

Institut National Agronomique (I.N.A – El-Harrach, Alger)
These Présentée en vue de l'obtention du diplôme de magister en Sciences Agronomiques
Spécialité Pédosphère

***Caractérisation physico-chimique,
micromorphologique et minéralogique de
quelques croûtes calcaires du nord de
l'Algérie***

Présenté Par Melle MAZOUZI Sabra
Directeur de thèse M. DJILI K.

Devant le Jury : M. DAOUD Y. Président M. DRIDI B. Examineur M^{me}. KOURGLI N. Examineur

Table des matières

REMERCIEMENT . .	5
Résumé . .	6
Abstract . .	7
Introduction générale . .	8
Chapitre I: Bibliographie . .	10
Introduction . .	10
1-Genèse des croûtes calcaires . .	10
2 - Conditions de formations de croûtes calcaires . .	11
2.1- Les conditions climatiques . .	11
2.2- La roche d'accueil . .	11
2.3- La topographie . .	12
3- Classification de croûtes calcaires . .	12
4- Description des formes individualisation et d'accumulation du calcaire . .	13
5- Répartition des croûtes calcaires . .	14
6- Caractéristiques physico-chimiques des accumulations calcaires . .	15
6.1- Le calcaire total . .	15
6.2- Porosité et densité . .	16
6.3- La solubilité de carbonate de calcium . .	16
7 - Forme et taille de cristaux de calcite . .	19
8- Diagenèse du calcaire . .	22
8.1- Dessiccation . .	22
8.2- Cimentation . .	22
8.3- Recristallisation . .	24
8.4- L'épigénie calcaire . .	25
9- Décarbonatation . .	25
10- L'altération . .	25
Chapitre II: Matériel et méthodes . .	27
Introduction . .	27
1- Les analyses chimiques . .	29
2- Les analyses physiques . .	29
3- L'analyse micro morphologique . .	29
4- La minéralogie . .	30
Chapitre III: Résultats et discussion . .	31
1- La morphologie des croûtes . .	31
2- La micro-morphologie des croûtes . .	47
3- les caractéristiques analytiques des croûtes étudiées . .	64
4- La minéralogie des croûtes . .	66
Discussion générale . .	67
Conclusion générale . .	70
Références bibliographiques . .	72

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui au long de mon parcours m'ont apporté leur aide, leurs conseils et leurs encouragements.

Je tiens tout d'abord à remercier mon Directeur de thèse, Monsieur K. DJILI Professeur à l'Institut National Agronomique d'El-Harrach, d'avoir accepté de diriger ce travail. Je voudrais le remercier, tout particulièrement, pour son encadrement de qualité, sa disponibilité et son aide de chaque instant.

j'exprime mes sincères remerciements à Monsieur Y. DAOUD, Professeur à l'Institut National Agronomique d'El-Harrach, pour l'honneur et le plaisir qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury, je le prie d'accepter le témoignage de ma respectueuse reconnaissance.

je remercie Monsieur B. Dridi, Maître de conférences à l'Institut National Agronomique d'El-Harrach, d'avoir accorder un intérêt à mes travaux et accepter d'examiner cette thèse, qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

je remercie également, Mme N. Kourgli, Chargé de cours à l'Institut National Agronomique d'El-Harrach, qui ma honoré en jugeant ce travail.

j'exprime ma reconnaissance au personnel du Département de Science du Sol pour leurs aides et leurs collaborations.

je n e pourrais oublier Melle Larbi Fatiha, pour son aide, sa gentillesse et sa patience. Qu'elle trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Résumé

