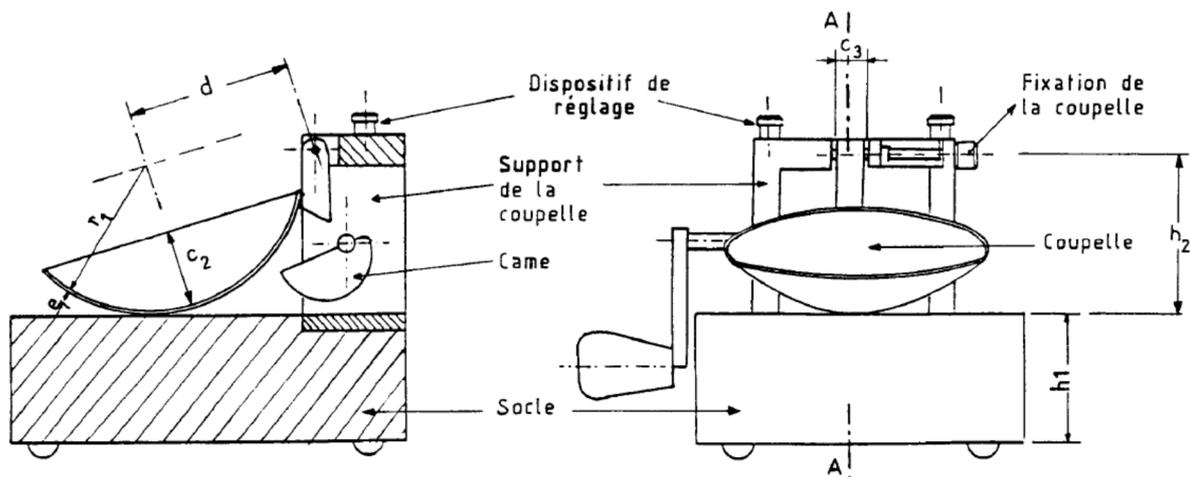


Figure 38: Appareil de Casagrande (NF P-94-051)

L'évaluation de la plasticité a été réalisée par la méthode dite limites d'Atterberg (LCPC, 1987) : limite de liquidité (LL), limite de plasticité (LP). Les indices de plasticité I_P ($I_P = LL - LP$), ont été déterminés conformément à la norme française NF P 94-051. Les essais de LL et PL ont été réalisés avec l'appareil de Casagrande (Fig. 38), selon la méthode décrite par Casagrande (1947).

III.3.8. Essai au bleu de méthylène d'un sol (NF P94-068)

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'adsorption d'un sol ou d'un matériau rocheux. Cette dernière est fonction de la surface spécifique des particules argileuses. A partir de cette définition, on peut déduire qu'un sol en solution aqueuse adsorbera d'autant plus de bleu que sa teneur en argile est élevée et que ses argiles sont actives. L'essai au bleu de méthylène, constitue donc un des paramètres d'identification de la classification des sols essentiellement argileux.

Le principe consiste à contrôler l'adsorption du bleu de méthylène injecté dans un bain aqueux contenant la prise d'essai, en observant une goutte de suspension déposée sur une feuille de papier filtre. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

On appelle valeur de bleu de méthylène du sol VBS, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. Le VBS est un indicateur essentiel dans la classification des sols.

III.4. Essais céramique

Le procédé de séchage et celui de la cuisson sont parmi les opérations principales qui déterminent les propriétés du produit final. Ainsi la maîtrise du cycle du séchage et de cuisson permet d'éviter de nombreux défauts qui apparaissent après ces deux étapes. La détermination des caractéristiques des céramiques au cours de l'opération de séchage et de cuisson a été menée sur des échantillons d'argile séchés à 50°C pendant 24h, broyés afin d'obtenir une matière finement pulvérisée, puis tamisés à sec (100 µm) pour trier les grains de matière selon leur finesse.

Les produits cuits (carreaux céramiques) ont été fabriqués selon les étapes suivantes :

- la préparation
- le façonnage
- le séchage
- la cuisson

III.4.1. Préparation de la matière première

Afin d'obtenir un matériau ayant des caractéristiques optimisées au niveau plasticité, aptitude au façonnage, au séchage, à la cuisson et donnant le meilleur produit fini, les matériaux argileux vont subir un certain nombre de traitements.

Les matériaux argileux sont broyés à sec dans un broyeur à billes, jusqu'à ce que 95 à 97% des particules passent à travers un tamis d'ouverture 500 μm . La poudre obtenue a été alors humidifiée (teneur en humidité de 7% en poids) avec de l'eau déminéralisée (norme ISO, 13006, 1998), malaxée manuellement jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène puis tamisé à l'aide d'un tamis d'ouverture 1 mm, afin d'obtenir des granulés de taille comprise entre 200 et 600 μm , appropriées pour le pressage.

III.4.2. Le façonnage

La plupart des **objets céramiques** sont façonnés dans des moules. Pour simuler les conditions de pressage industriel, les poudres homogènes et humides obtenues lors de la préparation ont été façonnées par pressage uniaxial dans un moule rigide (25 Mpa) en utilisant une presse hydraulique de laboratoire SPECAC, pour obtenir des carreaux céramiques (plaques rectangulaires) de dimension (80 x 40 x 10 mm).

III.4.3. Le séchage

Les carreaux de céramiques façonnés, contiennent encore une certaine quantité d'eau. Avant de pouvoir les cuire, il est nécessaire de les sécher. Une première étape de séchage naturel consiste à étaler les carreaux céramiques sur un plateau dans l'air atmosphérique du laboratoire à la température ambiante de $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ pendant 24 heures, puis les carreaux sont étuvés à 110°C pendant 24 heures jusqu'à masse constante, en s'approchant des conditions industrielles.

III.4.4. La cuisson

Après l'opération de séchage, les carreaux sont cuits dans des températures croissantes de 800, 950, 1050 et 1100°C , maintenues à la température maximale pendant 30 minutes dans un cycle de cuisson d'un total de 4 heures qui comprennent le refroidissement, s'approchant des conditions industrielles, dans un four électrique de laboratoire de type Nabertherm.

Afin d'évaluer les performances des carreaux céramiques élaborées, les propriétés suivantes ont été vérifiées : la couleur, le retrait linéaire à la cuisson, la perte en poids à la cuisson, la masse volumique apparente, l'absorption d'eau et la résistance à la flexion.

III.4.4.1. La couleur

La couleur des terres cuites est liée principalement aux teneurs du matériau argileux relatives en fer et en calcium (Kornmann, 2005). Quand la concentration en fer est supérieure à 5 %, la couleur après cuisson en atmosphère oxydante est rouge (couleur de l'hématite). Si, par contre, la concentration en calcium est supérieure à 7 %, la couleur tourne au jaune car le fer est dans ce cas sous la forme de ferrite de calcium. Il est donc possible de modifier la couleur d'une terre cuite en modifiant sa composition, d'abord en jouant sur le rapport fer/calcium par ajout de calcaire. Par ajout de dioxyde de manganèse (1 à 4 %), on peut obtenir des couleurs brunes. L'ajout d'oxyde de titane sur des argiles calcaires permet de parvenir à des couleurs jaunes. Pour les carreaux céramiques étudiés, l'appréciation visuelle de la couleur a été faite à l'aide du Code Munsell.

III.4.4.2. Le retrait linéaire à la cuisson

La détermination du retrait linéaire à la cuisson se fait par l'étude de la variation de la longueur des carreaux céramiques entre le séchage et la cuisson à différentes températures (800, 950, 1050 et 1100°C), la mesure des longueurs a été effectuée par un pied à coulisse à affichage digitale. La formule ci-après est utilisée pour calculer les pourcentages de retraits à la cuisson (R_c) :

$$\text{Retrait linéaire \%} = R_c \% = \frac{L_{110} - L_t}{L_{110}} \times 100$$

Avec :

L_{110} : longueur du carreau séché à 110 °C;

L_t : longueur du carreau après cuisant à une température T.

III.4.4.3. Perte en poids à la cuisson

La perte en poids permet de connaître la quantité des produits susceptibles de se décomposer ou de se volatiliser au cours de la cuisson. Entre la phase du séchage et celle de la cuisson des carreaux à différentes températures, il s'est produit une diminution du poids qui est déterminée par la relation suivante (LECOMTE G., 2004 ; EL YAKOUBI N. et al., 2006):

$$\text{Perte en poids \%} = H \% = \frac{m_{110} - m_t}{m_{110}} \times 100$$

Avec :

m_{110} : masse de l'éprouvette séché à 110 °C;

m_t : masse de l'éprouvette cuit à une température T.

III.4.4.4. L'Absorption d'eau

La plupart des terres cuites traditionnelles sont poreuses, les carreaux céramiques expérimentaux fabriqués devraient donc ainsi, comporter des pores ou des vides. Ces derniers sont déterminants pour la résistance et la durabilité des carreaux.

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores des carreaux qui sont ouverts au milieu ambiant. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est donc utilisée comme un des indicateurs importants de la qualité des carreaux céramiques. Une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense contre les agents agressifs extérieurs. Dans le but d'améliorer la résistance et la durabilité des produits céramiques, l'absorption d'eau des carreaux a été effectuée.

L'absorption d'eau est déterminée conformément à la norme ISO 10545-3 Part-3, en plaçant les carreaux céramiques dans un récipient rempli d'eau distillée ou désionisée pour être bouillis, de manière à ne pas toucher le fond et à être complètement immergés.

Le récipient doit être maintenu à l'ébullition pendant deux (02) heures. Ensuite les carreaux doivent être laissés refroidir pendant quatre (04) heures immergés dans l'eau. Une fois les carreaux retirés du récipient, l'excès d'eau est éliminé en essuyant soigneusement avec un chiffon absorbant (cuir de chamois) toute l'eau de surface et les carreaux sont ensuite pesés, aussi précisément que pour le poids sec.

L'absorption d'eau (Abs), exprimée en pourcentage du poids de la matière sèche est exprimée par la formule :

$$\text{Absorption d'eau \%} = \text{Abs \%} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Où:

m_h , masse du carreau humide.

m_s , masse du carreau sec.

Conjointement avec l'exécution de l'absorption d'eau par immersion, les densités apparentes relatives des carreaux ont été aussi déterminées (ISO 10545-3-Part 3). Le volume est déterminé grâce à la mesure des déviations dimensionnelles des carreaux céramique (longueur, largeur et épaisseur) conformément aux directives de la norme ISO 10545- Part 2 suivant la relation suivante :

$$\text{Le Volume } V = L \times B \times e$$

Où:

L : longueur moyenne du carreau

B : largeur moyenne du carreau

e : épaisseur moyenne du carreau

La mesure du poids des carreaux est faite par pesée sur une balance d'une portée de 5kg et avec une précision de 0,001 g. Les densités apparentes relatives sont alors calculées par les expressions ci-après :

$$\rho_{app} = \frac{M_s}{V}$$

Avec : ms masse sèche et v le volume du carreau céramique

III.4.4.5. Résistance à la flexion

La connaissance de la résistance mécanique des matériaux est d'une grande utilité. Elle permet entre autre de s'assurer que les produits céramiques élaborés résisteront aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis.

La détermination de la résistance en flexion des carreaux fabriqués a été mesurée d'après le test de flexion en trois points (Fig. 39) avec une cellule de charge maximale unique de 200 KN et une vitesse de déformation de 950 N/min appliquée au milieu de l'éprouvette. Elle est calculée par la relation suivante conformément à la norme EN ISO 10545-4 :

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Où :

F : charge de rupture (en N)

L : palier entre les tiges de support (en mm)

b : largeur de la tuile au bord cassé (en mm)

h : épaisseur minimale de la tuile (en mm).

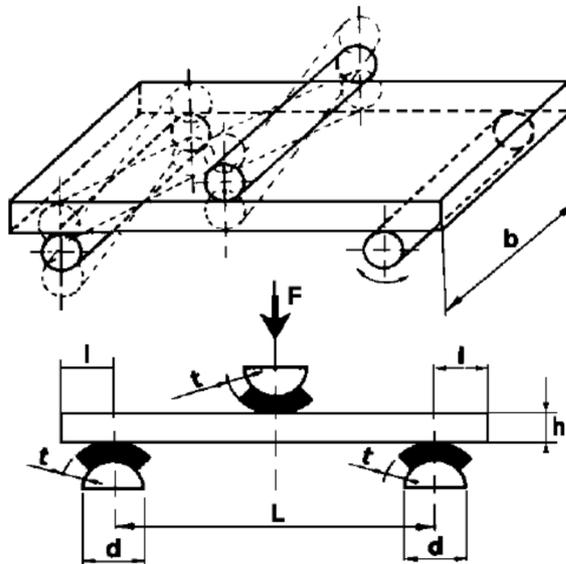


Figure 39: Système de chargement dans la mesure de la résistance à la flexion.

III.4.4.6. Minéralogie après cuisson

La minéralogie par DRX des poudres des produits céramiques permet de savoir si la phase désirée ou la réaction souhaitée pendant la cuisson a bien eu lieu. Les carreaux expérimentaux issues des différents échantillons d'argiles cuits à 800, 950, 1050 et 1100°C ont été broyées dans un mortier en agate en vue de l'obtention d'une poudre fine ($\varnothing \leq 150 \mu\text{m}$). Les différentes poudres sont ensuite soumises à un rayonnement X balayant un angle de 2° à $45^\circ 2\theta$ pendant 20 minutes en vue d'identifier et de semi-quantifier les phases minéralogiques totales. Le diffractomètre Bruker D8 Advance (anticathode $\text{CuK}\alpha 1$: $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) de l'Unité de Recherche « Argile, Géochimie et Environnement Sédimentaire (AGES) » du Département de Géologie de l'Université de Liège, a été utilisé.

CHAPITRE IV.

CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX ARGILEUX DE LA WILAYA DE JIJEL

IV.1. Introduction

Pour une utilisation optimale des matériaux argileux, objet de cette étude dans la filière de la céramique et/ou dans d'autres domaines industriels, un ensemble cohérent de techniques de caractérisation adapté à ces matériaux a été employé. Il s'agit des caractérisations :

- minéralogiques (diffraction des rayons X, spectroscopie infrarouge et MEB) ;
- chimiques (fluorescence X) ;
- géotechniques (granulométrie, limites d'Atterberg, valeurs au bleu de méthylène VBS, masse volumique des grains solides,) ;

IV.2. Matériaux argileux du bassin néogène de Jijel

La caractérisation minéralogique et physico-chimique des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel a déjà fait l'objet d'un article publié dans la revue Applied Clay Science (Baghdad et al., 2017). Le principal objectif est d'étudier la composition minéralogique (DRX, FT-IR), chimique (XRF) et physique (granulométrie et plasticité) de ces matériaux argileux et d'en déduire leur aptitude en tant que matière première dans l'industrie céramique.

IV.2.1. Etude minéralogique par DRX

Le résultat de l'analyse minéralogique par DRX sur poudres des matériaux argileux provenant du bassin néogène de Jijel est illustré par les spectres de diffraction, donnés à la figure 39A et 39B. Ces analyses mettent en évidence que le quartz, la calcite et l'argile totale sont les principales phases minérales dominantes. A ces phases sont associés en faible pourcentage du plagioclase, du feldspath-K (microcline) et de la dolomite. Le résultat de l'analyse minéralogique (Tab. 13 et Fig. 40) met en évidence une composition pratiquement homogène sur l'ensemble des échantillons analysés. Les pourcentages des différentes fractions minéralogiques, donnés par l'analyse sont comme suit : quartz (28 à 50%), calcite (25 à 40%), l'argile totale (18 à 44%), dolomite (0 à 8%), plagioclase (1 à 7%) et K-feldspath (1 à 2%).

Tableau 13: Composition minéralogique des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel.

Site d'étude	Code échantillon	Minéralogie des poudres %					Minéralogie des argiles (fraction < 2 µm) %					
		Quartz	Clay fraction	Microcline	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Kaolinite	Illite	Chlorite	Vermiculite	Interstratified 10-14 Å
		Facteur correctif de chaque minéral										
		(1.00) Cook et al. (1975)	(20.00) Boski et al. (1998)	(4.3) Cook et al. (1975)	(2.80) Cook et al. (1975)	(1.65) Cook et al. (1975)	(1.53) Cook et al. (1975)	(0.70) Fagel et al. 2007	(1.00) Fagel et al. 2007	(0.34) Fagel et al. 2007	(0.34) Fagel et al. 2007	(0.40) Fagel et al. 2007
Taher	T01	39	31	2	2	25	1	21	8	0	-	2
	T02	35	35	2	2	25	1	22	10	1	-	2
	T03	37	31	2	3	26	1	20	8	1	-	2
	T04	37	31	-	2	29	1	17	11	1	-	2
Harratène	H01	35	22	1	4	37	1	17	4	-	-	1
	H02	35	25	1	1	36	2	18	5	0	-	2
	H03	37	23	1	3	36	0	17	4	-	1	1
	H04	34	25	1	2	37	1	19	4	0	-	2
El-Akabi	K01	35	25	-	1	36	3	20	3	1	-	1
	K02	40	18	-	4	35	3	15	3	0	-	0
	K03	28	27	-	3	40	2	19	5	1	-	2
Emir Abdelkader	E01	50	44	-	2	2	2	38	5	0	-	1
	E02	40	27	-	6	25	2	8	16	1	-	2
	E03	35	23	-	7	35	0	8	12	1	-	2
	E04	33	25	-	2	32	8	15	8	0	-	2

Les numéros entre parenthèses représentent les facteurs de correction de chaque minéral pour son estimation semi-quantitative. Pour la fraction minérale en poudre, les facteurs de correction ont été déterminés par Cook et al. (1975) et Boski et al. (1998). Pour les minéraux argileux, les facteurs de correction ont été déterminés par Fagel et al. (2007).

Le diffractogramme sur poudre de l'échantillon T03 (Fig. 40B), montre que le quartz et la calcite représentent les phases les plus dominantes et comme autres minéraux, associés on a du plagioclase, du feldspath potassique (microcline) et de la dolomite. Pour la fraction <2 µm (non traité, glycolé, et chauffé à 500°C), la réflexion à 10,1 Å qui apparaît (Fig. 40C) est attribuée à l'illite qui est quantifiée sur le diffractogramme de l'échantillon glycolé (EG), et qui conserve toujours sa réflexion à 10 Å, quelque soit le traitement. La réflexion à (001) qui correspond à 14,2 Å et la rupture de pente sur le flanc interne de la réflexion (002) à 7,1 Å est attribuée à la chlorite qui est connue par la stabilité de son réseau, c'est-à-dire de ses pics de diffraction à 14 Å, 7 Å, 4.7 Å, 3.5 Å et 2.8 Å après traitement à l'éthylène glycol et après chauffage à 500°C (Johnson, 1964 ; Bergaya et al., 2006 ; Velde et Meunier, 2008).

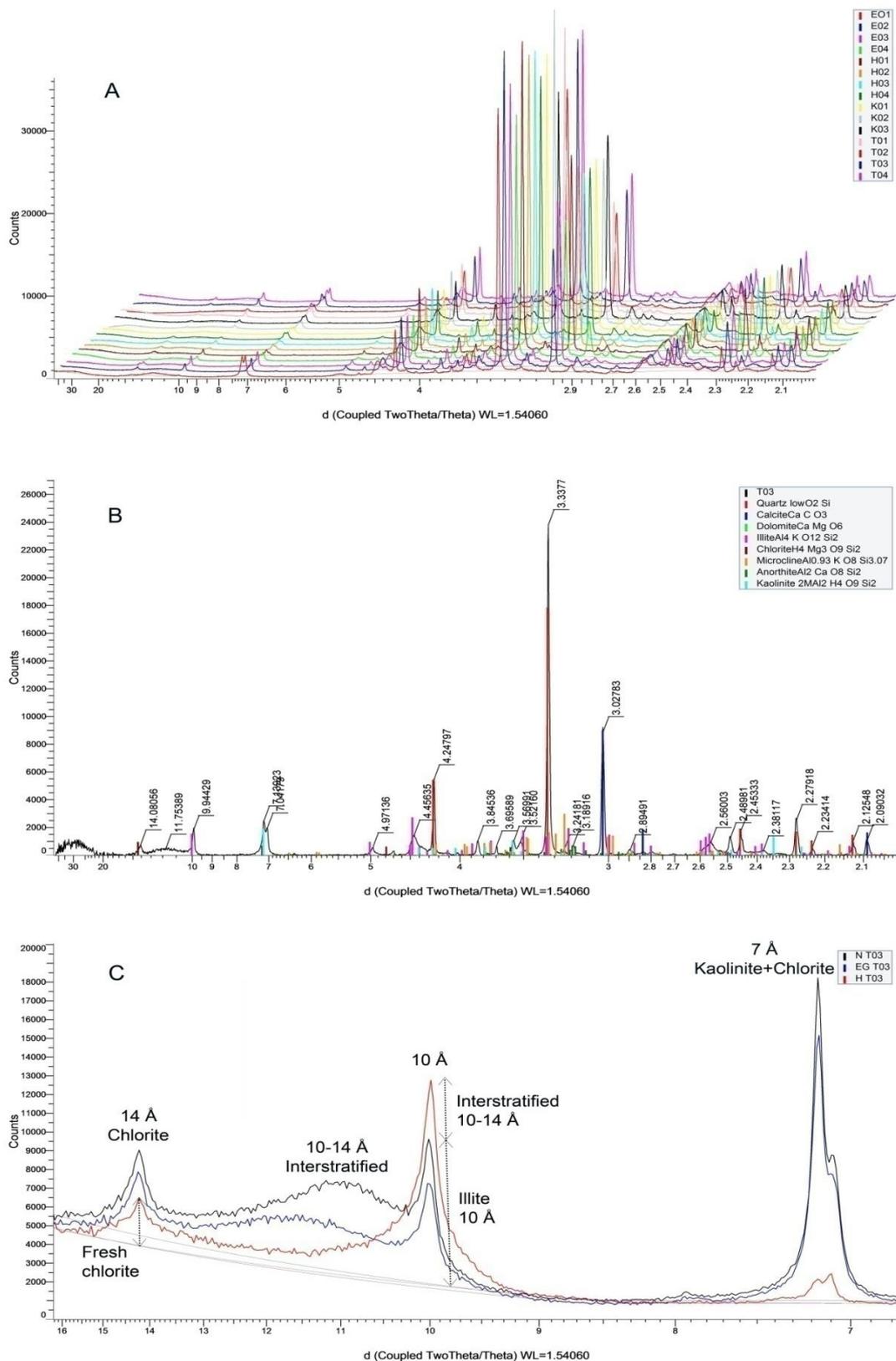


Figure 40: Spectres de diffraction de rayon X : (A) Poudre totale des échantillons étudiés ; (B) Poudre totale échantillon T03 ; (C) fraction argileuse échantillon T03 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.

La réflexion à 7.1 Å disparaît après chauffage à 500°C, cela confirme la présence de la kaolinite qui se transforme en métakaolinite. On note aussi la présence d'une réflexion à 11.1 Å attribuée à un interstratifié 10-14 Å, le pic correspondant reste stable après traitement à l'éthylène glycol ; par contre il disparaît après chauffage à 500°C, ce qui pourrait être représenté par un interstratifié type "illite-vermiculite". Il faut noter l'absence des minéraux argileux de types smectite, ce qui est intéressant, vue que ces derniers sont traditionnellement considérés comme problématiques pour le façonnage et le séchage (Blanco Garcia et al., 2005).

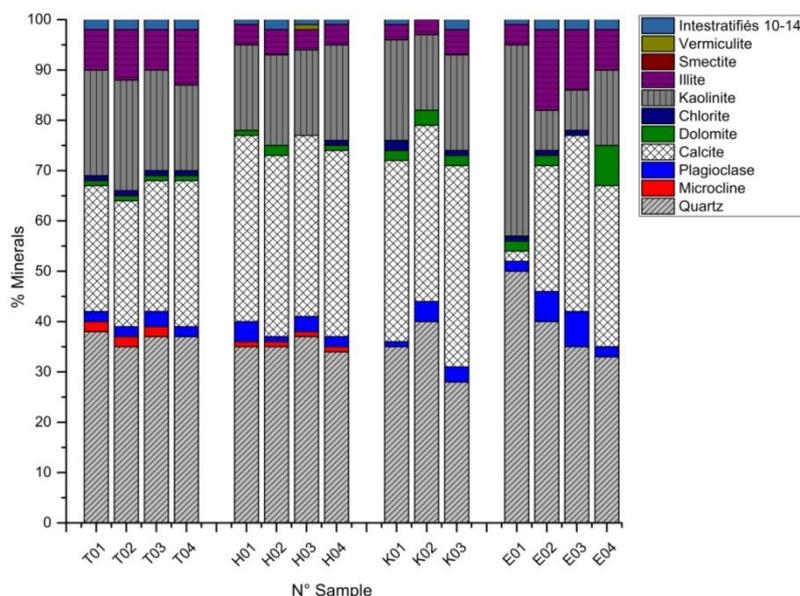


Figure 41: Composition minéralogique des échantillons étudiés par diffraction des rayons X

D'après les résultats de la semi-quantification de l'ensemble des échantillons étudiés (Tab. 13 et Fig. 41), on constate que la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$) est constituée essentiellement par une association de deux types d'argiles à savoir la kaolinite (30 à 86%) et l'illite (11 à 59%), qui sont présentes dans tous les matériaux argileux analysés, avec accessoirement d'interstratifié "10-14 Å", de la chlorite et des traces de vermiculite et de smectite. Pour les poudres on note, la richesse en quartz et calcite avec un faible pourcentage de feldspath-K, plagioclase et dolomite.

IV.2.2. Spectroscopie infrarouge (FT-IR)

Le spectre IR des échantillons T03 et E04 (Fig. 42), montre deux bandes de vibration d'élongation C-O autour de 1426 cm^{-1} (intense) et 873 cm^{-1} (faible et bien résolue) caractéristiques de la calcite et dont les harmoniques sont observées à 2982, 2872, 2512 et 1796 cm^{-1} . Les bandes apparaissant autour de 3696 et 3621 cm^{-1} ont révélés la présence, respectivement, de la kaolinite et de l'illite (Farmer, 1974; Sdiri et al., 2010; Russell et Fraser, 1994 ; Hammami-Ben Zaied et al., 2015).

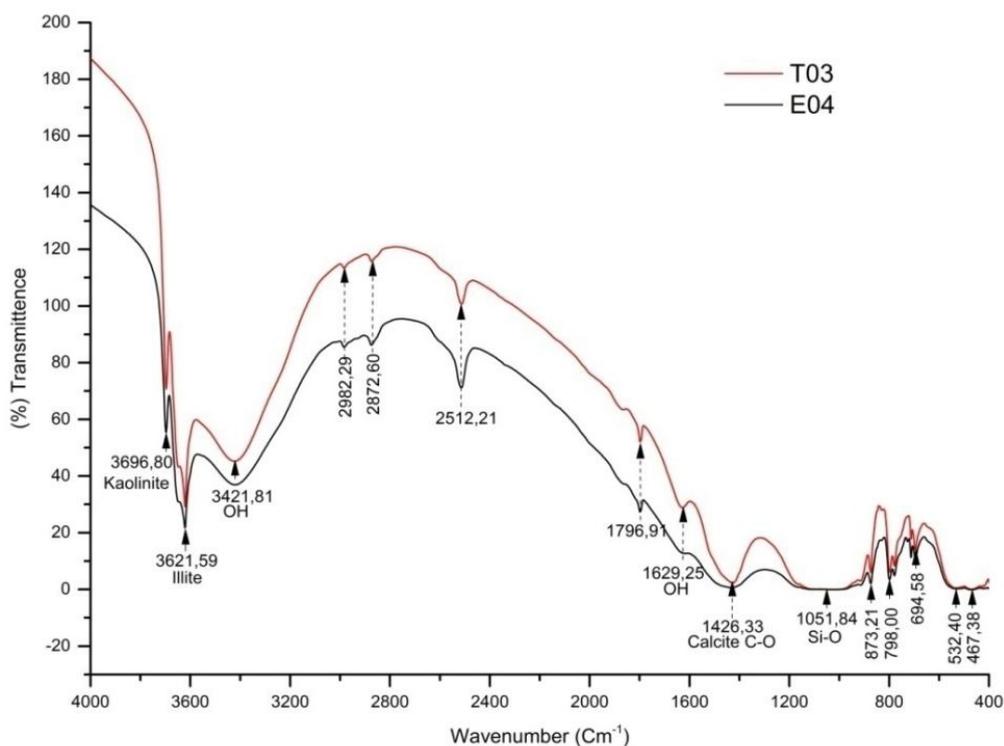


Figure 42: Spectres infrarouges, obtenus sur les échantillons T03 et E04.

Le quartz observé par DRX est traduit par une bande intense entre 900 et 1200 cm^{-1} et centré autour de 1051 cm^{-1} correspondant à la vibration d'élongation de Si-O. Les bandes localisées à 532 et 467 cm^{-1} , correspondent respectivement, à la vibration d'élongation de Si-O-Al et Si-O-Mg (Van der Marel and Beutelspacher, 1976; Velde, 1978). Le pic à 3421 cm^{-1} (intense et bien résolu) et la valeur 1629 cm^{-1} correspond à la bande d'absorption de l'eau de constitution [OH] caractéristique des phyllosilicates hydratés (Farmer, 2000 ; Madejova, 1998 et 2003) avec une intensité plus grande dans l'échantillon T03, ce qui suppose une capacité d'échange anionique plus grande dans ce dernier.

IV.2.3. Composition Chimique

Les résultats des l'analyses chimiques des formations argileuses du bassin néogène de Jijel sont consignés dans le tableau 14. De cette analyse, il ressort que les oxydes les plus abondants sont : SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ et CaO , les autres oxydes, à savoir MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , SO_3 et P_2O_5 sont présents avec une faible quantité. Le pourcentage de SiO_2 varie entre 42.0 et 53.68% ; Al_2O_3 entre 11.94 et 19.62% ; CaO présente des teneurs variant entre 2.24 et 17% et Fe_2O_3 entre 4.89 et 8.08%.

Les fortes teneurs en SiO_2 et celles relativement faibles en Al_2O_3 conduisent à des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ élevés ($> 3.0\%$), ce qui indique que dans tous les échantillons la participation du quartz est la plus importante avec une moyenne de 47.47%. La participation la plus importante du quartz est exprimée dans l'échantillon E01 provenant de la région de l'Emir abdelkader où la teneur en SiO_2 est de 53.68%.

L'oxyde de fer, " $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$ ", est le principal colorant dans les matériaux argileux. Il est à l'origine de la couleur rougeâtre, observée après cuisson (Abajo, 2000). D'après le résultat d'analyse géochimique des argiles de la région d'étude, donné au tableau 14, l'échantillon E01 présente la valeur la plus élevée de Fe_2O_3 avec 8.08% et l'échantillon K03 d'El-Akabi présente la valeur la plus faible de Fe_2O_3 avec 4.89%. Les teneurs légèrement élevées du MgO (1.54–2.71%) et des alcalins $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (1.97–2.79%) suggèrent la présence respectivement des minéraux du groupe de la chlorite, de l'illite ainsi que les plagioclases et les feldspaths–K (déterminés par DRX). (Fig. 40, Tab. 13). La perte au feu varie entre 9.6% et 18.32%. Ces valeurs, relativement élevées sont liées à la déshydroxylation des minéraux hydratés, l'oxydation de la matière organique et la décomposition des carbonates, des hydroxydes (Milheiro et al., 2005 ; Baccour et al., 2008).

IV.2.4. Analyse granulométrique

Le pourcentage de la fraction argileuse contenu dans les échantillons est un facteur déterminant pour une éventuelle aptitude à être utilisée dans divers applications (Strazzera et al., 1997, Murray, 2007). Les résultats des analyses granulométriques des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel sont consignés dans le tableau 15 et les graphes, illustrant les résultats granulométriques à la figure 43. Les échantillons analysés montrent un pourcentage compris entre 32 et 49%, avec une moyenne de 39% de la fraction inférieure à 2 μm . A ce propos, il est à signaler que les échantillons, provenant de la région de Taher montrent le pourcentage le plus élevé de la fraction inférieure à 2 μm , avec une moyenne de 46%. La fraction limoneuse comprise entre 2 et 60 μm présente un pourcentage de 25 à 58% avec une moyenne de 42%. La fraction sableuse supérieur à 60 μm varie de 2 à 40% avec une moyenne de 19%.

Tableau 14: Composition chimique, (en % en poids des oxydes) des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel.

N° Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	BaO	SrO	P. F 1000°	Rapport SiO ₂ /Al ₂ O ₃	
Taher	T1	49.60	15.50	5.72	9.93	2.07	1.95	0.55	0.76	0.57	0.03	0.26	0.02	0.04	0.04	13.58	3.20
	T2	50.10	15.65	5.76	9.58	2.05	2.05	0.61	0.77	0.66	0.03	0.25	0.02	0.02	0.04	13.08	3.20
	T3	49.40	15.95	5.76	9.56	1.97	2.03	0.57	0.78	0.64	0.02	0.26	0.02	0.02	0.04	13.25	3.10
	T4	48.90	15.80	6.03	9.93	2.04	2.08	0.71	0.78	0.53	0.03	0.26	0.02	0.02	0.04	13.27	3.09
Harratène	H1	48.63	11.94	5.14	14.00	1.55	1.74	0.40	0.60	0.10	0.03	0.25	0.01	0.02	0.04	15.71	4.07
	H2	46.71	12.58	5.39	14.30	1.94	1.68	0.27	0.60	0.19	0.03	0.27	0.02	0.06	0.05	16.39	3.71
	H3	48.82	11.96	5.19	14.05	1.56	1.74	0.40	0.61	0.09	0.03	0.25	0.01	0.02	0.05	15.79	4.08
	H4	44.05	12.61	5.96	14.55	1.96	1.64	0.36	0.62	0.28	0.02	0.25	0.02	0.02	0.06	16.69	3.49
Emir-Abdelkader	E1	53.68	19.62	8.08	2.24	1.96	1.74	0.40	0.99	1.14	0.07	0.21	0.02	0.07	0.02	9.60	2.74
	E2	51.41	12.55	4.93	11.35	1.92	2.06	0.55	0.61	1.72	0.06	0.17	0.01	0.04	0.06	13.24	4.10
	E3	46.46	12.04	4.99	15.30	1.54	1.84	0.51	0.57	0.05	0.06	0.18	0.01	0.03	0.06	16.45	3.86
	E4	42.17	13.00	5.30	14.80	2.71	1.83	0.36	0.63	0.51	0.04	0.25	0.01	0.06	0.06	18.32	3.24
El Akabi	K1	44.20	13.00	5.37	15.00	2.42	1.59	0.36	0.64	0.54	0.02	0.27	0.02	0.02	0.06	16.72	3,40
	K2	45.90	12.65	5.03	14.70	2.18	1.74	0.37	0.65	1.27	0.02	0.25	0.02	0.02	0.05	16.04	3,63
	K3	42.00	12.60	4.89	17.00	2.15	1.74	0.37	0.61	0.94	0.02	0.23	0.01	0.03	0.07	17.80	3,33

Les échantillons de la région de Taher montrent le pourcentage le plus faible en sable avec une moyenne de 2%, ce qui est relativement faible et qui nécessite un ajout d'un dégraissant pour une éventuelle utilisation industrielle. La masse volumique des particules solides (ρ_s) de l'ensemble des échantillons argileux analysés est presque similaire, allant de 2.58 à 2.64 t·m⁻³, avec une moyenne de 2.62 t·m⁻³.

Tableau 15: Distribution des particules solides, limites d'atterberg, pourcentage de CaCO₃ et masse volumique des particules solides des échantillons étudiés.

Propriétés physiques	T01	T02	T03	T04	H01	H02	H03	H04	E01	E02	E03	E04	K01	K02	K03
Distribution des particules solides (%)															
Argile (< 2 µm)	49	48	40	46	35	37	34	36	42	37	37	36	32	35	39
Limon (2-60 µm)	49	50	58	51	25	30	39	31	45	45	41	37	41	43	45
Sable (> 60 µm)	2	2	2	3	40	33	27	33	13	18	22	27	27	22	16
Limites d'atterberg (%)															
Limite de plasticité	18	24	22	26	18	19	19	17	16	18	18	18	19	18	18
Limite de liquidité	52	52	55	56	38	40	39	38	30	34	35	35	41	37	38
Indice de plasticité	34	28	33	30	20	21	20	21	14	16	17	17	22	19	20
Pourcentage CaCO ₃	17	17	16	18	25	29	26	26	1	19	26	25	25	19	23
Masse volumique (ρ _s) (t/m ³)	2.60	2.62	2.61	2.60	2.64	2.58	2.63	2.62	2.63	2.64	2.59	2.63	2.60	2.64	2.62

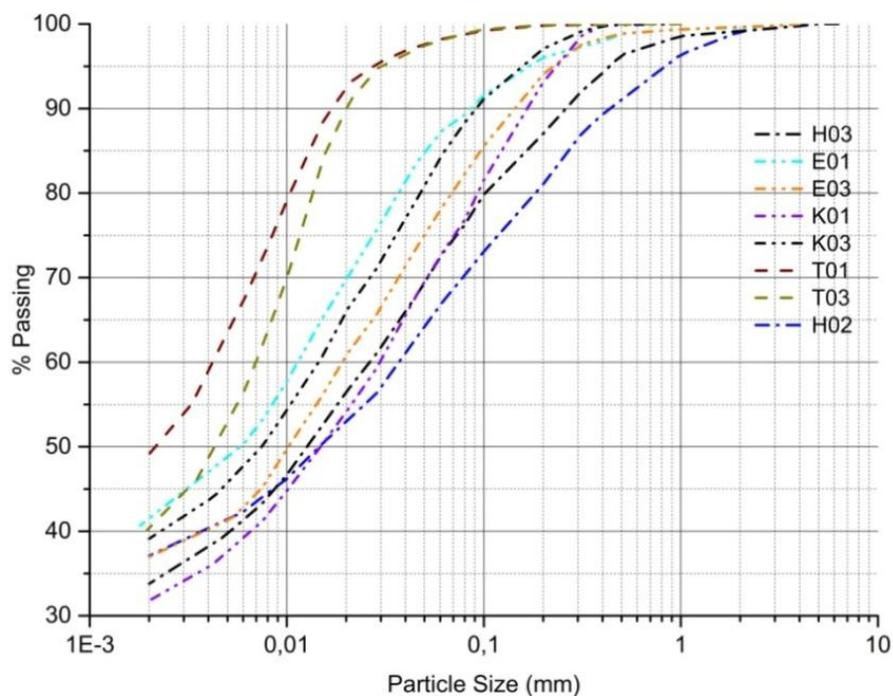


Figure 43: Courbes granulométrique des échantillons T1, T3, H02, H03, E01, E03, K01 et K03

Le diagramme ternaire de Mc. Manus (1988), permet de représenter la variation de la proportion de sable, limon et argile des échantillons analysés de la région d'étude, pour une évaluation de leur perméabilité et porosité (Fig. 44). Ce diagramme fait ressortir que l'ensemble des échantillons font partie de la région de faible perméabilité et de faible porosité. Pour une faible perméabilité, l'eau apporte à la pâte céramique suffisamment de cohésion pour permettre au corps céramique une meilleure extrusion.

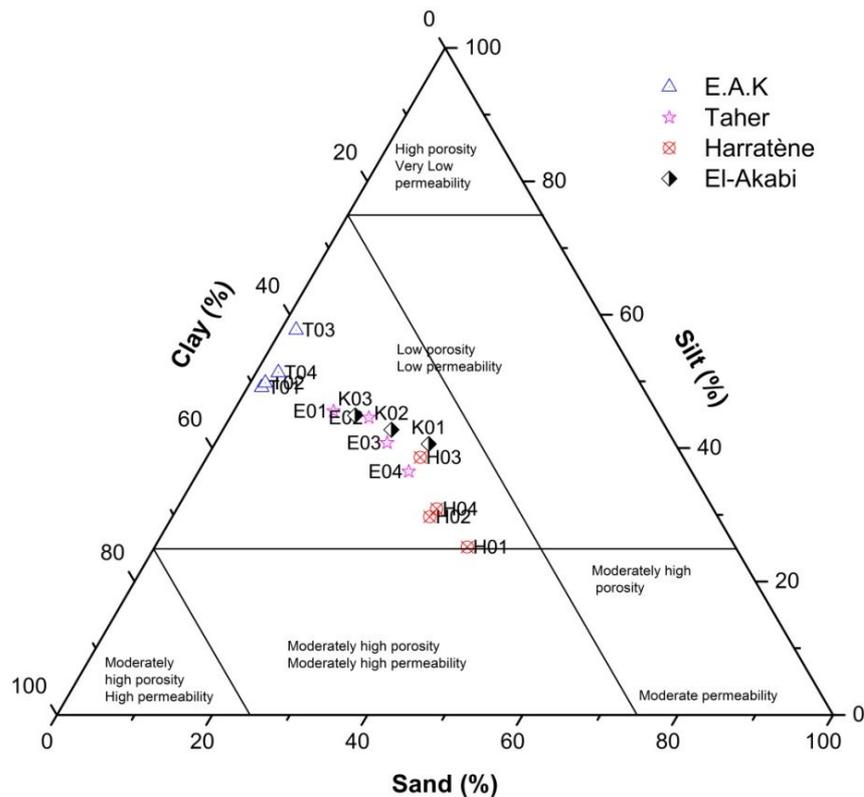


Figure 44: Position des échantillons étudiés dans le diagramme ternaire de McManus (1988)

La calcimétrie de Bernard a mis en évidence des échantillons riches en CaCO_3 (16-29%) avec une moyenne de 22%, à l'exception de l'échantillon E01 de l'Emir abdelkader avec 1% de CaCO_3 , qui s'écarte carrément de la moyenne.

IV.2.5. Evaluation de la plasticité

Les résultats de limites d'atterberg obtenus sont reportés dans le Tableau 15 et la figure 45. D'après les résultats de cette analyse, on constate que les valeurs des limites de plasticité (LP) des échantillons provenant des sites de Harratène, El-Akabi et Emir Abdelkader varient de 16–19%, les limites de liquidité (LL) 30–38% et les indices de plasticité (PI) 14–22% avec une moyenne de 19% caractérisant des argiles moyennement plastiques. Pour le site de Taher, les limites de plasticité varient 18–22%, les limites de liquidité 52–56% et les indices de plasticité 28–34% caractérisant des argiles plastiques à très plastiques, pouvant présentés un fort potentiel de gonflement.

D'après le diagramme de Holtz et Kovacs (1981), qui exprime la variation de la limite de liquidité en fonction de l'indice de plasticité, l'ensemble des échantillons analysés (El-Akabi, Harratène et Emir Abdelkader) se place dans la région de plasticité moyenne à faible, préconisé dans l'industrie céramique. Néanmoins pour le site de Taher, les échantillons correspondant se

place dans la région de plasticité élevée, confirmant, ainsi, les résultats de l'analyse granulométrique, traduite par le faible taux de la fraction sableuse (2%) et une teneur élevée de la fraction argileuse inférieure à 2 μm (46%) et de la fraction limoneuse (52%), (Tab. 15), qui influe sur la plasticité du matériau argileux.

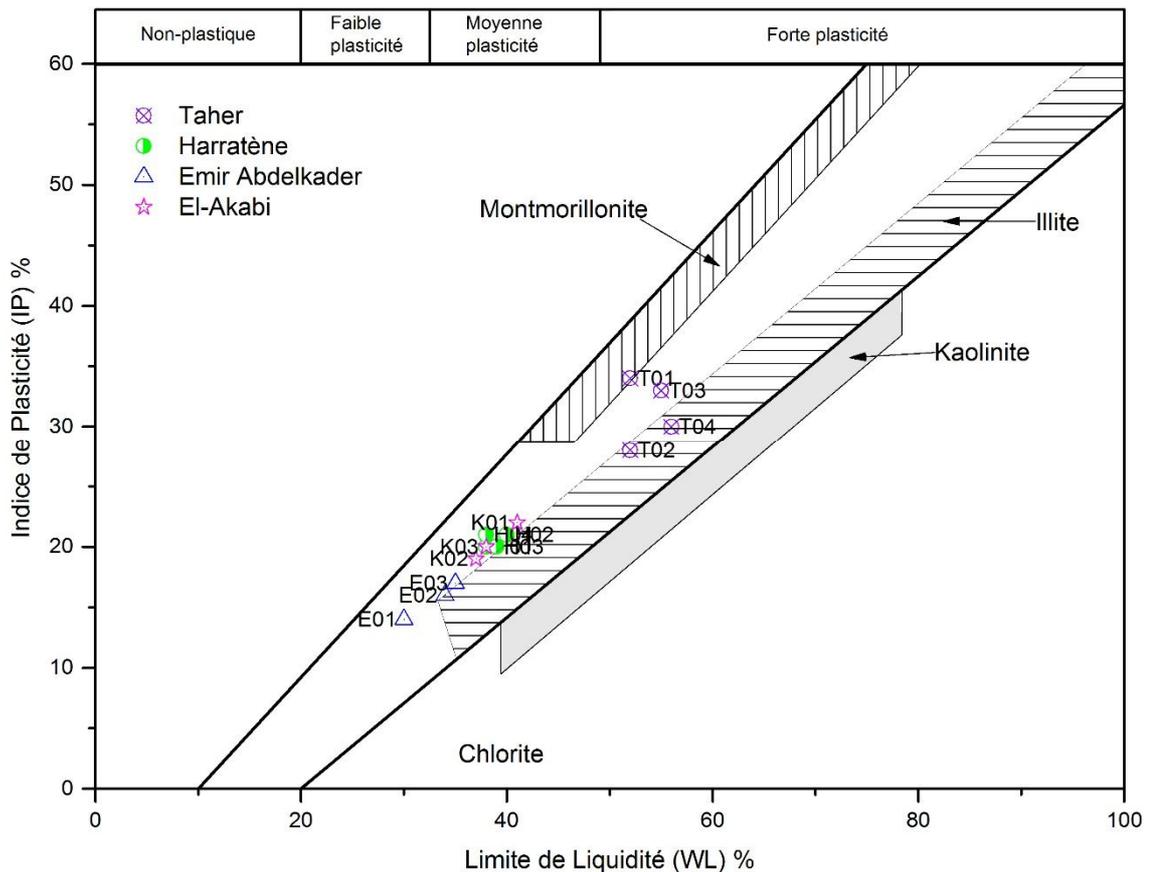


Figure 45: Position des formations argileuses analysées sur le diagramme de Holtz & Kovacs (1981).

IV.2.6. Caractérisation morphologique

L'observation effectuée au microscope électronique à balayage (MEB) sur l'échantillon E02, confirme les résultats d'analyses par DRX et montre que les constituants principaux sont la kaolinite, l'illite, la chlorite et les interstratifiés (Fig. 46). La kaolinite se présente sous forme de plaquettes pseudo-hexagonales, disposées face à face moins distinctives. La chlorite est disposée suivant un motif de rosette bien développé. Quand à l'illite, elle montre de fines paillettes avec des projections en forme de ruban (Fig. 46).

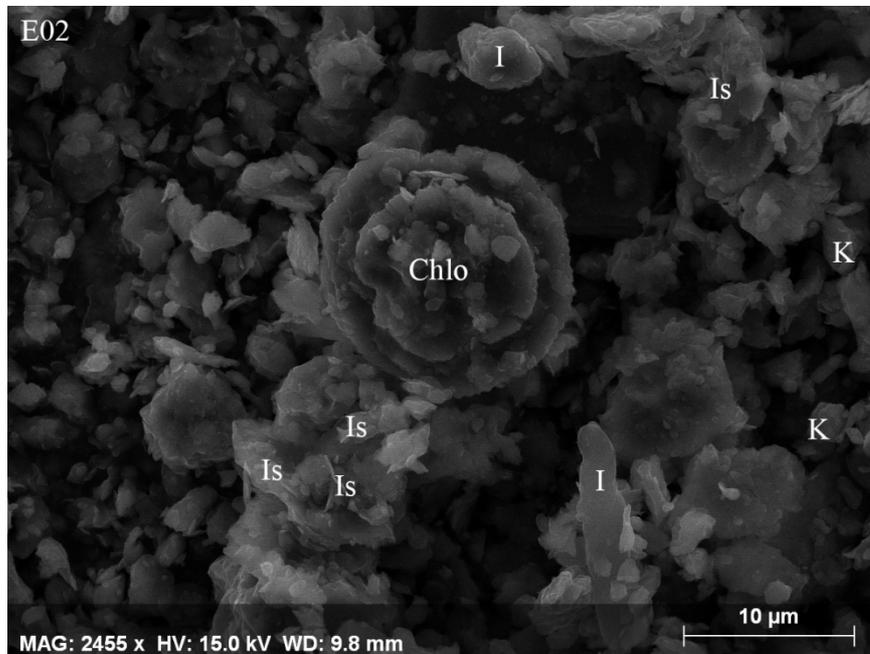


Figure 46: Planche illustrant une vue au MEB de l'argile de l'échantillon E02 (K : Kaolinite, I : Illite, Chlo : Chlorite, Is : Interstatifié)

IV.2.7. Evaluation de l'aptitude des matériaux argileux étudiés aux applications industriels

L'aptitude des matériaux argileux pour une éventuelle utilisation dans la fabrication de produits céramiques est fonction de la composition minéralogique, chimique et des propriétés physiques. Ces facteurs vont déterminer le comportement du mélange argileux lors des opérations de façonnage ou moulage, séchage et cuisson. Afin d'évaluer l'aptitude des argiles étudiées comme matière première pour différents produits de céramique et/ou de produits rouges, les caractéristiques de ces dernières ont été visualisées sur différents diagrammes.

L'abondance relative des minéraux argileux peut influencer de manière significative les propriétés finales des produits céramiques. Le diagramme ternaire (kaolinite/illite/chlorite) de la figure 47A, montre que la plupart des échantillons d'argiles étudiés du bassin néogène de Jijel sont riches en kaolinite, à l'exception des échantillons E02 et E03 provenant de la région d'Emir abdelkader qui sont plutôt riche en illite, ces deux minéraux argileux sont largement les premiers utilisés dans l'industrie céramique. La kaolinite est la plus utilisée en raison de sa température de fusion élevée et de sa couleur blanchâtre, caractéristique après cuisson. L'illite, qui est aussi l'un des composants majeurs des argiles étudiées, est largement utilisée comme matériau de fondant dans la céramique traditionnelle (Ferrari & Gualtieri, 2006). Quand à la chlorite, elle donne une couleur rougeâtre au cours de la cuisson des briques.

Une bonne évaluation de l'aptitude d'une matière première pour la production de produits céramiques doit tenir compte de la taille des particules. Le diagramme de Winkler (Winkler, 1954), basé sur la proportion des fractions : 2 à 20 μm , < à 20 μm et > à 2 μm , regroupe les données granulométriques des échantillons étudiés, comme l'illustre la figure 47B. D'après ce diagramme, les matériaux argileux de la région de Taher (T01, T02, T03 et T04) font partie de la zone IV, favorable pour les produits creux en raison de sa granulométrie fine, alors que les autres échantillons des régions de Harratène, El-Akabi et Emir Abdelkader sont plutôt appropriés pour la fabrication de produits rouges (tuiles et briques de maçonnerie).

Le diagramme ternaire de Strazzer et al. (1997), qui utilise l'abondance des minéraux argileux, quartz-feldspaths et carbonates, relie la composition minéralogique avec les applications céramiques (Fig. 47C). L'ensemble des argiles étudiés, font partie du domaine des produits structurels (briques et tuiles) destinés à être utilisés dans la construction et sont donc potentiellement approprié pour la céramique de structure. En outre, la minéralogie de l'échantillon K02 d'El-Akabi fait partie du domaine d'utilisation de la tuile de couverture (Fabbri et Dondi, 1995). Néanmoins, pour l'échantillon E01, il semble qu'il n'est pas approprié en tant que matière première pour les applications céramiques, en raison de sa teneur élevée en quartz. Pour cela, ce type de matériaux argileux nécessite un traitement approprié afin de limiter la teneur en quartz et d'améliorer l'aptitude au façonnage.

La projection des données d'analyses chimiques sur le diagramme ternaire $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (Fig. 47D), utilisé par Fiori et al. (1989) pour classer les matériaux argileux bruts et les pâtes céramiques industrielles, montre que, les matériaux argileux K01, K02, K03 d'El-Akabi, et E02 de l'Emir Abdelkader, font partie du domaine de la céramique rouge. Les autres échantillons de Taher (T01, T02, T03, T03), Harratène (H01, H02, H03, H04) et Emir Abdelkader (E03, E04), se place en dehors du domaine de la céramique fine, mais non loin du domaine de la céramique rouge, à l'exception de l'échantillon E01, qui se trouve carrément en dehors du domaine de la céramique rouge.

Ces observations sont en accord avec les travaux effectués par Fiori et al. (1989), Murray (2007), et Baccour et al. (2009), qui indiquent que les matériaux argileux qui contiennent 5% ou plus de Fe_2O_3 sont des argiles qui présentent une couleur rouge à la cuisson. Par contre, pour ceux qui contiennent entre 1 et 5% de Fe_2O_3 sont des argiles qui cuits rouge et ceux qui contiennent moins de 1% de Fe_2O_3 sont des argiles qui cuits blanc. A cet effet, et en raison de la teneur relativement élevée en Fe_2O_3 (>5%) dans l'ensemble des matériaux argileux, étudiés (Tableau 14), ils ne peuvent

être utilisés pour la production de céramiques fines, sauf si des traitements de réduction de la teneur en oxyde de fer sont entrepris. Par contre, ils pourraient être considérés comme des matières premières appropriées pour les produits de céramique structurelle (Konta, 1995).

La figure 47E, caractérisant l'aptitude des matériaux argileux à l'extrusion, en ce basant sur la plasticité des mélanges (Marsigli et Dondi, 1997), laissent apparaître qu'une grande partie des matériaux argileux étudiés à savoir : site d'El-Akabi (K01, K02 et K03), site de Harratène (H01, H02, H03 et H04) et site d'Emir Abdelkader (E02, E03 et E04) se placent dans le domaine d'extrusion optimale ; alors que les échantillons de la région de Taher, quand à eux se placent dans la zone d'extrusion considérée acceptable, exception faite pour l'échantillon E01, qui, lui se situe en dehors à la fois le la région d'extrusion acceptable et optimales.

La particularité de cet échantillon se traduit par le fait que ce matériau argileux est inapproprié pour l'extrusion, en raison de sa faible plasticité. Cette dernière peut engendrer des problèmes liés à une variation possible de la quantité d'eau d'extrusion, qui affecte les produits finis soit par des caractéristiques dimensionnelles inappropriées ou même des fissures (Abajo, 2000).

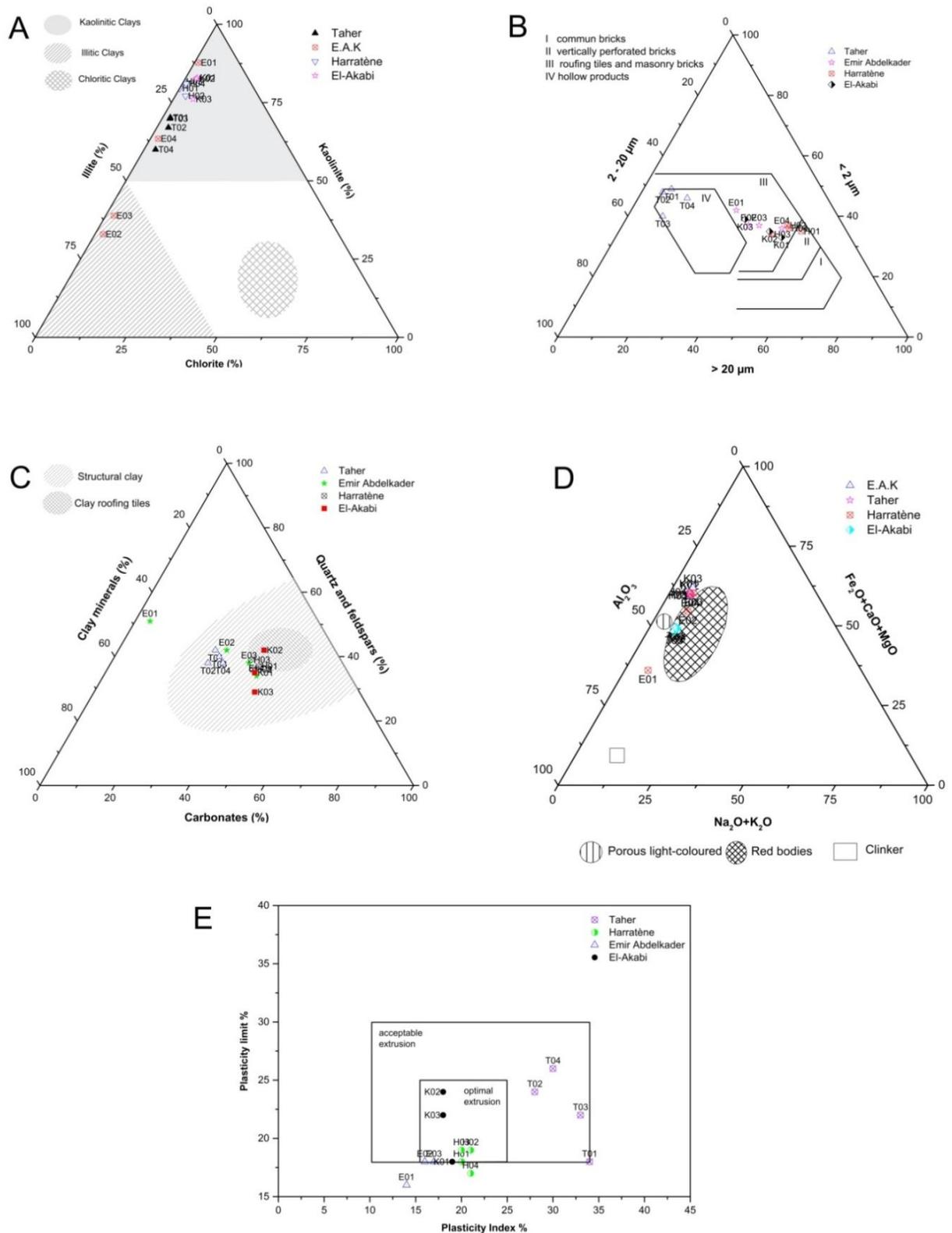


Figure 47: Position des matériaux argileux étudiés sur les diagrammes de classification des matériaux argileux étudiés. **A:** Composition minéralogique de la fraction argileuse, d'après le diagramme ternaire: kaolinite/illite/chlorite; **B:** Diagramme ternaire d'après Winkler (1954); **C:** Diagramme ternaire d'après Strazzera et al. (1997); **D:** Diagramme ternaire d'après Fiori et al. (1989); **E:** Evaluation du comportement à l'extrusion d'après Marsigli and Dondi (1997).

IV.3. Matériaux argileux des sites de Djimla-Tamentout et Tarzoust (argiles sous-numidiennes)

IV.3.1. Etude minéralogique par DRX

Les diffractogrammes des échantillons d'argiles sous numidiennes analysées sont données à la figure 48. Les phyllosilicates (minéraux argileux), le quartz, les feldspaths et la calcite sont les constituants principaux de ces matériaux argileux, parfois associés à de faibles quantités de plagioclase, de calcite, de dolomite et de feldspath-K (microcline). L'analyse semi-quantitative de la phase (poudre totale et fraction < 2µm) des sept (07) échantillons est présentée dans le tableau 16. La minéralogie totale de ces argiles se particularise par la l'abondance du quartz (33–49%) comme minéral non argileux. La présence de plagioclase (1-4%), de feldspath-K (2-3%), de calcite (0-4%) et de la dolomite (0-3%) était également mise en évidence, mais en faibles quantités.

Tableau 16 : Composition minéralogique des matériaux argileux des sites de Tarzoust (El-Milia) et Djimla-Tamentout.

No. d'échantillon	Minéralogie des poudres %						Minéralogie des argiles (fraction < 2 µm) %			
	Quartz	Argile totale	Microcline	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Kaolinite	Illite	Chlorite	Interstratifié 10-14 Å
	Facteur correctif de chaque minéral									
	(1.00)	(20.00)	(4.3)	(2.80)	(1.65)	(1.53)	(0.70)	(1.00)	(0.34)	(0.40)
	Cook et al. (1975)	Boski et al. (1998)	Cook et al. (1975)	Fagel et al. 2007	Fagel et al. 2007	Fagel et al. 2007	Fagel et al. 2007			
Djimla										
D01	38	56	-	4	1	1	34	18	1	3
D02	35	58	2	3	1	1	32	21	2	3
D03	48	50	-	2	0	0	30	13	-	7
D04	43	54	2	1	0	0	30	18	1	5
D05	33	65	-	1	0	1	46	13	2	4
Boutias										
M01	37	55	3	4	1	1	32	18	1	3
M02	49	42	-	2	4	3	20	19	2	1

Le dépouillement des diffractogrammes de DRX de la fraction < 2µm a permis de constater que les principaux pics observés étaient caractéristiques de la kaolinite (30–46%), de l'illite (13–21%) qui sont omniprésentes dans tous les échantillons étudiés, d'où on note aussi la présence d'interstratifié 10-14 Å (1–7%) et de la chlorite avec des proportions inférieures à 2%. La kaolinite

est, dans ce cas, le phyllosilicate porteur des propriétés céramiques favorables des matériaux étudiés.

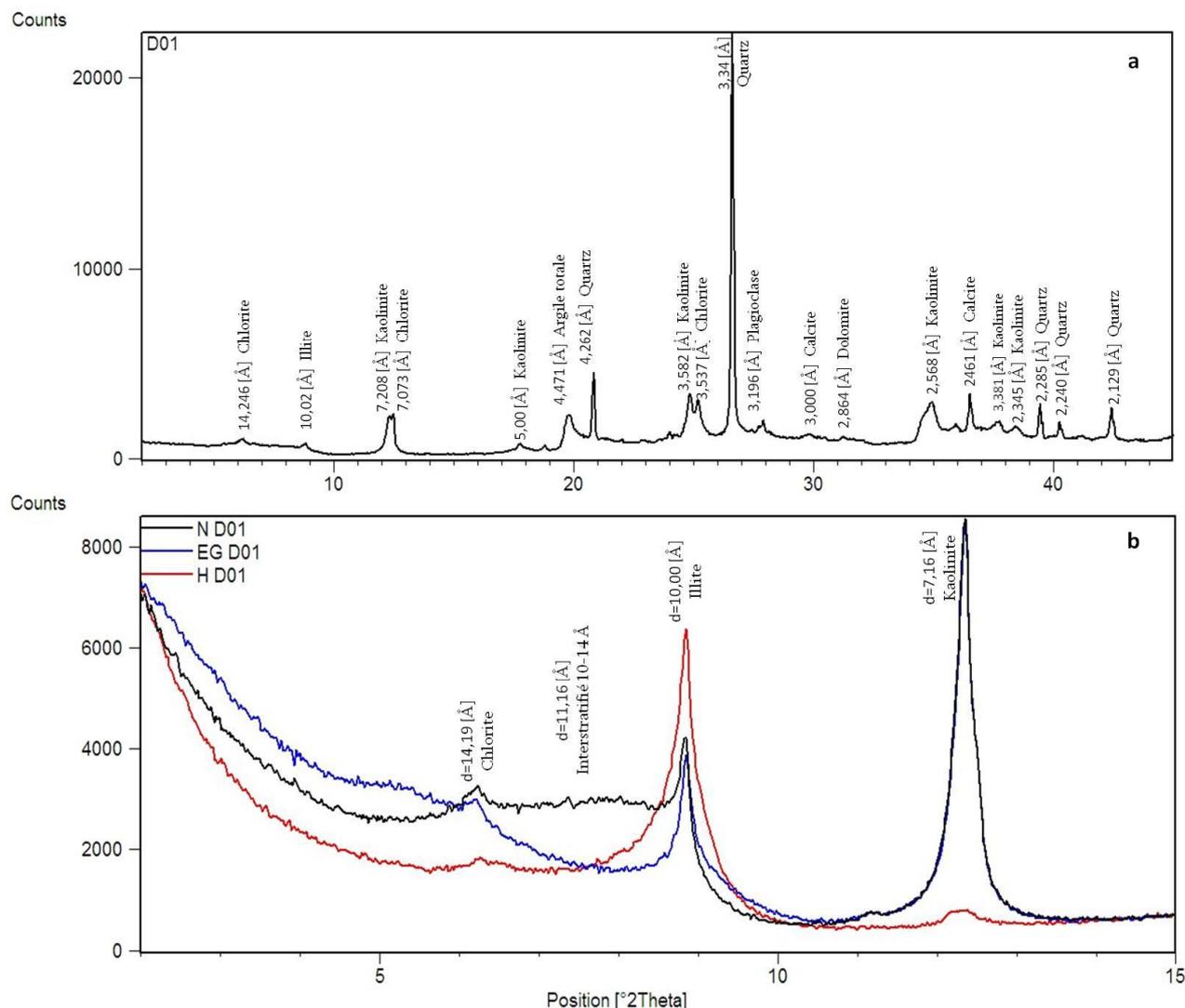


Figure 48: Spectres de diffraction de rayon X : (a) Poudre totale de l'échantillon étudiés D01 ; (b) fraction argileuse échantillon D01 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.

La réflexion principale du quartz apparait à 3.34 Å bien intense, l'espace interfoliaire basal (001) à 10.10 et 14.47 Å confirme la présence respectivement de l'illite et de la chlorite. La diffraction de 7,16 Å disparaît après cuisson à 550°C, ce qui confirme la présence de la kaolinite. Les interstratifiés (10-14 Å) se présentent en faible teneur, ce qui empêche une identification claire du type d'interstratifié. Les réflexions à 2.88 Å, 3.03 Å et 3,25 Å confirment la présence respectivement de la dolomite, la calcite et du feldspath-K (microcline) mais en très faible quantité ($\leq 4\%$).

La composition minéralogique globale des matériaux de Djimla-Tamentout est semblable voir très proche. Du point de vue qualitatif et même quantitatif, à celle des matériaux argileux de Tarzoust. Les diffractogrammes des poudres désorientées et ceux des préparations orientées naturelles, saturées à l'éthylène-glycol et chauffées à 500°C sont superposables pour tous les échantillons. Malgré l'éloignement des deux sites, les spectres DRX présentent une parfaite similitude qui confirme une homogénéité des matériaux formés dans les mêmes conditions physico-chimiques, dans les mêmes environnements géologiques et la provenance d'une source commune.

IV.3.2. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR

La spectrométrie Infra Rouge a été utilisée en complément de la diffraction de rayon X. La figure 49 présente les spectres IR des échantillons D02 et M01, et la position des différentes bandes IR est résumée dans le tableau 17. A l'image de ces résultats, on constate à priori que :

- Les des bandes d'absorption autour de 3697 cm^{-1} et 3620 cm^{-1} qui sont en accord avec la DRX indiquant la présence respectivement de la kaolinite et de l'illite (Salerno et al, 2001 ; Farmer, 1974 ; Russel et Fraser, 1996 ; Madejova, 2003).
- Le quartz observé par DRX est traduit par les bandes à $\sim 1031\text{ cm}^{-1}$, $\sim 797\text{ cm}^{-1}$ et $\sim 694\text{ cm}^{-1}$ correspondant à la vibration d'élongation de Si-O.
- Les groupements H-OH appartenant à l'eau absorbée en inter couche sont également mis en évidence dans les bandes à 3410 cm^{-1} et 1636 cm^{-1} (échantillon D02) et 3417 cm^{-1} et 1623 cm^{-1} (échantillon M01), avec une intensité plus grande dans l'échantillon 1, ce qui suppose une capacité d'échange anionique plus grande dans ce cas.
- La bande à 910 cm^{-1} pour l'échantillon D02 (Fig. 49a) est attribuable aux vibrations de flexion des groupements Al-Al-OH et Al-Mg-OH, indiquant la présence de la smectite (Madejova et al, 1998 ; Caillere et al, 1982). La présence simultanée des bandes à 3620 cm^{-1} et à 910 cm^{-1} indique que la smectite est dioctaédrique (Borchardt, 1977). Ces résultats sont en accord avec ceux de la DRX, ils confirment la présence de la kaolinite, de l'illite et de la smectite.
- La bande de vibration d'élongation C-O (Fig. 49b) autour de 1441 cm^{-1} pour l'échantillon M01 (faible et bien résolue) indique la présence de la calcite. La présence de bandes IR fines à 1384 cm^{-1} est due à l'absorption atmosphérique de CO_2 (Yanagisawa et al. 1995 ; Gillot, 2010).

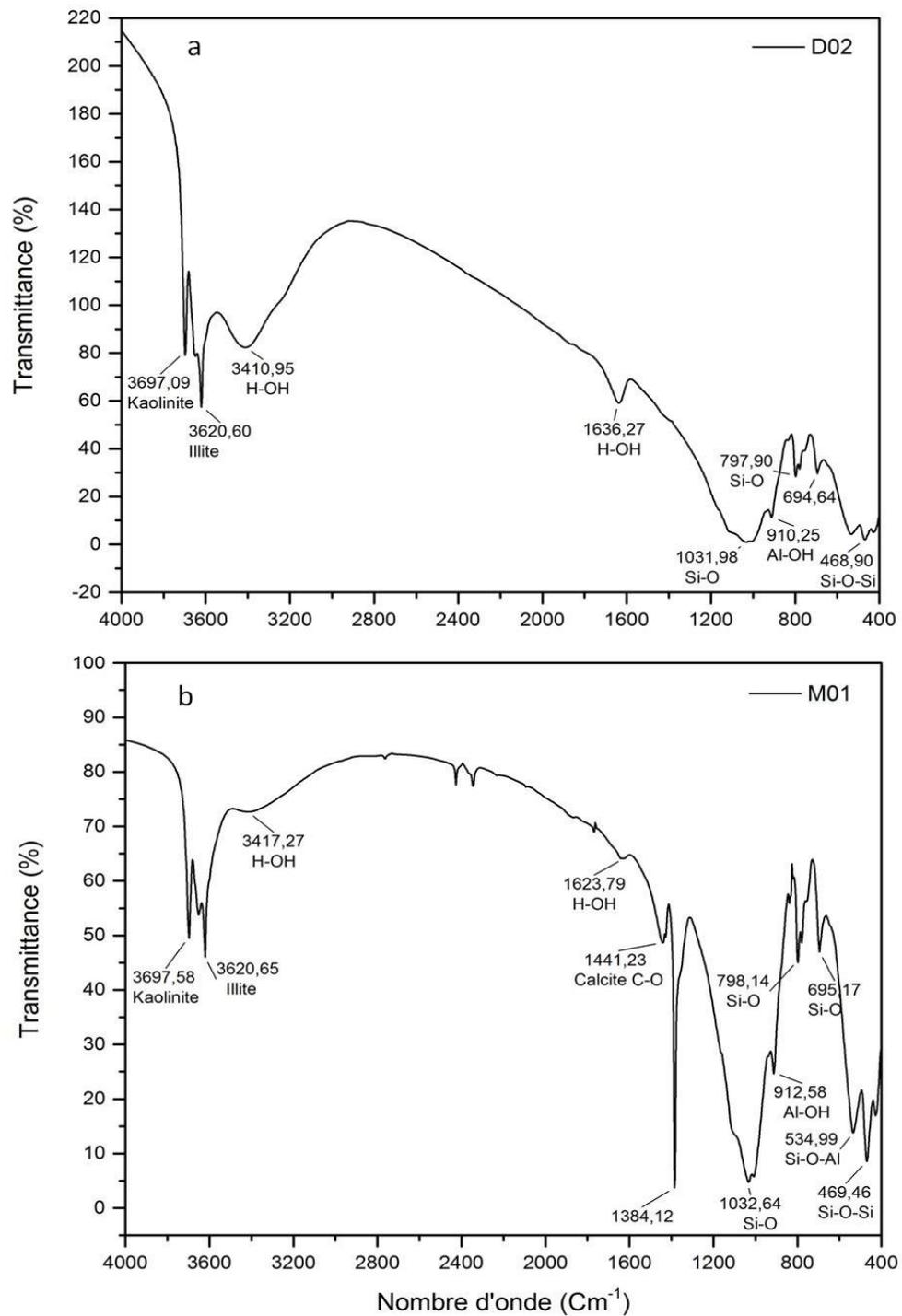


Figure 49: Spectres FT-IR représentatifs de l'échantillon D02 et M01.

Tableau 17: Positions des bandes IR des échantillons D02 et M01.

Attribution	Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	
	D02	M01
OH-	3697	3697
Hydroxyles cristallins	3620	3620
H-O-H	3410	3417
Eau absorbée	1636	1623
C-O (CO ₃ ⁻²)	-	1441
O-C-O	-	1384
Al-OH	910	912
Si-O	1031	1032
Quartz	797	798
	694	695
	468	469
Si-O-Al ^{VI} déformation	-	534

IV.3.3. Composition Chimique

Les compositions chimiques en pourcentages massiques et les pertes au feu des matériaux argileux des formations argileuses sous numidiennes des sites de Tarzoust (El-Milia) et de Djimla-Tamentout (Sud de Jijel) sont présentées dans le tableau 18. De l'examen des pourcentages en éléments majeurs, il se dégage des observations suivantes :

- Ces argiles sont essentiellement constituées de SiO₂ et Al₂O₃, ces deux oxydes représentent 70 % en poids, de la fraction totale de l'argile brute. Les résultats des analyses des échantillons brutes révèlent la dominance de SiO₂ entre 53 et 56 % et de Al₂O₃ dont les valeurs varient de 20 à 21 %. Par comparaison à une argile réfractaire dont le taux d'alumine dépasse 45%, on peut dire que ces argiles sont non réfractaires et grésantes.
- Les alcalins montrent des teneurs variant entre 0.17 et 0.54 % pour Na₂O et entre 2.29 et 3.18 % pour K₂O. Ces teneurs sont comprises dans les limites admissibles que doivent présenter une argile destinée à l'industrie céramique (El Yakoubi et al. 2006). Les teneurs en potassium dues à la présence d'illite sont relativement importantes (Jamoussi, 2001).

Tableau 18: Composition chimique des matériaux argileux de Djimla-Tamentout et de Tarzoust (en % poids).

N° Echan	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	BaO	SrO	P.F 1000°	Rapport SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Djimla																
D01	54.00	21.70	7.43	1.26	2.57	2.96	0.31	1.00	0.06	0.15	0.12	0.02	0.05	0.02	8.53	2.49
D02	53.90	21.60	8.92	0.56	2.47	3.02	0.28	0.98	0.15	0.40	0.13	0.02	0.10	0.02	8.31	2.50
D03	55.30	20.30	9.11	0.39	2.02	2.52	0.27	1.02	0.10	0.20	0.20	0.02	0.07	0.01	8.36	2.72
D04	56.50	21.00	7.31	0.34	1.94	3.18	0.23	1.00	0.07	0.21	0.11	0.02	0.04	0.01	8.34	2.69
D05	54.00	20.90	8.81	0.44	1.94	2.87	0.17	1.06	1.03	0.06	0.23	0.02	0.04	0.03	9.50	2.58
Boutias																
M01	55.60	21.10	8.09	0.68	2.42	2.54	0.54	1.03	0.03	0.04	0.17	0.02	0.03	0.02	7.93	2.64
M02	53.80	20.60	6.56	3.43	2.31	2.29	0.25	1.10	0.07	0.02	0.25	0.03	0.01	0.02	9.62	2.61

Les échantillons sont riches en oxyde fer Fe₂O₃ qui varie entre 6.56 et 9.11 %, cet oxyde n'est pas le seul qui influe sur la coloration du carreau cuit, CaO, MgO, MnO et TiO₂ influent également sur la coloration du produit fini (Monteiro, 2004). Par ailleurs, la température de cuisson, le taux de Al₂O₃ et l'atmosphère du four influent sur la coloration de l'argile cuite (Aydin, 2004). On note aussi le faible taux de participation des carbonates avec des valeurs inférieurs à 1 % sauf pour l'échantillon M02 avec 3.43 % et D01 avec 1.26 %.

A l'image de ces résultats, on peut en conclure que les compositions chimiques de ces argiles sont comparables à celles des matières premières utilisées dans la fabrication des produits de terre cuite (voir tableau n°06).

IV.3.4. Analyse granulométrique

La composition granulométrique est indiquée dans le tableau 19. De la lecture de données contenues dans ce tableau il se dégage que les échantillons de la région de Djimla-Tamentout présentent une fraction argileuses (< 2µm) comprise entre 44-49 %, la fraction limoneuse (2-60 µm) 14-29 % et la fraction sableuse (> 60 µm) 25-37 %. Pour le site de Boutias (El-Milia) la fraction argileuse est comprise entre 42-45 %, la fraction limoneuse 26-27 % et la fraction sableuse 29-31 %. Ces pourcentages montrent que la fraction argileuse est la plus dominante avec une moyenne de 48 % pour le site de Djimla-Tamentout et de 43 % pour le site de tarzoust (El-Milia).

Tableau 19: Granulométrie, limites d'atterberg, valeur au bleu de méthylène (VBS) et masse volumique des particules solides des échantillons étudiés, des sites de Tarzoust et Djimla.

Propriétés physiques	Djimla					Boutias (El-Milia)	
	D01	D02	D03	D04	D05	M01	M02
Distribution des particules solides (%)							
Argile (< 2 µm)	49	49	48	48	44	42	45
Limon (2-60 µm)	26	14	17	22	29	27	26
Sable (> 60 µm)	25	37	35	30	27	31	29
Limites d'atterberg (%)							
Limite de plasticité (WP)	27	25	22	22	23	23	21
Limite de liquidité (WL)	57	53	50	47	49	46	42
Indice de plasticité (IP)	30	28	28	25	26	22	19
Teneur en eau "W"	16.06	12.46	14.49	16.66	16.06	14.64	21.32
Indice de consistance (IC)	1.19	1.32	1.27	1.22	1.23	1.40	1.09
Valeurs au bleu de méthylène VBS	5.3	4.1	4.5	3.0	3.7	3.1	2.8
Masse volumique (ρ_s) (t/m ³)	2.67	-	2.65	-	2.65	2.64	2.66

La projection des résultats d'analyse granulométrique sur le diagramme ternaire de Shepard (1954), basé sur la proportion de la fraction argileuse, limoneuse et sableuse (Fig. 50). On constate que l'ensemble des matériaux sont classés comme argile limoneuse sableuse, à l'exception des échantillons D02 et D03 qui sont plutôt classés comme argile sableuse. Le problème de la présence de particules dans la fraction de sable grossier (0.2-2 mm), cette dernière peut être résolu simplement par broyage.

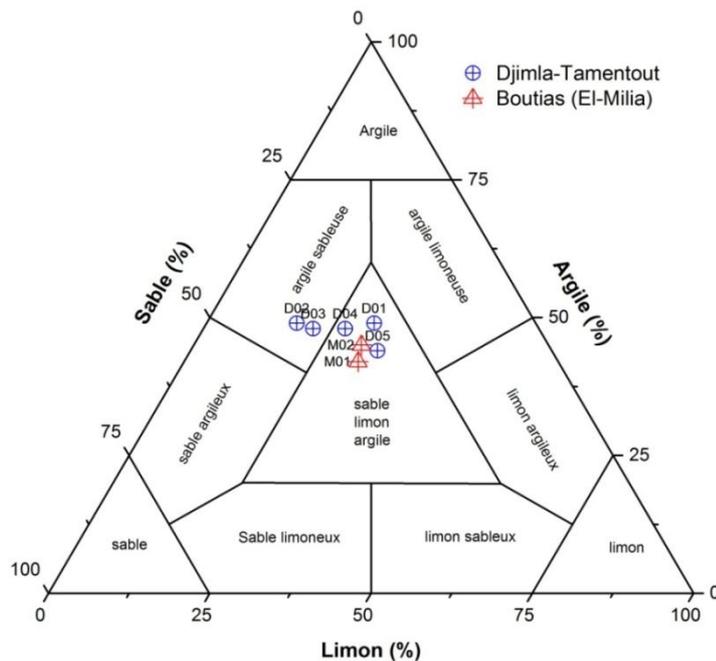


Figure 50: Position des échantillons argileux de Djimla-Tamentout et tarzoust sur le diagramme ternaire de Shepard (1954).

IV.3.5. Evaluation de la plasticité

La plasticité est l'un des paramètres les plus importants, pris en considération dans la fabrication de produits céramiques. Elle est contrôlée par plusieurs facteurs, tels que la granulométrie, la quantité de minéraux argileux expansibles (smectite, vermiculite et interstratifiés), les impuretés (minéraux non argileux) et la présence de la matière organique (Bergaya et al., 2006 ; Hajjaji et al. al., 2010). L'ensemble des données des échantillons analysés, incluant la limite plasticité (WP), la limite liquidité (WL), l'indice plasticité (IP) et l'indice de consistance (IC) sont présentées dans le tableau 12. La figure 51 montre la position de ces argiles sur le diagramme de plasticité de Holtz et Kovacs (Holtz et Kovacs, 1981).

Pour les matériaux argileux de la région de Djimla-Tamentout, l'indice de plasticité (IP) est de 25-30%, la limite de liquidité (WL) est de 47-57 %, la limite de plasticité (WP) est de 22-27 % (Fig. 51, Tab. 19). Ces valeurs caractérisent des argiles de plasticité moyenne à forte selon le diagramme de Holtz & Kovacs (1981) et de consistance semi-solide ($IC > 1$). L'échantillon D01 présente l'indice de plasticité le plus élevé avec $IP=30\%$, ce qui caractérise des argiles très plastique. Cette plasticité élevée pourrait probablement être liée à la quantité de la fraction argilo-limoneuse qui s'élève à 75 %. Un indice de plasticité élevé indique un potentiel élevé de gonflement. De plus, les produits céramiques fabriqués à base de cet échantillon sont susceptibles de présenter de forts retraits au séchage.

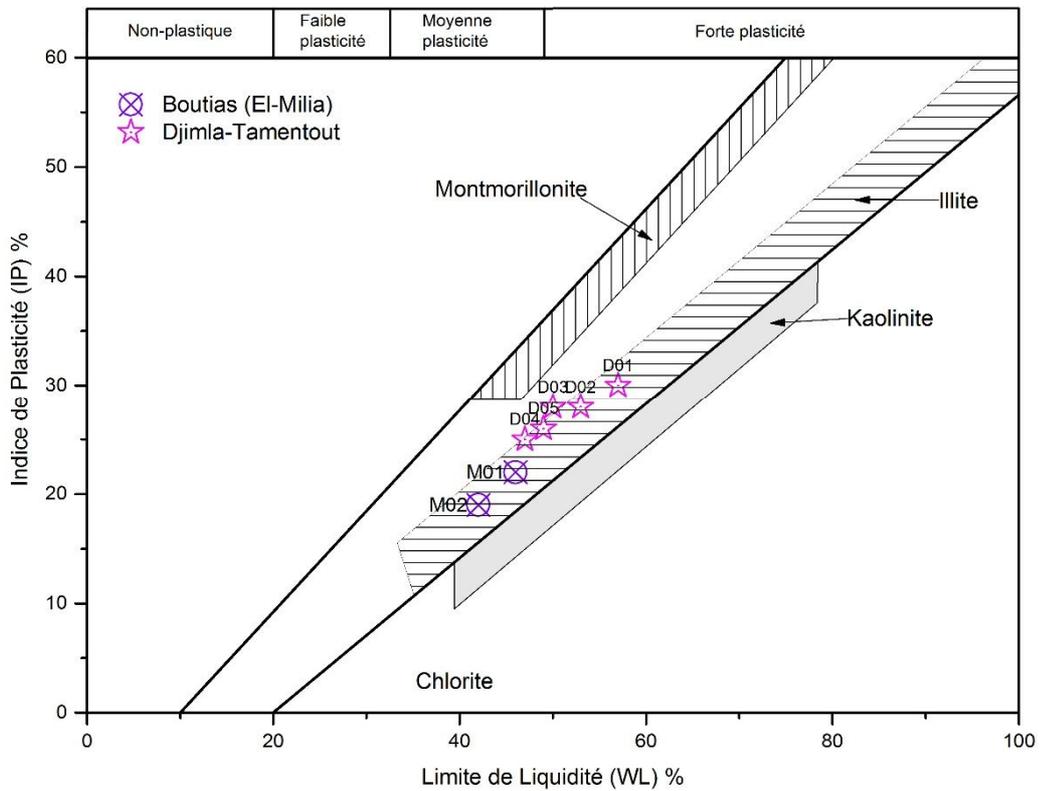


Figure 51: Position des échantillons de Djimla-Tamentout et de Boutias dans le diagramme de plasticité (d'après Holtz et Kovacs, 1981).

Les échantillons de la région de Boutias quand à eux, ils sont de plasticité moyenne et présentent un indice de plasticité compris (IP) 19-22%, limite de liquidité (WL) 42-46 %, limite de plasticité (WP) 21-23 %. Les valeurs de limite de liquidité pour les deux sites sont en accord avec les limites définies dans la littérature ($30 < WL < 60$ %) pour la production de céramique.

L'évaluation de la surface spécifique d'échange des matériaux argileux a été déterminée en se basant sur l'essai de bleu de méthylène d'un sol (NF P 94-068), les résultats sont présentés dans le tableau 15. Les valeurs VBS sont très homogènes pour les deux sites et sont comprises entre $2.8 < VBS < 5.3$ caractérisant ainsi des sols argilo-limoneux. L'échantillon D01 présente la valeur maximum avec 5.3, cette valeur relativement élevée est liée à la quantité de la fraction fine (> 50 %) et à la composition minéralogique.

Le coefficient de détermination $R^2 = 0,9529$ et le coefficient de corrélation $r = 0,98415$ obtenu à l'issue d'une étude de corrélation entre l'indice de plasticité et la valeur de bleu de méthylène montre qu'il existe une forte corrélation entre l'indice de plasticité (IP) et la valeur au bleu de méthylène (VBS) (Fig. 52).

Etant donné que ces matériaux argileux peuvent être définis comme des argiles riches en kaolinite et illite, leurs densités sont également compatibles avec celles généralement données dans la littérature (2,64 à 2,67 t/m³).

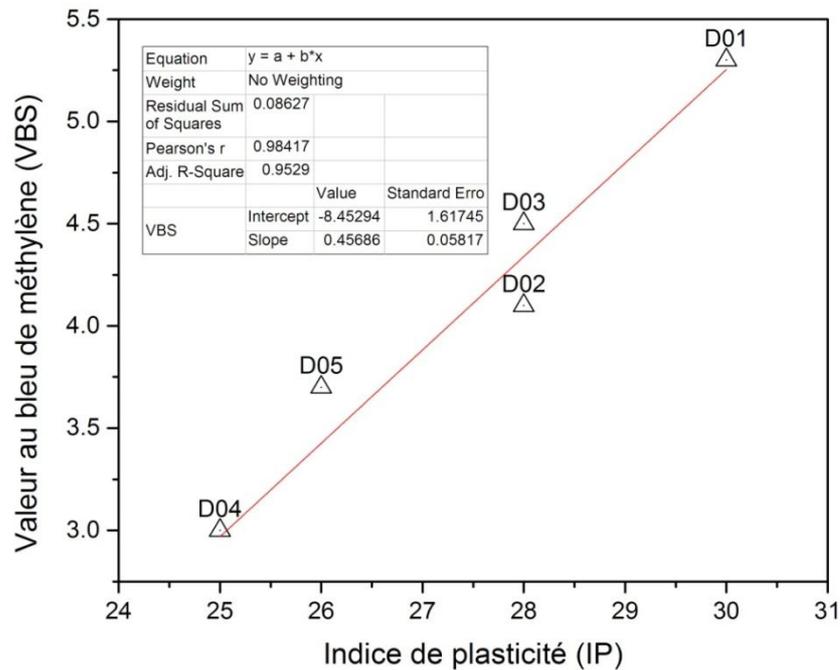


Figure 52: Corrélation de l'indice de plasticité et la valeur du bleu du méthylène (IP-VBS).

La figure 53 présente un essai d'évaluation de l'extrusion en se basant sur le diagramme de plasticité des matériaux argileux (Marsigli et Dondi, 1997). La limite de plasticité WL, correspond à la teneur en eau nécessaire pour que le matériau argileux atteigne une consistance plastique, ce qui permet sa formation par extrusion. L'indice de plasticité PI définit l'étendu du domaine plastique. Pour des raisons pratiques, l'indice de plasticité doit être supérieur à 10% (Abajo, 2000).