La présente recherche a pour objectif d'étudier les caractéristiques morphologiques, micromorphologiques, minéralogiques et analytiques de vingt une croûtes calcaires provenant de la région Algéroise, de Berrouaghia et le Nord Ouest d'Algérie. Toutes les croûtes étudiées proviennent d'horizon d'accumulation calcaire, de sols rouges lessivés développés sur de différentes roches mères, qui peuvent être calcaires ou non. L'observation morphologique a montré que ces croûtes sont généralement peu friables quand elles sont blanchâtres et très dures quand elles sont de couleur rosâtre à saumon. Les résultats ont montré une certaine hétérogénéité micromorphologique dans les différentes croûtes étudiées. Les vingt une croûtes calcaires ont le même cortège minéralogique constitué essentiellement par la calcite et le quartz. Les résultats ont montré aussi que ces croûtes ont des teneurs en calcaire très élevés, des densités apparentes et réelles également très élevés, des porosités variables et des solubilités faibles.

Cette étude a montré que les croûtes calcaires étudiées se différenciées très peu les une des autres quand elles se situent dans une même région, ainsi qu'entre région différente.

Mots clés : Croûte Calcaire, Calcaire, Calcite, Quartz, Densité, Porosité, Solubilité.

Abstract

This work presents a study of a morphological, micromorphological, mineralogical and analytical of twenty-one calcretes from Algiers, Berroughia and North –West Algeria region.

All of the calcretes came from horizon accumulation of calcareous. Washed red soils, developed on different bed rock which can be calcareous or not.

The morphological observation has shown that calcretes are generally little hard when they are white and very hard when they are roses to saumon color. The results have shown certain micromorphological heterogeneity in the different calcrete. The twenty-one calcrete have the same mineralogical procession, constituted essentially by calcite and quartz. The results have also shown that calcrete are a high level calcareous high real and apparent density, various porosity and weak solubilities.

This study showed that the calcretes studied is very little differentiated one of the other when they fall within the same region, as well as between different regions.

Key words : Calcrete, Calcareous, Calcite, Quartz, Density, Porosity, Solubility.

Introduction générale

Les croûtes et les encroûtements calcaires sont des horizons spéciaux qui occupent une place importante dans la définition des sols calcimorphes, surtout en Afrique du Nord. Leur découverte remonte au siècle dernier en Afrique du Nord et dans l'ouest des Etats-Unis (Bock, 1983). Cependant, les controverses sur les croûtes calcaires sont les plus nombreuses et surtout les plus anciennes.

Aubert (1967) définit les croûtes calcaires comme des bancs peu épais qui affleurent à la surface du sol où à faible profondeur et qui présentent une zone litée très dur suivie d'une masse dure souvent noduleuse sur un niveau tendre granuleux. Il considère que la plus grande partie de ces croûtes est fossile et daterait du quaternaire ancien même s'il s'en forme encore. De même, Durand (2005) considère les croûtes calcaires comme des formations continentales superficielles carbonatées qui peuvent s'étendre sur de vastes domaines géographiques dans les régions à climat aride et semi-aride, et qui constituent des marqueurs stratigraphiques d'une grande importance en géologie du quaternaire. L'apport de contraintes temporelles sur la formation et l'évolution des croûtes est déterminant pour la compréhension des conditions paléo- environnementales et physico-chimiques qui ont conduit à leur formation.

La genèse des croûtes calcaires a fait l'objet de nombreuses études. Selon Verrecchia et Freydet (1987), les premiers travaux furent principalement d'ordre descriptif, conduisant à des nomenclatures fondées sur les variations des taux de CaCO_3 et de l'induration des accumulations calcaires. Le modèle per-ascensum avancé au début du siècle a été très tôt remplacé par la théorie per-descensum avancée par les pédologues. Simultanément, la thèse sédimentaire fut proposée par des chercheurs franco-belges travaillant en Afrique du Nord (Vogt, 1987).

Les travaux effectués par Pouget et Rambaud (1985) sur les steppes algériennes (climat méditerranéen aride avec pluviométrie comprise entre 100 et 400mm) ont montré que les vastes surfaces encroûtées du quaternaire ancien et moyen attestent de l'extension considérable des sols à croûte calcaire sur des matériaux très divers (alluvions, colluvions de piedmont, argiles sableuses rouges du tertiaire continental). De même, Ruellan (1970) et Halitim (1988) indiquent que la morphologie des croûtes calcaires présente une très grande diversité en fonction de nombreux facteurs tels que l'âge de la surface encroûtée, la nature du matériau et la topographie.