Le résultat de la figure 53 révèle que l'ensemble des matériaux argileux étudiés se place dans la région à extrusion acceptable à optimale. Ceci suggère que l'ensemble des matériaux présentant des $10 < IP < 34\%$ présente une bonne aptitude à l'extrusion. Les matériaux argileux qui présentent des valeurs $IP < 10\%$ ne sont pas appropriés pour la production de céramique de construction en raison du risque d'apparition de fissures lors de l'extrusion. Ces problèmes sont liés à une variation possible de la quantité d'eau d'extrusion, provoquant des caractéristiques dimensionnelles inappropriées et même des fissures dans les produits céramiques (Abajo, 2000).

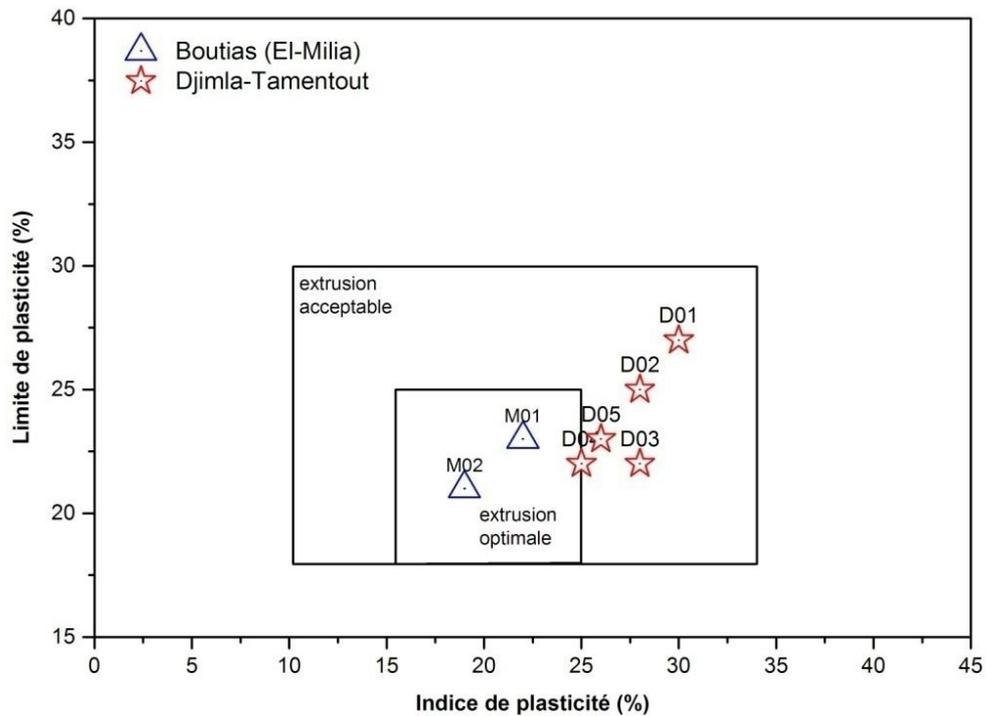


Figure 53 : Evaluation de l'extrusion à partir des limites d'atterberg (Marsigli et Dondi, 1997).

IV.3.6. Observation par microscope à balayage électronique « MEB »

Les résultats des observations au microscope électronique à balayage des échantillons M02 de Boutias et D01 de Djimla sont illustrés sur la figure 53. La figure 54a et 54b montrent une kaolinite de forme pseudo hexagonale irrégulière relativement déchiquetées parfois arrondie de taille supérieure à 3 μm . Par ailleurs pour l'échantillon D01 de Djimla, la kaolinite est de forme plutôt arrondie et de taille inférieure à 3 μm (Fig. 54c), d'où on note la présence de petits grains subarrondie dispersés dans la matrice attribués à du quartz.

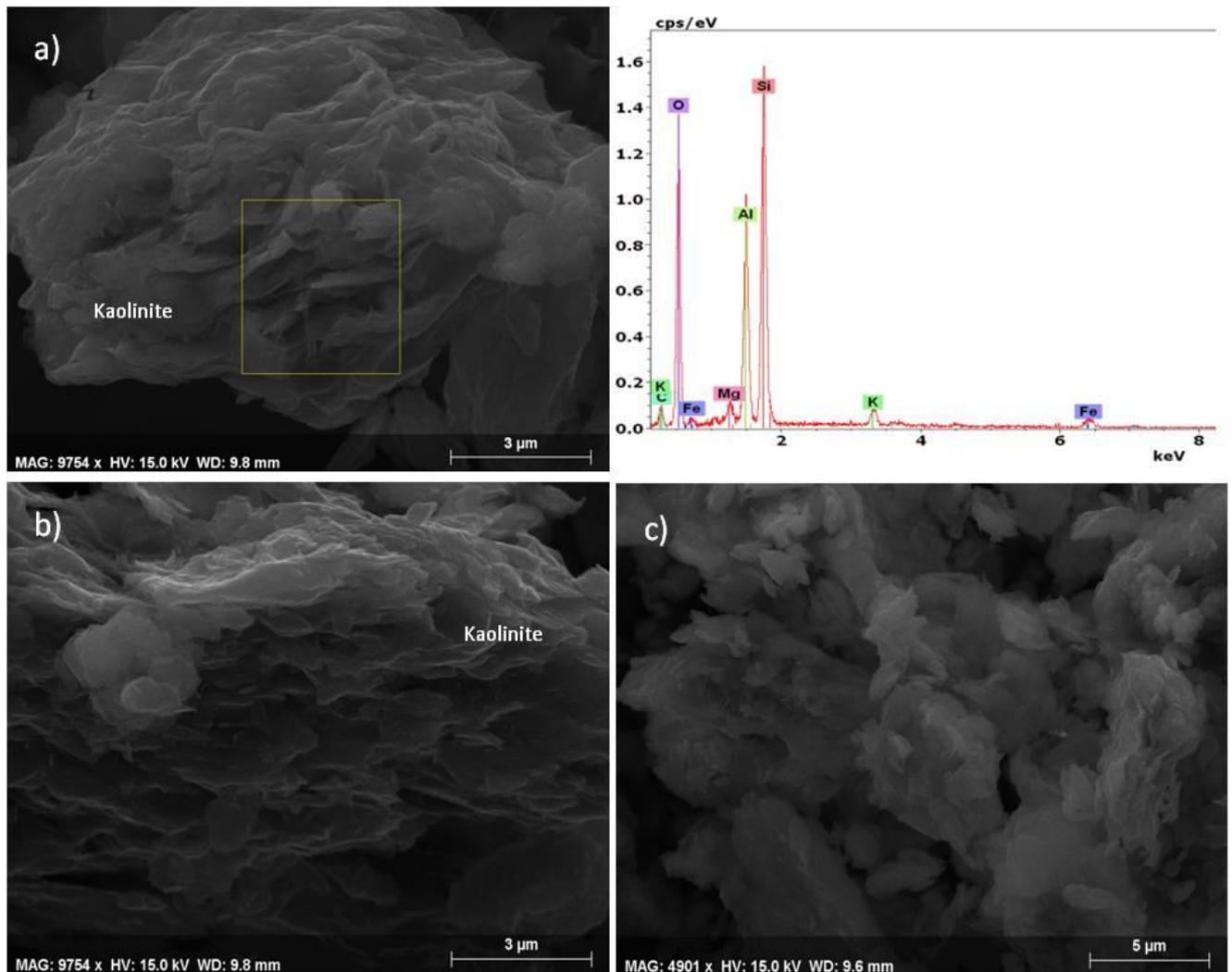


Figure 54: Image MEB des échantillons argileux d'El-Milia (Tarzoust) M02 (a et b) et de Djimla D01 (c).

IV.4. Matériaux argileux du site de Settara

La région de Settara présente un potentiel important en matériaux argileux, qui constitue la matière première pour l'industrie céramique. Deux sites ont fait l'objet d'investigation, avec un prélèvement de onze (11) échantillons pour une caractérisation au laboratoire. Le premier site est situé à 2 km au Sud-Est de la commune de Settara au niveau de Mechtet Achâch le long de la route menant vers la localité de Bordj Ali, alors que le deuxième site est situé à 1.5 km à l'Est de la commune de Settara au niveau de Mechtet Naima plus précisément à la localité d'Aggrar.

Les deux sites se présentent, sous forme de versant très érodé où l'érosion joue un rôle très important, il est caractérisé par une déclivité variable, douce à faible sur la totalité de surface, il présente quelque changement brusque de pente. On signale, l'existence dans quelques zones, des indices d'instabilité nettement observables, à l'image des arrachements localisés sous forme de petite loupe de glissement.

IV.4.1. Composition minéralogie par DRX

Les diffractogrammes des échantillons d'argile du site de Settara analysés sont présentés dans la figure 55. L'estimation semi-quantitative des phases minéralogiques totales et des minéraux argileux de ces échantillons est présentée dans le tableau 20.

Les résultats de l'analyse de cette argile montrent que la caractéristique commune à tous les matériaux argileux analysés des deux sites est la présence avec des proportions variables, d'une minéralogie totale composée essentiellement de quartz (25–62%), calcite (1–33%), feldspaths K (2–10%), plagioclase (1–6%) et de dolomite (< 2 %), avec des traces de gypse (essentiellement pour les échantillons du site 2), alors que les minéraux argileux (fraction < 2.0 μm) sont représentés par la kaolinite (12–42%) qui est fortement dominante (essentiellement dans le premier site), l'illite (1–9%), la smectite (1–6%) et des interstratifiés 10-14 Å (< 2%).

L'augmentation de l'espacement inter-couches basal de 13.92 Å à 16.86 Å après le traitement EG (Fig. 55) est caractéristique de la smectite. Des concentrations de smectite sont observées dans les échantillons argileux du site 2, et en traces dans le site 1. La présence de ce minéral dans les matériaux argileux étudiés peut engendrer des retraits lors du séchage et même après cuisson dommageable pour les produits finis.

La kaolinite est, dans ce cas, le phyllosilicate porteur des propriétés céramiques favorables des matériaux étudiés. L'existence de feldspaths dans les échantillons issus du site 2 de Settara présente un intérêt technique. En effet, la pâte plastique, formée par le mélange de l'argile avec de l'eau, se contracte pendant le séchage et surtout le chauffage. Ces retraits sont minimisés par des constituants non plastiques (dégraissants) dont les feldspaths qui jouent aussi le rôle de fondant en favorisant l'apparition d'une phase visqueuse à bas point de fusion au cours du traitement thermique et contribuant ainsi à réduire la porosité de la pièce et à en améliorer les propriétés mécaniques (ARIB A. et al., 2007).

Tableau 20: Composition minéralogique des matériaux argileux des deux sites de Settara.

No. d'échantillon	Minéralogie des poudres %							Minéralogie des argiles (fraction < 2 µm) %			
	Quartz	Argile totale	Microcline	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Gypse	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifié 10-14 Å
	Facteur correctif de chaque minéral										
	(1.00) Cook et al. (1975)	(20.00) Boski et al. (1998)	(4.3) Cook et al. (1975)	(2.80) Cook et al. (1975)	(1.65) Cook et al. (1975)	(1.53) Cook et al. (1975)	(0.40) Cook et al. (1975)	(0.70) Fagel et al. 2007	(1.00) Fagel et al. 2007	(0.25) Fagel et al. 2007	(0.40) Fagel et al. 2007
Settara 1											
S01	42	35	4	2	16	1	-	32	2	0	1
S02	50	36	-	6	7	1	-	35	1	-	0
S03	25	40	-	1	33	1	-	37	2	-	1
S04	25	39	-	2	33	1	-	35	3	0	1
S05	58	33	4	3	1	1	-	26	5	-	2
Settara 2											
ST1	49	28	4	4	12	2	1	20	5	3	-
ST2	43	31	7	2	14	2	1	23	5	3	-
ST3	42	36	2	3	16	1	-	26	6	4	-
ST4	41	29	10	3	15	2	0	21	5	3	-
ST5	62	16	7	4	10	1	-	12	3	1	-
ST6	31	57	3	3	5	1	-	42	9	6	-

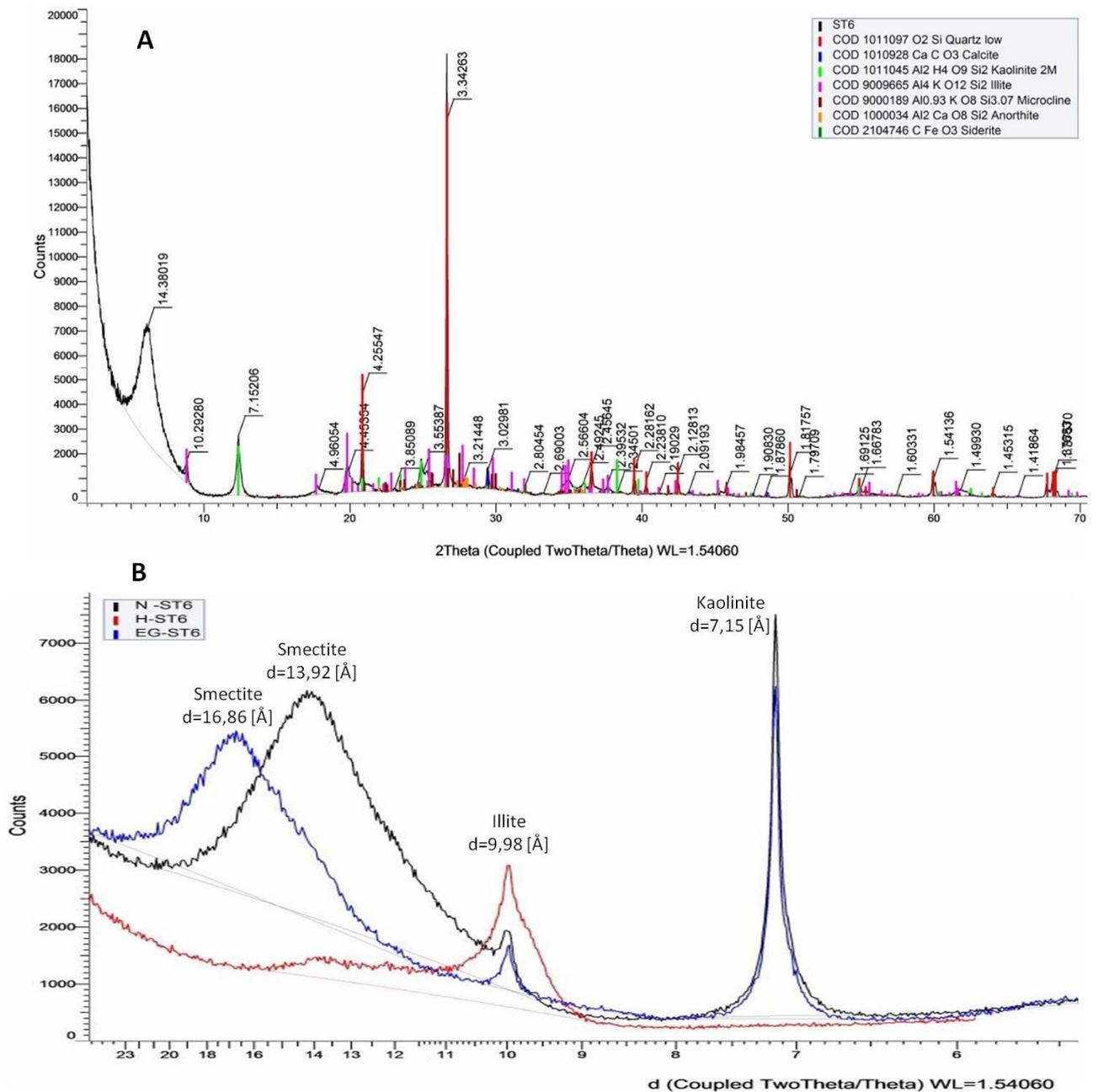


Figure 55: Spectres de diffraction de rayon X : (A) Poudre totale de l'échantillon ST06 ; (B) fraction argileuse échantillon ST06 avec (N) échantillon non traité ; (EG) traité avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.

IV.4.2. Composition chimique

Les compositions chimiques et les pertes au feu des échantillons argileux issus du site 1 et du site 2 de Settara sont présentées dans le tableau 21. Les oxydes les plus abondants dans les échantillons des deux sites sont SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO est en moindre mesure MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 et P_2O_5 . Les teneurs en SiO_2 varient entre (44.87–66.06%) avec une moyenne de 54.95%, caractérisant des échantillons riche en SiO_2 (> 50.0%) plus particulièrement le deuxième site.

Les valeurs faibles en Al_2O_3 (9.92–17.27%) donnant des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ supérieurs à 2.39 avec un maximum de 6.66 mettant en relief la forte contribution du quartz et permettent de classer ces matériaux parmi les produits silico-argileux.

L'oxyde de fer, Fe_2O_3 , présente des teneurs comprises entre (4.69–7.68%) avec une moyenne de 6.23%. cette teneur en fer relativement élevée donnera lieu à une couleur rougeâtre après cuisson (Abajo, 2000). De ce fait, ces matériaux peuvent donc servir de matière première pour la fabrication des briques et tuiles de couleur rougeâtre, orange ou jaunâtre.

Tableau 21: Résultats des analyses chimiques des matériaux argileux des sites de Settara.

N° Echan	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cr ₂ O ₃	BaO	SrO	LOI 1000	Rapport SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Site 1																
S01	52.57	17.98	6.27	5.86	2.09	1.74	0.46	0.88	0.05	0.27	0.08	0.02	0.02	0.02	11.12	2.92
S02	56.97	20.39	4.77	3.13	1.44	1.48	0.50	1.03	0.01	0.20	0.06	0.02	0.01	0.02	9.66	2.79
S03	45.34	18.34	7.04	9.78	2.10	1.45	0.12	0.78	0.07	0.16	0.30	0.02	0.01	0.03	14.88	2.47
S04	44.87	18.80	7.68	8.39	2.03	1.49	0.07	0.80	0.07	0.17	0.71	0.02	0.01	0.04	15.04	2.39
S05	62.52	16.48	6.57	0.97	1.70	1.98	0.31	0.87	0.08	0.17	0.05	0.02	0.04	0.01	8.25	3.79
Site 2																
ST01	54.97	12.01	5.55	7.24	2.05	1.55	0.21	0.68	0.09	0.23	-	-	-	-	14.31	4.58
ST02	55.33	12.66	5.92	6.89	1.80	1.57	0.13	0.71	0.09	0.24	-	-	-	-	14.17	4.37
ST03	56.22	12.80	5.83	6.66	1.74	1.60	0.18	0.72	0.09	0.24	-	-	-	-	14.09	4.39
ST04	55.16	12.95	6.67	6.43	1.83	1.59	0.17	0.72	0.12	0.24	-	-	-	-	14.02	4.26
ST05	66.06	9.92	4.69	5.05	1.49	1.52	0.22	0.62	0.04	0.20	-	-	-	-	10.49	6.66
ST06	54.55	17.27	7.50	2.12	2.55	1.73	0.12	0.75	0.12	0.26	-	-	-	-	12.98	3.16

Les teneurs en alcalins ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) et alcalino-terreux ($\text{CaO}+\text{MgO}$) est respectivement de (1.56–2.29%) et (2.67–11.88). Les échantillons riches en K_2O reflètent la présence significative de K-feldspaths et de l'illite. On note aussi que les teneurs en alcalino-terreux (CaO et MgO) sont quantitativement et significativement trop élevés (> 10.0% échantillon S03 et S04), caractérisant des matériaux riche en éléments carbonatés et minéraux argileux de type smectite, susceptibles d'occasionner des porosités et des retraits au séchage dans les produits finis.

La perte au feu liée à la déshydroxylation des minéraux argileux est très comparable au niveau des deux sites et varie entre 8.25 et 15.04 %.

IV.4.3. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR

Les spectres IR des échantillons ST5 et S03 sont données à la figure 56, et les positions des bandes IR correspondantes sont consignées dans le tableau 22.

- les spectres infrarouges (Fig. 56) font apparaître la présence de minéraux argileux comme la kaolinite et l'illite, avec des bandes autour de $\sim 3696\text{ cm}^{-1}$, $\sim 3697\text{ cm}^{-1}$ pour la kaolinite et 3620 cm^{-1} pour l'illite (Faten Hammami, 2015). Le pic à 3421 cm^{-1} (intense et bien résolu) et celui à 1631 cm^{-1} pour l'échantillon S03 correspond à la bande d'absorption de l'eau de constitution [OH] caractéristique des phyllosilicates hydratés (Farmer, 2000 ; Madejova, 2003) avec une intensité plus grande dans l'échantillon S03, ce qui suppose une capacité d'échange anionique plus grande dans ce dernier.
- Le quartz et la calcite sont également présents. Les bandes autour de 1032 cm^{-1} , 798 cm^{-1} , 694 cm^{-1} sont attribuées à la vibration d'élongation de Si-O (Cetinkaya et Yürüm, 2000, Georgakopoulos et al., 2003, Velde, 1978), en particulier, la bande autour de 469 cm^{-1} pour l'échantillon ST5 est attribuée aux vibrations de flexion Si-O-Si.
- les bandes autour de 534 cm^{-1} provient des vibrations Si-O-Al (Al en coordination octaédrique) (Madejova, 2003, Van Jaarsveld et al., 2002).
- pour l'échantillon S03 (Fig. 56b), les bandes de vibration d'élongation C-O autour de 1428 cm^{-1} (intense et bien résolue) indique la présence de la calcite et dont les harmoniques sont observées à 1797 cm^{-1} et 2511 cm^{-1} .
- La présence de bande IR fines à 1384 cm^{-1} pour l'échantillon ST5 (Fig. 56a) est due à l'absorption atmosphérique de CO_2 (Yanagisawa et al. 1995 ; Gillot, 2010).

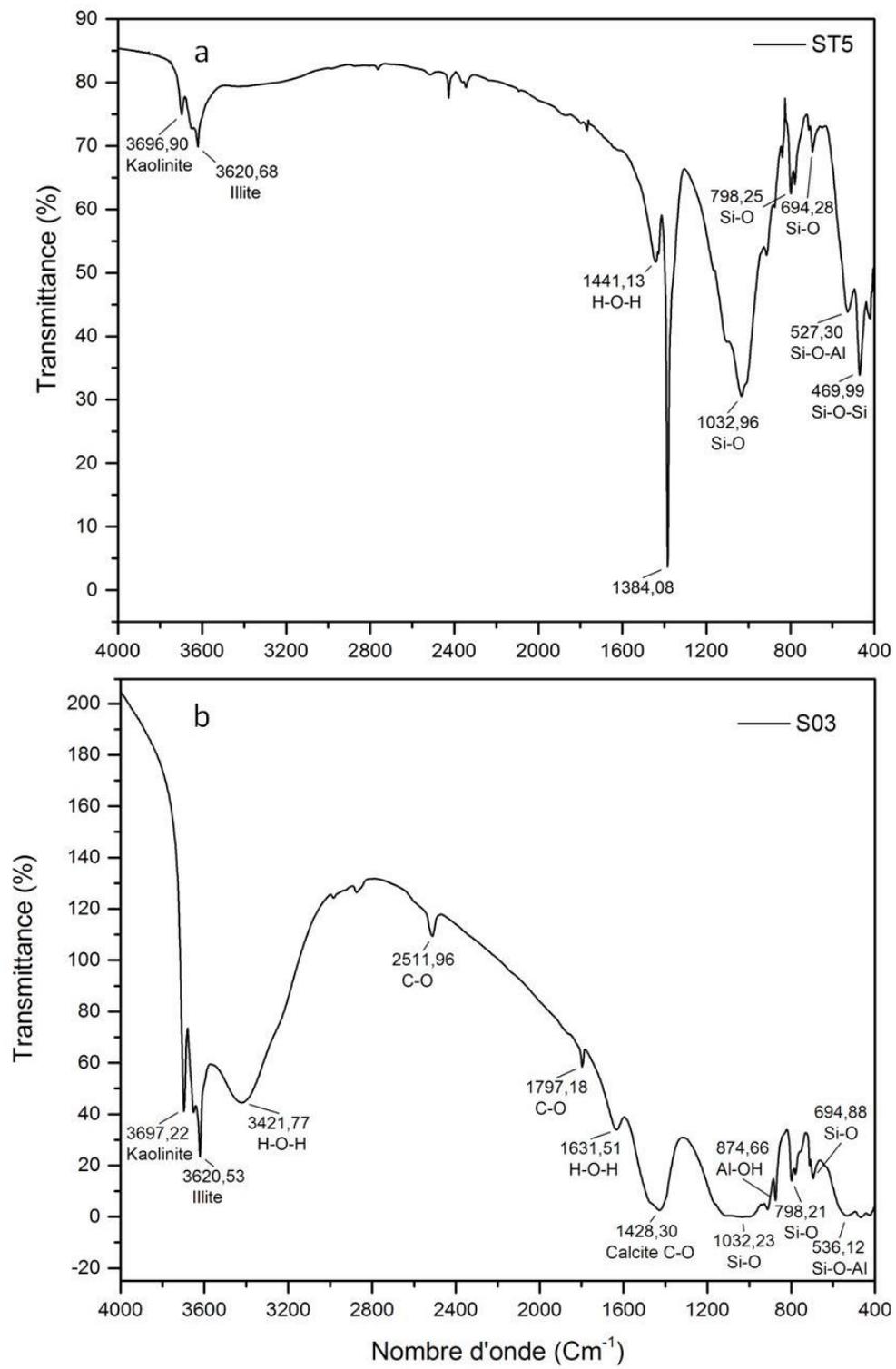


Figure 56: Spectres FT-IR représentatifs de l'échantillon ST5 et S03.

Tableau 22: Positions des bandes IR et groupement fonctionnels correspondants observés pour les échantillons argileux ST5 et S03.

Attribution	Nombre d'ondes (cm ⁻¹)	
	S03	ST5
OH- Hydroxyles cristallins	3697	3696
	3620	3620
H-O-H Eau absorbée	3421	1441
	1631	
C-O (CO ₃ ⁻²)	1428	-
	1797	
	2511	
O-C-O	-	1384
Si-O Quartz	1032	1032
	798	798
	694	694
Si-O-Si	-	469
Si-O-Al ^{VI} déformation	536	527

IV.4.4. Analyse granulométrique

La composition granulométrique des échantillons analysés est présentée dans le Tableau 23 et la Figure 57. Les échantillons analysés montrent une grande variation dans la taille des grains avec une fraction d'argile (< 2 µm) comprise entre 26 et 40% pour le site 1 et 25 et 52% pour le deuxième site d'où l'échantillon ST6 présente la valeur la plus élevée avec 52%. La fraction limoneuse varie de 11 à 44% et la fraction sableuse entre 4 et 54%.

D'après le diagramme de Shepard (1954) les matériaux étudiés sont classés comme « sables argileux » pour les échantillons S02, S03, S04 et S05, et « sables limoneux argileux » pour les autres échantillons (ST1, ST2, ST3, ST4 et S01) avec des proportions de sable, limon et argile relativement proches, à l'exception de l'échantillon ST6 qui est riche en fraction argileuse 52% avec une classification comme « argile limoneuse » d'après le diagramme de Shepard (1954).

Tableau 23: Granulométrie, limites d'atterberg et masse volumique des particules solides des échantillons de Settara.

Propriétés physiques	S01	S02	S03	S04	S05	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6
Distribution des particules solides (%)											
Argile (< 2 µm)	31	34	40	39	26	30	35	38	33	25	52
Limon (2-60 µm)	24	18	17	11	20	28	26	25	37	21	44
Sable (> 60 µm)	45	48	43	50	54	42	39	37	30	54	4
Limites d'atterberg (%)											
Limite de plasticité	21	21	25	21	26	22	26	26	25	23	27
Limite de liquidité	48	49	59	46	44	48	57	60	54	47	65
Indice de plasticité	27	28	34	25	18	26	31	34	29	24	38
Teneur en eau "W"	16.54	15.11	18.34	16.39	15.05	8.76	10.50	9.56	9.32	10.57	8.34
Indice de consistance	1.17	1.21	1.20	1.18	1.61	1.51	1.50	1.51	1.54	1.52	1.49
Valeurs au bleu de méthylène VBS	3.8	4.6	8.3	3.3	2.8	3.5	6.3	7.5	6.8	3.0	10.4
Masse volumique (ρ_s) (t/m³)	2.63	2.64	-	-	2.65	2.63	-	2.62	-	-	2.60

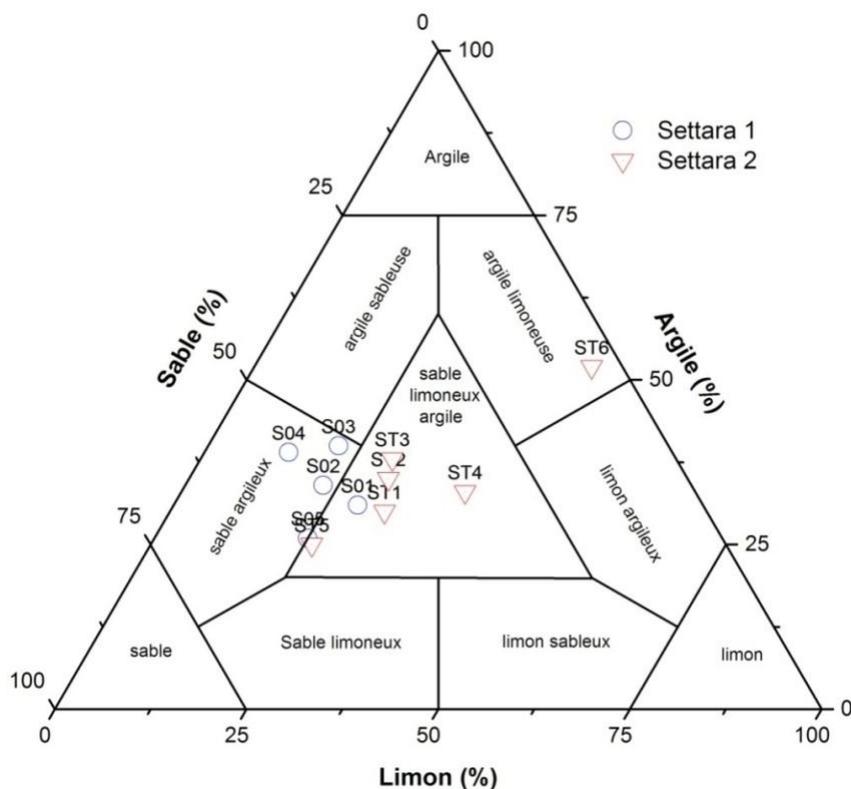


Figure 57: Répartition granulométrique des matériaux argileux des sites de Settara, selon le diagramme ternaire de Shepard (1954).

IV.4.5. Evaluation de la plasticité

Les résultats des limites d'atterberg (WL, WP, IP et IC) obtenus sont présentés dans le Tableau 23 et la figure 58. Les limites de liquidités varient entre 47–65%, tandis que les limites de plasticité sont comprises entre 21–27%. L'indice de plasticité varie de 18–38% avec une valeur moyenne de 29%.

D'après les travaux de Holtz et Kovacs (1981), les cinq échantillons d'argile des deux sites de Settara (ST2, ST3, ST4, ST6 et S03) se placent dans le domaine des argiles illitiques, présentant une plasticité élevée ($> 30\%$), particulièrement l'échantillon ST6 avec un IP de 38%. Les autres échantillons se placent quand a eux dans le domaine d'argiles illitiques avec une plasticité moyenne à modérée (IP $< 30\%$). A l'image de ces résultats et sur la base des valeurs des indices de plasticité trouvés, on constate qu'ils présentent une bonne corrélation par rapport à la valeur du bleu de méthylène (VBS) et du pourcentage de fraction argileuse (Fig. 59).

Les résultats des essais de valeur de bleu de méthylène sont présentés dans le tableau 15. Les valeurs VBS varient de 2.8 à 10.4, la valeur maximum (10.4) est relevée dans l'échantillon ST6, cela est lié à la quantité de la fraction fine ($> 50\%$) et à la présence de minéraux argileux expansifs présentant une surface spécifique élevée (smectite). Les masses volumiques des particules solides (ρ_s) varient entre 2.60 à 2.64 t/m³, compatibles avec les valeurs généralement trouvées dans des argiles riches en kaolinite et illite.

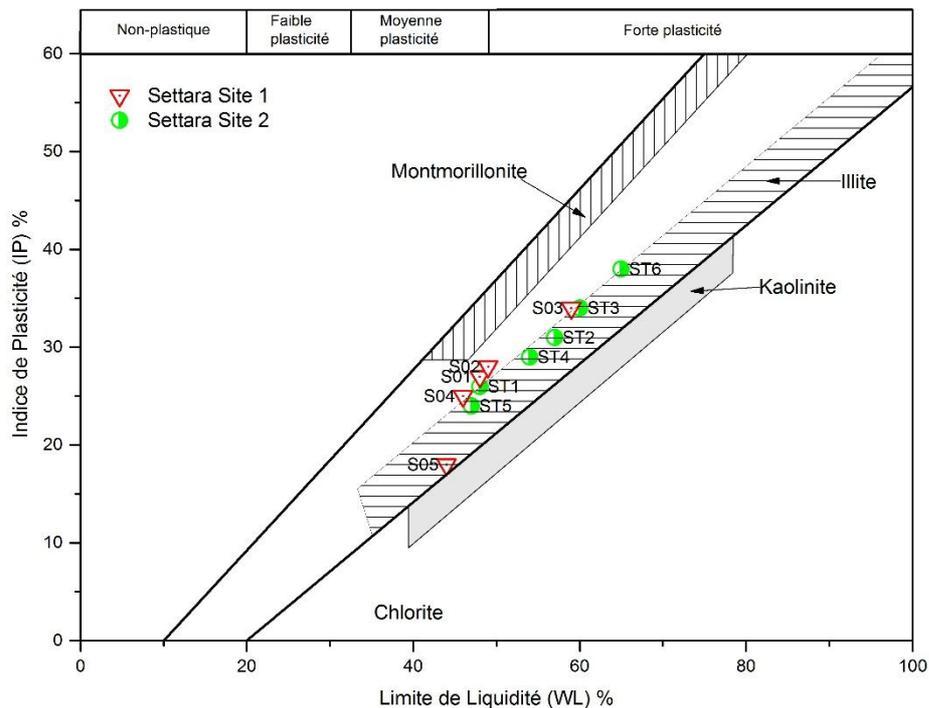


Figure 58: Position des échantillons argileux de Settara sur le diagramme de plasticité (Holtz & Kovacs, 1981).

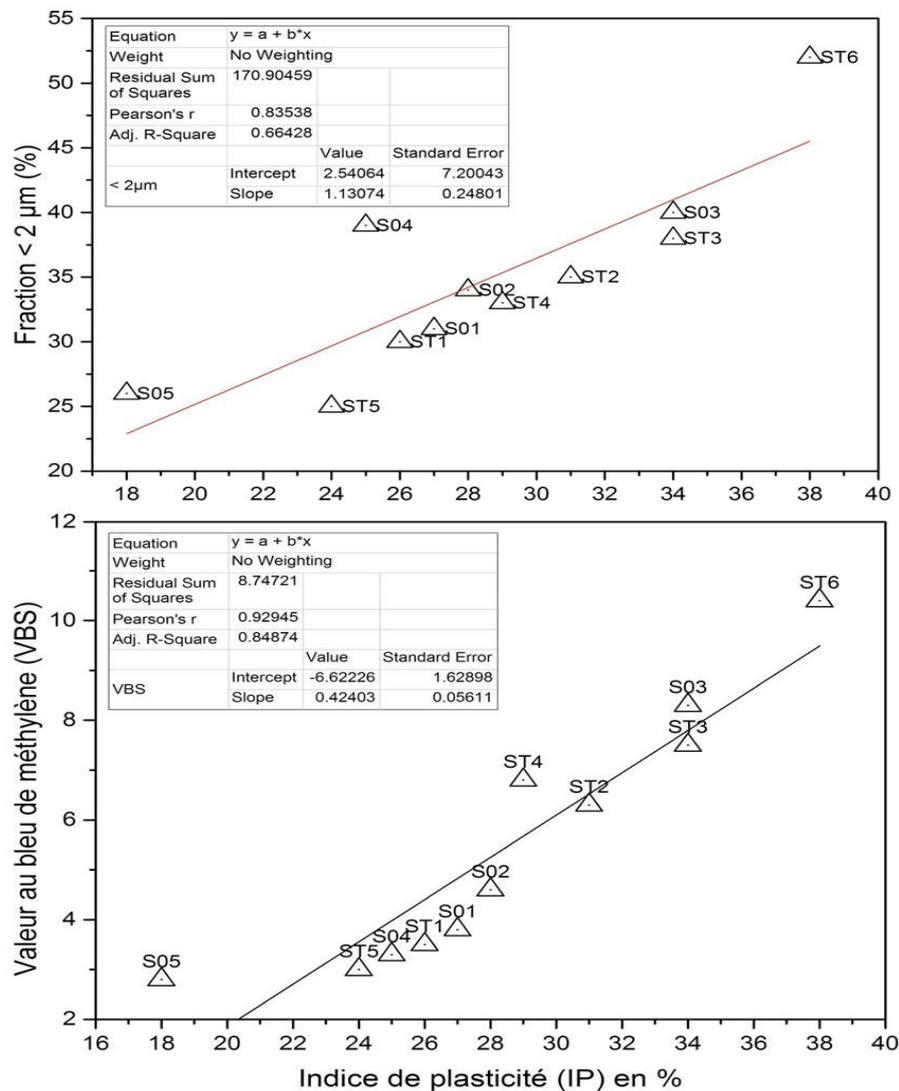


Figure 59: Corrélation de l'indice de plasticité (IP) en fonction de la fraction < à 2µm et de la valeur du bleu de méthylène (VBS) pour les sites 1 et 2 de Settara.

La figure 60 présente un essai d'évaluation de l'extrusion en se basant sur le diagramme de plasticité des matériaux argileux (Marsigli et Dondi, 1997). L'ensemble des matériaux argileux étudiés se place dans la région à extrusion acceptable voir optimale à l'exception de l'échantillon ST6 qui se place en dehors des deux régions.

Les échantillons présentant des valeurs $IP < 35\%$ sont acceptables pour le moulage (extrusion) dans la fabrication de briques et poterie, vu qu'ils présentent une bonne aptitude à être travaillés à l'état plastique. Par contre pour les échantillons très plastiques ($IP > 35\%$) à l'image de l'échantillon ST6, il convient plutôt à la céramique fine comme la poterie et les sanitaires. Néanmoins pour une éventuelle utilisation dans la fabrication de briques et de tuiles pleines ou perforées, ces derniers nécessitent un ajout de dégraissant afin d'atteindre une plasticité adéquate.

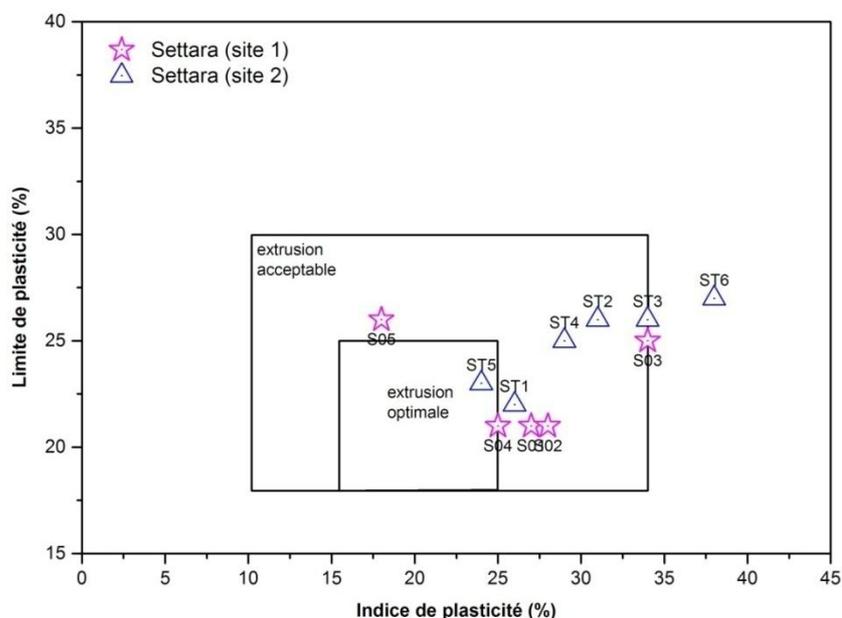


Figure 60: Evaluation de l'extrusion des échantillons de la région de Settara selon le diagramme de Marsigli et Dondi, 1997.

IV.4.6. Examen et analyse des échantillons d'argile de Settara par microscopie électronique à balayage (MEB)

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de l'échantillon ST6 (Fig. 61a, 61b et 61c) a révélé que : la texture de ce sédiment est caractérisée par un arrangement très dense de petites plaquettes d'allures hexagonales moins visible, parfois très ténues attribuées à la kaolinite. La taille des particules et leurs arrangements diffèrent nettement. Il faut noter aussi, que la kaolinite se trouve associée à d'autres minéraux, notamment du quartz (Fig. 61a) et de la smectite. La smectite se présente sous forme de grandes lames à bords retroussés présentant des ondulations bien représentatives (Fig. 61c), et le quartz qui entourent les plaquettes de kaolinite (Fig. 61a).

Pour l'échantillon S02 la kaolinite se présente sous forme de plaquettes très fines regroupées en amas feuilletés de taille inférieure à 5 μm (Fig. 61d et 61f). La distribution de la taille des grains est hétérogène et leur surface paraît régulière. L'illite montre de fines paillettes bien allongées avec des projections en forme de ruban (Fig. 61d). Parmi les impuretés repérées on note la présence du quartz (Fig. 61e)

La kaolinite observée dans les échantillons argileux de Settara (ST6 et S02) et bien caractéristiques d'une kaolinite sédimentaire de faible cristallinité. Les grains de kaolinite semble être au cours du transport se déliter et s'exfolier en donnant des particules isolées qui de plus se réduisent en dimension. Toutefois il faut noter que les kaolins sédimentaires proviennent de

l'érosion de profils d'altération, du transport plus ou moins long des matériaux kaolinitiques, du dépôt et de la compaction plus ou moins grande de ces argiles dans des milieux souvent riches en matière organique.

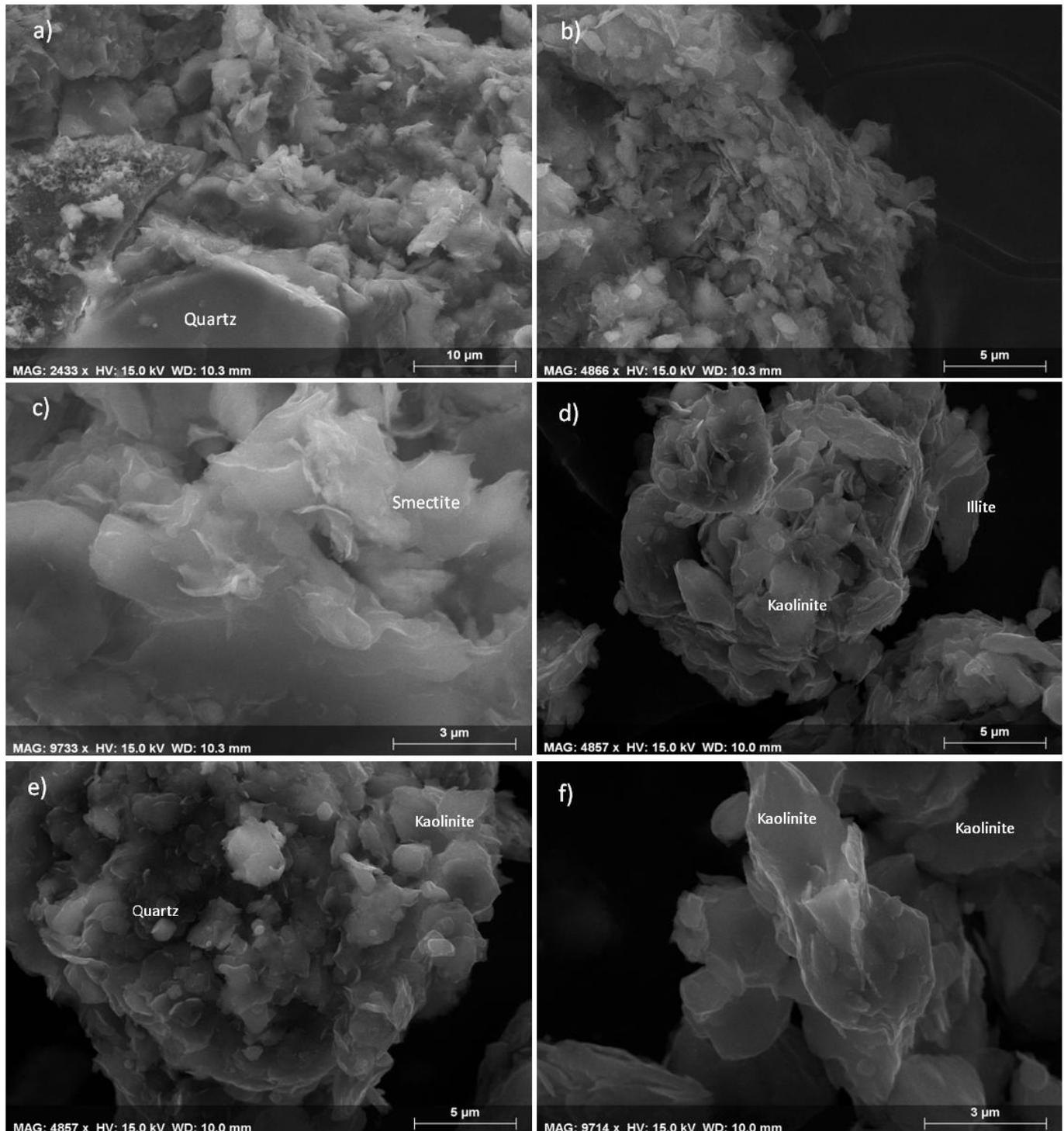


Figure 61: Image MEB des échantillons argileux de Settara ST6 (a, b et c) et S02 (d, e et f).

IV.5. KAOLINS DES SITES DE TAMAZERT (EL-MILIA) ET D'ADJERDA (CHEKFA)

Les kaolins de Tamazert et d'Adjarda sont des gisements primaires où la kaolinite représente le résultat direct de l'altération chimique sans transport ultérieur. Dans le gisement de Tamazert la zone kaolinisée correspond à l'altération de lames d'orthogneiss intercalés dans des schistes. Dans le gisement d'Adjarda, le kaolin provient de l'altération chimique des filons de pegmatites intercalés dans les formations métamorphique du socle Kabyle.

Dans le gisement de Tamazert, deux variétés de kaolin peuvent être distingué, deux échantillons (KT2 et KT3) ont fait l'objet de caractérisation. Ces deux échantillons se différencient par les traitements de valorisation et d'enrichissement qu'ils ont subi. Par contre, les échantillons de kaolin du gisement d'Adjarda non subit aucun traitement, ils sont à l'état naturel (échantillons brut).

IV.5.1. Etude minéralogique par DRX

L'analyse par DRX est effectuée sur des produits de kaolin enrichie (échantillon KT2 et KT3). Les spectres de diffraction des rayons X des deux échantillons de kaolins sont représentés sur la figure 62. La minéralogie totale de kaolin de Tamazert (KT2 et KT3) (Tab. 24) renferme outre les phyllosilicates (minéraux argileux) ayant un pourcentage de (77–80%) comme phase dominante, du quartz (12–13%), du feldspath-K (4-5%) et de faibles teneurs ($\leq 2\%$) de plagioclase, de calcite et de dolomite. La fraction inférieure à $2\mu\text{m}$ présente une forte teneur en kaolinite (69–75%) à laquelle s'ajoute de l'illite (5-8%).

L'existence d'un pic à 7.15 \AA , correspond à une phase minéralogique, constatée sur les diagrammes N et EG et la disparition de ce même pic sur le diagramme H, après chauffage à une température de 500°C , traduit le comportement typique de la kaolinite. Alors qu'il subsiste un fragment de ce pic de très faible intensité sur les deux échantillons KT2 et KT3, attribué en l'occurrence à l'existence de faibles proportions de chlorites alumineuses. Le pic à 9.99 \AA sur le diagramme N, EG et H est le comportement typique de l'illite et de la muscovite. Cependant, la largeur du pic laisse supposer la présence d'illite plutôt que de la muscovite (mica).

D'après les résultats de l'analyse par diffraction X, les compositions minéralogiques des deux échantillons de kaolin de Tamazert (KT2 et KT3) sont approximativement les mêmes. La présence de la kaolinite en forte proportion est décelée dans les deux échantillons avec un taux pratiquement le même.

La figure 63, illustre les diffractogrammes de rayons X (poudre totale et fraction argileuse) des échantillons C01 et C02 d'Adjarda (Chekfa). Contrairement au kaolin de Tamazert, la minéralogie du kaolin provenant du gisement d'Adjarda (Tab. 24), est composée essentiellement de feldspath sodique (albite) et potassique (microcline) avec respectivement (34–39%) et (12–14%), de la muscovite (12–23%) du quartz avec une moyenne de 12%, des minéraux argileux (kaolinite/illite) (15-22%) et à faible concentration ($\leq 2.0\%$) de la calcite et de la dolomite.

Tableau 24: Composition minéralogique des kaolins des gisements de Tamazert (El-Milia) et Adjarda (Chekfa).

No. d'échantillon	Minéralogie des poudres %							Minéralogie des argiles (fraction < 2 μm) %	
	Quartz	Argile totale	Muscovite	Microcline	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Kaolinite	Illite
	Facteur correctif de chaque minéral								
	(1.00)	(20.00)	(6.00)	(4.3)	(2.80)	(1.65)	(1.53)	(0.70)	(1.00)
	Cook et al. (1975)	Boski et al. (1998)	Cook et al. (1975)	Fagel et al. 2007	Fagel et al. 2007				
Kaolin Tamazert									
KT2	13.00	77.00	-	5.00	2.00	2.00	1.00	69.00	8.00
KT3	12.00	80.00	-	4.00	2.00	1.00	1.00	75.00	5.00
Kaolin Adjarda									
C01	12.00	22.00	12.00	12.00	39.00	1.00	2.00	12.00	10.00
C02	12.00	15.00	23.00	14.00	34.00	1.00	1.00	6.00	9.00

Les réflexions basales à 3.24 Å et 3.19Å sont respectivement attribuées aux feldspaths-K (microcline) et plagioclase (albite). La fraction < 2 μm est constituée de kaolinite (6-12%) et de l'illite (9-10%). La réflexion à $d=7.16$ Å et $d=3.58$ Å disparaît après chauffage à 500°C qui confirme la présence de la kaolinite qui se transforme en métakaolinite au-delà de 450°C, on note aussi la persistance d'un fragment de pic de très faible intensité à 7.17 Å qui pourrait être attribué à de la chlorite alumineuses.

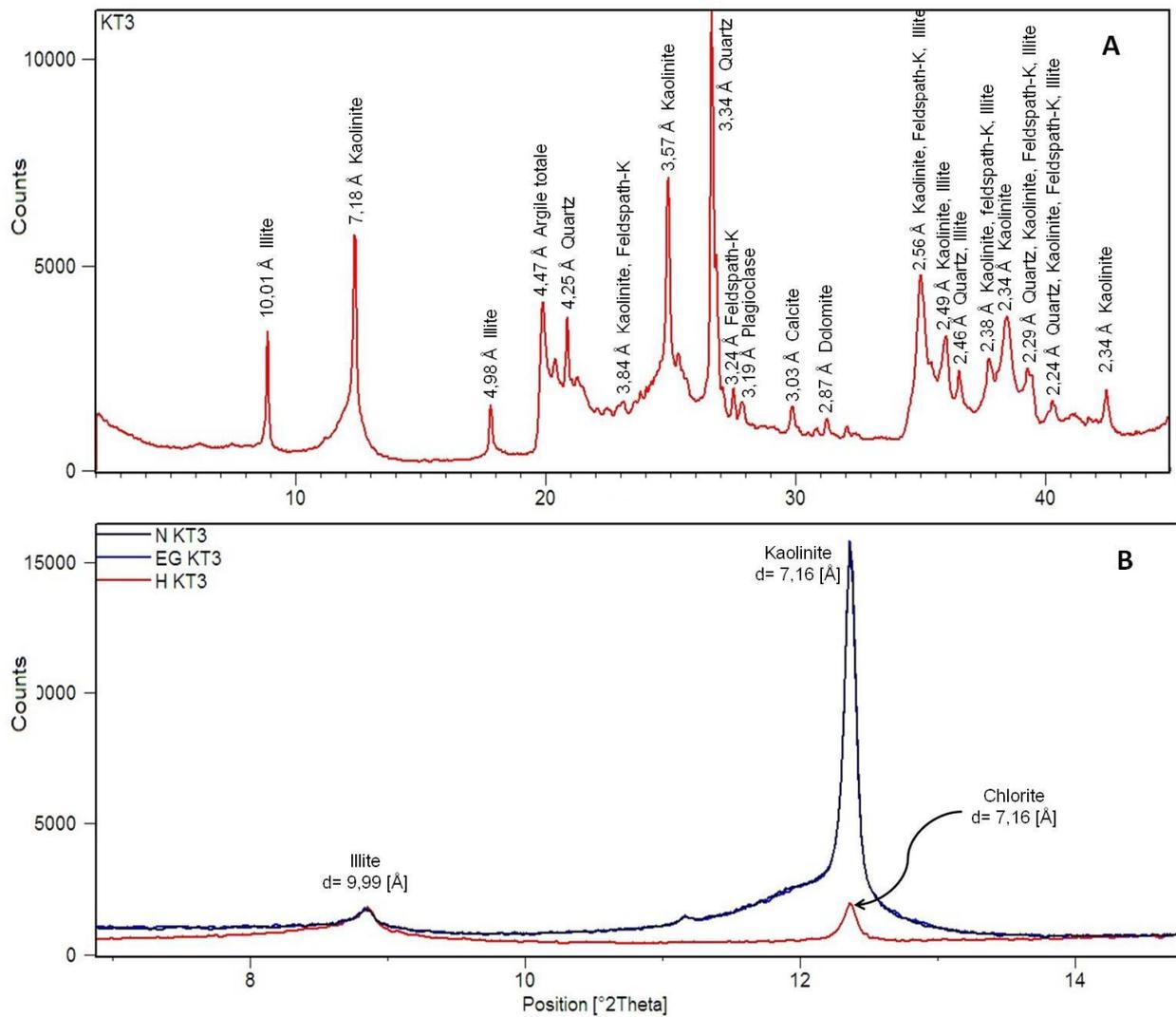


Figure 62: Spectres de diffraction de rayon X de l'échantillon de kaolin KT3 (gisement de Tamazert) : (A) Poudre totale; (B) fraction argileuse avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.

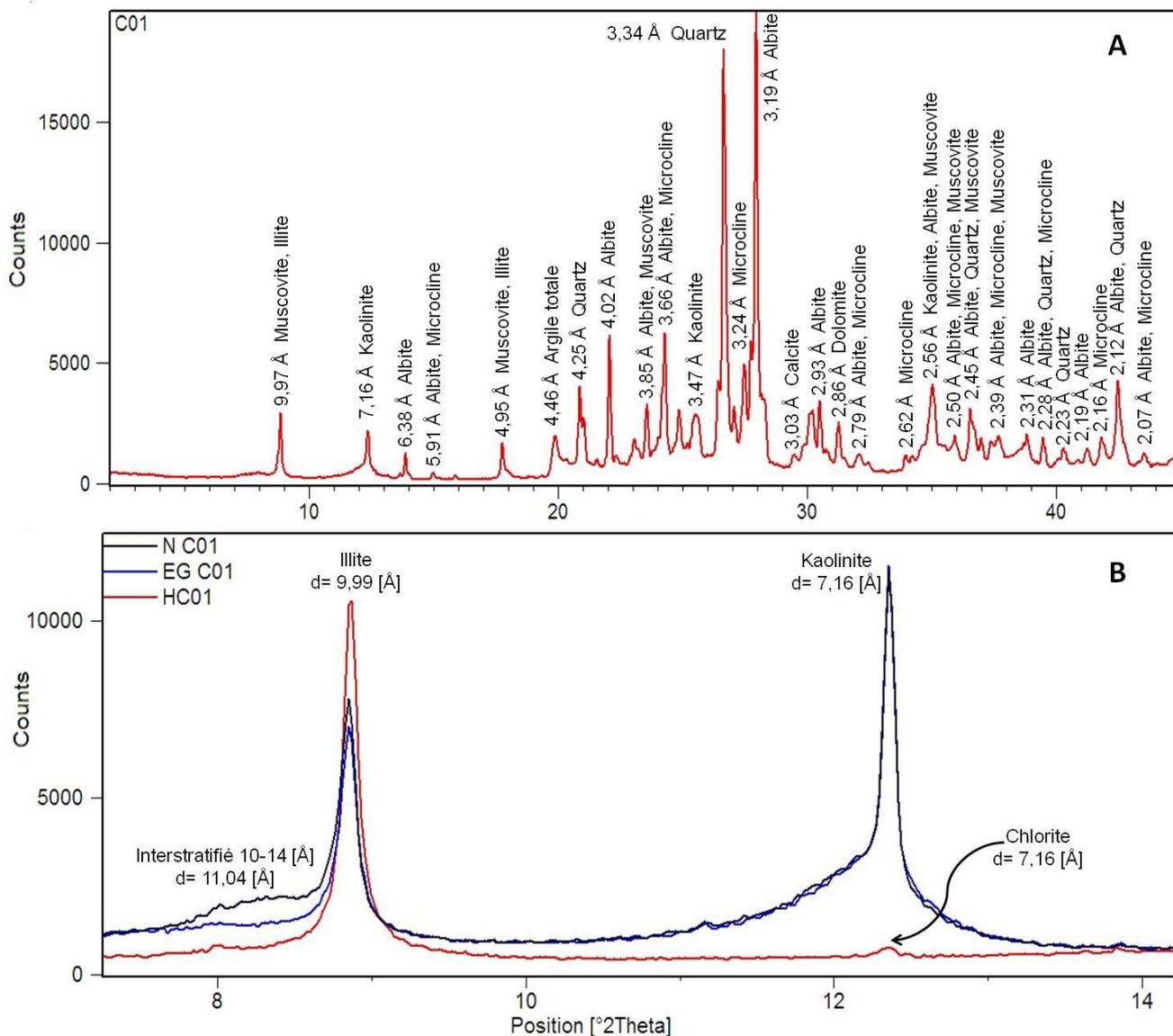


Figure 63 : Spectres de diffraction de rayon X de l'échantillon de kaolin C01 (gisement d'Adjarsa) : (A) Poudre totale; (B) fraction argileuse avec (N) échantillon non traité ; (EG) traitées avec de l'éthylène glycol ; (H) chauffé à 500°C.

IV.5.2. Composition Chimique

L'analyse chimique élémentaire des kaolins de Tamazert et d'Adjarda exprimée en pourcentages pondéraux est présentée dans le tableau 25.

Pour les échantillons de kaolin de Tamazert, les oxydes les plus dominants sont : SiO_2 (49%), Al_2O_3 (32%), Fe_2O_3 (2.87%) et K_2O (2.72%), les autres oxydes (CaO , MgO , Na_2O , TiO_2 et P_2O_5) sont présents mais en faible quantités (< 1.0%). Le rapport massique : $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est égal à 1.51, ce qui est proche de la valeur classique généralement trouvée dans la kaolinite pure ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=1.18$), partiellement liée à la quantité de silice libre (quartz).

Une concentration relativement élevée en Al_2O_3 (32%) étant corrélée à la présence de phases argileuses (kaolinite, illite). Les teneurs en Fe_2O_3 (2.87%) sont acceptable ($< 5.0\%$), cet oxyde agit comme fondant. Il est à l'origine de la couleur brune ou rouge des produits après cuisson. La quantité moyenne de CaO et MgO est égale respectivement à 0.12 et 0.48%, cela indique l'absence de carbonates et des minéraux argileux de type smectite. Les pertes au feu (11.26%) sont légèrement inférieures à celles des kaolinites pures qui avoisinent les 13.96%.

La composition en % en poids du kaolin du gisement d'Adjarda (Chekfa) est comme suit : SiO_2 (65%), Al_2O_3 (21%), K_2O (5%) et Na_2O (4%) sont les oxydes les plus dominants. Les autres oxydes à savoir TiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cr_2O_3 sont présent mais avec des teneurs très faible. Ces minéraux, malgré leurs faibles concentrations, ils sont susceptibles d'engendrer des propriétés rhéologiques et physico-chimiques qui se répercutent directement sur la qualité de la matière première (Merabet et Belkacemi, 2003). Le ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3.15, est largement supérieur à la valeur obtenue pour le kaolin de Tamazert (1.51), qui indique la forte contribution du quartz dans les kaolins d'Adjarda.

Tableau 25: Composition chimique, (en % en poids des oxydes) des kaolins de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa).

N° Echan	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	SO_3	Cr_2O_3	BaO	SrO	LOI 1000	Rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Kaolin Tamazert																
KT2	49.13	32.48	2.82	0.12	0.48	2.83	0.12	0.45	0.01	0.13	0.03	$< 0,01$	0.02	$< 0,01$	11.12	1.51
KT3	49.14	32.79	2.92	0.12	0.48	2.60	0.12	0.47	0.01	0.14	0.04	$< 0,01$	0.01	$< 0,01$	11.40	1.50
Kaolin Adjarda																
C01	64.77	21.06	1.26	0.34	0.27	4.77	4.16	0.08	0.01	0.10	0.01	$< 0,01$	0.02	0.02	3.18	3.08
C02	65.58	20.34	1.32	0.33	0.25	4.89	4.01	0.08	0.01	0.11	0.01	$< 0,01$	0.01	0.01	3.28	3.22

Le taux d'alcalins ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) est de 8.92% est fortement élevée dans les échantillons de kaolin d'Adjarda par rapport à ceux de Tamazert (2.84%), ceci indiquerait la présence de minéraux micacés dans ces matériaux (Famer, 1974), éventuellement la muscovite détectée par la DRX. La teneur en Fe_2O_3 est relativement faible (1.29%) par apport à celle de Tamazert (2.87%), mais reste comprise dans les limites admissibles que doivent présenter une argile destinée à l'industrie céramique ($< 5.0\%$).

IV.5.3. Minéralogie par spectroscopie infrarouge FT-IR

Les analyses par spectrométrie IR permettent d'identifier les différentes liaisons chimiques appartenant à la kaolinite et aux autres minéraux. Les spectres infrarouges sont divisés en 2 zones principales. La première zone correspond aux bandes de fréquences élevées situées entre 3700 - 3400 cm^{-1} , la seconde correspond aux fréquences plus faibles situées dans la zone des 1500 - 400 cm^{-1} . Les grandes fréquences concernent vibrations des hydroxyles O-H, en revanche les bandes des petites fréquences (partie à droite) concernent les liaisons Al-OH, Si-O, Si-O-Si et Si-O-Al.

Après observation des spectres des échantillons KT2 et KT3 (Tamazert) et C02 (Adjarda), figures 64, la position des différentes bandes IR (liaisons chimiques) sont comparées à celle de Gadsen (1975) et une identification des échantillons est résumée dans le tableau 26.

- D'après la figure 64 qui illustre les spectres IR des échantillons de kaolin (KT2, KT3 et C02), les spectres typiques de kaolin montrent quatre bandes, à 3697, 3669, 3645 et 3620 cm^{-1} , et deux de ces bandes caractéristiques sont observées dans les échantillons de kaolin étudiés comme mentionné dans le tableau 26. Les caractéristiques générales des bandes d'absorption d'élongation OH sont bien reconnues pour le kaolin (Farmer, 1974).
- Les vibrations de valence des groupes OH se traduisent par la présence de bandes observées à environ 3620 cm^{-1} est attribuée aux hydroxyles internes (illite) et la bande observée autour de 3698 cm^{-1} est généralement attribuées aux vibrations des hydroxyles externes (kaolinite).
- Les bandes d'absorption observées à 3451 cm^{-1} pour l'échantillon KT2 et 1635 cm^{-1} , 1434 cm^{-1} , 1436 cm^{-1} respectivement pour les échantillons KT2, KT3 et C02 sont attribuées à l'OH de la molécule d'hydroxyle ce qui est observé dans presque tous les silicates hydratés naturels.
- Les bandes élongations des Si-O caractéristiques du quartz sont observées à $\sim 1043 \text{ cm}^{-1}$, $\sim 796 \text{ cm}^{-1}$ et $\sim 695 \text{ cm}^{-1}$. La bande à 909 cm^{-1} , $\sim 912 \text{ cm}^{-1}$ et $\sim 914 \text{ cm}^{-1}$ correspond aux vibrations de flexion Al-OH de la kaolinite.
- La bande à $\sim 909 \text{ cm}^{-1}$ et 3698 cm^{-1} correspond à la liaison Al-OH de vibration de flexion de la kaolinite. La bande à 3698 cm^{-1} bien caractéristiques de la kaolinite, ce pic apparaît habituellement dans une kaolinite pure bien cristallisée (Farmer, 1974, Van der Marel et Eutelspacher, 1976, Kodama, 1985, Farmer, 2000).

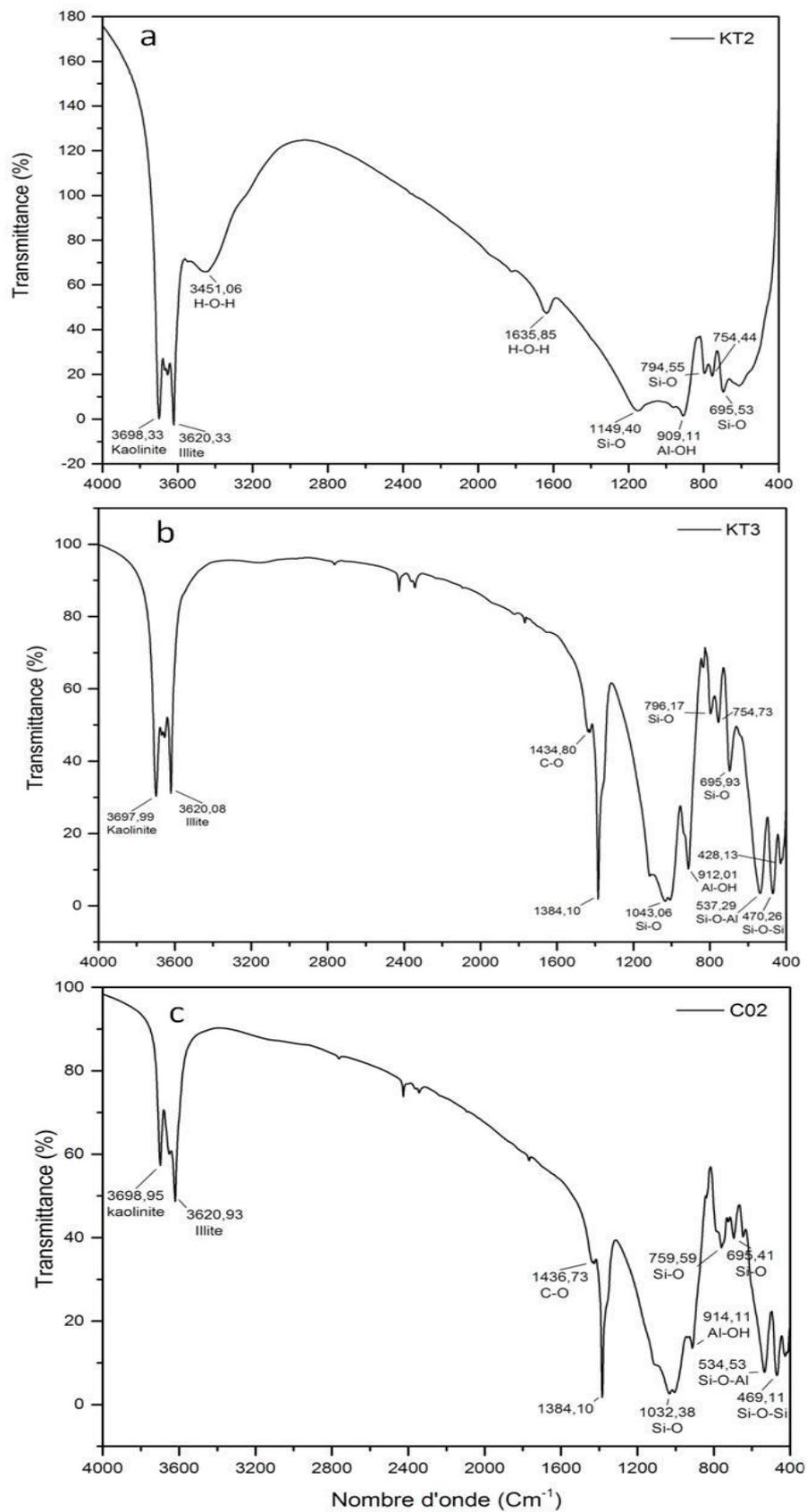


Figure 64: Spectres FT-IR représentatifs des échantillons de Kaolin KT2, KT3 (Tamazert) et C02 (Adjarda).

- D’après Russel et Fraser, les deux bandes d’intensité faible et pratiquement égale, situées à $\sim 798 \text{ cm}^{-1}$ et près de $\sim 750 \text{ cm}^{-1}$ observées pour les trois échantillons indiquent la présence de la kaolinite.
- Le spectre IR des échantillons KT3 et C02 (Fig. 64b et 64c), montre deux bandes de vibration d’élongation C-O autour respectivement de 1436 cm^{-1} et 1435 cm^{-1} (très faible), caractéristiques de la présence de la calcite. La présence de bandes IR fines à 1384 cm^{-1} (KT3 et C02) sont due à l’absorption atmosphérique de CO_2 (Yanagisawa et al. 1995 ; Gillot, 2010).

Tableau 26: Positions des bandes IR et groupement fonctionnels correspondants observés pour les kaolins étudiés (KT2, KT3 et C02).

Attribution	Nombre d’ondes (cm^{-1})		
	KT2	KT3	C02
OH-	3698	3697	3698
Hydroxyles cristallins	3620	3620	3620
H-O-H	3451		
Eau absorbée	1635		
C-O (CO_3^{-2})	-	1434	1436
O-C-O	-	1384	1384
Al-OH	909	912	914
Si-O	1149	1043	1032
Quartz	794	796	759
	695	695	695
Si-O-Si	-	470	469
Si-O-Al ^{VI} déformation	608	537	534

IV.5.4. Analyse granulométrique

Les résultats d’analyse granulométrique présentés dans le tableau 27, a montré que le kaolin de Tamazert après traitement se démarque par une richesse en fraction argileuse avec une teneur moyenne de 58%. La fraction limoneuse avec une moyenne de 39% reste comme même appréciable, alors que la fraction sableuse présente une moyenne de 3% qui indique, l’efficacité du traitement d’enrichissement.

Pour le kaolin d’Adjarda (échantillon non traité), la fraction limoneuse est la plus dominante avec une moyenne de 48%. La fraction argileuse présente une teneur relativement faible avec 17% en moyenne, alors que la fraction sableuse est plus ou moins abondante avec 36% en moyenne.

Tableau 27: Granulométrie, limites d'atterberg, valeur du bleu de méthylène et masse volumique des particules solides des échantillons de kaolins des gisements de Tamazert et d'Adjarda.

Propriétés physiques	Tamazert (El-Milia)		Adjerd (Chekfa)	
	Echantillons traités		Echantillons non traités (brut)	
	KT2	KT3	C01	C02
Distribution des particules solides (%)				
Argile (< 2 µm)	55	61	18	15
Limon (2-60 µm)	41	37	50	45
Sable (> 60 µm)	4	2	32	40
Limites d'atterberg (%)				
Limite de plasticité	30	33	24	25
Limite de liquidité	50	57	36	39
Indice de plasticité	20	24	12	14
Teneur en eau "W"	-	-	16.45	18.20
Indice de consistance	-	-	1.65	1.64
Valeurs au bleu de méthylène VBS	2.57	-	1.68	-
Masse volumique (ρ_s) (t/m³)	2.37	-	2.60	-

D'après le diagramme ternaire de Shepard (1954), le kaolin de Tamazert s'apparente à des argiles limoneuses riches en fraction fines, et d'argile limoneuse riche en fraction sableuse pour le kaolin d'Adjarda (Fig. 65), cette différence provient du fait que le kaolin de Tamazert a subi un traitement (enrichissement) et celui d'Adjarda se présente à l'état brut. A partir de ces résultats, il faut noter qu'une teneur élevée en fraction argileuse fines peut engendrer des problèmes de retrait et de fissures des produits pendant le séchage et après cuisson.

La capacité d'adsorption des échantillons de kaolin a été évaluée par l'essai de valeur de bleu de méthylène (VBS), les résultats sont présentés dans le tableau 27. L'échantillon de kaolin KT2 de Tamazert présente un VBS de 2.57, caractérisant un matériau argilo-limoneux de plasticité moyenne, alors que pour l'échantillon C01 d'Adjarda, la valeur de VBS, trouvée est de 1.68, ce qui caractérise un matériau sablo-argileux peu plastique.

Les masses volumiques des particules solides (ρ_s) est respectivement de 2.37 t/m³ et 2.60 t/m³ pour l'échantillon KT2 de Tamazert et l'échantillon C01 d'Adjarda.

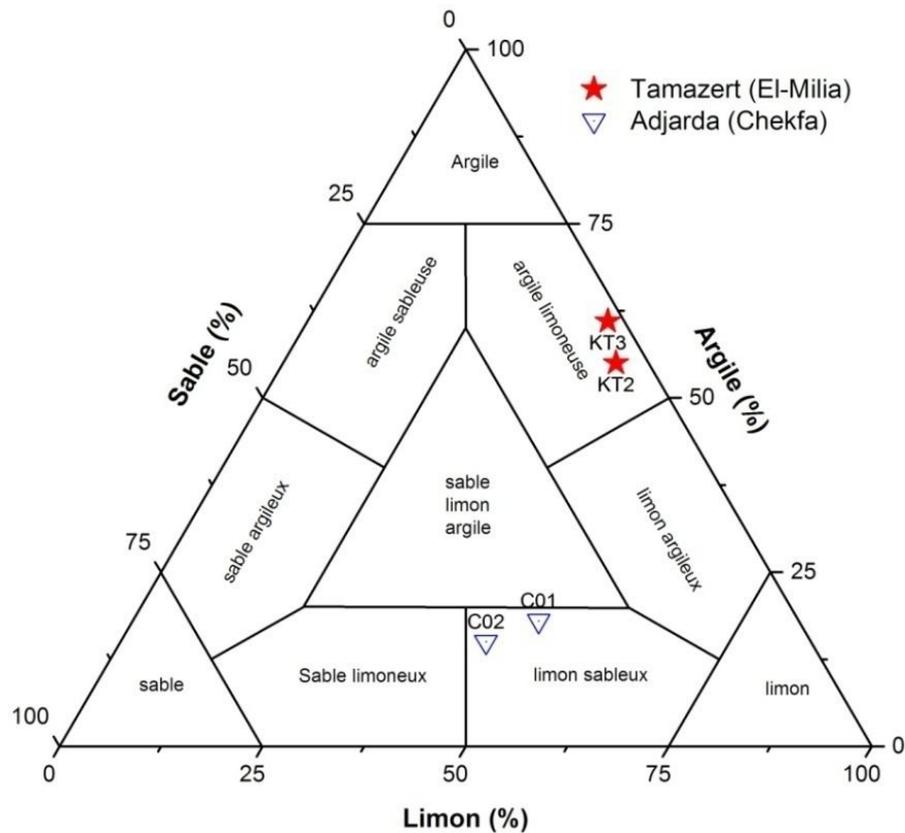


Figure 65: Répartition granulométrique des échantillons de kaolin de Tamazert et Adjarda selon le diagramme ternaire de Shepard (1954).

IV.5.5. Evaluation de la plasticité

L'aptitude des kaolins pour les produits céramiques a été évaluée en déterminant les limites d'Atterberg (Tab. 27). On peut observer que ces matériaux présentent une plasticité faible à moyenne avec un indice de plasticité moyen de 23% pour les échantillons issus du gisement de Tamazert et 13% pour ceux d'Adjarda. Les valeurs de limite de liquidité pour l'ensemble des échantillons varient $36\% < WL < 57\%$, ce qui est en accord avec la gamme définie dans la littérature (30–60%) pour les kaolins destinés à l'industrie céramique (Baccour et al., 2008).

La projection des données WL et IP sur le diagramme de Holtz et Kovacs, (1981), (Fig. 66) démontre que les échantillons de kaolin de Tamazert sont moyennement plastiques à très plastiques et se placent dans la zone de la kaolinite, alors que ceux d'Adjarda présentent une plasticité faible à moyenne.

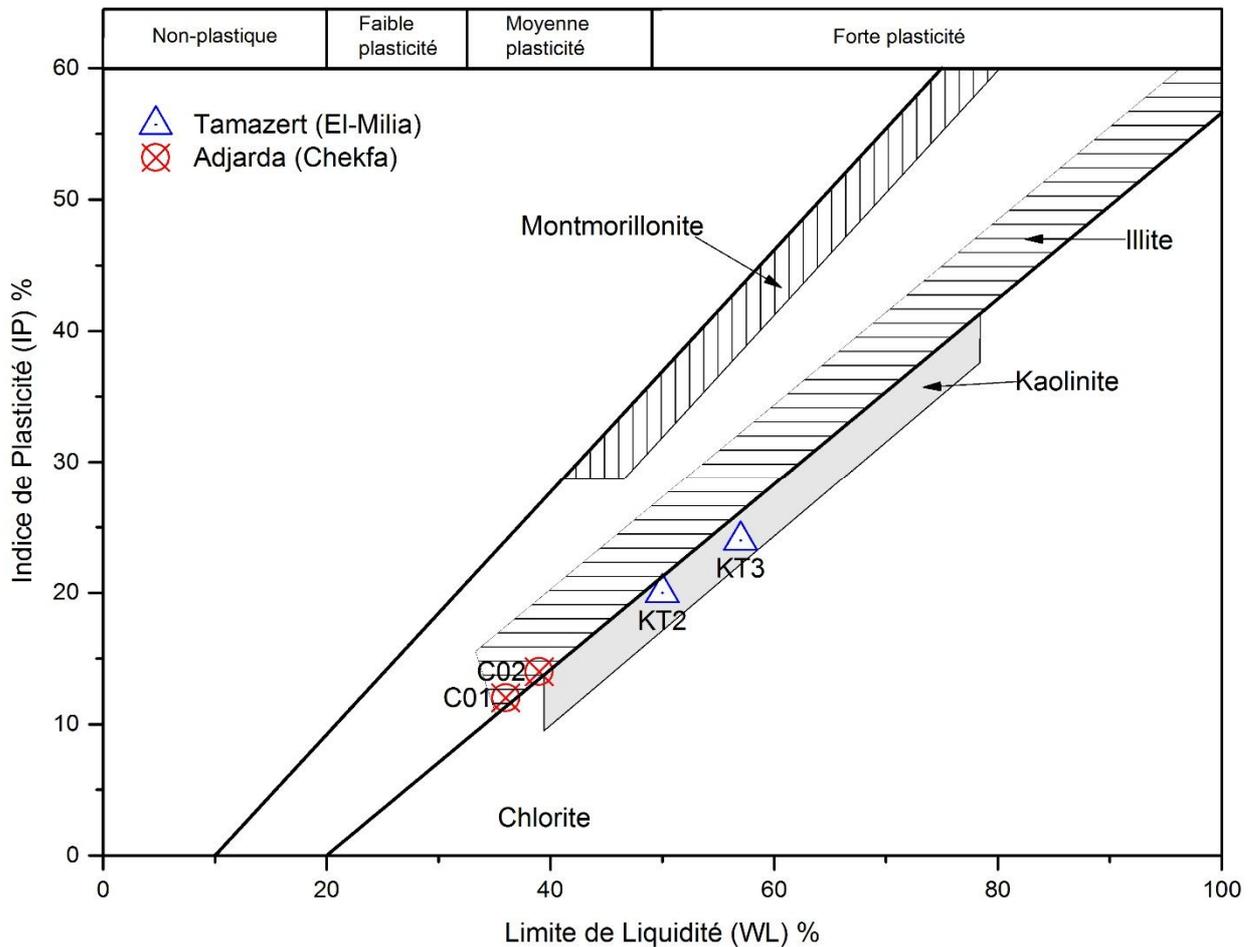


Figure 66: Position des échantillons de Kaolin (KT2, KT3, C01 et C02) de Tamazert et Adjarda dans le diagramme de plasticité (d'après Holtz et Kovacs, 1981).

L'évaluation de l'aptitude des matériaux de kaolin pour l'extrusion, faite sur la base de la plasticité d'après Marsigli et Dondi, (1997) est présentée sur la figure 67. Les matériaux aptes à l'extrusion doivent présenter des valeurs $IP > 10\%$ (Abajo, 2000).

Le résultat de la Fig. 67 révèle que le kaolin du gisement d'Adjarda se place dans la zone d'extrusion acceptable, c'est-à-dire présente une bonne aptitude à l'extrusion. L'échantillon de kaolin KT2 de Tamazert, quant à lui, il se place à la limite de la zone d'extrusion acceptable, par contre l'échantillon KT3 est situé à l'extérieur des zones d'extrusion acceptables et optimales qui suggèrent que ce matériau peut présenter des difficultés, voir des problèmes lors de l'extrusion vu sa plasticité élevée, d'où une aptitude à l'utilisation dans la poterie traditionnelle.

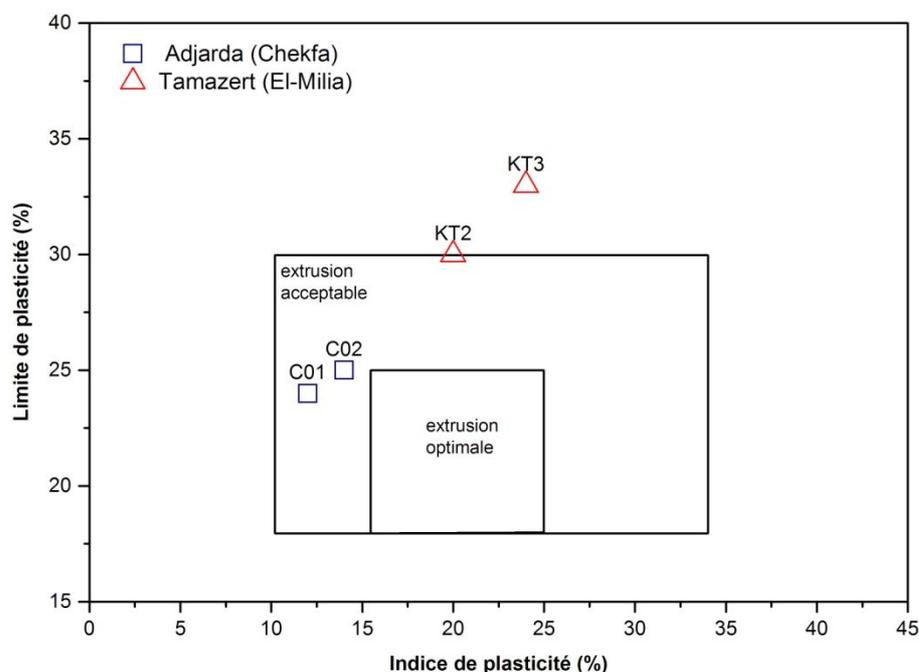


Figure 67: Evaluation de l'extrusion à partir des limites d'atterberg (Marsigli et Dondi, 1997).

IV.5.6. Observation et analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage a été utilisée afin d'analyser la forme et la taille des différents constituants et plus encore leurs composition chimiques. L'examen de poudres métallisées au carbone, d'échantillons bruts ou broyés de kaolin KT3 (Tamazert) et C01 (Adjarda) a été réalisé au microscope électronique à balayage (PHILIPS), couplé à l'EDX. Les images obtenues sont données à la figure 68.

Dans le kaolin de Tamazert (échantillon KT3) nous remarquons que les plaquettes de kaolinite sont de forme pseudo hexagonale (Fig. 68). La forme feuilletée de ces plaquettes de kaolinite, regroupées en amas sont de taille inférieure à 10 μm (entre 6 et 8 μm). La surface des plaquettes n'est pas régulière, il y'a des distorsions notables, ce qui donne une morphologie d'une kaolinite moyennement à mal cristallisée, en raison de la présence d'impuretés (Amigo et al. 1994). En outre nous remarquons des grains de quartz qui entourent les plaquettes de kaolinite.

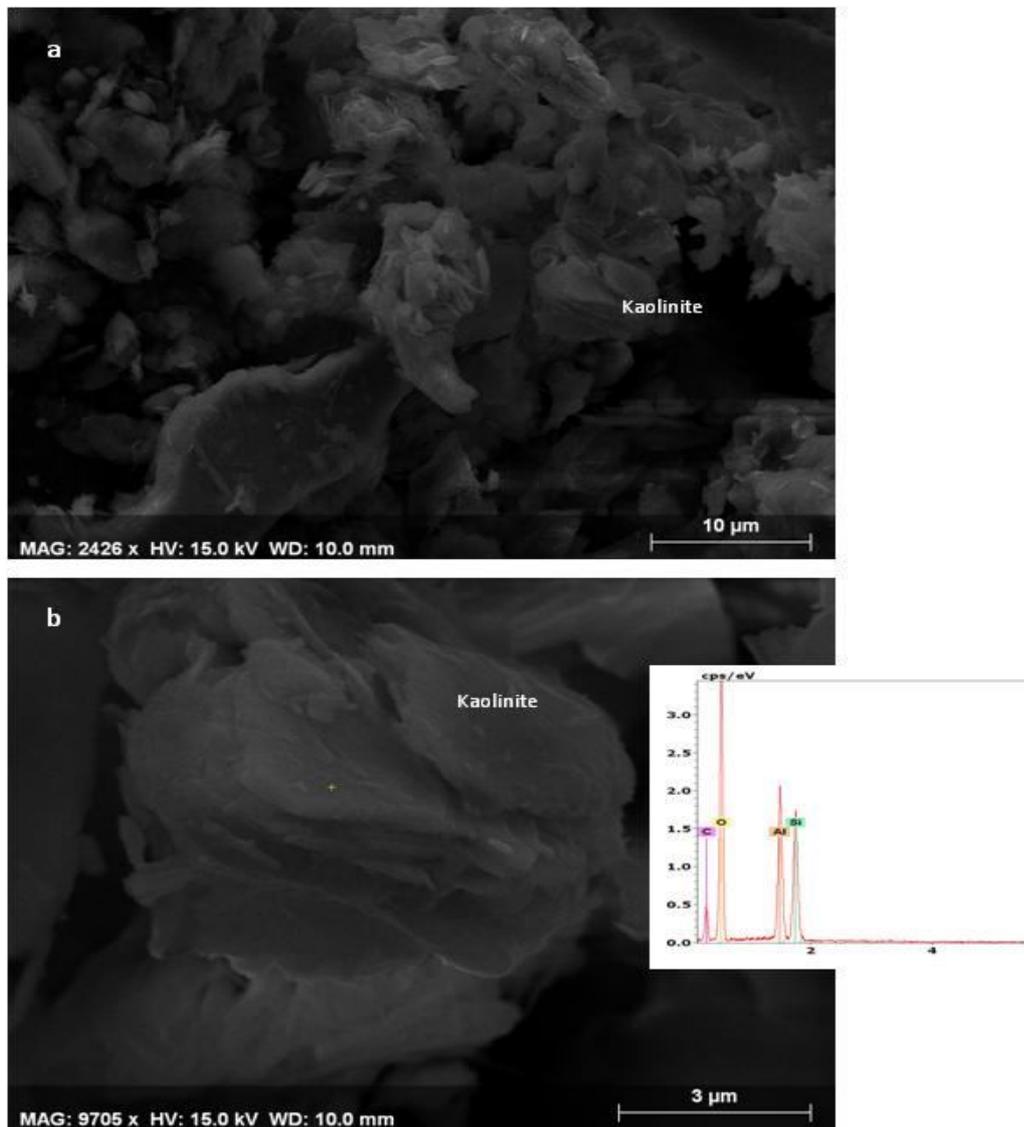


Figure 68: Morphologie d'une kaolinite contenue dans l'échantillon de kaolin KT3 (Tamazert).

La figure 69a et 69b montre des grains de kaolinite contenus dans l'échantillon de kaolin C01 d'Adjarda relativement déchiquetées d'une forme plane parfois circulaire souvent très irrégulière si l'on compare avec une kaolinite bien cristallisée. Par ailleurs, on note la présence de petits feuillets superposés les uns sur les autres, parfois posés sur les grains de kaolinite, attribués à des micas. La présence de micas laisse penser que le kaolin d'Adjarda est issu de l'altération d'un granite à muscovite (pegmatite).

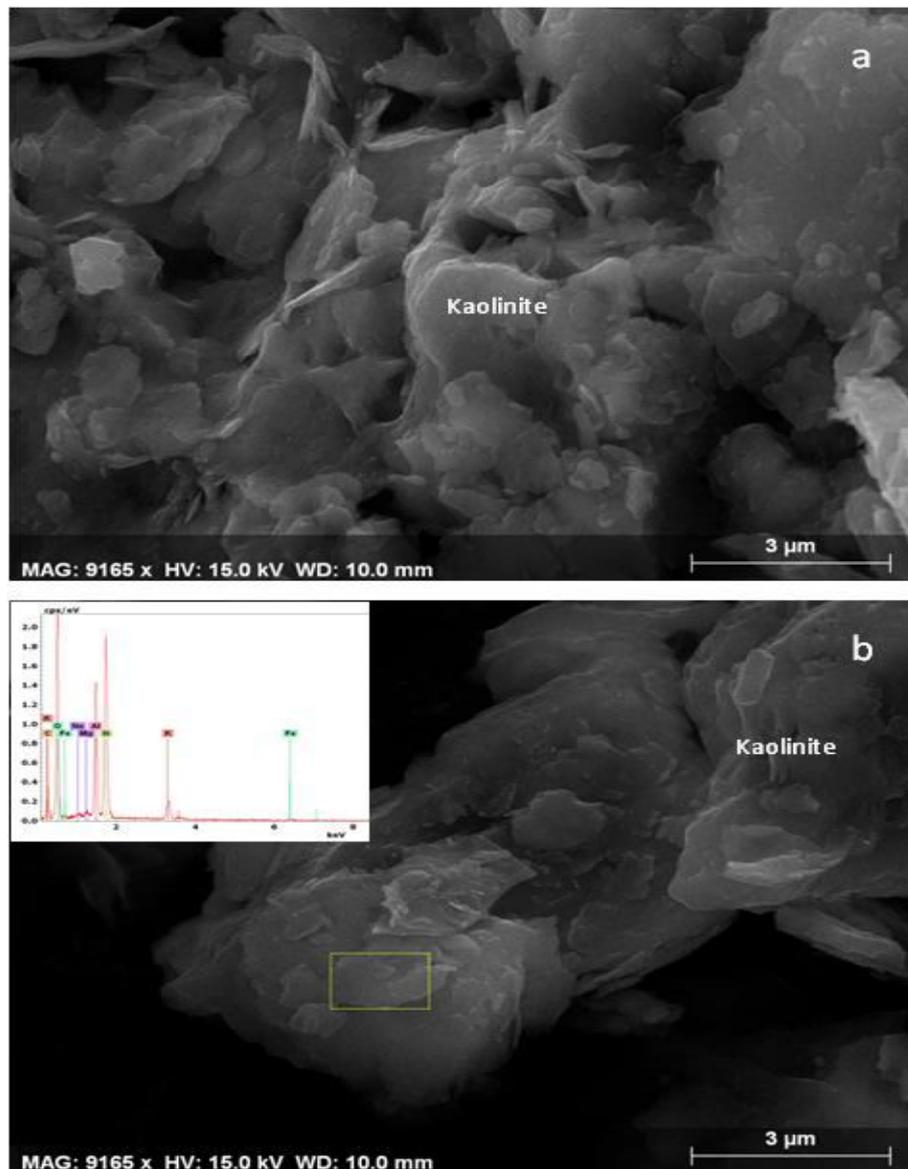


Figure 69: La morphologie d'une kaolinite contenue dans l'échantillon de kaolin C01 d'Adjarda (Chekfa).

IV.6. Conclusion

Les résultats d'analyses minéralogiques, géochimiques et géotechniques des matériaux argileux provenant de différentes régions de la wilaya de Jijel montrent les caractéristiques suivantes :

- Les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel, présentent des assemblages minéralogiques pratiquement homogènes avec une prédominance du quartz (28–50%), de la calcite (25–40%) et de la fraction argileuse (18-44%). Cette dernière est constituée principalement de la kaolinite (8–22%) et de l'illite (3–16%) et en faible teneur de la chlorite, de la vermiculite et des interstratifiés (10–14 Å). Ces matériaux présentent une fraction argileuse fine, moyennement

plastique à plastique dont les oxydes prédominants sont SiO_2 (42–53%), Al_2O_3 (12–19%), Fe_2O_3 (5–8%) et CaO (2–17%).

- Les matériaux argileux de la région de Settara, sont composés essentiellement de quartz (25–62%), de calcite (1–33%), d'une fraction argileuse (16–57%) et Feldspath-K (3–10%) avec des traces de dolomite et de gypse (< 2%). La kaolinite (12–42%) est fortement dominante avec de l'illite (1–9%), et en moindre mesure de smectite (< 6%) et des interstratifiés (10-14 Å). Les oxydes les plus dominants sont : SiO_2 (44–66%), Al_2O_3 (9–20%) et Fe_2O_3 (5–7%). Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dans les différents échantillons est supérieurs à 3.0 (essentiellement au niveau du site2) mettant ainsi, en relief la forte contribution du quartz permet de classer ces matériaux argileux parmi les produits silico-argileux. Ces derniers sont plastiques (IP > 30%) à moyennement plastiques.
- La minéralogie des argiles sous-numidiennes de la région de Djimla-Tamentout (Sud de Jijel) et de Tarzoust (El-Milia) est représentée par des minéraux argileux (42–65%) associés au quartz (33–49%) et au plagioclase (1–4%). Dans ces argiles sous-numidiennes, la kaolinite est le minéral argileux dominant (20–46%), avec des proportions variables d'illite (13–21%), de chlorite (< 2%) et interstratifiés 10–14Å. Les teneurs en silice élevée ($\text{SiO}_2 > 54\%$) et des teneurs en alumine appréciables ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 20\%$), en relation avec la présence de minéraux argileux tels que la kaolinite. ces argiles sont non réfractaires et grésantes. Les teneurs en sesquioxyde de fer (Fe_2O_3) varient de 6–9%. La fraction argileuse est dominante avec 46 % en moyenne, classés comme argile limoneuse sableuse, moyennement plastique à plastique.
- Le kaolin de Tamazert (échantillons traités) est caractérisé par une concentration en minéraux argileux (77–80%) comme phase dominante à laquelle s'ajoutent du quartz (12–13%) et du feldspath-K (4–5%). La fraction argileuse inférieure à 2 μm présente une forte teneur en kaolinite (69–75%) avec de l'illite (5-8%). Contrairement au kaolin de Tamazert, la minéralogie du kaolin d'Adjarda (non traité) est composé essentiellement, de feldspath sodique (albite) et potassique (microcline) avec respectivement (34–39%) et (12–14%), de la muscovite (12–23%) du quartz avec une moyenne de 12%, de minéraux argileux (15–22%) et en faible concentration ($\leq 2.0\%$) de la calcite et de la dolomite. Les oxydes les plus dominants dans le kaolin de Tamazert sont : SiO_2 (49%), Al_2O_3 (32%), Fe_2O_3 (2.87%) et K_2O (2.72%). Les faibles teneurs en CaO et MgO indiquent, l'absence de carbonates et des minéraux argileux de type smectite. Les pertes au feu (11.26%) sont légèrement inférieures à celles des kaolinites pures qui avoisinent les 13.96%. Pour le kaolin d'Adjarda (Chekfa), SiO_2 (65%), Al_2O_3 (21%), K_2O (5%) et Na_2O (4%) sont les oxydes les plus dominants. Le ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3.15 et le taux

d'alcalins (K_2O+Na_2O) de 8.92% pour le kaolin d'Adjarda est nettement élevé qui indique respectivement la forte contribution du quartz et la présence de minéraux micacés (muscovite) dans ces matériaux détectée par DRX.

- Le kaolin de Tamazert est moyennement plastique à plastique, pauvre en fraction sableuse (éliminée par traitement) et riche en fraction argileuse et limoneuse. A l'opposé, le kaolin d'Adjarda est moyennement plastique, riche en fraction sableuse et limoneuse et pauvre en fraction fine argileuse. Cette différence est liée aux différents processus d'enrichissement opérés sur le kaolin de Tamazert. Le kaolin d'Adjarda présente une meilleure aptitude à l'extrusion, contrairement au kaolin de Tamazert.

Compte tenu de la minéralogie, la chimie, la granulométrie et la plasticité, les matériaux argileux étudiés semblent convenir comme matière première potentielle pour l'industrie céramique. Cependant, et en raison de la teneur, relativement élevée des oxydes Fe_2O_3 (> 5%) et CaO (> 12%) dans les matériaux argileux des sites du bassin néogène de Jijel et de Settara, et des argiles sous-numidiennes de Djimla-Tamentout et Tarzoust, ces derniers ne peuvent être utilisés pour la production de céramiques fines, mais pourraient être considérés comme matières premières, appropriées pour les produits de céramique structurelle (tuiles et briques de maçonnerie). Par contre pour le kaolin des gisements de Tamazert et Adjarda, ils sont plutôt appropriés pour la céramique fine (porcelaine, industrie sanitaire, réfractaire, carrelages, synthèse des émaux, produits de charge pour peinture et produits pharmaceutiques...etc).

Sur la base des résultats obtenus dans cette partie, des essais à échelle semi-industrielle voir à l'échelle du laboratoire, appliqués sur ces matériaux argileux doivent être envisagés, afin d'évaluer leurs comportement lors du façonnage, séchage et cuisson, pour une meilleure valorisation comme matière première dans l'industrie céramique locale.

CHAPITRE V. ETUDE DES PROPRIETES CERAMIQUES DES MATERIAUX ARGILEUX

V.1. Introduction

A cause de leurs diverses propriétés physico-chimiques, les argiles ont été utilisées depuis la plus haute antiquité et déjà par nos ancêtres de la préhistoire pour la fabrication des poteries rudimentaires. De nos jours, l'utilisation de ces matériaux connaît un nouvel essor dans de nombreux secteurs industriels, en l'occurrence la céramique et le bâtiment (MURRAY H.H., 2000 ; BARRIOS NEIRA J. et al., 2009).

Bien que la wilaya de Jijel recèle un important potentiel en matériaux argileux, l'exploitation industrielle de ces matériaux n'a connue qu'un début, et cela par manque de caractérisation des propriétés physico-chimiques et minéralogiques de ces matériaux.

A cet effet, les matériaux argileux échantillonnés au niveau des différents sites étudiés, ont subi de test pour la fabrication des produits céramiques sous forme de carreaux expérimentaux cuits jusqu'à 1100°C. Les caractéristiques technologiques et minéralogiques des produits céramiques ainsi élaborés permettent, comme l'ont montré les résultats des travaux de caractérisations physico-chimiques et géotechniques, de justifier l'emploi des substances premières dans l'industrie céramique.

V.2. Fabrication des carreaux céramiques

La fabrication des carreaux céramiques a été réalisée au niveau du laboratoire Argile, Géochimie et Environnement Sédimentaire (AGEs) de Liège (Belgique). Les protocoles expérimentaux en vigueur des différents essais ont été utilisés.

Les produits cuits (carreaux céramiques) ont été fabriqués selon les étapes suivantes :

- la préparation ;
- le façonnage ;
- le séchage ;
- la cuisson.

V.3. Caractéristiques technologiques

V.3.1. Coloration des produits

Les différentes colorations des carreaux céramiques obtenus après cuisson sont regroupées dans le tableau 28. La Figure 70 donne une image des produits après cuisson. A l'issue des opérations de cuisson réalisées sur les carreaux céramiques élaborés à partir des matériaux argileux des sites des bassins néogène de Jijel et Settara, et des argiles sous-numidiennes des régions de Djimla-Tamentout (Sud de Jijel) et Tarzoust (El-Milia), les carreaux obtenus après cuisson montre des couleurs brunes beiges à rouges brique, à l'exception des échantillons T01 et E04 qui tirent beige nacré, à beige foncé. Pour les carreaux céramiques élaborés à partir des kaolins de Tamazert et d'Adjarda les couleurs obtenues sont beiges foncés à un beiges claires.

Cette variation de couleur est liée principalement aux concentrations relatives en fer et en calcium. Pour une teneur en $Fe_2O_3 > 5 \%$ la couleur après cuisson est rouge, couleur de l'hématite (Kornmann, 2005). Les produits après cuisson des différents matériaux argileux étudiés ont des teintures à incidence commerciale positive très importante pour une utilisation dans l'industrie céramique.

On note aussi pour certains échantillons du secteur de Settara, la présence de nodules blancs de sulfate de calcium ($CaSO_4$) à la surface des produits cuits à $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, résultant de la réaction de sulfates avec le CaO.

Tableau 28 : Coloration des produits de cuisson en fonction de la température

Code échantillon	Température de cuisson ($^\circ\text{C}$)			
	800	950	1050	1100
KT3	Beige foncé (7.5YR 8/3)		Beige clair à pale (7.5YR 7/3)	
C02	Beige clair			
D04	Beige brun foncé à clair			Brun beige à rouge brique
D05	Beige brun foncé à clair			Brun beige à rouge brique
M01	Beige brun foncé à clair			Brun beige à rouge brique
T01	Beige nacré, à beige foncé			
E01	Beige nacré à beige plus foncé			Rouge brique
E04	Beige nacré, à beige clair			
ST5	Beige brun clair à foncé			Rouge brique



Figure 70 : Coloration des carreaux céramiques après cuisson à température finale 1100°C.

V.3.2. Retrait linéaire à la cuisson

Le volume apparent d'un corps varie en fonction de la température, soit du fait de dilatations, soit à la suite de retraits consécutifs à des réactions ou des phénomènes rendant le matériau plus compact. Les transformations durant le processus de cuisson peuvent être divisées en deux processus: décomposition carbonatée et transformation de phase. La décomposition et les transformations de phase influencent l'évolution et l'intensité du processus de frittage (Milheiro et al., 2005). Ces transformations sont accompagnées par le retrait et la perte en poids des produits en terre cuite. Le retrait linéaire indique le degré de densification pendant le frittage, et il est très important pour le contrôle dimensionnel des produits céramiques finis.

Les valeurs des retraits à différentes températures de cuisson de 800°C à 1100°C, pour les échantillons étudiés sont présentées dans le tableau 29 et sur la figure 71. Ils montrent clairement une augmentation du retrait lors de l'augmentation de la température de cuisson pour tous les échantillons. Cependant, cette augmentation de retrait est plus importante à des températures de

cuisson plus élevées. Le retrait linéaire se comporte différemment au-dessous et au-dessus de 950°C, ceci est lié aux mécanismes de frittage distincts dans ces gammes de températures. Entre 800 et 950°C, il y'a un léger retrait linéaire (0–4.8%). A cette température, les structures d'argile se décomposent et les phases vitreuses commencent à se former.

Au-dessus de 1050 ° C, les courbes de retrait de cuisson montrent une augmentation du retrait linéaire. En comparant les températures de cuisson de 1050 et 1100 °C, les retraits de cuisson des matériaux argileux issus du site de Settara ST1, ST3, ST6 et S03 sont passés de 7.97 à 12.85 % et 8.27 à 13.73 % et 9.79 à 13.06 % et 3.04 à 6.13 %, respectivement. Cette augmentation du retrait peut s'expliquer par la présence de minéraux expansifs (smectite), d'alcalins, d'oxydes de fer et d'alcalino-terreux (Ramachandran et al., 2008). La présence de quartz dans les échantillons d'argile réduit le rétrécissement, à l'image des échantillons argileux issus des sites de Harratene, EAK et El-Akabi (E01, K01, E02 et H02) avec des valeurs respectivement de 2.59 %, 2.69 %, 3.11 % et 3.71 %. On note aussi, la présence de fissures, observées sur certains produits finis à partir de 1000°C, probablement dues aux teneurs élevés en Carbonates (CaO) et à la présence de minéraux expansifs de type smectite.

Normalement, une brique de bonne qualité présente un retrait total inférieur à 8 % (BIA, 2006), et la plupart des argiles issues du bassin néogène et des sites de Djimla-Tarzoust ont des valeurs de retrait entre (2,59–8,20%) avec une moyenne de 5.31% comprises dans les limites de la production industrielle de briques céramiques. Par contre, une grande partie des matériaux issus du site de Settara présente des valeurs de retrait au-dessus de la limite (> 8,0%) à l'exception des échantillons S02, S03 et S05. La correction par l'ajout d'un dégraissant (sable, feldspath ou autre substance à caractère non hydraulique) peut s'avérer nécessaire. Cette opération exige la réalisation d'essais complémentaires en laboratoire pour déterminer la proportion optimale à introduire dans le mélange.

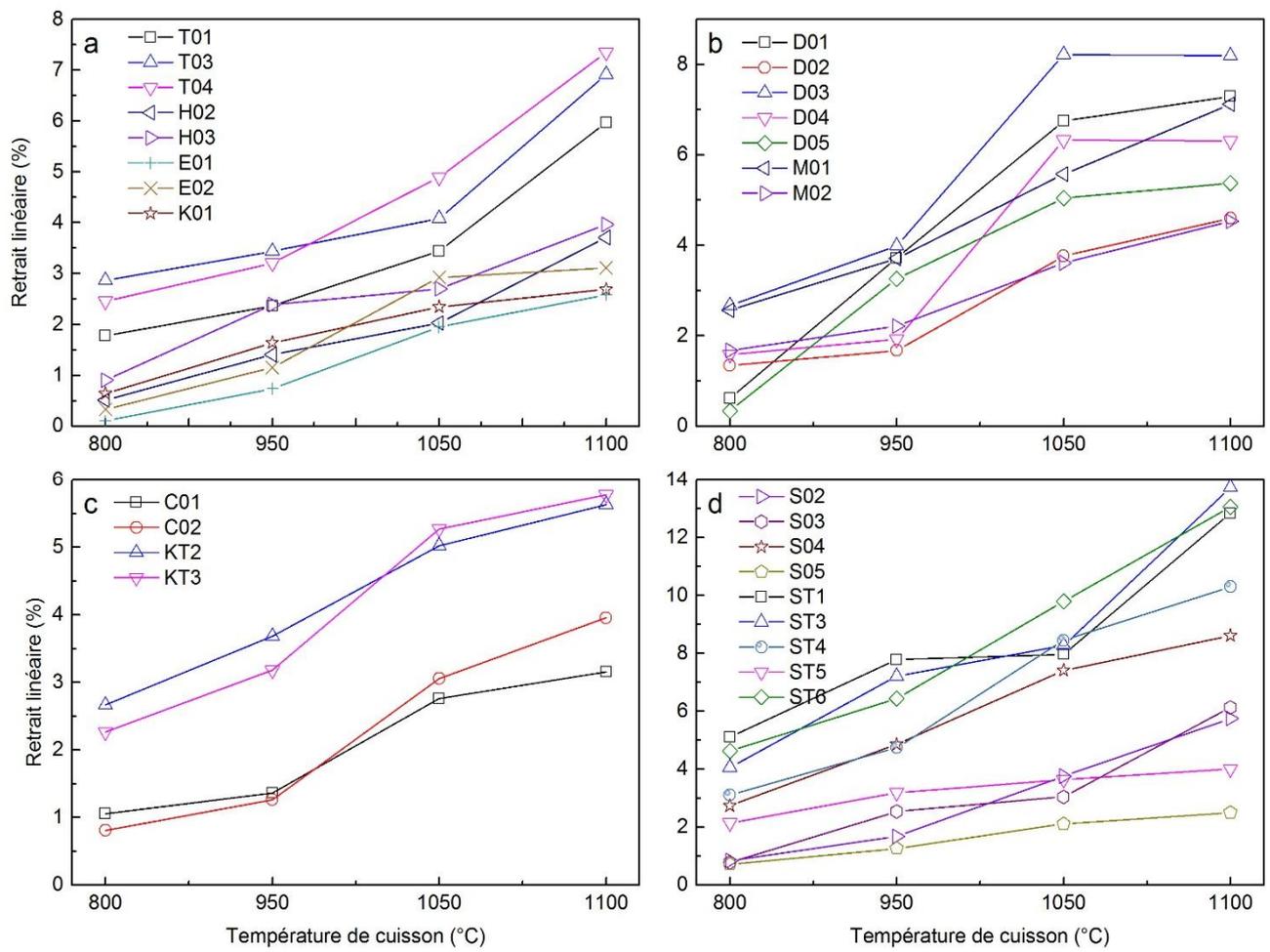


Figure 71 : Variation du retrait linéaire des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson. **a** : site du bassin néogène de Jijel ; **b** : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; **c** : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; **d** : site de Settara.

Pour les kaolins de Tamazert et Adjarda, les retraits maximum sont de l'ordre de 5.78 % et 3.96 % respectivement. On remarque que le retrait du kaolin d'Adjarda (C01, C02) est inférieur à celui du kaolin de Tamazert (KT2, KT3), ceci proviendrait du fait que le kaolin de Tamazert a subi un enrichissement par traitement, et les retraits sont liés essentiellement à la déshydroxylation, par contre les retraits de faibles amplitudes sont liés à la forte teneur en quartz dans le kaolin d'Adjarda. Pour les kaolins utilisables dans la filière de la céramique fine ou dans bien d'autres secteurs industriels exigeant des températures de cuissons plus importantes (par exemple supérieures à 1050°C), le retrait à la cuisson de 3.16 à 5.78% est largement acceptable.

Tableau 29 : Retrait à la cuisson des carreaux céramiques des différents matériaux argileux étudiés.

Site	N° échant	Retrait linéaire à la cuisson en %			
		800°C	950°C	1050°C	1100°C
Bassin néogène de Jijel	T01	1,78	2,36	3,44	5,97
	T03	2,87	3,44	4,08	6,92
	T04	2,46	3,21	4,89	7,35
	H02	0,51	1,41	2,03	3,71
	H03	0,91	2,39	2,70	3,96
	K01	0,64	1,64	2,35	2,69
	E01	0,11	0,74	1,95	2,59
	E02	0,33	0,74	2,93	3,11
Djimla-Tarzoust	D01	0,62	3,72	6,75	7,29
	D02	1,35	1,67	3,76	4,60
	D03	2,67	3,99	8,22	8,20
	D04	1,58	1,92	6,33	6,31
	D05	0,34	3,26	5,04	5,37
	M01	2,56	3,71	5,57	7,12
	M02	1,67	2,21	3,61	4,53
Tamazert- Adjarda	C01	1,05	1,36	2,76	3,16
	C02	0,81	1,26	3,06	3,96
	KT2	2,66	3,68	5,02	5,63
	KT3	2,26	3,18	5,27	5,78
Settara	ST1	5,11	7,79	7,97	12,85
	ST3	4,06	7,21	8,27	13,73
	ST4	3,10	4,74	8,45	10,30
	ST5	2,14	3,19	6,65	8,01
	ST6	4,63	6,44	9,79	13,06
	S02	0,84	1,67	3,76	5,75
	S03	0,78	2,54	3,04	6,13
	S04	2,74	4,86	7,41	8,61
	S05	0,71	1,26	2,11	2,50

V.3.3. Perte en poids à la cuisson

L'augmentation de la température de cuisson entraîne une augmentation de la perte en poids des carreaux céramiques. Il est connu que la perte en poids est liée au développement de la porosité et à la densification dans l'argile cuite au cours du processus de cuisson (Weng et al., 2003). Une perte en poids significative est observée jusqu'à 800°C pour la plupart des échantillons d'argile étudiés.

La variation de la Perte en poids à la cuisson est représentée dans le tableau 30 et figure 72. À 1100°C, il y'a une grande variation dans la perte de masse pendant la cuisson, de 12.74 à 19.77 %,

de 10.54 à 12.70 %, de 5.08 à 12.84 % et de 12.05 à 14.75 % respectivement pour les échantillons du bassin néogène de Jijel et de Settara, et les échantillons d'argile sous-numidiennes de Djimla-Boutias, ainsi que les échantillons de kaolin de Tamazert -Adjarda. Cette forte perte en poids est observée en particulier pour les échantillons du bassin néogène de Jijel (Site de Harratène et d'El-Akabi) K01 (19.77 %), H03 (18.95 %) et H02 (18.83 %) qui est due à l'eau de constitution et à la forte teneur en CaO et FeO, confirmant les données obtenues à partir des analyses chimiques et minéralogiques. Le critère de perte en poids pour une brique d'argile normale est de 15% (AASHTO, 1982), et une grande partie des carreaux céramiques faites pour cette étude répondent au critère de perte de poids.

Certains matériaux argileux, notamment ceux du bassin néogène de Jijel (échantillons T03, T04, H02, H03, K01 et E02) présentent des valeurs de perte en poids au dessus de la norme. Pour remédier à ce problème, il serait utile de mélanger ces matières premières avec d'autres argiles non carbonatées, afin de diluer leur teneur en carbonate et de réduire en conséquence leur perte de poids.

On peut mettre en relation une augmentation du retrait avec une diminution de l'absorption d'eau, et une augmentation de la température de cuisson. Cette tendance apparaît surtout au-dessus de 1000°C. Le retrait est lié à la formation de phases cristallines anhydres à haute température, et les vitesses de retrait sont directement liées au développement du matériau vitreux. La formation de gaz pendant la vitrification peut également avoir un effet significatif sur les dimensions nettes des minéraux argileux cuits. Le plus grand retrait au-dessus de 1000°C est dû à une formation de phase liquide plus significative. Lors de la formation de la phase liquide, la tension superficielle du liquide et la capillarité aident à rapprocher les particules et à réduire la porosité (Nkalih, 2016).

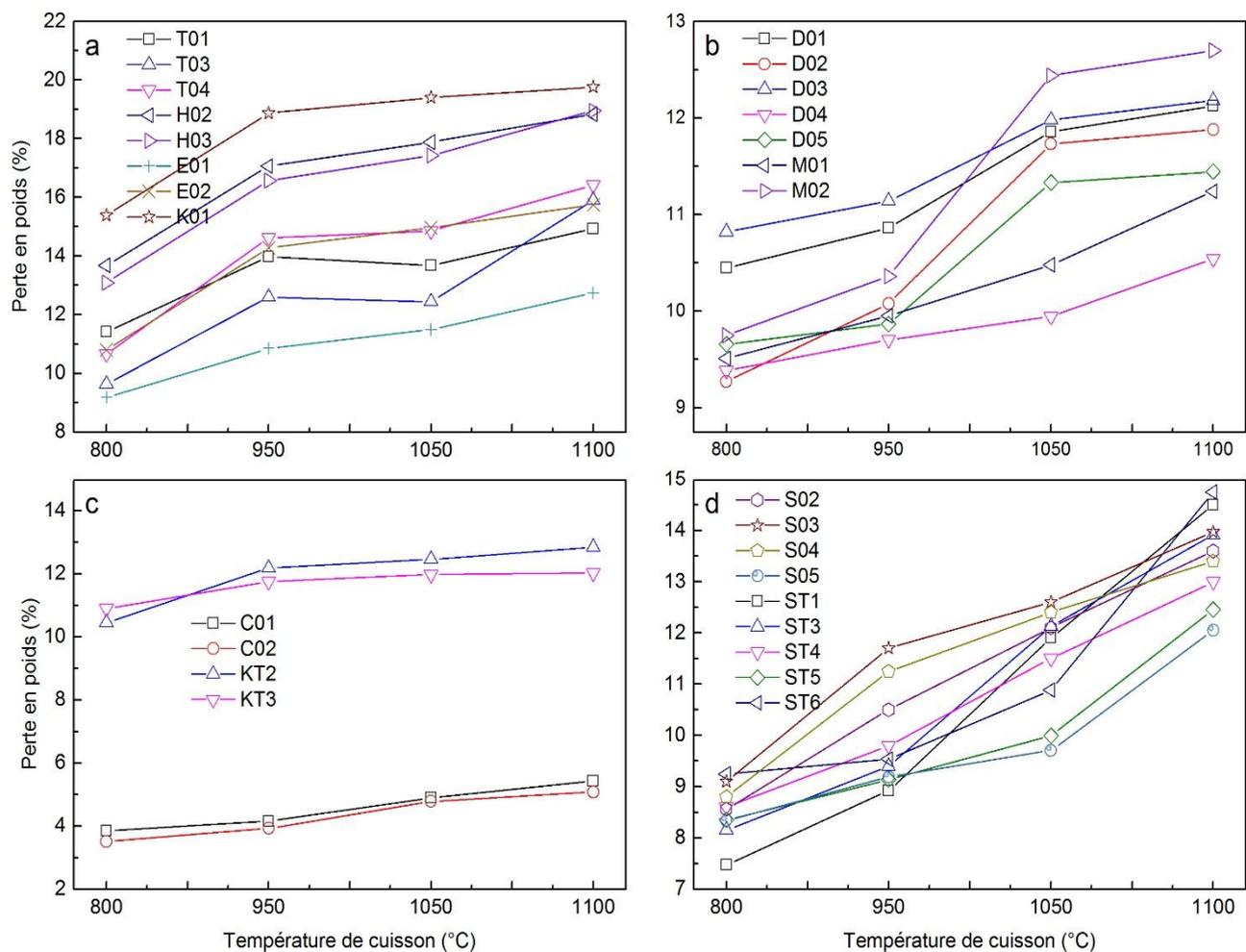


Figure 72 : Perte en poids des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson. **a** : site du bassin néogène de Jijel ; **b** : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; **c** : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; **d** : site de Settara.

Tableau 30 : Perte en poids à la cuisson des carreaux céramiques.

Site	N° échant	Perte en poids à la cuisson en %			
		800°C	950°C	1050°C	1100°C
Bassin néogène de Jijel	T01	11,41	13,98	13,68	14,93
	T03	9,63	12,60	12,44	15,90
	T04	10,66	14,62	14,85	16,42
	H02	13,68	17,06	17,88	18,83
	H03	13,09	16,57	17,43	18,95
	K01	15,38	18,87	19,39	19,77
	E01	9,18	10,85	11,49	12,74
	E02	10,79	14,28	14,97	15,74
Djimla-Tarzoust	D01	10,45	10,86	11,86	12,12
	D02	9,27	10,08	11,73	11,88
	D03	10,82	11,14	11,98	12,18
	D04	9,38	9,71	9,94	10,54
	D05	9,66	9,87	11,33	11,44
	M01	9,51	9,95	10,48	11,24
	M02	9,75	10,36	12,44	12,70
Tamazert- Adjarda	C01	3,85	4,16	4,89	5,43
	C02	3,50	3,92	4,78	5,08
	KT2	10,45	12,18	12,46	12,84
	KT3	10,90	11,75	11,98	12,02
Settara	ST1	7,47	8,92	11,90	14,50
	ST3	8,15	9,40	12,13	13,91
	ST4	8,60	9,80	11,50	13,00
	ST5	8,35	9,14	10,00	12,45
	ST6	9,25	9,54	10,88	14,75
	S02	8,56	10,50	12,10	13,60
	S03	9,10	11,70	12,60	13,97
	S04	8,80	11,25	12,40	13,40
	S05	8,34	9,19	9,71	12,05

V.3.4. Absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau est un facteur important qui affecte la résistance et la durabilité des produits céramiques. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des carreaux contre les agents agressifs extérieurs. L'absorption d'eau par immersion est le résultat de la densification dans le produit cuit et également des mouvements capillaires dans les pores des carreaux qui sont ouverts sur le milieu ambiant. L'absorption d'eau est une image de la porosité. Elle est utilisée comme un des indicateurs importants de la qualité de la brique.

Le tableau 31 et la figure 73 présentent l'évolution de l'absorption d'eau des carreaux confectionnés dans cette étude, en fonction de la température de cuisson. Les résultats indiquent que l'absorption d'eau est fonction de la température. Pour tous les échantillons argileux, étudiés et quelle que soit, la nature du matériau et la température de cuisson, on remarque une nette diminution de l'absorption d'eau, lorsque la température de cuisson augmente. Les valeurs d'absorption d'eau diminuent lorsque la température de cuisson augmente. Une augmentation de la température de frittage provoque une diminution de l'espace total des pores dans la structure (Demir et Orhan, 2003). L'absorption d'eau est liée aux pores ouverts, et liée à la densification.

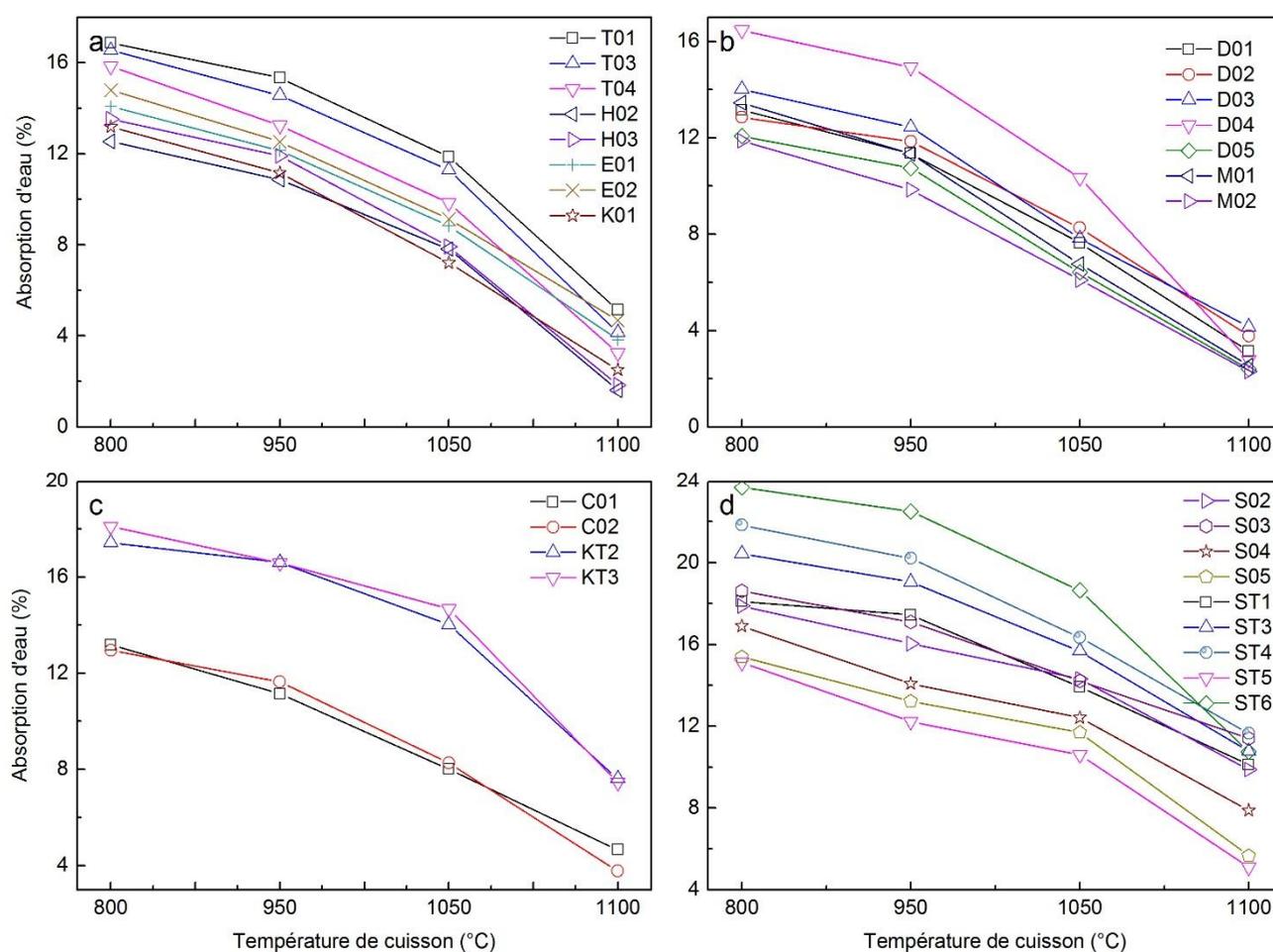


Figure 73 : Résultats d'absorption d'eau des carreaux céramiques étudiés en fonction de la température de cuisson. **a** : échantillon du bassin néogène de Jijel ; **b** : échantillon de site de Djimla-Tamentout et Tarzoust ; **c** : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; **d** : échantillon site de Settara.

Une diminution significative de l'absorption d'eau est observée pour les argiles de Settara (ST5, S04 et S05) à partir de 950 °C (figure 73d). Cette diminution serait liée au frittage et à la formation de la phase vitreuse. A 1100 °C, on observe une diminution remarquable de l'absorption d'eau. À

titre exceptionnel, ST6 et ST4 présentent la plus forte capacité d'absorption d'eau (environ 22 %) avec une diminution respective de 10.75 % et 11.64 %. Les argiles du bassin néogène de Jijel et de Djimla-Tarzoust ont une capacité d'absorption d'eau relativement faible, allant respectivement de 1.62 à 5.15 % et de 2.31 à 4.15 %.

Pour les Kaolins de Tamazert et Adjarda les valeurs d'absorption d'eau sont acceptable, est variant de 3.78 à 7.62 %. Le kaolin de Tamazert présente les valeurs d'absorption les plus élevées avec une variation de 18.10 à 7.46 % (une diminution de 10.64 %) pour l'échantillon KT3. L'échantillon C02 d'Adjarda présente une valeur d'absorption faible de 3.78 % à 1100°C avec une diminution de 9.17 %. Il est à signaler que cet échantillon est riche en SiO₂, cela indique que la quantité de quartz influence la quantité de phase amorphe après frittage (Baccour et al., 2009). Les variations observées dans la capacité d'absorption d'eau sont en partie dues à la variation de la composition chimique. Au-dessus de 1100°C, le comportement de densification de l'argile est influencé par la présence de produits fondant tels que K₂O, Na₂O, Fe₂O₃ et CaO dans les matériaux, ce qui peut contribuer à la vitrification (Iqbal et Lee, 2000 ; Bilgin et al., 2012).

Selon Milheiro et al. (2005), les valeurs acceptables d'absorption d'eau sont inférieures à 25% pour les briques et inférieures à 20 % pour les tuiles. Pour les argiles de la wilaya de Jijel, sur lesquelles à porté notre étude, ils présentent des valeurs acceptables tant pour les briques que pour les tuiles au-dessus de 1100°C.

Tableau 31 : Absorption d'eau des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.

Site	N° échant	Absorption d'eau en %			
		800°C	950°C	1050°C	1100°C
Bassin néogène de Jijel	T01	16,88	15,34	11,86	5,15
	T03	16,55	14,57	11,28	4,15
	T04	15,84	13,25	9,85	3,26
	H02	12,54	10,87	7,81	1,62
	H03	13,52	11,91	7,92	1,84
	K01	13,19	11,16	7,21	2,51
	E01	14,09	12,13	8,84	3,83
	E02	14,80	12,53	9,14	4,68
Djimla-Tarzoust	D01	13,14	11,34	7,64	3,15
	D02	12,85	11,84	8,26	3,78
	D03	14,01	12,44	7,81	4,15
	D04	16,46	14,92	10,34	2,79
	D05	12,06	10,75	6,41	2,41
	M01	13,46	11,32	6,77	2,55
	M02	11,87	9,84	6,10	2,31
Tamazert- Adjarda	C01	13,17	11,15	8,01	4,66
	C02	12,95	11,64	8,26	3,78
	KT2	17,44	16,61	14,02	7,62
	KT3	18,10	16,59	14,67	7,46
Settara	ST1	18,10	17,45	13,92	10,11
	ST3	20,43	19,05	15,67	10,77
	ST4	21,83	20,21	16,34	11,64
	ST5	15,11	12,23	10,60	5,10
	ST6	23,68	22,50	18,64	10,75
	S02	17,87	16,04	14,31	9,87
	S03	18,61	17,10	14,21	11,40
	S04	16,90	14,07	12,41	7,87
	S05	15,38	13,22	11,69	5,66

V.3.5. Masse volumique apparente

La variation de la masse volumique apparente des échantillons étudiés en fonction de la température de cuisson est présentée dans le tableau 32 et figure 74. On constate que l'augmentation de la masse volumique des carreaux est fonction de la température de cuisson. Les valeurs de masses volumiques augmentent lorsque la température de cuisson augmente, elles sont plus significatives au-dessus de 1000°C.

Les masses volumiques les plus élevées sont observées dans les échantillons (M01, D03, C01, C02, D01 et D02) des sites de Djimla-Tarzoust et des kaolins de Tamazert de d'Adjarda, avec des valeurs comprises entre 2.14 et 2.18 g/cm³.

Ce comportement de densification rapide de ces échantillons par rapport aux autres échantillons est probablement induit par leur minéralogie, notamment à l'abondance relative d'impuretés qui a conduit à une formation d'une phase vitreuse qui favorise la densification et réduit la porosité. (Nzeukou Nzeugang et al., 2013). Les autres échantillons présentent des valeurs de masses volumiques qui varient entre 1.97 et 2.10 g/cm³.

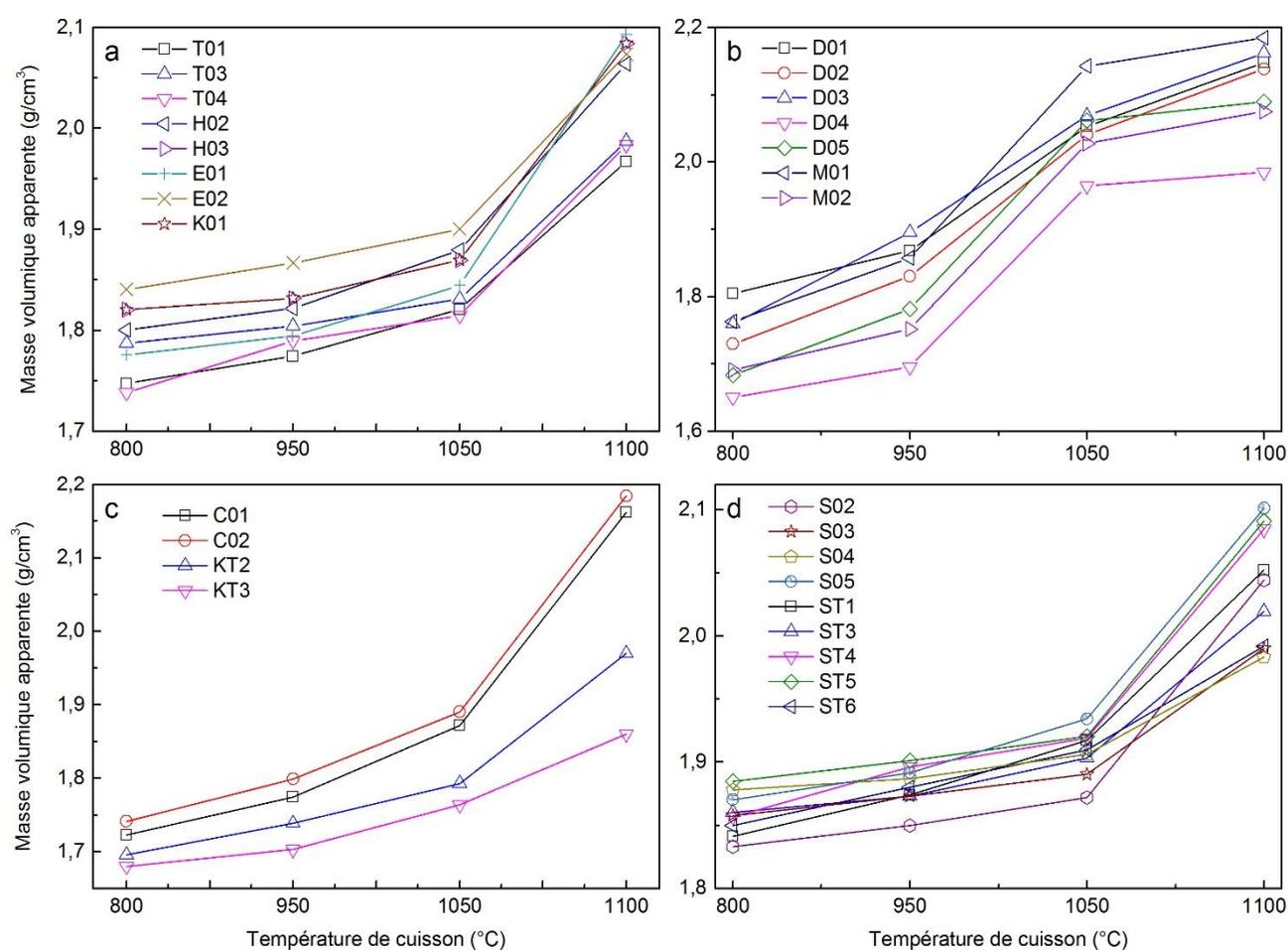


Figure 74 : Masse volumique apparente des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson des matériaux argileux étudiés. **a** : site du bassin néogène de Jijel ; **b** : site Djimla-Tamentout et Tarzoust ; **c** : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; **d** : site de Settara.

Tableau 32 : Masse volumique apparente des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.

Site	N° échant	Masse volumique apparente en (g/cm ³)			
		800°C	950°C	1050°C	1100°C
Bassin néogène de Jijel	T01	1,75	1,77	1,82	1,97
	T03	1,79	1,80	1,83	1,99
	T04	1,74	1,79	1,81	1,98
	H02	1,80	1,82	1,88	2,06
	H03	1,82	1,83	1,87	2,08
	K01	1,82	1,83	1,87	2,08
	E01	1,78	1,79	1,84	2,09
	E02	1,84	1,87	1,90	2,07
Djimla-Tarzoust	D01	1,80	1,87	2,05	2,15
	D02	1,73	1,83	2,04	2,14
	D03	1,76	1,90	2,07	2,16
	D04	1,65	1,70	1,96	1,98
	D05	1,68	1,78	2,06	2,09
	M01	1,76	1,86	2,14	2,18
	M02	1,69	1,75	2,03	2,07
	Tamazert- Adjarda	C01	1,72	1,77	1,87
C02		1,74	1,80	1,89	2,18
KT2		1,70	1,74	1,79	1,97
KT3		1,68	1,70	1,76	1,86
Settara	ST1	1,84	1,87	1,92	2,05
	ST3	1,86	1,87	1,90	2,02
	ST4	1,86	1,90	1,92	2,08
	ST5	1,88	1,90	1,92	2,09
	ST6	1,85	1,88	1,91	1,99
	S02	1,83	1,85	1,87	2,04
	S03	1,86	1,87	1,89	1,99
	S04	1,88	1,89	1,91	1,98
	S05	1,87	1,89	1,93	2,10

V.3.6. Résistance à la flexion

La température de cuisson est un facteur important qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et la durabilité des produits céramiques finis, car le matériau devient plus dense. Il s'agit également d'un indice de qualité technique important pour les matériaux de construction.

Le tableau 33 et la figure 75 présente la variation de la résistance à la flexion en fonction de la température de cuisson des carreaux céramiques. On remarque que la résistance mécanique à la flexion montre une fonction croissante avec la température de cuisson. L'augmentation de ce paramètre est plus prononcée à partir de la température de cuisson de 1050°C pour les carreaux

élaborés à partir des échantillons argileux de Djimla-Tarzoust, avec des résistances qui varient de 11.41 à 15.67 Mpa et qui sont très acceptables. A cet effet, l'échantillon D03 (Djimla) présente la valeur la plus élevée. Pour ces matériaux, la température de 1100°C représente la température idéale de cuisson pour des résistances mécaniques à la flexion largement admissibles.

Pour les autres échantillons issus du bassin néogène de Jijel et du site de Settara les résistances à la flexion sont plutôt acceptables. Elles varient dans l'ensemble entre 5.42 et 11.02 Mpa, ces valeurs sont bonnes pour un emploi dans la filière des briqueteries et de la céramique (TRAORE K. et al., 2007). On peut voir clairement, à une température de 1100 °C, que la plus forte résistance à la flexion des échantillons argileux est associée à l'absorption d'eau la plus faible et à la densité apparente la plus élevée comme indiqué sur les figures. 75, 73 et 74.

Le même constat pour les kaolins de Tamazert et d'Adjarda qui présentent des résistances à la flexion comprises entre 6.84 et 10.55 Mpa, ce qui est un facteur favorable pour l'incorporation de ces matériaux dans le domaine de la fabrication des produits sanitaires et même des carreaux de revêtement des sols.

Alors pour obtenir des briques et même des tuiles de bonne qualité à partir de matériaux issus des sites étudiés (bassin néogène de Jijel et de Settara et Djimla-Tarzoust), il est indispensable de les cuire à des températures de l'ordre de 1050°C en vue d'éviter un taux d'absorption d'eau supérieurs à 10%, afin de favoriser l'obtention des produits moins denses. Cette température de cuisson de 1050°C n'engendre que de faibles retraits de l'ordre de 5 %. La bonne maîtrise de l'uniformité des dimensions des produits finis est donc étroitement liée à ce paramètre thermique.

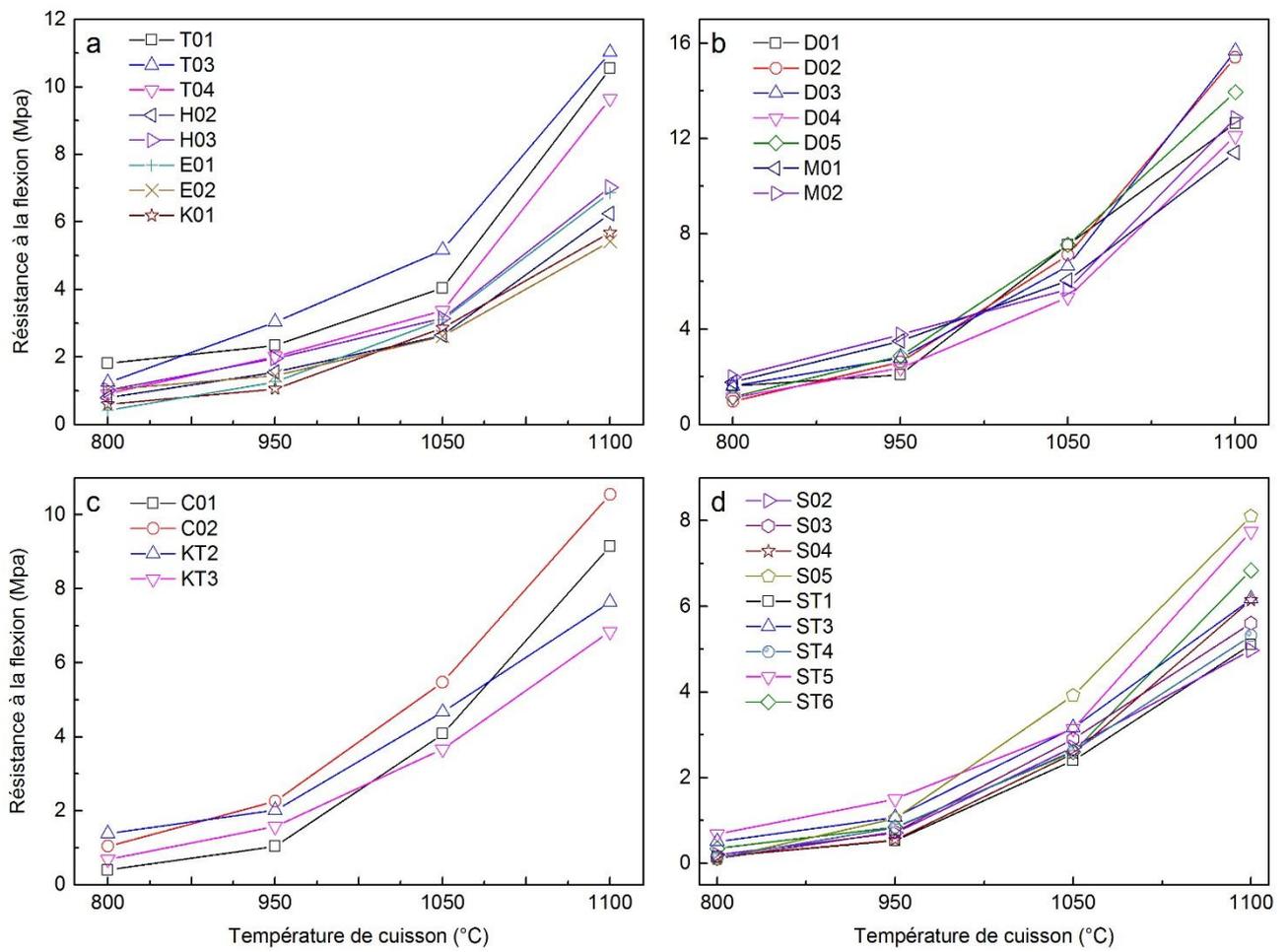


Figure 75 : Résultats de la résistance à la flexion des carreaux céramiques en fonction de la température de cuisson des matériaux argileux étudiés. **a** : argile du bassin néogène de Jijel ; **b** : site de Djimla-Tamentout et Tarzoust ; **c** : kaolin de Tamazert et d'Adjarda ; **d** : argile de Settara.

Tableau 33 : Résistance à la flexion des carreaux céramiques des matériaux argileux étudiés.

Site	N° échant	Résistance à la flexion en (Mpa)			
		800°C	950°C	1050°C	1100°C
Bassin néogène de Jijel	T01	1,82	2,34	4,04	10,54
	T03	1,25	3,03	5,16	11,02
	T04	0,91	2,01	3,37	9,65
	H02	0,80	1,55	2,64	6,25
	H03	1,02	1,96	3,15	7,03
	K01	0,60	1,06	2,86	5,68
	E01	0,42	1,26	3,10	6,86
	E02	1,03	1,45	2,62	5,42
Djimla-Tarzoust	D01	1,61	2,09	7,55	12,64
	D02	0,97	2,61	7,10	15,40
	D03	1,61	2,78	6,64	15,67
	D04	1,12	2,37	5,35	12,10
	D05	1,15	2,87	7,55	13,94
	M01	1,78	3,51	6,05	11,41
	M02	1,99	3,77	5,67	12,85
	Tamazert- Adjarda	C01	0,40	1,03	4,08
C02		1,04	2,25	5,48	10,55
KT2		1,39	2,01	4,67	7,64
KT3		0,69	1,57	3,67	6,84
Settara	ST1	0,16	0,53	2,40	5,11
	ST3	0,51	1,07	3,16	6,17
	ST4	0,13	0,84	2,62	5,32
	ST5	0,68	1,50	3,14	7,75
	ST6	0,35	0,85	2,60	6,84
	S02	0,20	0,71	2,71	4,97
	S03	0,11	0,73	2,90	5,60
	S04	0,16	0,55	2,57	6,15
	S05	0,10	1,05	3,92	8,11

V.4. Minéralogie des carreaux après cuisson

Les carreaux céramiques cuits à 800, 950, 1050, 1100°C ont été broyés avec un mortier (en agate) pour l'obtention de la poudre fine de granulométrie inférieure à 150 µm. Les différentes poudres sont ensuite soumises à une analyse par DRX, balayant un angle de 2° à 45° 2θ pendant 20 minutes en vue d'identifier et de semi-quantifier les phases minéralogiques totales. A cet effet, le diffractomètre Bruker D8 Advance (anticathode CuKα1: λ = 1,5406Å) de l'Unité de Recherche « Argile, Géochimie et Environnement Sédimentaire (AGEs) » du Département de Géologie de l'Université de Liège, a été utilisé.

Les spectres DRX et les transformations minéralogiques des échantillons de carreaux céramiques à différents température de cuisson sont représentés graphiquement sur les figures 76, 77, 78, 80, 81 et 82. Les abréviations des minéraux indiquées dans le tableau 34 sont utilisées dans cette partie.

Dans l'ensemble et suivant les températures de cuisson utilisées, on observe qu'à partir de 1050 °C la présence dominante du quartz (silice), du feldspath-K et du plagioclase comme minéraux originaux (fonction de la nature des échantillons) dont les taux diminuent avec la température de cuisson. Huit principales phases minéralogiques ont été identifiées. Il s'agit du spinelle, de la mullite, de l'hématite, la chaux, du diopside, de la géhlenite, de la rhodochrosite et de la cristobalite (Tab. 34). Le quartz, le feldspath et le plagioclase représentent les reliques de l'argile de départ.

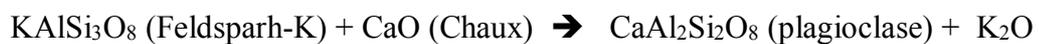
Tableau 34 : Liste et abréviation des minéraux primaires et néoformés, leurs formules chimiques et la valeur des pics caractéristiques par DRX.

Minéral	Abréviation	Formule chimique	d(Å)
Minéraux primaires			
Quartz	Q	SiO ₂	3.34
Calcite	C	CaCO ₃	3.04
Dolomite	D	CaMg(CO ₃) ₂	5.89
Kaolinite	K	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7.18
Illite	I	K _x Al ₂ [Si _{4-x} Al _x O ₁₀](OH) ₂ KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	10.0
Chlorite	Cl	(Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	14.0
Vermiculite	V	(Mg,Ca) _{0,7} (Mg,Fe,Al) ₆ (Al,Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₄ ·8H ₂ O	14.0
Muscovite	M	KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂]	10.0
Argile totale	Ph	-	4.48
Minéraux primaires et néoformés			
Feldspath-K	KF	(K,Na)AlSi ₃ O ₈	3.25
Hematite	H	Fe ₂ O ₃	2.69
plagioclase	P	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	3.19
Minéraux néoformés			
Chaux	CO	CaO	2.40
Hematite	H	Fe ₂ O ₃	2.69
Cristobalite	Cr	SiO ₂	4.05
Gehlenite	G	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	2.85
Mullite	Mu	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	3.40
Spinelle	Sp	MgAl ₂ O ₄	2.42
Rhodochrosite	R	MnCO ₃	2.84
Diopside	Di	CaMgSi ₂ O ₆	2.99

NB : L'appellation d'argile totale, regroupe l'ensemble des minéraux argileux contenu dans le matériau argileux étudié, reconnu par la réflexion à 4.47-4.48Å sur spectre DRX.

Les premières transformations minérales observées à température croissante comprennent la déshydroxylation de la kaolinite entre 400-700°C et la néoformation de la métakaolinite ($Al_2Si_2O_7$), qui se transforme à son tour en mullite (Al_6SiO_{13}) aux environs de 950-1000 °C, puis ensuite en silicate liquide (Al-Si) ou en spinelle. Au-delà de 1000°C, la silice polymorphe cristobalite commence à se former (Christidis, 2011; Ngun et al., 2011), suivie par la décomposition d'autres minéraux argileux (illite, chlorite, smectite et vermiculite), qui ont été déshydroxylés près de 950 °C. La calcite et la dolomite subissent une décarbonatation et se transforment en chaux (CaO) et MgO puis réagissent avec d'autres composants pour générer la néoformation de minéraux riches en calcium (Ca) et magnésium (Mg), tels que la géhlenite et le diopside.

Généralement, la persistance ou la disparition du feldspaths-K dans les matériaux argileux étudiés, semble être contrôlé par la présence ou l'absence du $CaCO_3$. En effet, la présence de $CaCO_3$ dans les matériaux argileux engendre la disparition des feldspath-K au détriment du plagioclase qui semble persisté jusqu'à 1100 °C, et l'absence de $CaCO_3$ contribue à la persistance du Feldspath-K.



Les résultats des transformations minéralogiques, données par les spectres de diffraction des échantillons analysés, montrent que la minéralogique principale des produits cuits est contrôlée par la composition minéralogique initiale, en particulier la teneur en carbonates. C'est sur cette base que trois groupes de matériaux argileux ont été pris en considération et définie comme suit : matériaux argileux non-carbonatés (argiles de Djimla et Tarzoust) et matériaux argileux riches en carbonates (argiles du bassin néogène de Jijel et de Settara), et les kaolins de Tamazert et Adjarda.

V.4.1. Argiles non-carbonatées (de la région de Djimla et Tarzoust)

Les échantillons provenant des sites de Djimla et de Tarzoust (D04 et M01) sont des matériaux argileux pauvres en $CaCO_3$. Ils s'apparentent à des argiles kaoliniques et illitiques à teneur moyenne en quartz (~ 35%) avec présence de chlorite en petite quantité. La proportion de plagioclase et de feldspath-K rentrant dans la composition minéralogique de ses argiles est faible. Les transformations minéralogiques donnés par les spectres de diffraction (Fig. 77), indiquent que la kaolinite, l'illite et la chlorite disparaissent entre 550 et 1050 °C. Quand au plagioclase, il disparaît au voisinage de 800 °C. Le quartz (silice) et le feldspath-K restent présents dans toute la gamme des températures.

Les premiers minéraux néoformés qui apparaissent sont l'hématite et le spinelle. Ils apparaissent respectivement à 800 et 950 °C et atteignent une proportion maximale à 1100 °C. A partir de 1050 °C, on observe l'apparition de la mullite et la rhodochrosite dont le taux augmente avec l'augmentation de la température de cuisson (Fig. 76). De même, on observe l'apparition de la cristobalite à 1100 °C (échantillon M01). Les proportions de silice (polymorphe de la silice) et de feldspath évolue de façon dégressive (Fig. 80). Malgré leur composition variable, les échantillons M01 et D04 ont des minéraux néoformés pratiquement similaires (Fig. 76).

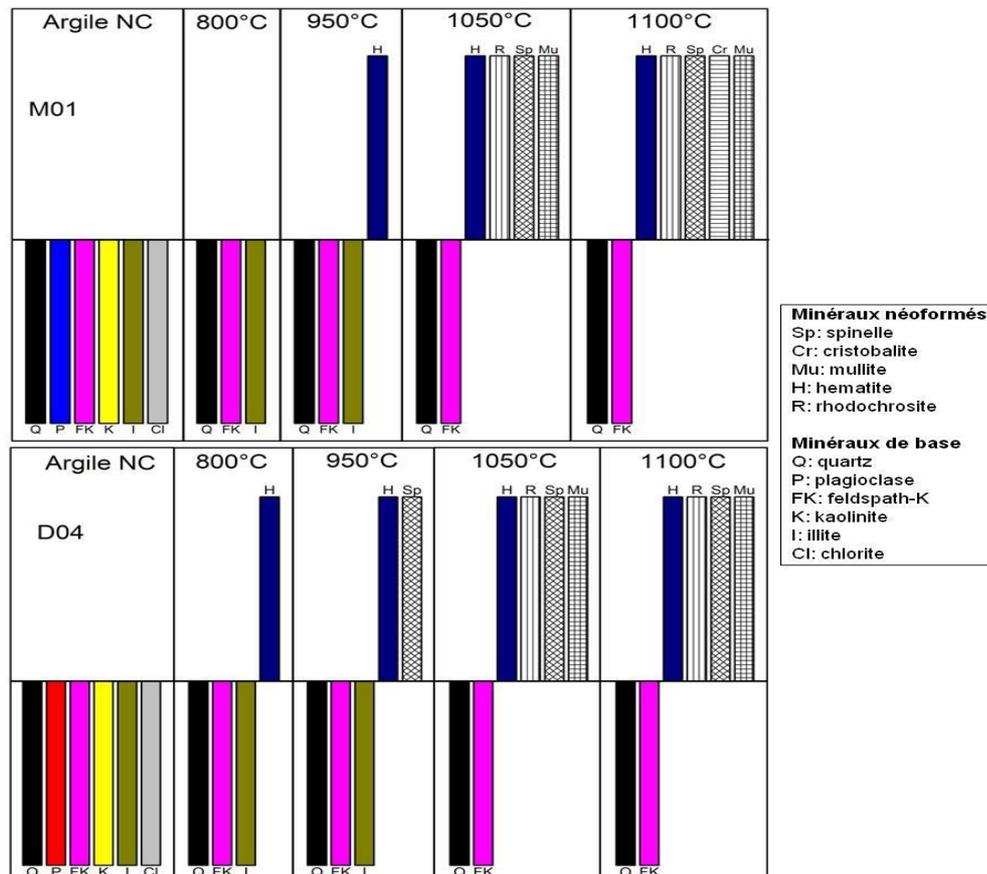


Figure 76 : Transformations minéralogique des matériaux argileux de Tarzoust et Djimla (M01 et D04) durant le frittage.

Le MgO et le CaO libérés par la destruction de CaCO₃ et de la chlorite, participe pour la formation du plagioclase calcique (anorthite) et du diopside. En raison, de la faible quantité de MgO libéré par la destruction de la chlorite, ce dernier est préférentiellement utilisé pour la formation de la diopside, donc pour la phase spinelle, elle résulte de l'excès d'alumine (Al₂O₃) résultant de la destruction des minéraux argileux et du feldspath-K, elle serait probablement de type Al₂O₄ (corindon). Dans le cas où il y'aura du MgO en proportion suffisante, le spinelle sera formé par la réaction: MgO + Al₂O₃ → MgAl₂O₄.

Dans le cas de la rhodochrosite, ce minéral proviendrait de la destruction de la calcite qui libère du CO₂, ce dernier se combine avec le manganèse Mn contenu en petite quantité dans les minéraux argileux pour donner du MnCO₃.

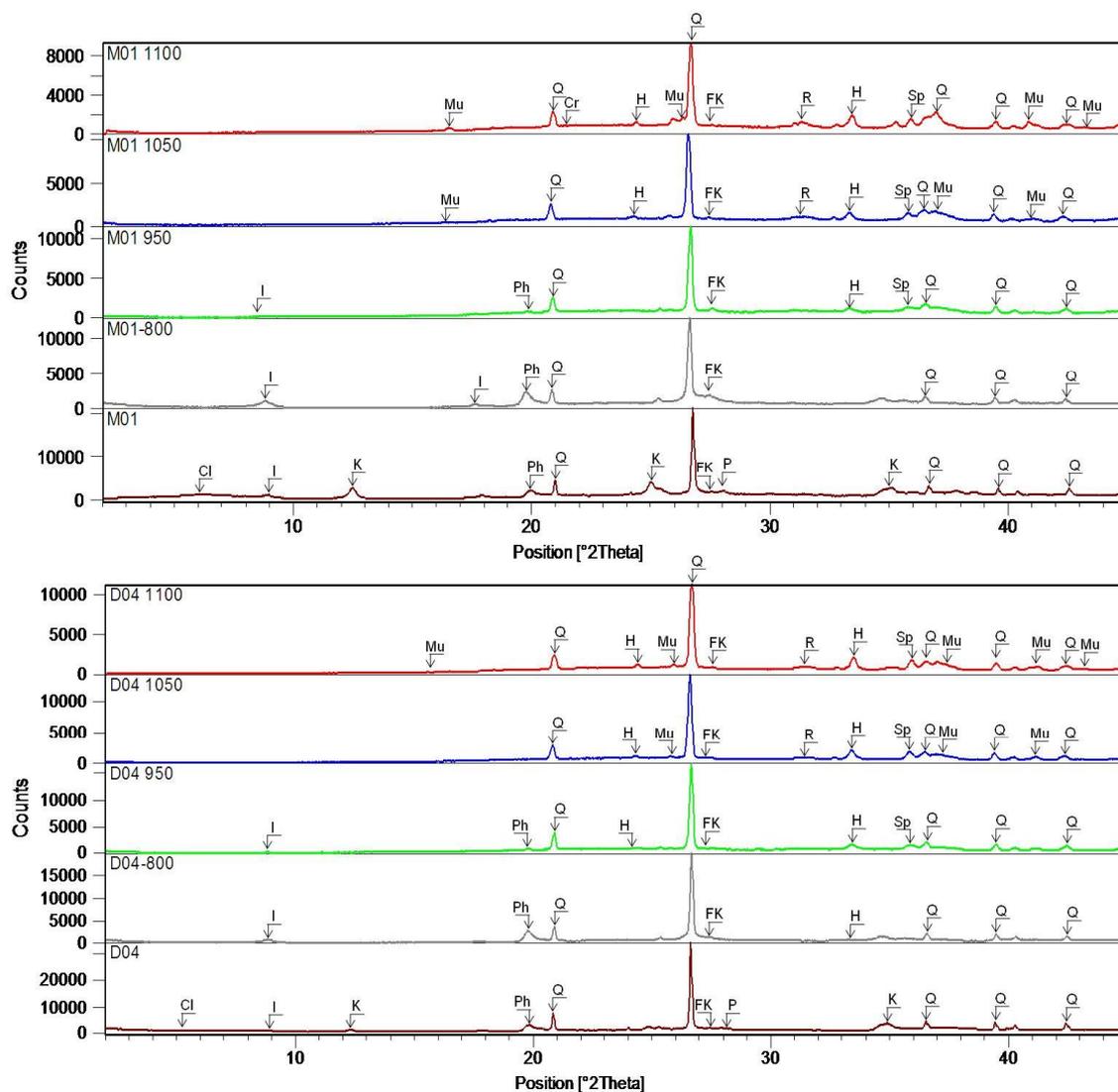


Figure 77 : Les spectres de DRX des échantillons argileux M01 et D04 à différentes températures de cuisson (Q : quartz, K : kaolinite, I : illite, Cl : chlorite, P : plagioclase, FK : feldspath-K, Ph : phyllosilicates, Sp : spinelle, Cr : cristobalite, Di : diopside, R : rhodochrosite, Mu : mullite, H : hématite).

La mullite se trouvant respectivement dans l'échantillon M01 et D04, proviendraient probablement de la transformation des minéraux argileux, en particulier l'illite (Pardo et al., 2011), selon la composition minéralogique, ces argiles contiennent environ 18 % d'illite. Pour la cristobalite, elle résulte de la transformation du quartz (Benhammou et al., 2009), forme de silice observée à haute température. Le principal minéral original à haute température est la silice, qui est

la phase la plus stable dans tous les échantillons d'argile. D'autres minéraux primaires accompagnent le quartz c'est le cas du feldspath jusqu'à 1100 °C.

La minéralogie de néoformation des argiles provenant des sites de Djimla et Tarzoust (argiles pauvre en carbonates) est relativement simple. Elle comporte de l'hématite, du spinelle, de la cristobalite, de la rhodochrosite, de la mullite et du feldspath-K. La mullite apparaît à 1050 °C et sa proportion augmentée à des températures plus élevées. Sa formation est favorisée par l'abondance de la silice et des minéraux argileux. La cristobalite a été identifiée essentiellement, dans les argiles riches en quartz au-delà de 1050 °C. Le feldspath néoformé, observé à des températures de cuisson élevées est considérée être une phase de haute température (plagioclase calcique).

V.4.2. Argiles riches en carbonate (argiles du bassin néogène de Jijel et de Settara)

Les matériaux argileux des bassins néogène de Jijel et Settara (échantillons T01, H03 et S03) sont des argiles riches en carbonates avec respectivement 33%, 25% et 36%. Ces argiles kaoliniques et illitiques, présentent une teneur moyenne en quartz de 34%. La vermiculite, la chlorite sont présentes en faible proportion (de l'ordre de 2%) dans les échantillons T01 et H03. On note aussi la présence de minéraux accessoires en petite proportion comme la dolomite, le plagioclase et le feldspath-K.

Pour l'ensemble des échantillons (S03, T01 et H03), la calcite, la dolomite, le feldspath et les minéraux argileux ont été les premiers minéraux à disparaître à 950 °C (Fig. 78, 79). Le plagioclase et le quartz (la silice) sont présents dans toute la gamme de température, mais la proportion du quartz (silice) diminue progressivement jusqu'à une valeur minimale atteinte au environ de 1100 °C, contrairement au plagioclase. Cette diminution de la proportion de la silice, peut être mise en relation avec la néoformation de nouveaux minéraux de haute température contenant le diopside et la mullite (Fig. 80).

Les premières phases néoformés sont la chaux, l'hématite, le diopside, la géhlenite et le spinelle qui apparaissent à 950 °C, suivis de la cristobalite à 1050 °C. La proportion de géhlenite a diminué aux températures plus élevées, et le diopside et le spinelle restent stable à 1100 °C (minéraux de haute températures). Le feldspath-K disparaît aux environ de 800 °C, le plagioclase semblait persister jusqu'à 1100 °C et augmenté en quantité, parce que le CaO libéré par la décomposition de la calcite, va réagir avec le feldspath-k pour former du plagioclase calcique.

Les transformations minéralogiques sont rapportées dans les figures 78 et indiquent que lorsque la température atteint les 800 °C, la calcite CaCO₃ se décompose en CaO et les minéraux argileux se décomposent, avec une apparition de la phase de spinelle. L'hématite résulte du fer libéré lors de la décomposition de la chlorite. Le spinelle et la cristobalite étaient présents à 1050 °C et leur abondance maximale a été observée à 1100 °C. La mullite est formée à partir de 1050 °C et atteint des proportions maximales à 1100 °C.

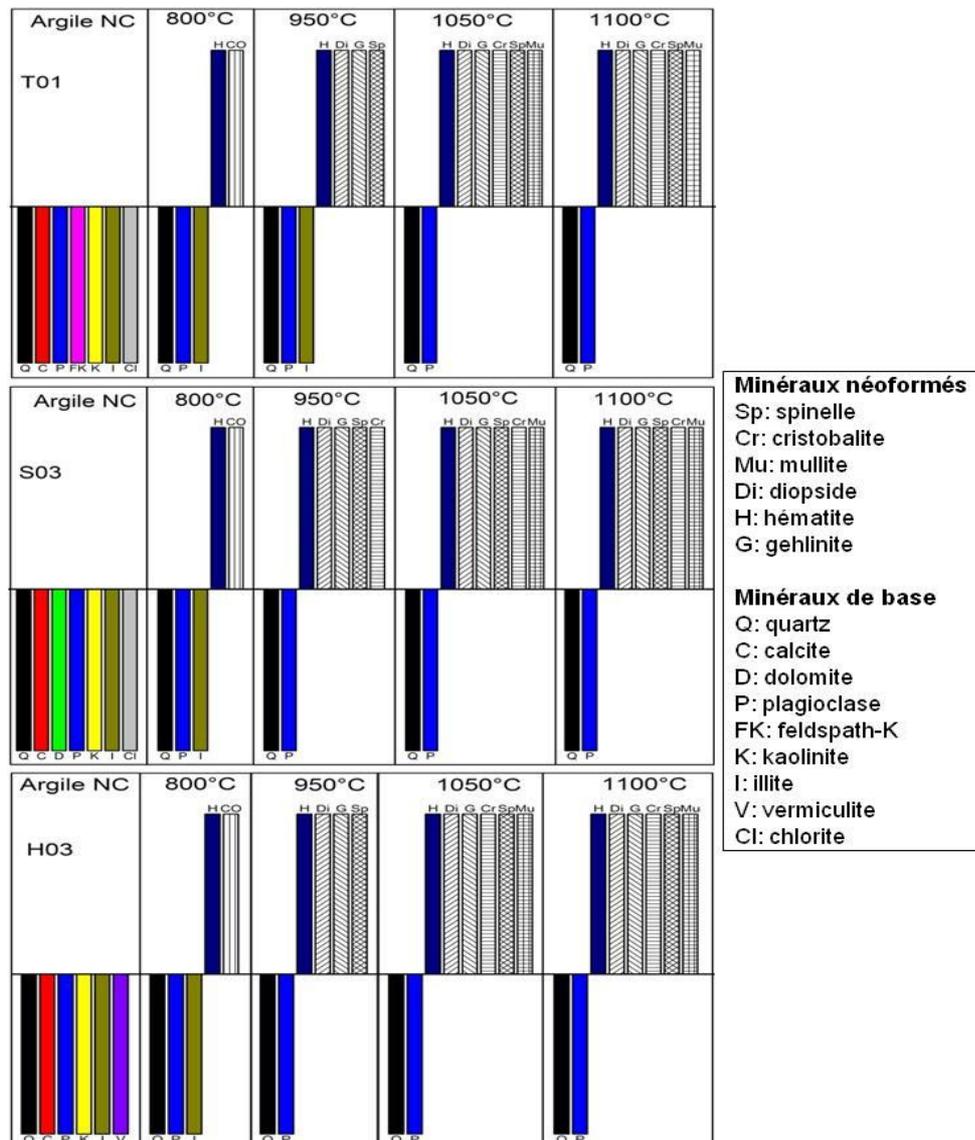


Figure 78 : Transformations minéralogiques des matériaux argileux du bassin néogène de Jijel (T01, H03) et de Settara (S03) durant le frittage.

Les transformations minéralogiques les plus importantes sont observées dans les échantillons riches en carbonates, à des températures de cuisson supérieures à 800 °C. La cuisson provoque la décomposition des minéraux carbonatés, des minéraux argileux et des minéraux silicatés et la formation d'une phase à l'état fondu, riche en Si, Al, Ca et K (Trindade et al., 2009). A partir de

Dans tous les échantillons argileux riches en carbonates et en chlorite, à partir de 950 °C, on note la formation de la gèhlenite et du diopside, qui se forment en raison de la libération de CaO et MgO, en plus, on a la formation d'autre phase cristalline telle que l'hématite, spinelle et cristobalite. La fusion commence juste avant 950 °C en raison de l'abondance des carbonates (Riccardi et al., 1999). Le calcium « Ca » et le magnésium « Mg » issus des carbonates peuvent agir comme agents fondant, mais de manière à limiter l'étendue de la vitrification (Pardo et al., 2011). D'autre part, les teneurs élevées en SiO₂ contenues dans ces échantillons argileux procurent une plus grande quantité de matière riche en silice potentiellement fondante.

La gèhlenite commence à se former à 950 °C, par réaction entre la chaux « CaO », l'aluminium « Al » et la silice « SiO₂ ». Le Diopside commence également, à se former à 950 °C dans l'ensemble des échantillons argileux riches en carbonates par réaction entre Ca, Mg et SiO₂ issu de la dolomite, chlorite, vermiculite et du quartz (en fonction de la minéralogie de chaque échantillon).

L'hématite néoformée résulte de la déshydroxylation d'argiles riches en fer (vermiculite et/ou chlorite, dans notre cas). Dans les échantillons d'argiles bruts non cuits, l'hématite présente montre une augmentation de sa proportion en fonction de l'augmentation de la température. Cela suggère que l'oxyde ferrique peut être formé par la décomposition des minéraux argileux avec des quantités non négligeables d'oxydes de fer (Franco Correia et al., 2000). L'oxyde de fer qui se forme serait probablement de la magnétite (Fe₃O₄), qui est la forme d'oxyde de fer établie à haute température.

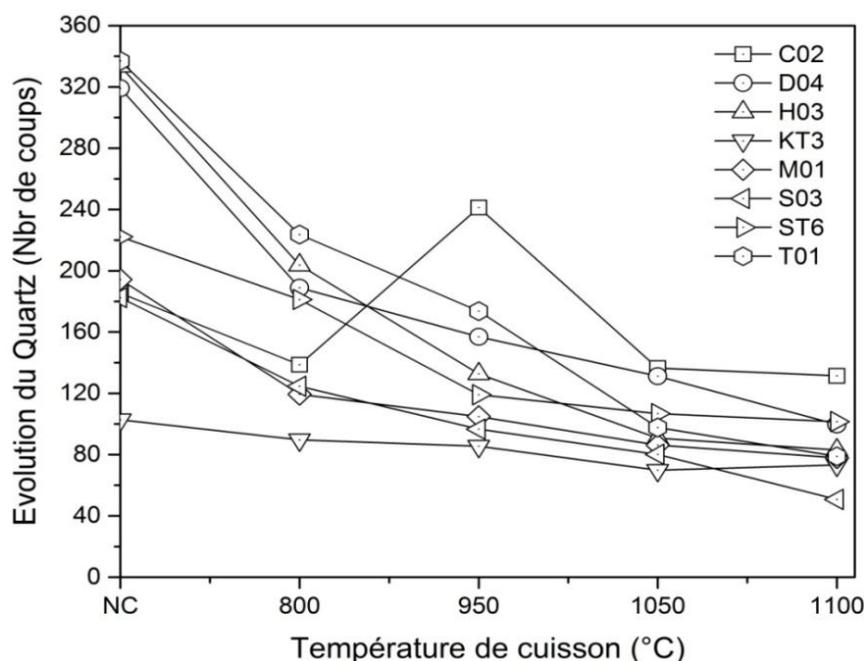


Figure 80 : Evolution de la silice dans les échantillons étudiés en fonction de l'évolution de la température, en nombre de coups (cps).

V.4.3. Les kaolins des gisements de Tamazert et Adjarda

Les échantillons de kaolin du gisement de Tamazert (KT3) sont des échantillons qui ont subis un processus d'enrichissement. Dans cette échantillon la kaolinite est le minéral le plus dominant à plus de 75%, le quartz est présent avec des proportions relativement faibles (~12%). En plus de la kaolinite, comme minéral argileux, l'illite est présente en très faible quantité (~5%). Le plagioclase (albite), le feldspath-k (microcline), la calcite et dolomite quant à eux sont présents avec des proportions inférieures à 4 %.

Pour le kaolin du gisement d'Adjarda l'échantillon (C02) analysé en est à l'état brut. Le plagioclase (albite) est le minérale dominant avec 34%, suivi du feldspath-k avec 14% et une phase micacée (muscovite et/ou illite) est présente avec une proportion non négligeable de l'ordre de 23%. Les minéraux argileux sont représentés par la kaolinie et l'illite avec respectivement 6% et 9%. Le quartz présente des proportions relativement faibles de l'ordre de 12% et la calcite et la dolomite en trace avec 1%.

L'ensemble des transformations minéralogiques des échantillons de kaolin KT3 et C02 sont illustrées dans les figures 81 et 82. Pour l'échantillon de kaolin KT3 (riche en kaolinite), la kaolinite et le plagioclase ont été les premiers minéraux à disparaître à 800 °C, suivi de la calcite à 950 °C, la dolomite et l'illite à 1050 °C. Le quartz et le feldspath-k restent stables sur toute la gamme de température, la proportion de silice diminue progressivement jusqu'à une valeur minimale atteinte à 1100 °C, contrairement au feldspath-k qui devient pratiquement nulle voir négligeable à 1100 °C. Les minéraux néoformés sont l'hématite et la mullite. Ces minéraux apparaissent respectivement à 950 °C et 1050°C, et atteignent une proportion maximale à 1100 °C.

Contrairement à l'échantillon de kaolin KT3 de Tamazert, celui d'Adjarda C02 montre une plus importante transformation minéralogique avec l'apparition de nouveaux minéraux à partir des températures de cuisson supérieures à 800°C. Les premiers minéraux néoformés sont la géhlenite, le diopside, le spinelle, la cristobalite à partir de 950 °C et l'hématite et la mullite à partir de 1050 °C (Fig. 81). La géhlenite apparue à 950 °C a diminuée en proportion pour disparaître à 1050 °C. Par contre, le diopside et la cristobalite augmentent pour atteindre des proportions plus importantes à 1100°C, contrairement au spinelle qui reste inchangé.

L'apparition de la mullite et de l'hématite à des températures élevées est favorisée par l'abondance du quartz et de l'illite et/ou muscovite. Leur proportion augmente avec l'augmentation de la température. À partir de 1050 °C, lorsque l'illite et la muscovite commence à disparaître, le

mélange réagisse avec la silice et se transforment en mullite et feldspath-k en plus d'une masse fondue, selon la réaction suivante (Cultrone et al., 2001) :

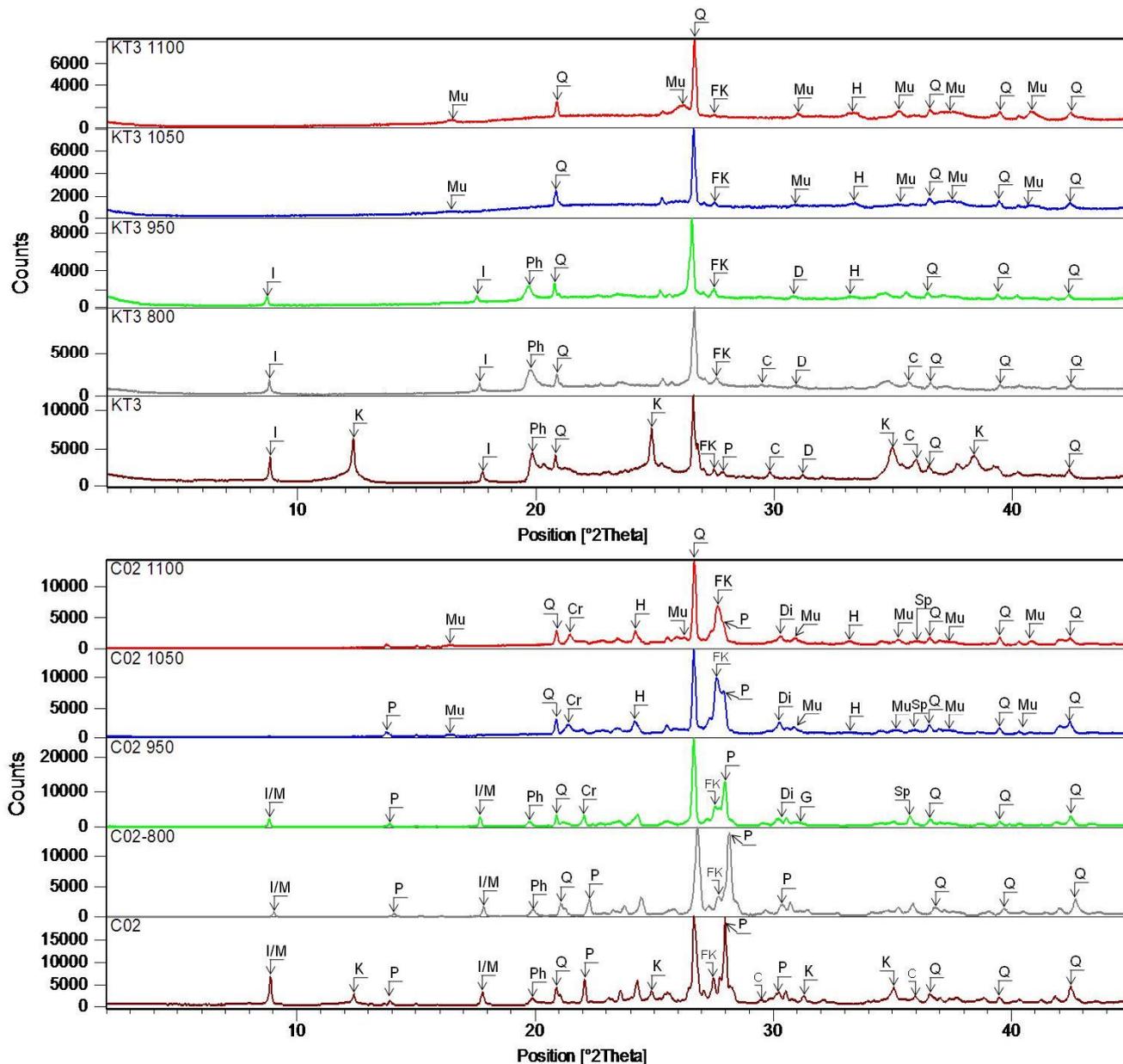
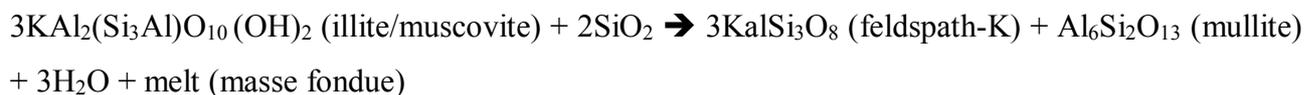


Figure 81 : Spectres DRX des kaolins de Tamazert et Adjarda (KT3 et C02) à différentes températures de cuisson (Q : quartz, K : kaolinite, I : illite, M : muscovite, P : plagioclase, FK : feldspath-K, Ph : phyllosilicates, Sp : spinelle, Cr : cristobalite, Di : diopside, G : géhlinite, Mu : mullite, H : hématite).

Les polymorphes de la silice, le feldspath-k et le plagioclase semblent persister jusqu'à 1100 °C. Avec l'élévation de la température le plagioclase se voit diminué en proportion pour atteindre des valeurs minimales à 1100 °C, contrairement au feldspath-K. Les feldspaths (en particulier les feldspaths-k) sont des fondants, de sorte qu'ils peuvent être néoformés pendant la cuisson, démontrés par leur augmentation à 1000 °C, ce qui peut être attribué à la formation de la mullite (Johari et al., 2010). Pour la silice son abondance a diminuée progressivement jusqu'à une valeur minimale atteinte à 1100 °C (figure 33). La kaolinite et la calcite ont été les premiers minéraux à disparaître respectivement à 800 °C et 950 °C.

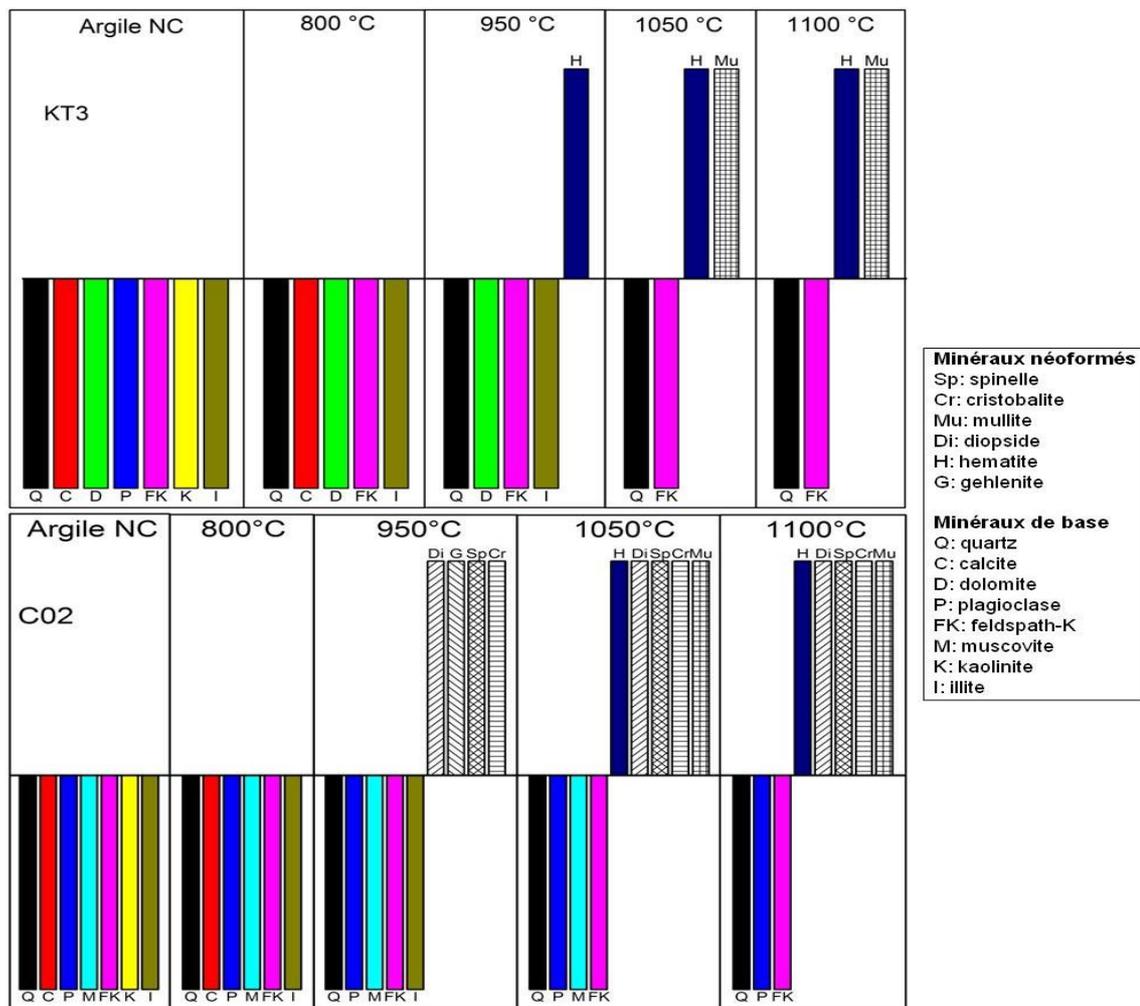


Figure 82: Transformations minéralogique des kaolins de Tamazert et Adjarda (KT3 et C02) durant le frittage.

V.5. Conclusion

La cuisson reste l'opération finale et décisive de la fabrication des produits céramiques préalablement façonnés. Les matières premières utilisées dans les pâtes céramiques sont généralement des mélanges complexes de minéraux argileux avec d'autres phases minérales (quartz, feldspaths, carbonates, micas, gypse, oxydes divers et matière organique). Pendant ce processus, diverses modifications physico-chimiques et minéralogiques s'opèrent et il se développe un fluide visqueux, qui au refroidissement conduit à la consolidation et à la diminution de la porosité du produit final (Aliprandi, 1979).

Les essais céramiques ont porté sur les caractéristiques technologiques et minéralogiques des produits cuits issus des matériaux argileux des différents sites de la wilaya de Jijel. Les carreaux cuits à 800, 950, 1050, 1100 °C ont été fabriqués et étudiés au laboratoire.

Les caractéristiques technologiques et minéralogiques de ces produits sont très intéressantes pour justifier leurs emplois comme matériau de base dans l'industrie céramique grossière (argiles des bassins néogène de Jijel et de Settara et argiles sous numidiennes de Djimla-Tarzoust) ou fine (Kaolin de Tamazert et d'Adjarda) pour la fabrication des produits céramiques.

Néanmoins, les produits cuits du site de Settara ont présenté des retraits à la cuisson assez élevés avec 13.73, 13.06 et 12.85 % pour une température maximale de 1100°C et une perte en poids à la cuisson de l'ordre de 14% en moyenne. Pour une bonne adaptation aux normes, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout d'une quantité optimale de dégraissant ou en revoyant à la hausse la température du séchage pendant l'élaboration des produits.

Il apparaît qu'en dehors de la composition chimique et minéralogique des matières premières, l'augmentation ou la diminution de la résistance mécanique à la flexion des produits céramiques cuits à différentes températures n'est pas totalement dépendante de la porosité ou des retraits à la cuisson, ni de la simple quantité des phases minéralogiques rigides néoformées (mullite). Cette propriété mécanique est très sensible aux microstructures de la pâte et au développement des fissures dans le matériau à haute température.

Deux groupes d'argiles se distinguent, selon le type de minéraux néoformés à haute température, les argiles calcaires et les argiles non calcaires. Les argiles calcaires cuites à des températures supérieures à 950 °C donnent des silicates de calcium (diopside et géhlenite), du spinelle, de la cristobalite, de l'hématite et du plagioclase. La mullite peut également se former dans les produits argilo-calcaires, lorsque la teneur en carbonates dépasse 10 %.

La cuisson des argiles non calcaires (T01, H03 et S03) des sites de Djimla-Tamentout et de Tarzoust, a permis la formation de la rhodochrosite à 1050 °C. Le spinelle et la mullite ont été formés plus tard à partir de 1050 °C, essentiellement pour les argiles contenant de l'illite, de la kaolinite et des argiles à base de chlorite. Dans les argiles contenant une quantité élevée de chlorite, l'hématite a été formée à partir de 800 °C.

Le kaolin du gisement d'Adjarda, riche en plagioclase, feldspath et muscovite ont connus une plus importante transformation minéralogique avec l'apparition de nouveaux minéraux à partir des températures de cuisson supérieures à 800 °C. La géhlenite, le diopside, le spinelle, la cristobalite à partir de 950 °C, l'hématite et la mullite à 1050 °C.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans une perspective de développement local durable, le travail, présenté dans cette thèse est un apport à une meilleure connaissance des matériaux argileux de la wilaya de Jijel, en vue de leur valorisation dans le secteur de la céramique. Il présente donc un double intérêt, d'une part, un intérêt scientifique et d'autre part un intérêt industriel, et contribue à la mise en valeur, à la promotion des matériaux locaux et du développement du sol et/ou sous-sol de la Wilaya.

Les principales formations argileuses de la wilaya de Jijel qui présentent un intérêt pour l'industrie céramique et qui ont faits l'objet de cette étude sont les argiles marneuses du Burdigalien, formant le remplissage du bassin néogène de Jijel et de Settara. Les argiles sous numidiennes, formant la base de la nappe numidienne au niveau de la région de Djimla et Tamentout et de Tarzoust (El-Milia), et les kaolins résultant de l'altération chimique des intrusions de leucogranites, des lames d'orthoigneiss et des filons de pegmatites, intrudés dans les formations du socle Kabyle, des gisements de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa).

Les résultats des travaux de laboratoire qui ont porté sur la détermination des propriétés physiques, minéralogiques, géochimiques et céramiques des argiles étudiées, ont montré l'aptitude de ces dernières à la fabrication des produits de terre cuite, notamment des briques et tuiles et de céramique fines et autres produits pour les kaolins. Ces résultats ont soulevé des problématiques pour la recherche et l'amélioration de la qualité des matériaux argileux.

1. Les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel et de Settara

Les observations de terrain et les résultats des travaux de laboratoire mettent en évidence que les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel indiquent une paragenèse minérale à dominance quartz (28-50%), argile totale (18-44%) et calcite (2-40%) associés à des faibles proportions de feldspath-k, plagioclase et dolomite. La fraction argileuse est dominée par la kaolinite (8-22%) et l'illite (3-16%) avec des proportions variables de chlorite, vermiculite et interstratifiés 10-14Å. Pour les matériaux argileux de Settara, ils présentent une minéralogie totale composée essentiellement de quartz (25-62%), calcite (1-33%), feldspaths K (2-10%), plagioclase (1-6%) et de dolomite (< 2%), avec des traces de gypse. Les minéraux argileux sont représentés par la kaolinite (12-42%) qui est fortement dominante, l'illite (1-9%), la smectite (1-6%) et des interstratifiés 10-14Å (<

2%). Les argiles de Settara se particularisent par la présence de smectite et de sulfates, susceptibles d'occasionner une porosité et des retraits au séchage élevés, néfaste pour les produits finis.

La morphologie de la kaolinite observée dans les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel et de Settara, présente une forme irrégulière, caractéristique d'une kaolinite de faible cristallinité caractéristiques des environnements sédimentaires. La smectite observée dans les échantillons argileux de Settara se présente sous forme de grandes lames à bords retroussés présentant des ondulations bien représentatives.

L'étude géochimique des matériaux du bassin néogène, donne quatre oxydes majeurs à savoir : SiO₂ (42-53%), Al₂O₃ (11-19%), CaO (2-17%) et Fe₂O₃ (4-8%). La perte au feu (L.O.I) varie de 9 à 18%. Pour les matériaux argileux de Settara, les oxydes les plus abondants sont SiO₂ (44-66%), Al₂O₃ (9-20%), Fe₂O₃ (5-7%) et CaO (2-9%) est à faible teneur ($\leq 2\%$) MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂ et P₂O₅. Les rapports SiO₂/Al₂O₃ élevés, mettent en relief la forte contribution du quartz, due probablement à un apport détritique assez important dans ces argiles sédimentaires, et permettent de classer ces matériaux parmi les produits silico-argileux. On note aussi, la forte contribution des alcalino-terreux (CaO et MgO) avec des proportions supérieures à 10%. Les pertes au feu des argiles de Settara sont très homogènes est variée entre 8.25 et 15.04 % liée à la déshydroxylation des minéraux argileux.

Les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel et de Settara, sont constitués d'une fraction argileuse dominante avec des proportions atteignant 52%, pour le cas des argiles de Settara. Ils sont moyennement plastiques à plastiques. Les valeurs de plasticité les plus élevées sont observées dans les matériaux argileux de Settara, lié à la présence de minéraux argileux expansifs de type smectite.

Les essais céramiques ont porté sur les caractéristiques technologiques et minéralogiques des produits cuits issus des argiles du bassin néogène et de Settara et façonnées par pressage. La couleur à la cuisson de ces matériaux argileux est beige nacré, à beige foncé à rouge brique. Les matériaux de la région de Settara présentent les valeurs de retrait et d'absorption les plus élevées avec respectivement 13.73% et 11.64%, qui peut s'expliquer par la quantité de la fraction fine, la présence de minéraux expansive (smectite). Les valeurs de résistance à la flexion est dans l'ensemble homogène et variée entre 5–11Map. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les matériaux argileux du bassin néogène de Jijel.

Malgré le fait que les paramètres de cuisson (retrait linéaire, absorption d'eau et résistance à la flexion,) soient favorables pour un usage de ces argiles en céramique grossière, la présence de fissures observées sur les produits finis à partir de 1000°C pour le cas des argiles du bassin néogène

de Jijel, ne sont guères favorables pour leurs usage en l'état surtout pour l'argile calcaire (riche en carbonate). On note aussi, que la présence de sulfates en faible quantité dans quelques échantillons carbonatés de Settara conduit après cuisson à 1050 °C à la formation de nodules blancs de sulfate de calcium (CaSO₄) à la surface des produits cuits, résultant de la réaction de sulfates avec le CaO.

La composition minéralogique des produits cuits dépend de la présence et/ou de l'absence des carbonates. Les argiles calcaires cuites à des températures supérieures à 950°C donnent des silicates de calcium (diopside et géhlenite), du spinelle, de la cristobalite, de l'hématite et du plagioclase. Pour la mullite elle c'est formée dans l'ensemble des échantillons à partir de 1050°C.

2. Les matériaux argileux de Djimla-Tamentout et Tarzoust (argiles sous-numidiennes)

La minéralogie des matériaux argileux de Djimla, Tamentout et Tarzoust est représentée par les minéraux argileux (argile totale) associés à du quartz et plagioclase. Les feldspath-k, la calcite et la dolomite sont présent mais en faible proportion. La kaolinite est le minéral argileux dominant (20–46%), avec des proportions variables d'illite (13–21%), de chlorite (< 2%) et aussi d'interstratifiés 10–14Å.

Sur le plan géochimique, ces argiles montrent une teneur en silice élevée (SiO₂ > 54%), une teneur en alumine appréciable (Al₂O₃ > 20%) corrélées à la présence des minéraux argileux tels la kaolinite. Les teneurs en sesquioxyde de fer (Fe₂O₃) varient de 6–9%. Les teneurs en alcalins et alcalino-terreux (Na₂O + K₂O + CaO + MgO) oscillent entre 5.0–7.0%.

Du point de vue granulométrique les matériaux argileux de Djimla, Tamentout et Tarzoust présentent une fraction argileuse comprise entre 42-49 %, fraction limoneuse entre 14-29 % et sableuse entre 25-37 %. De cela, il ressort que la fraction argileuse est la plus dominante avec une moyenne de 46 %, classés d'après le diagramme ternaire de Shepard (1954) comme argile limoneuse sableuse. Ils sont moyennement plastique à plastique (IP : 19-30 ; WL : 42-57% ; Wnat : 12-21%), très consistants (IC : 1.09-1.40). D'après le diagramme de (Marsigli et Dondi, 1997) basé sur la plasticité des matériaux argileux, ces derniers se place dans la région à extrusion acceptable à optimale.

L'observation des carreaux après cuisson montre que la couleur des produits est beige brun foncé à clair pour des températures allant jusqu'à 1000°C et brun beige à rouge brique à 1100°C due à la présence de teneurs élevés (> 5%) en oxydes de fer (Fe₂O₃). Les caractéristiques technologiques des carreaux cuits ont montré entre 800-950°C, une augmentation du retrait à la cuisson, cependant

cette augmentation est plus importante à des températures plus élevées avec des valeurs de 4.53–8.20 % à 1100°C. Les valeurs de résistance à la flexion des différents produits cuits augmentent avec l'évolution de la température de cuisson, est variée entre 11.41-15.67 Mpa qui est largement admissible, l'augmentation de ce paramètre est plus prononcée à partir de 1050°C.

A partir de ces résultats trouvés, on peut dire que les matériaux argileux des formations argileuses sous-numidiennes sont aptes en tant que matières premières pour la production de céramiques structurales, en particulier dans la production des briques. Les teneurs élevées de Fe_2O_3 dans tous les échantillons les rendent inappropriées pour la production de la céramique fine.

Les transformations minéralogiques lors de la cuisson des argiles non carbonatées produisent du spinelle et de l'hématite à 950°C. La rhodochrosite, le spinelle et la mullite sont formées ultérieurement, à partir de 1050°C pour les argiles qui contiennent de l'illite, kaolinite et chlorite. De même, on observe l'apparition de la cristobalite à 1100 °C. Le taux de silice et du feldspath évolue de façon dégressive.

3. Kaolins des gisements de Tamazert (El-Milia) et d'Adjarda (Chekfa)

Du point de vue minéralogique, le kaolin traité de Tamazert est caractérisé par la prédominance des minéraux argileux (77–80%) comme phase dominante, du quartz (12–13%), du feldspath-K (4–5%) et des faibles concentrations ($\leq 2\%$) de plagioclase, de calcite et de dolomite. La fraction argileuse présente une forte teneur en kaolinite (69–75%) et de l'illite (5–8%). Contrairement au kaolin de Tamazert, la minéralogie des kaolins brut du gisement d'Adjarda, est composée essentiellement de feldspath sodique (albite) et potassique (microcline) avec respectivement (34–39%) et (12–14%), de la muscovite (12–23%) du quartz avec une moyenne de 12%, des phyllosilicates (15–22%) et à faible concentration ($\leq 2.0\%$) de la calcite et de la dolomite.

Pour la composition chimique du kaolin de Tamazert, les oxydes les plus dominants sont : SiO_2 (49%), Al_2O_3 (32%), Fe_2O_3 (2.87%) et K_2O (2.72%), les autres oxydes (CaO , MgO , Na_2O , TiO_2 et P_2O_5) sont présents mais à faibles quantités ($< 1.0\%$). Une concentration relativement élevée en Al_2O_3 (32%) étant corrélée à la présence de phases argileuses (kaolinite, illite). Les faibles teneurs en CaO et MgO indiquent l'absence de carbonates et des minéraux argileux de type smectite. Les pertes au feu (11.26%) sont légèrement inférieures à celles des kaolinites pures qui avoisinent les 13.96%.

Le kaolin d'Adjarda (Chekfa), SiO_2 (65%), Al_2O_3 (21%), K_2O (5%) et Na_2O (4%) sont les oxydes les plus dominants. Les autres oxydes à savoir TiO_2 , MnO , P_2O_5 , Cr_2O_3 sont présents mais

avec des teneurs très faible. Le ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3.15, est largement supérieur à la valeur obtenue pour le kaolin de Tamazert (1.51), qui indique la forte contribution du quartz dans le kaolin d'Adjarda. Le taux d'alcalins ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) est de 8.92% est fortement élevée dans les échantillons de kaolin d'Adjarda par rapport à ceux de Tamazert (2.84%), ceci indiquerait la présence de minéraux micacés dans ces matériaux (Farmer, 1974).

L'imagerie MEB a mis en évidence pour le kaolin de Tamazert des plaquettes de kaolinite en amas de taille inférieure à 10 μm et des surfaces non régulière avec des distorsions notables. Pour la kaolinite issue du kaolin d'Adjarda, elle est relativement déchiquetées d'une forme plane parfois circulaire souvent très irrégulière si l'on comparé avec une kaolinite bien cristallisée. Ces observations pour les deux sites, indiquent qu'on est en présence d'une kaolinite moyennement à mal cristallisée en raison de la présence d'impuretés.

La distribution dimensionnelle des grains du kaolin de Tamazert sont : Argile (55-61%), limons (37-41) et sable (2-4%), alors que pour le kaolin d'Adjarda, ils oscillent entre : argile (15-18%), Limon (45-50%) et sable (32-40%). Cela démontre que kaolins de Tamazert sont pauvres en fraction sableuse et riche en fraction argileuse et limoneuse, à l'opposé des kaolins d'Adjarda qui sont riches en fraction sableuse et limoneuse et pauvre en fraction fine argileuse. Cela est lié aux différents processus d'enrichissement opérés sur les kaolins de Tamazert.

Le kaolin de Tamazert est moyennement plastique à plastique avec un $\text{IP}=23\%$, cette plasticité relativement élevée est liée à la quantité de la fraction argileuse contenue dans ce kaolin. Par contre, le kaolin d'Adjarda est peut à moyennement plastique avec $\text{IP}=13\%$. En fonction de la plasticité et d'après le diagramme de Marsigli et Dondi, (1997), les kaolins d'Adjarda présentent une meilleure aptitude à l'extrusion, contrairement aux kaolins de Tamazert.

La coloration des produits cuits issus du kaolin de Tamazert et d'Adjarda varie en fonction de la température de cuisson, ils présentent des couleurs beige brun foncé à clair voir pale et brun beige clair pour des températures allant jusqu'à 1100°C. Les caractéristiques technologiques, retrait linéaire (3.16–5.78%), la perte en poids (5.43–12.84%) et la masse volumique apparente (1.86–2.18 g/cm^3) augmente généralement avec la température de cuisson alors que le taux d'absorption (3.78–7.62%) diminue. Les résistances à la flexion comprises entre 6.84–10.55 Mpa, présente un facteur favorable pour l'incorporation de ces matériaux dans le domaine de la fabrication des produits sanitaires et même des carreaux de revêtement des sols.

Pour les kaolins de Tamazert, les minéraux néoformés sont l'hématite et la mullite qui apparaissent respectivement à 950 °C et 1050°C, ils ont acquis une abondance maximale à 1100 °C. Les kaolins d'Adjarda ont connus une plus importante transformation minéralogique. La géhlenite, le diopside, le spinelle, la cristobalite à partir de 950 °C, l'hématite et la mullite à 1050 °C sont les premiers minéraux néoformés. La mullite et l'hématite apparus à des températures élevées, favorisés par l'abondance du quartz est de l'illite/muscovite, leurs abondances a augmenté à des températures plus élevées.

4. Secteurs de valorisation et perspectives

Les études menées dans le cadre de cette recherche, ont montré l'intérêt que présentent les matériaux argileux objets d'étude dans la production céramique au niveau de la wilaya de Jijel. Les connaissances scientifiques acquises sur les matériaux naturels et sur les produits fabriqués permettent de justifier l'emploi des matériaux issus du bassin néogène de Jijel et de Settara dans la filière grossière de la céramique ou céramique de construction.

En effet, ces matériaux argileux sont des produits silico-argileux plastiques qui constituent des ressources minérales industrielles de bonne qualité pour la fabrication des produits variés dont les briques cuites ou stabilisées (creuses, perforées, pleines et de parement), les hourdis et les tuiles. Les teneurs en oxyde de fer (> 5%) couplée à des teneurs élevée en CaO explique la coloration qui varie de beige brun clair à foncé à rouge brique après cuisson. Les teneurs élevées de Fe₂O₃ dans toutes les argiles les rendent inappropriées pour la production de la céramique fine.

Certains produits cuits de Settara ont présenté un retrait à la cuisson > 10 % pour une température de 1100 °C et une perte en poids à la cuisson de l'ordre de 14%. Pour une bonne rentabilité industrielle, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout d'une quantité optimale de dégraissant (sable ou chamotte) ou en revoyant à la hausse la température du séchage pendant l'élaboration des produits.

D'après les exigences granulométriques, chimiques, minéralogiques et technologiques, les argiles de Djimla, Tamentout et Tarzoust (argiles sous-numidiennes), peuvent être employées dans la fabrication de divers produits céramiques parmi lesquels se trouvent la terre cuite (briques, tuiles, poterie, carreaux). Néanmoins, les teneurs élevées en alumine (>20%) de ces argiles permettent d'envisager leurs application dans le secteur des réfractaires silico-alumineux et dans la branche de la céramique fine, traditionnelle et industrielle, après élimination du Fe₂O₃ et d'ajouts de produits

alcalins. Dans l'ensemble, la teneur en fer de ces argiles qui est en moyenne de 8%, explique la coloration rouge brique après cuisson.

Les caractéristiques physico-chimiques des kaolins de Tamazert et d'Adjarda montrent qu'ils constituent d'importantes ressources minérales premières dans la filière de la céramique fine ; ils peuvent donc entrer dans la formulation de certains produits céramiques tels que : porcelaine, industrie sanitaire, réfractaire, carrelages, synthèse des émaux,...etc, voir aussi comme charge minérale des matériaux composites (papier, peinture, caoutchouc, engrais...etc). Ces kaolins présentent des teneurs élevés en SiO_2 et Fe_2O_3 pour être utilisés dans le domaine de la céramique fine. Il faut aussi signaler les faibles teneurs en alcalins ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) essentiellement pour le kaolin de Tamazert. A la cuisson, ils présentent des couleurs beige foncé à beige clair à des températures de 1100°C .

A l'issue de cette étude, les travaux effectués ont permis de bien appréhender les caractéristiques physico-chimique, minéralogique et technologique des matériaux argileux étudiés. Toutefois, quelques axes mériteraient des approfondissements, ils pourront faire l'objet de développements futurs :

- A titre d'illustration, il serait intéressant pour mieux comprendre le processus de densification, effectué des analyses de la microstructure par Microscopie Electronique à Balayage (MEB), et de déterminer la porosité ouverte et fermée, ce qui conditionnera d'une manière précise les propriétés d'absorption et de perméabilité des matériaux, voir aussi l'influence des impuretés dans les différents processus de transformation et de frittage.
- Effectué des études de caractérisation de produits cuits à des températures supérieures à 1100°C seraient indispensables pour apporter des informations technologiques complémentaires. Des mélanges et des formulations serait utiles pour les argiles qui présentent des qualités inférieures aux normes.
- Effectuer une étude géochimique en éléments trace et terres rares, pour essayer de comprendre le processus de mise en place de ces formations argileuses dans les différents bassins de sédimentation et interpréter la diversité des matériaux existants en relation avec la géodynamique globale.
- Evaluer la mise en valeur de ces argiles dans d'autres applications industrielles (cosmétique, pharmaceutique, traitement des eaux, boue de forage, charges minérales), essentiellement pour les gisements de kaolin.
- Envisager une évaluation des gisements d'argile existant à l'image des formations argileuse du bassin néogène de Jijel, et la prospection de matériaux argileux dans d'autres localités devrait

également être envisagée afin d'enrichir la base des données des matériaux argileux au niveau de la wilaya de Jijel.

- Enfin pour gérer de façon durable et intégrée les ressources minérales industrielles au niveau de la wilaya de Jijel, il est souhaitable d'envisager l'organisation des données y afférentes sous forme cartographique à l'aide des outils du Système d'Information Géographique (SIG).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO, T., 1982. Standard Test Methods for Moisture Density Relations of Soils and Soil Aggregate Mixtures Using 5.5 lb rammer and 12 in. drop. Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing: Part II, Washington.
- Abajo, M.F., 2000. Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos Ed. Beralmar S. A., Barcelona.
- Afalfiz A., 1990. Etude comparative paragenétique et géochimique des indices minéralisée à Fe, Pb, Zn, Cu, Ba de la partie occidentale du massif cristallophyllien de Petite Kabylie(Algérie). Thèse Magister. USTHB, Alger, 176P.
- Akodad. M., 1994. Les minéraux argileux du Crétacé supérieur de l'Est de la Belgique et des régions limitrophes (Pays-bas et Allemagne) : Genèse, argilostratigraphie, organisation séquentielle, implications paléogéographiques et paléoclimatiques. Thèse de Doctorat en sciences, Université de Liège. 287 p.
- Aliprandi G., 1979. Matériaux réfractaires et céramiques techniques (Eléments de céramique et de la technologie), SEPTIMA, Paris, 612p.
- Amigo, J.M, M. Bastida, J. Sanz, A. Signes, M.J. Serrano., 1994. Crystallinity of lower cretaceous kaolinites of Teruel (Spain). Appl.clay Sc, Vol 9; pp 51-69.
- A.N.R.H., 1993, Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une notice de 49 p.), Ministère de l'Equipement, Alger, Ed. I.N.C.
- Arib A., Sarhiri A., Moussa R., Remmal T., Gomina M., 2007. Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles: influence de la source de feldspath. ScienceDirect, C.R. Chimie, 10, 502-510p.
- Aydin A, the change of phase composition in kaolinite and illite-rich clay-based ceramic bodies, 24, Applied Clay science, 257-269 (2004).
- Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., Mhiri, T., Daoud, A., 2008. Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. Mater. Charact. 59, 1613–1622.
- Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., and Mhiri, T., 2009. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia: Journal of Materials Processing Technology, v. 209, no. 6, p. 2812-2817.
- Baïlon J.P., Dorlot J.M., 2000. Des matériaux. 3^{ème} éd. Montréal : Presses Internationales Polytechniques, 1-736p.
- Banfield, J.F. and Eggleton, R.A., 1990. Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite and K-feldspar weathering. Clays and Clay Minerals, 38, 77-89.
- Barrios Neira J., Montealegre L., Lopez L.A., Romerol., 2009. Ceramics of Ategua (Cordoba, Spain): Mineralogical and petrographic study. Applied Clay Science 42, 529-537p.
- Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., 2006. Handbook of clay science. Developments in Clay Science, vol. 1. Elsevier Ltd.
- Benhammou, A., Tanouti, B., Nibou, L., Yaacoubi, A. and Bonnet, J.-P., 2009. Mineralogical and physicochemical investigation of Mg-smectite from Jbel Ghassoul, Morocco. Clays and Clay Minerals, 57(2): 264-270.
- BIA, 2006. The Brick Industry Association Technical Notes on Brick Construction 9-Manufacturing of Brick, no. Reston, VA.
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., and Marşoğlu, M., 2012. Use o waste marble powder in brick industry: Construction and Building Materials, v. 29 no. 0, p. 449-457.

- Blanco Garcia, I., Rodas, M., Sanchez, C.J., Dondi, M., Alonso-Azcarate, J., 2005. Technological characterization and ceramic application of gravel pit by-products from middlecourse Jarama river deposits (central Spain). *Appl. Clay Sci.* 28:283–295.
- Boës X. and Fagel N., 2008. Relationships between southern Chilean varved lake sediments, precipitation and Enso for the last 600 years. *Journal of Paleolimnology* 39, 237-252. *CI 2006*: 2.197
- Borchardt, G.A. (1977); Montmorillonite and other smectite minerals. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 299–330.
- Boski, T., Pessoa, J., Pedro, P., Thorez, J., Dias, J.M.A., Hall, I.R., 1998. Factors governing abundance of hydrolyzable amino acids in the sediments from the N.W. European Continental Margin (47–50°N). *Prog. Oceanogr.* 42:145–164.
- Bouillin J.P. et Raoult, J.F., 1971. Présence sur le socle kabyle du constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs; le Numidien peut être un néo-autochtone? *Bull. Soc. géol. France*, 7, pp 338-362.
- Bouillin J.P., Kornprobst, A., 1974. Association ultrabasique de la petite Kabylie : Péridotite de type Alpine et complexes stratifiés; Comparaison avec les zones internes bético rifaines. *Bull. Soc. géol. France*, 167, pp 183-194.
- Bouillin J.P., 1977. Géologie alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El-Milia (Algérie). Thèse Doctorat. Univ. P. et M. Curie, 509,511p.
- Boulekroune Y, Zaïbet H., 2016. Les ressources minérales de la wilaya de Jijel (Algérie nord-orientale) : distribution spatiale et analyse des relations avec les ensembles géologiques. Mémoire de Master. Univ. M. S. ben yahia, Jijel. 52p.
- Brindley, G.W., 1996. Discussion and recommandations concerning the nomenclature of clay minerals and related phyllosilicates. *Clay and Clay Minerals*. 14, 27-34.
- Brown, G., Brindley, G.W., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: Brindley, G.W., Brown, G. (Eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*. Mineral. Soc. Monogr. 5, pp. 305–359.
- Bureau D., 1970. Principaux traits de la structure des monts de Bélezma (Algérie). *Bull. Soc. Géol. France*. (7). T. XII. N°2. PP.210-213.
- Caillère, S., S. Hénin and M. Rautureau., 1982. *Minéralogie des argiles*. Masson, Tomes 1 et 2, 184p et 189p.
- Callaud M.J., 2004. Cours de mécanique des sols. Tome I : Propriétés des sols. Groupe EIER-ETSHER, 1-137p.
- Caner, L., 2011. Phyllosilicates des sols, de l'identification à la quantification. Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université de Poitiers.
- Casagrande, A., 1947. Plasticity chart for the classification of cohesive soils. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 783–811.
- Celik, H., 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Appl. Clay Sci.* 50:245–254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2010.05.001>.
- Cerame-Unie, 2003 et 2004. Proposed Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the European Ceramic Industry.
- Ceratec., 1987. Blocs en terre stabilisée. Technologie de production. 1-31p.
- Cetinkaya, S., Yürüm, Y., 2000. Oxidative pyrolysis of Turkish lignites in air up to 500 °C. *Fuel Process. Technol.* 67 (3), 177–189.
- Christidis G.E., 2011. Industrial clays. European mineralogical Union, Notes in mineralogy. Vol. 9, chapter 9, 341-414P.
- Churchman G.J. & Carr R.M., 1975. Dehydration of the washed potassium acetate complex of halloysite. *Clays & Clay Minerals*, 21, 423-442.

- Cook, H.E., Johnson, P.D., Matti, J.C., Zemmels, I., 1975. Methods of sample preparation and X-ray diffraction analysis in X-ray mineralogy laboratory. In: Kaneps, A.G., et al. (Eds.), *Init. Repts DSDPXXVIII*. Print. Office, Washington, DC, pp. 997–1007.
- Courme-rault M.D., 1985 : Stratigraphie du miocène et chronologie comparée des déformations suivant deux transversales des Atlasides orientales (Algérie- Sicile), Thèse és-sciences, univ d'Orléans, 2 tomes, 456p, 26pl .
- Cuevas, J., Leguey, S., Garralon, A., Rastrero, M. R., Procopio, J. R., Sevilla, M. T., Jimenez, N. S., Abad, R. R., and Garrido, A., 2009. Behavior of kaolinite and illite-based clays as landfill barriers: *Applied Clay Science*, v. 42, no. 3-4, p. 497-509.
- Cultrone, G., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O., and De la torre, M. J., 2001. Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing: *European Journal of Mineralogy*, v. 13, no. 3, p. 621-634.
- Cyril, L., 2005. Les argiles, genèse et utilisations. [en ligne] http://www.normalesup.org/~clanglois/Sciences_Terre/Argiles/Argiles2.html [consulté le 13 octobre 2015].
- Demir, I., and Orhan, M., 2003. Reuse of waste bricks in the production line: *Building and Environment*, v. 38, no. 12, p. 1451-1455.
- Djangang, C. N., Elimbi, A., Melo, U. C., Lecomte, G. L., Nkoumbou, C., Soro, J., Bonnet, J. P., Blanchart, P., and Njopwouo, D., 2008, Sintering of clay-chamotte ceramic composites for refractory bricks: *Ceramics International*, v. 34, no. 5, p. 1207-1213.
- Djellit, H., 1987. Evolution tectono-métamorphique du socle Kabyle et polarité de mise en place des nappes de flyschs en Petite Kabylie occidentale (Algérie). Thèse Doct. Univ d'Orsay Paris (206P).
- Duchaufour. Ph., 1984. Abrégé de pédologie. Editions Masson, Paris, 220p.
- Durand Delga et Lambet A., 1955. Existence d'un flysch schisto-gréseux tithonique à néocomien aux abords des massifs anciens kabyles. *C. R. Somm. Soc. Géol. France*, p.296-298.
- Durand Delga M., 1969. Mise au point sur la structure de Nord-Est de la Bérberie. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*. 39, pp.89-131.
- Durand Delga, M., Magné, J., 1952. Note préliminaire sur le Néogène du bassin de Djidjelli (Nord-Constantinois, Algérie). *CRS. Soc. Geol. France* 11, 225–227.
- Elfil H., Srasra E., Dogguy M., 1995. Caractérisation physico-chimique de certaines argiles utilisées dans l'industrie céramique. *Journal of Thermal Analysis*, vol. 44, 663-683p.
- El Ouahabi M., 2013. Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc. Thèse doct. Univ. Liège, 1-189p.
- El Yakoubi N, Aberkan M, Ouadia M., 2006. Potentialité d'utilisation d'argiles marocaine de Jbel Kharrou dans l'industrie céramique, *338 Géomatériaux*, 693-702.
- Ekosse, G.E., 2010. Kaolin deposits and Occurrences in Africa: *Geology, Mineralogy and Utilization*. *Applied Clay Science*, 50(2), 212-236.
- Eslinger E., et Peaver D., 1988. Clay minerals for petroleum geologists and engineers, *SEPM Short course 22*. Soc. Economic paleontologists and mineralogists, Tulsa, USA.
- Fabbri, B., Dondi, M., 1995. La produzione del laterizio in Italia. *Faenza Editrice*, 160pp.
- Fagel, N., Thamó-Bózsó, E., Heim, B., 2007. Mineralogical signatures of Lake Baikal sediments: sources of sediment supplies through Late Quaternary. *Sediment Geol* 194:37–59.
- Farmer, V.C., 1974. The layer silicates in the infrared spectra of minerals. Pp 331–365. In: Farmer, V.C. (Ed.), *Infrared spectra of minerals*. Mineralogical Society, London.
- Farmer, V. C., 1974. The infrared spectra of Minerals. *Mineralogical Society*, 4, 331-359.
- Farmer. V. C., 1974. The Infrared Spectra of Minerals, *Mineralogical Society, Monograph 4*, London.

- Farmer, V.C., 2000. Transverse and longitudinal crystal modes associated with OH stretching vibrations in single crystals of kaolinite and dickite. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 56, 927–930.
- Fernandez-Caliani, J.C., Galan, E., Aparicio, P., Miras, A. & Marquez M.G. (2010). Origin and Geochemical Evolution of the Nuevo Montecastelo Kaolin deposit (Galicia, NWSpain). *Applied Clay Science*, 43, 91-97.
- Ferrage, E. 2004. Etude expérimentale de l'hydratation des smectites par modélisation des raies 00l de diffraction des rayons X - Implications pour l'étude d'une perturbation thermique sur la minéralogie de l'argilite du site Meuse-Haute Marne., Université Joseph Fourier, Grenoble, 326p.
- Ferrage, E., Lanson, B., Malikova, N., Plançon, A., Sakharov, B. & Drits, V.A. 2005a. New insights on the distribution of interlayer water in bi-hydrated smectite from X-ray diffraction profile modeling of 00l reflections. *Chemistry of Materials*, 17, 3499-3512.
- Ferrage, E., Lanson, B., Sakharov, B.A. & Drits, V.A. 2005b. Investigation of smectite hydration properties by modeling of X-ray diffraction profiles. Part 1. Montmorillonite hydration properties. *American Mineralogist*, 90, 1358-1374.
- Ferrage, E., Lanson, B., Sakharov, B.A., Geoffroy, N., Jacquot, E. & Drits, V.A. 2007. Investigation of dioctahedral smectite hydration properties by modeling of X-ray diffraction profiles: Influence of layer charge and charge location. *American Mineralogist*, 92, 1731-1743.
- Ferrari, S., Gualtieri, A. F., 2006. The use of illitic clays in the production of stoneware tile ceramics. *Applied Clay Science*, 32, 73–81.
- Fiori, C., Fabbri, B., Donati, G., Venturi, I., 1989. Mineralogical composition of the clay bodies used in the Italian tile industry. *Appl. Clay Sci.* 4, 461–473.
- Foucault, A. et Raoult, J.F., 1984. Dictionnaire de géologie. Paris, Masson (Coll. Guides géologiques régionaux), 2^eédition, 347 p.
- Franco Correia, V.M., Aguiar Gomes, M.A., Suleman, A., Mota Soares, C.M. and Mota Soares, C.A., 2000. Modelling and design of adaptive composite structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 185(2–4): 325-346.
- Gadsen, J. A., 1975. *Infrared Spectra of Minerals and Related Inorganic compounds*, Butterworths, London.
- Galtier L., Lécivain L., Rocher P., Vouillemet M., 1992. Approvisionnement de la France en minéraux industriels. Paris : Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunication et du Commerce Extérieur, Convention N° 92.2.83.0001, 1-163p.
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 383–411.
- Gelard J.P., 1969. Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif Chellata : Le flysch maurétanien (Grande Kabylie). *Bull. Soc. géol. France*.7.pp 676-686.
- Georgakopoulos, A., Iordanidis, A., Karma, V., 2003. Study of low rank coals using FT-IR spectroscopy. *Energy Sources* 25, 995–1005.
- Gillot, J., 2010. Synthèse et cristallisation de silicates amorphes poreux dans le ternaire MgO-CaO-SiO : application à la transition amorphe-cristal des disques d'accrétion. Thèse Doct. Univ Lille 1 Sciences et Technologies: 103P.
- Grim R.E., 1962. *Applied Clay Mineralogy*, McGraw- Hill, New York, NY.
- Guiraud R., 1973. Evolution post triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude de basin de Hodna et des régions voisines. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, (2), 17,4, pp.427-446.
- Hajjaji, W., Hachani, M., Moussi, B., Jeridi, K., Medhioub, M., López-Galindo, A., Rocha, F., Labrincha, J.A., Jamoussi, F., 2010. Mineralogy plasticity clay sediments north east Tunisia. *J. Afr. Earth Sci.* 57, 41–46.

- Hammami-Ben Zaied, F., Abidi, R., Slim-Shimi, N., Somarin, A., 2015. Potentiality of clay raw materials from Gram area (Northern Tunisia) in the ceramic industry. *Appl. Clay Sci.* 112–113:1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.027>.
- Harvey, C.C. & Murray, H.H., 1997. *Industrial Clays in the 21st Century: A Perspective of Exploration, Technology and Utilization*. *Applied Clay Science*, 11, 285-310.
- Holtzapffel, T., 1985. Les minéraux argileux: préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord*, 12,15-43.
- Holtz R.D., Kovacs W.D., 1981. *Introduction à la géotechnique*. Edition de l'école polytechnique de Montréal, Québec, 808p.
- Iqbal, Y., and Lee, W. E., 2000. Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain: *Journal of the American Ceramic Society*, v. 83, no. 12, p. 3121-3127.
- Jamoussi F., 2001. Les argiles de Tunisie : Etude minéralogique, géotechnique et utilisations industriels, Ph.D Thesis, The University of Tunis El Manar, Tunisia.
- Johnson, L.J., 1964. Occurrence of regularly interstratified chlorite-vermiculite as a weathering product of chlorite in a soil. *Am. Mineral.* 49, 556–572.
- Jordan, M. M., Montero, M. A., Meseguer, S., and Sanfeliu, T., 2008. Influence of firing temperature and mineralogical composition on bending strength and porosity of ceramic tile bodies: *Applied Clay Science*, v. 42, no. 1–2, p. 266-271.
- Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B.K.G., Righi, D. & Delvaux, B. 2005. Halloysite clay minerals – a review. *Clay Minerals*, 40, 383-426.
- Jozja, N., 2003. Étude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité." Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- Kabre, T.S., Traore, K., Blanchart, P., 1998. Mineralogy of clay raw material from Burkina Faso and Niger used for ceramic wares. *Appl. Clay Sci.* 12:463–477.
- Khalfaoui, A., Kacim, S., and Hajjaji, M., 2006. Sintering mechanism and ceramic phases of an illitic-chloritic raw clay: *Journal of the European Ceramic Society*, v. 26, no. 1-2, p. 161-167.
- Kodama, H., 1985. *Infrared Spectra of Minerals*. Pp Reference Guide to Identification and Characterization of Minerals for the Study of Soil. 198 pp.
- Konta, J., 1995. *Clays and Man: Clay Raw Materials in the Service of Man*. *Applied Clay Science*, 10, 275-335.
- Kornmann, M., 2005. *Matériaux de construction en terre cuite: Fabrication et propriétés*, Paris, Genève, p. 42–37.
- Lahondère, J.C., Feiberg, H., Hac, B.U., 1979. Datation des grès numidiens d'Algérie orientale: Conséquences structurales, *C R. Acad. Sc. Paris t 289, N°4*, pp 383386
- Luckham, P. F. and S. Rossi., 1999. Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Adv. Colloid Interface Sci.* 82, 43-92.
- Madejova, J., 2003. FTIR techniques in clay mineral studies. *Vib. Spectrosc.* 31:1–10.
- Madejova, J., Bujda'k, J., Janek, M., Komadel, P., 1998. Comparative FT-IR study of the structural modifications during acid treatment of dioctahedral smectites and hectorite. *pectrochimica Acta A*, 54; 1397-1406.
- Mahdjoub, Y., 1991. Cinématique des déformations et évolution P-T anté-alpines en Petite Kabylie (Algérie Nord Orientale). Thèse Doctorat d'Etat, USTHB, Alger, 190 p
- Marsigli, M., Dondi, M., 1997. Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. *L'industria dei laterizi* 46 pp. 214–222.
- McKenzie R. C., 1975. The classification of soil silicates and oxydes. In : *Soil components vol. 2 ; Inorganic components*. Giesecking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1-25.

- McManus, J., 1988. Grain size determination and interpretation. In: Tucker, M.E. (Ed.), *Techniques in Sedimentology*. Blackwell, Oxford, pp. 63–85.
- Merabet, D., Belkacemi, H., 2003. Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie). *Ann. Chim. Sci. Mat.* 28, 61-83.
- Mering, J. and G. Pedro., 1969. Discussion à propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1. *Bulletin du groupe français des argiles* 21, 1-30.
- Meunier, A., 2005. *Clays*. Springer, Heildeberg, 472 pp.
- Meunier, A., 2002. *Argiles*. GB Science Publisher, Paris, 420p.
- Milheiro, F.A.C., Freire, M.N., Silva, A.G.P., Holanda, J.N.F., 2005. Densification behaviour of a red firing Brazilian kaolinitic clay. *Ceram. Int.* 31, 757–763.
- Millot, G., 1964. *Géologie des argiles: Altérations, Sédimentologie, Géochimie*. Masson et Cie, éd., Paris, 499.
- Monteiro S, Vieira C., 2004. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes. Brazil, 27, *Applied Clay Science*, 229-234.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1989. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, New York (332 pp).
- Murray, H.H., 2007. *Applied clay mineralogy. Developments in Clay Science 2*. Elsevier, B.V.
- Murray H.H., 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: general overview. *Applied Clay Science* 17, 207-221p.
- Murray, H.H. & Keller, W.D. (1993). Kaolins, Kaolins and Kaolins. In: *Kaolin Genesis and Utilization*, by Murray H.H., Bundy W and Harvey C Eds. The Clay Minerals Society, Special Publication 1, Chantilly, VA, pp 1-24.
- Murray H.H., 1991. Overview-clay mineral applications. *Applied Clay Science*, 5, 379-395.
- Ngun B.K., Mohamad H., Sulaiman S.K., Okada K., Ahmad Z.A. (2011). Some ceramic properties of clays from central Cambodia. *Applied Clay Science*, 53, 33–41.
- Njaya, D., Hajjaji, M., Njopwouo, D., 2012. Effects of some processing factors on technical properties of a clay-based ceramic material. *Appl. Clay Sci.* 65–66:106–113.
- Nkalih M A., 2016. *Cartographie et propriétés physico-chimiques des argiles de fouban (Ouest-Cameroun)*. Thèse Doct. Univ Liège (Belgique), 190 pp.
- Nzeukou Nzeugang A., Kamgang Kabeyene V, Medjo Eko R, Melo Chinje U, Njaya A, Lemougna Ninla P and Fagel N., 2013. Industrial Potentiality of Alluvial Clays deposits from Cameroon: Influence of Lateritic clayey admixture for Fired Bricks Production. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1,236-244.
- OBERT O., 1986. *Etude géologique des Babors orientaux (domaine tellien d’Algérie)*. Thèse de Doctorat d’Etat, Paris, France, 635 pages.
- Office national de la Recherche Géologique et Minière (ORGM), 1999. *Livret des substances utiles non métalliques de l’Algérie (Wilaya de Jijel)*. Edition du service géologique de l’Algérie (Boumerdès), 60p.
- Pardo, F., Meseguer, S., Joran, M.M., Sanfeliu, T. and Gonzalez, I., 2011. Firing transformations of Chilean clays for the manufacture of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 51(1–2): 147-150.
- Pialy, P., 2009. *Etude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) : minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d’élasticité*. Thèse doct. Univ. Limoges, 1-130p.
- Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., and Delgado, A. H., 2008, *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, Elsevier Science.
- Raoult, J.F., 1982. Le flysch maurétanien de Guerrouch: cadre structural, données sédimentologiques et géochimiques (Petite Kabylie, Algérie). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 3, 611–626.
- Raoult J.F., 1974. *Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du constantinois, (Algérie)*. *Mém. Soc. Géol. France*, 53, pp 121-163.

- Raoult J.F., 1972. Précision sur le flysch massylien : série stratigraphique, variation de faciès, nature du matériel remanié (Nord du constantinois, Algérie). *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord.* T. 63 (1-2), pp.73-92.
- Raoult J.F., 1969. Relation entre la dorsale kabyle et les flyschs sur la transversale du Djebel Rheidir; Phase tangentielle éocène, paléogéographie (Nord du Constantinois, Algérie). *Bull. Sol. géol. France*, pp 523-543.
- Riccardi, M. P., Messiga, B., and Duminuco, P., 1999. An approach to the dynamics of clay firing: *Applied Clay Science*, v. 15, no. 3–4, p. 393-409.
- Russel J. D, Fraser A. R., 1994. Infrared methods. *Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods / ed. par M. J. WILSON.* London: Chapman and Hall,) p. 11-67.
- Salerno. P, Asenjo. M. B, Mendioroz. S., 2001. Influence of preparation method on thermal stability and acidity of Al–PILCs, *Thermochimica Acta*, 379; 101-109.
- Sdiri, A., Higashi, T., Hatta, T., Jamoussi, F., Tase, N., 2010. Mineralogical and spectroscopic characterization and potential environmental use of limestone from the Abiod formation, Tunisia. *Environ. Earth Sci.* 61:1275–1287
- Semroud B., Ouabadi A., Belanteur O., 1992. Les granitoïdes associés à la chaîne alpine en Algérie du Nord. *Bull. Ser. géol.* Vol.9.N°1. pp 3-8.
- Shepard, F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sediment. Petrol.* 24, 151.
- Strazzera, B., Dondi, M., Marsigli, M., 1997. Composition and ceramic properties of tertiary clays from southern Sardinia (Italy). *Appl. Clay Sci.* 12:247–266.
- Thevenot, F., 1992. Céramiques composites à particules : cas du frittage-réaction, Paris, Spetma.
- Thorez J., 2003. L’argile, minéral pluriel. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège.* Vol. 72, 1, 19-70.
- Thorez, J., 1976. *Practical Identification of Clay Minerals.* G. Lelotte, Ed., Dison, Belgium: 108p.
- Traoré K., Blanchart P., Jernot J.P., Gomina M., 2007. Caractérisation physicochimique et mécanique de matériaux céramiques obtenus à partir d’une argile kaolinique du Burkina Faso. *ScienceDirect, C.R., Chimie*, 511-517p.
- Trindade, M.J., Dias, M.I., Coroado, J. and Rocha, F., 2009. Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing: A comparative study between calcite and dolomite rich clays from Algarve, Portugal. *Applied Clay Science*, 42(3–4): 345-355.
- Van Jaarsveld, J., van Deventer, J., Lukey, G., 2002. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chem. Eng. J.* 89, 63–73.
- Van der Marel, H.W., Beutelspacher, H., 1976. *Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and Their Mixtures.* Elsevier, Amsterdam.
- Velde, B., 1992. *Introduction to Clay Minerals, Chemistry: Origins, uses and Environmental Significance.* Springer Verlag, 198p.
- Velde, B & Meunier, A., 2008. *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks.* Berlin, Springer, 406p.
- Velde, B., 1978. Infrared spectra of synthetic micas in the series muscovite-MgAl celadonite. *Am. Mineral.* 63, 343–349.
- Vila J. M., 1980. La chaîne alpine d’Algérie nord orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse Doctorat d’Etat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 665 pages.
- Weng, C.-H., Lin, D.-F., and Chiang, P.-C., 2003. Utilization of sludge as brick materials: *Advances in Environmental Research*, v. 7, no. 3, p. 679-685.
- Wetshondo Osomba D., 2012. Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la province de Kinshassa, Thèse Doctorat Université de Liège, 337p.
- Wildi W., 1983, La chaîne tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn. géog. Phys.*, (24), 3, pp 201-297.

- Wilson, M.J., 1966. The weathering of biotite in some Aberdeenshire soils. *Mineralogical Magazine*, 25, 269-276. Tel-00605819, version 1 - 4 Jul 2011- 143.
- Winkler, H.G.F., 1954. Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. *Ber. Dtsch. Keram. Ges.* 31, 337–343.
- Yanagisawa, Y, Takaoka, K. Yamabe, S., and T. Ito., 1995. Interaction of CO with magnesium oxide surfaces: a TPD, FTIR, and Cluster-Model calculation study. *Journal of Physical Chemistry*, 99:3704–3710.

ANNEXES

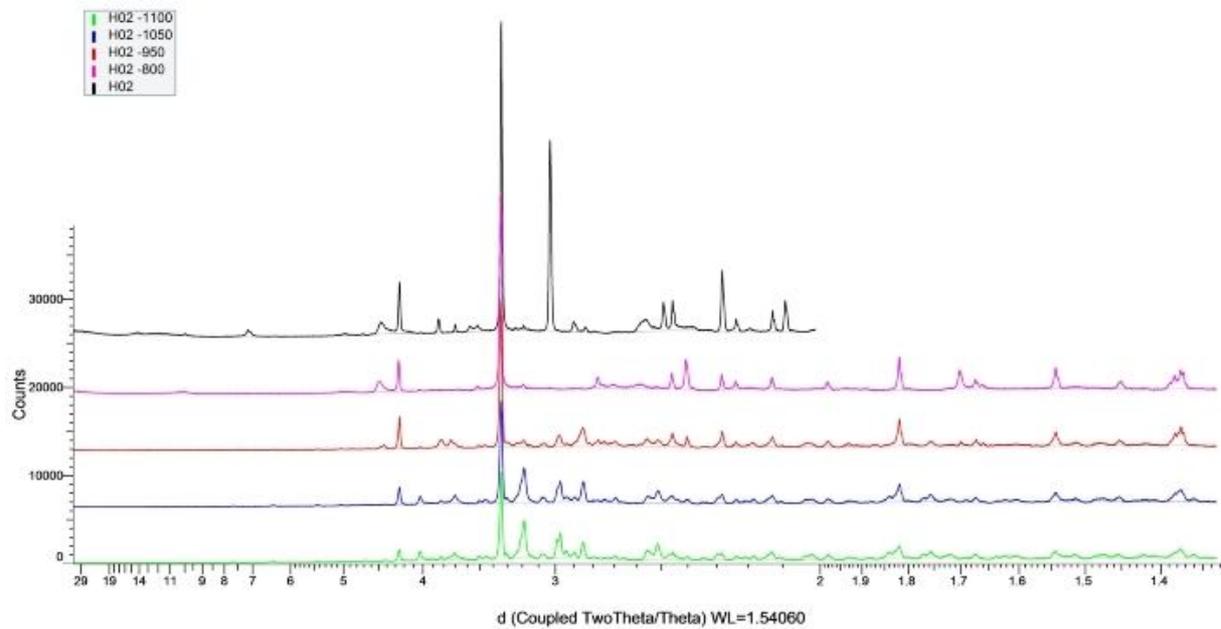
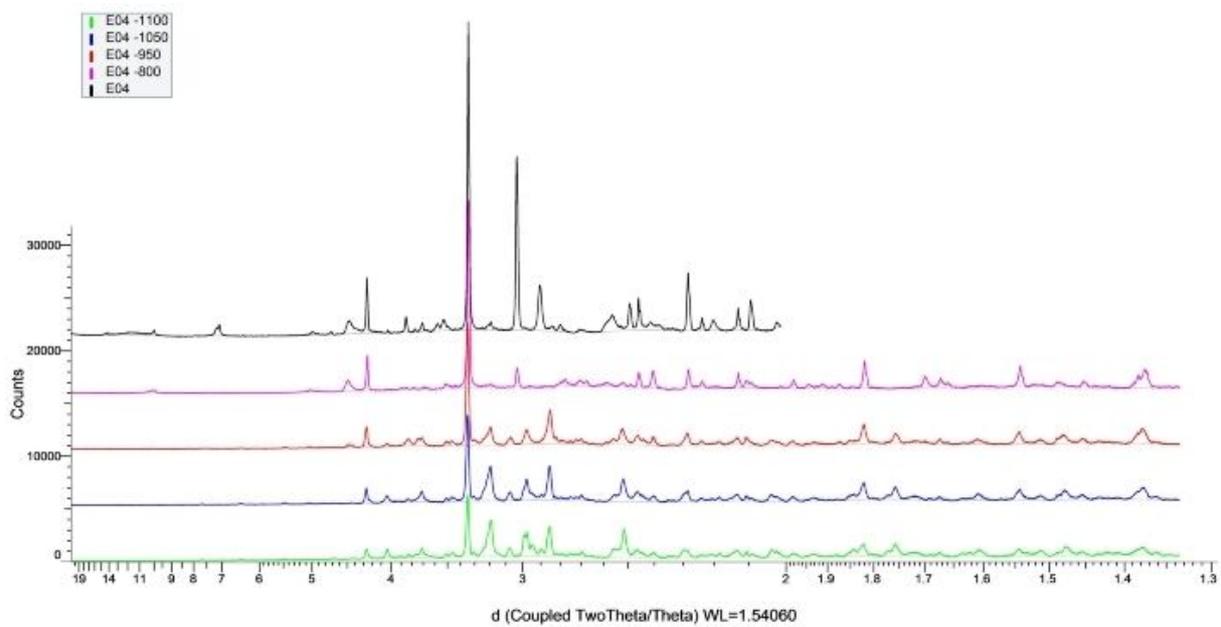
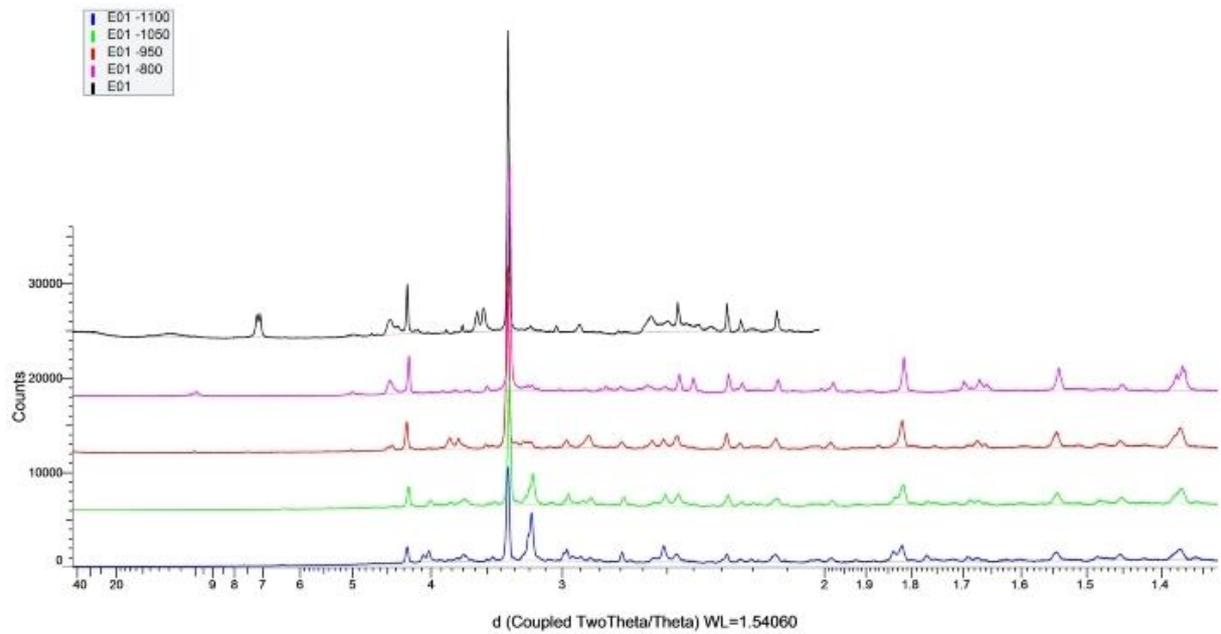
Planche 1 : Spectres DRX d'argiles cuites à différentes températures (Bulk, 800, 950, 1050 et 1100°C), pour les échantillons E01, H02, S02, ST1, ST2, ST3, ST4, ST5, ST6 et T02.

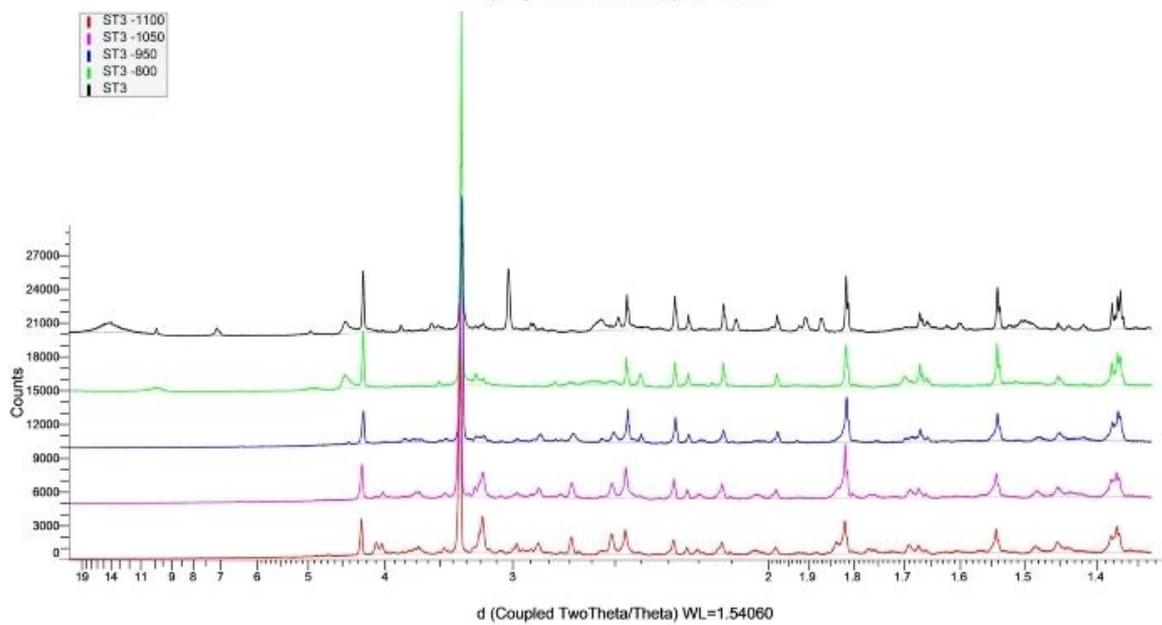
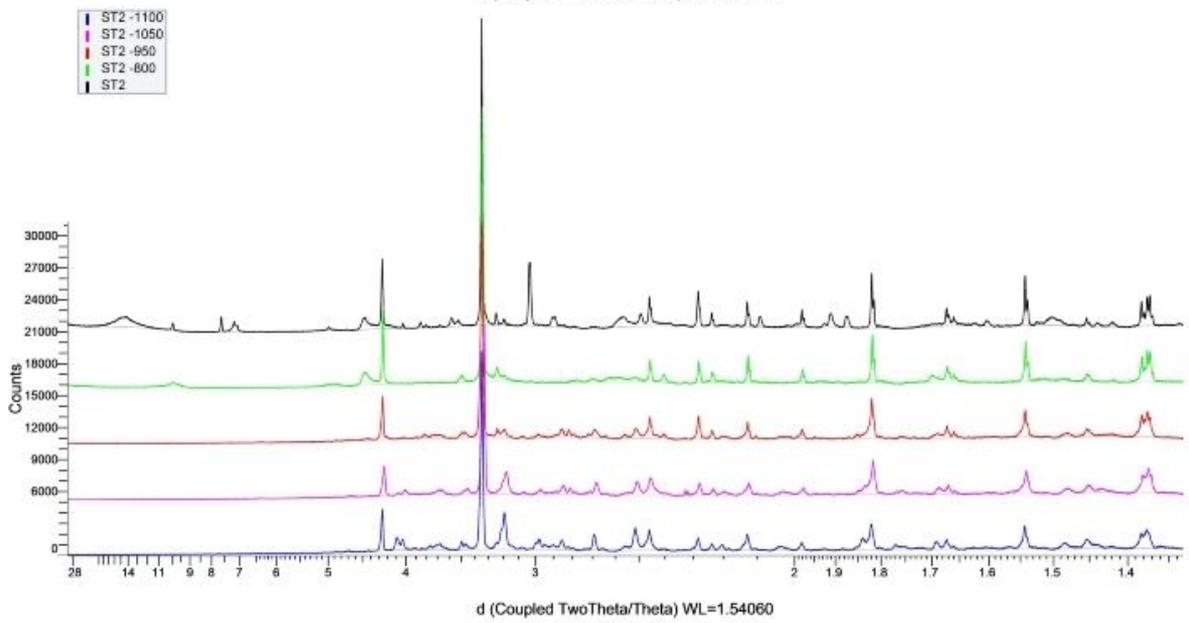
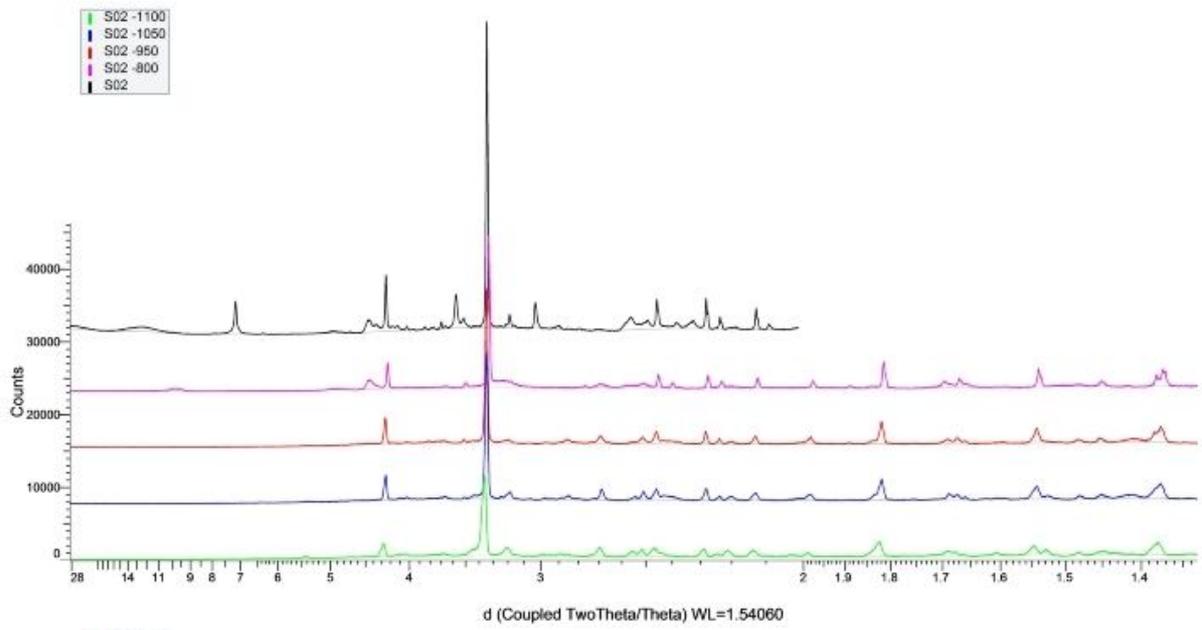
Planche 2 : Spectres DRX d'argiles brutes des échantillons argileux étudiés (K01, K02, K03), (H01, H02, H04), (T01, T02, T03, T04), (E01, E02, E03, E04), (S01, S02, S03, S04, S05), (M01, M02), (D01, D02, D03, D04, D05), (C01, C02, KT2, KT3).

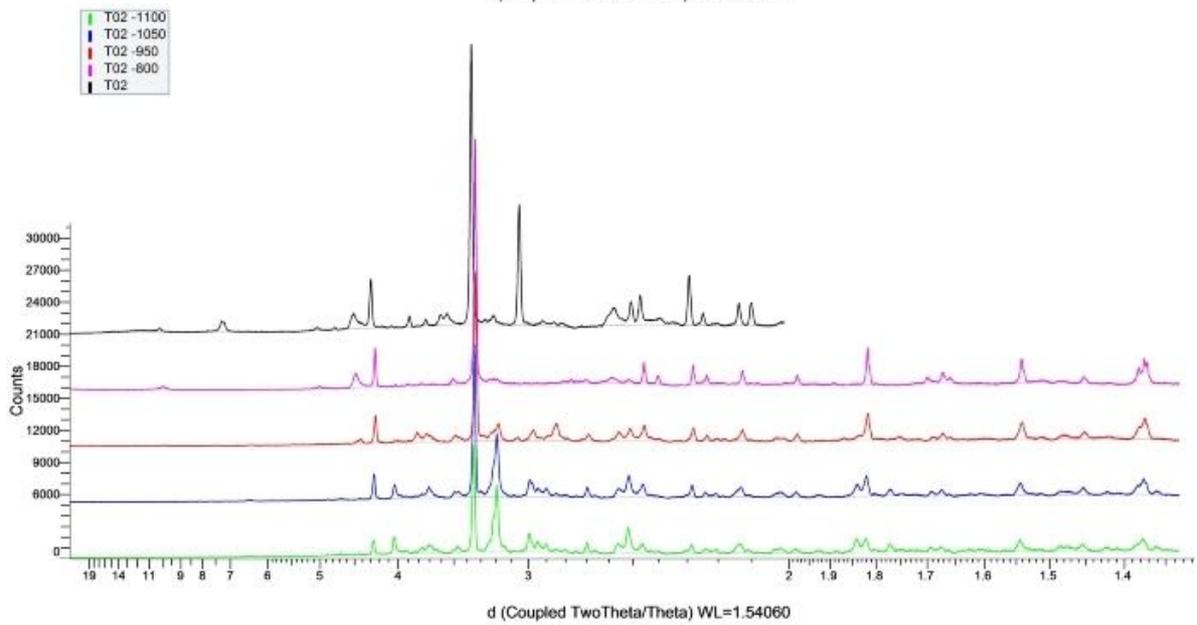
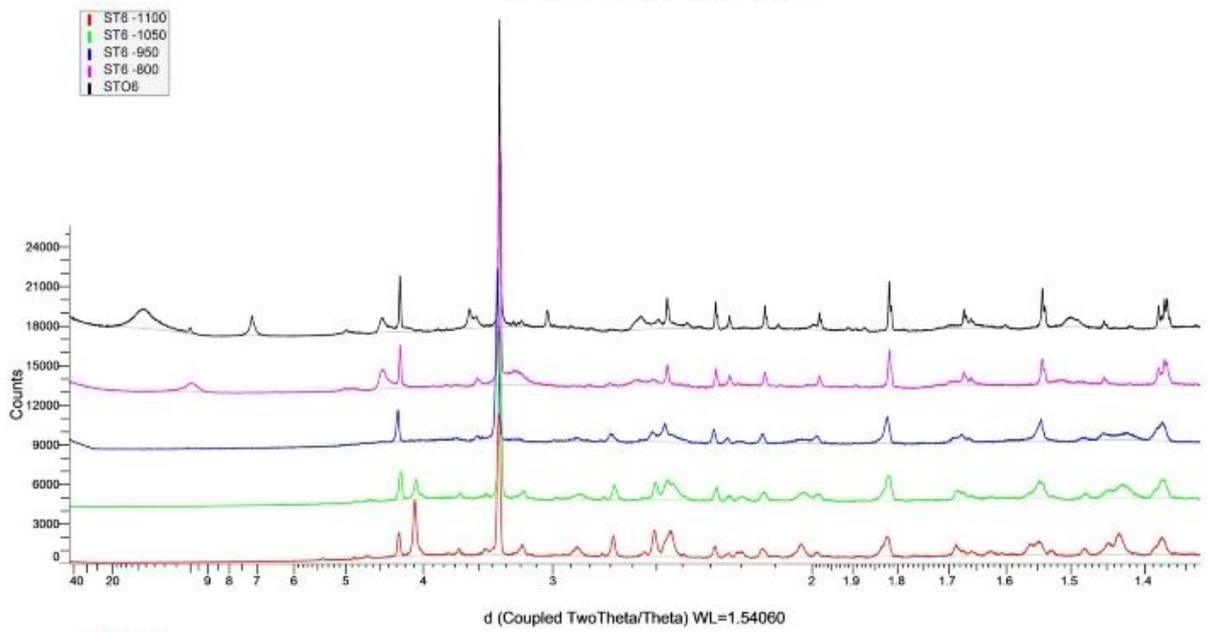
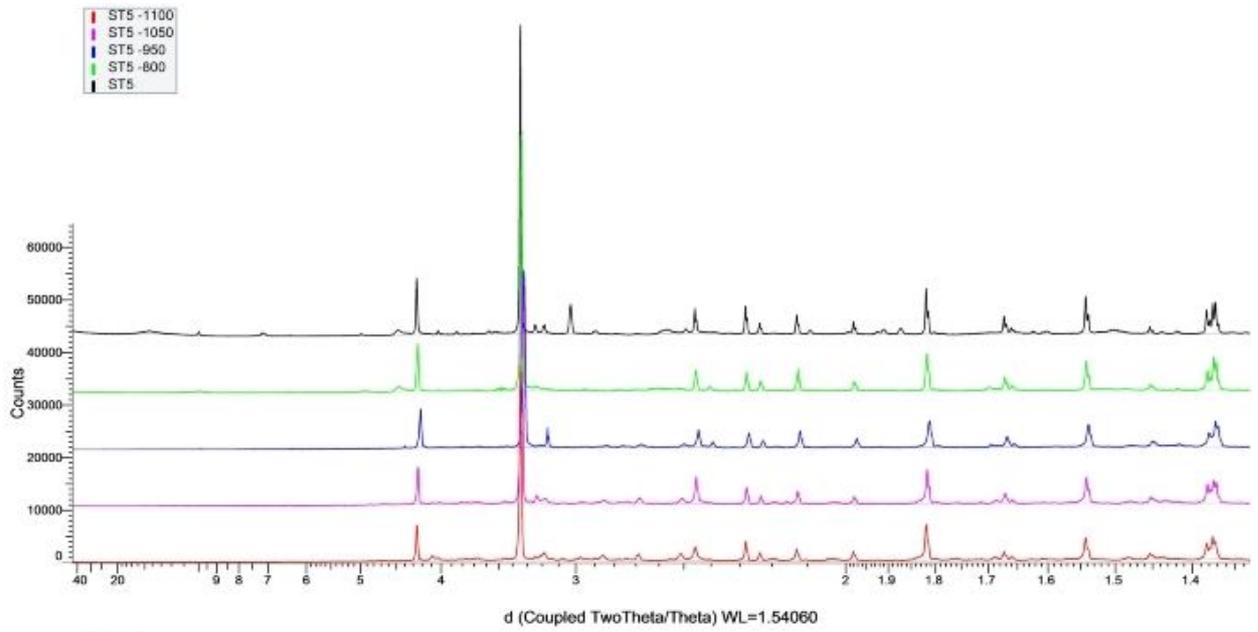
Planche 3 : Photos illustrant la couleur des argiles étudiées après cuisson.

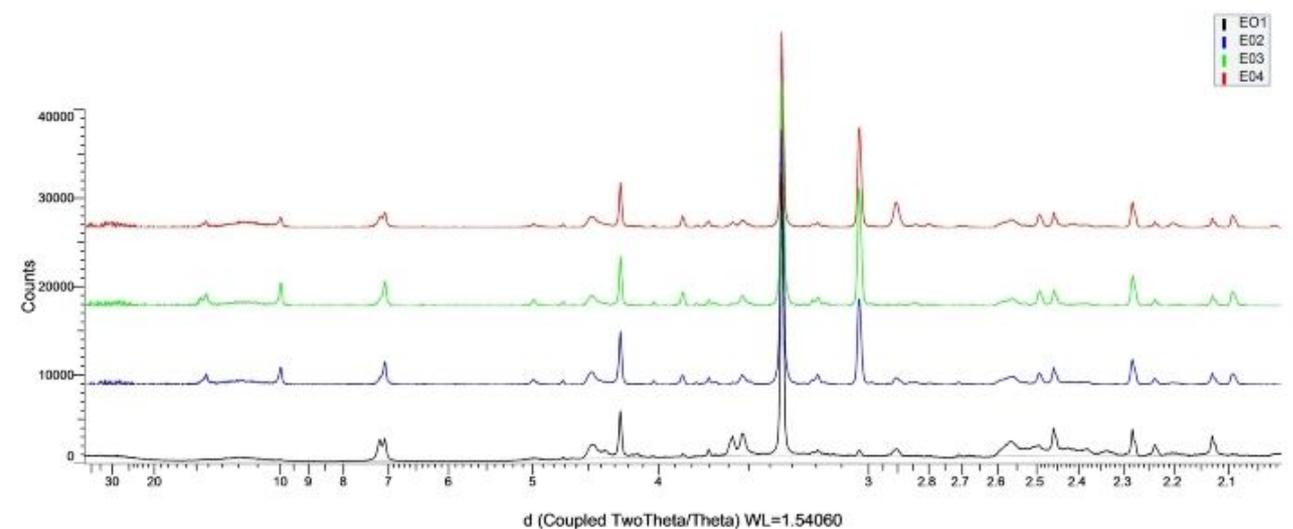
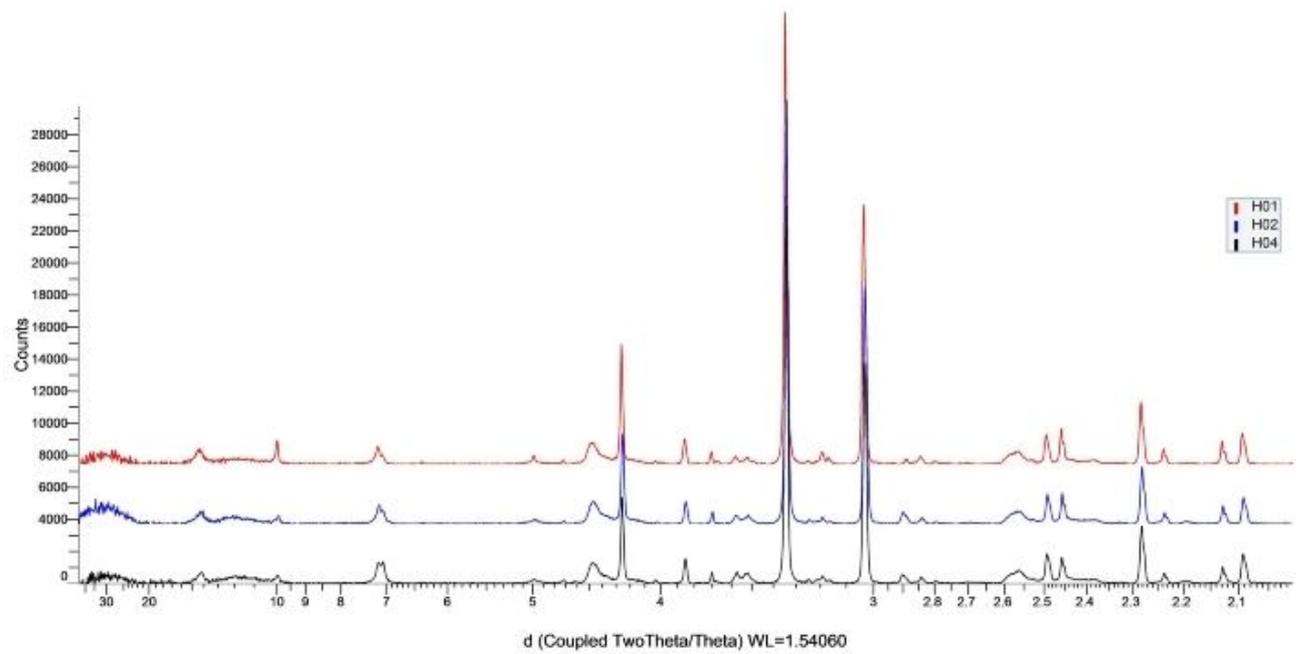
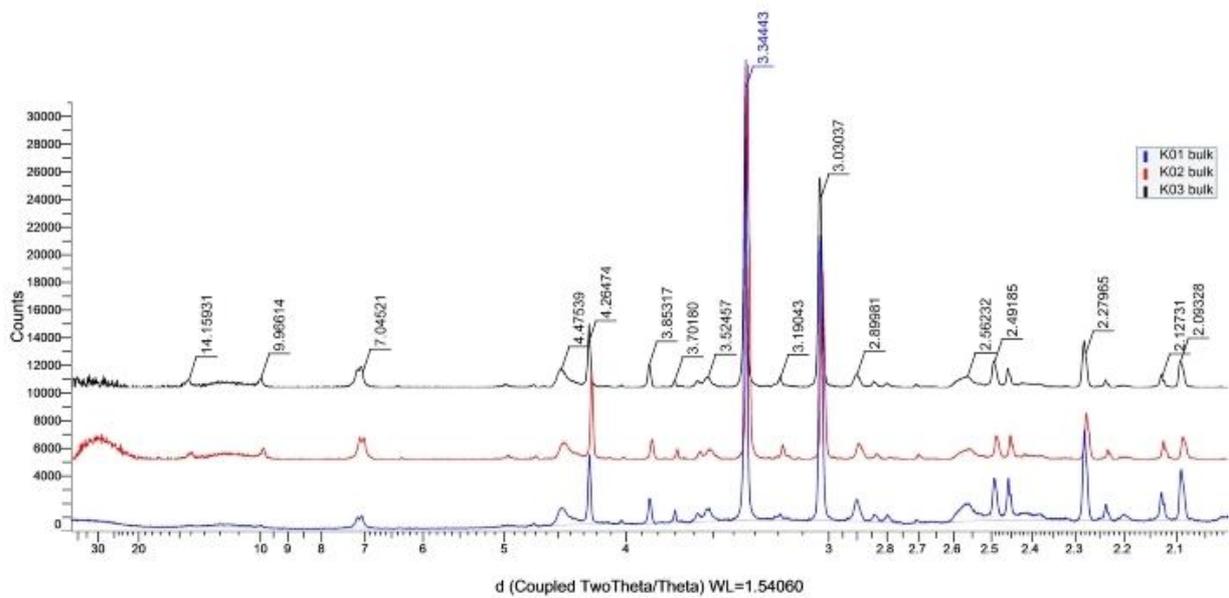
Planche 4 : Photos illustrant les sites au niveau desquels on a effectué nos prélèvements (Emir abdelkader, Settara, Taher et Djimla).

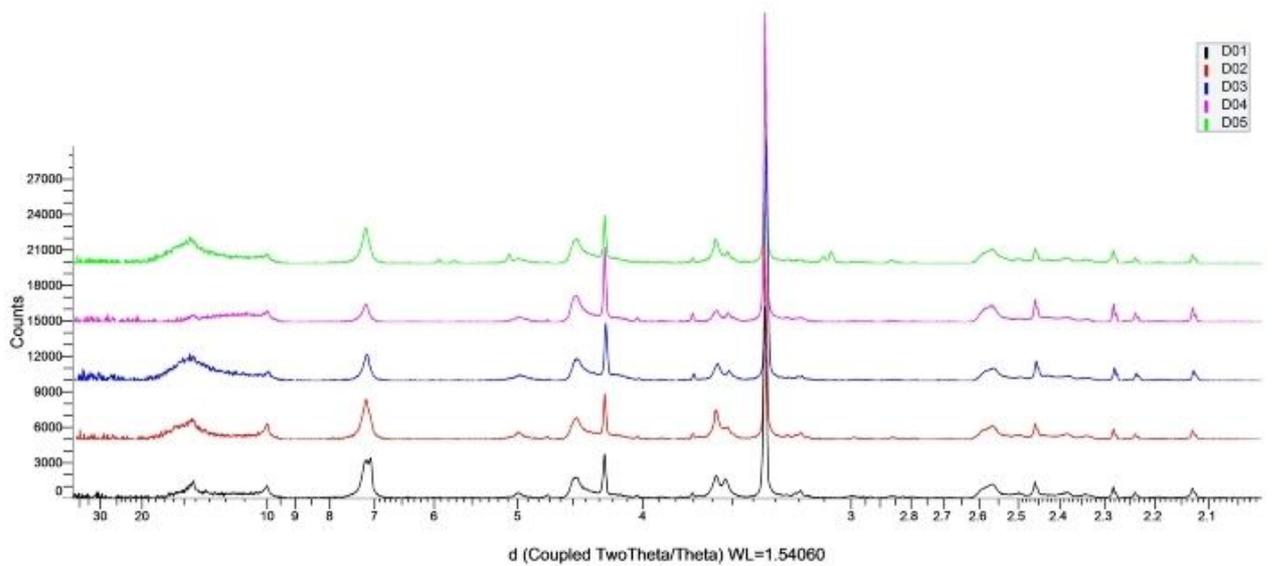
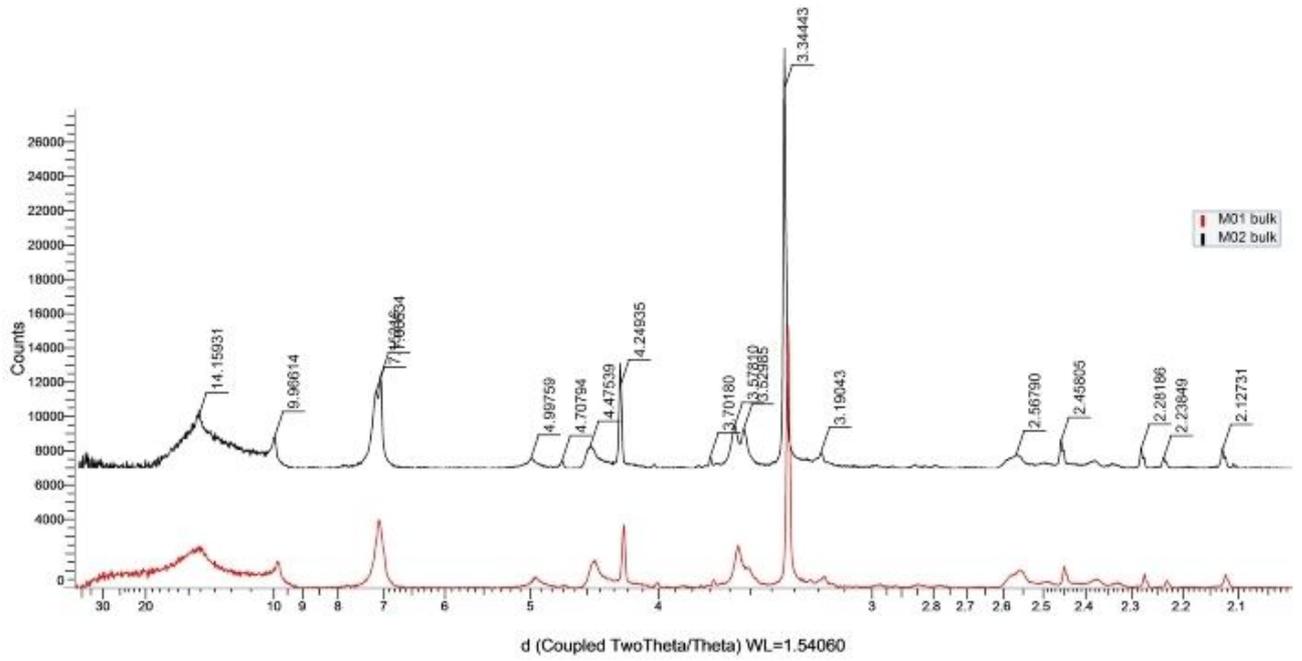
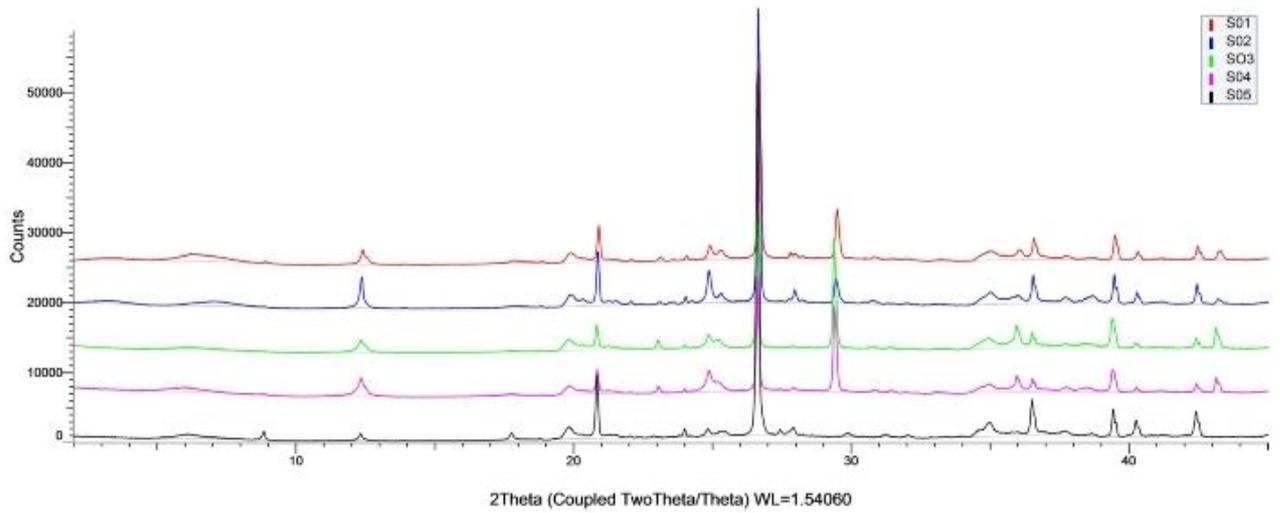
Planche 5 : Photo illustrant les travaux de laboratoire (analyse minéralogique par DRX avec diffractomètre Bruker D8 Advance, du Laboratoire Argile, Géochimie et Environnement sédimentaires « AGEs », Liège, Belgique).











C01
C02
KT2
KT3