La solubilité du carbonate de calcium a fait l'objet de plusieurs recherches. Dans ce sens, Gras (1974) note que la solubilité du carbonate de calcium pur cristallisé sous forme de calcite ou d'aragonite dans l'eau d'anhydrique met en jeu un certain nombre d'équilibres chimiques entre les différents constituants ; c'est la connaissance de ces équilibres simultanés qui permet de résoudre le problème de l'évolution des carbonates. Scott et al (1992) confirment que les roches calcaires ont une solubilité qui diminue quand le pH augmente. De même, William et al (1986) indiquent que la solubilité du calcaire est influencée par la taille des particules. En effet, plus les particules sont fines, plus leur surface spécifique augmente ce qui induit une solubilité rapide ; pour les particules grossières nous observons un phénomène inverse. Bathurst (1971) montre que la solubilité du carbonate

de calcium, dans l'eau pure et en vase clos, est d'environ 14.3 mg/l à 25° C et en présence de l'atmosphère elle peut atteindre 50 mg/l.

La porosité est l'une des principales caractéristiques physiques des croûtes calcaires. Selon Durand (1978), elle intervient dans la définition du pédoclimat. Le milieu très poreux, donc très aéré et séchant, permet une sursaturation rapide des solutions par évaporation tant en été qu'en hiver. De ce fait, la cristallisation du carbonate de calcium sera rapide et pourra s'orienter vers des formes en aiguilles de calcite, en opposition avec la forme en rhomboèdres qui serait plus spécifique d'une croissance lente en milieu aqueux non saturé. Cailleau et al (1980) indiquent que la porosité régulerait l'évaporation des solutions et agirait sur le comportement chimique des solutés. L'intensité de cette évaporation est bien évidemment fonction des conditions climatiques. Selon Mathieu et Thorez (1976), les croûtes zonaires et les encroûtements calcaires ont une faible porosité et risquent d'être imperméables s'ils ne sont pas fissurés. Par contre, les calcaires pulvérulents ont une porosité plus forte et sont donc plus perméables.

Certains auteurs comme Ruellan (1976) par exemple, font intervenir la teneur du carbonate de calcium dans la classification des accumulations calcaires. Ainsi, la teneur du carbonate de calcium dépasse les 60% dans un encroûtement calcaire, dans la croûte calcaire elle fait plus de 70% et dans la dalle compacte elle fait plus de 90%. Mais pour plusieurs auteurs, les teneurs en calcaires sont données à titre indicatif lors de leurs études. En Algérie, Djili (2000) a montré que la distribution des formes du calcaire dans l'espace et dans le profil concorde avec celle des taux de calcaire, les faibles taux de calcaire et les formes diffusent se localisent nettement mieux dans la frange nord du pays dans les horizons de surface. Les formes continues et les forts taux de calcaire concernent surtout la frange sud du pays et les horizons de profondeur.

Les études sur les croûtes calcaires des sols d'Algérie ont été effectuées essentiellement en milieux arides et semi-arides, en particulier dans la région steppique et les hauts plateaux. Elles se sont intéressées à leur processus de formation et leur signification paléo climatique. Peu de travaux ont été consacrés à leur caractérisation. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail qui a pour objectif de faire une description morphologique, physico-chimique, micro morphologique et minéralogique de quelques croûtes calcaires situées dans la zone la plus septentrionale de l'Algérie et dans un contexte climatique plus humide que celui des régions steppiques.

Pour ce faire, nous avons structuré cette étude en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les accumulations calcaires.
- Le second chapitre porte sur le matériel et les méthodes employées dans cette étude.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats. Nous terminerons cette étude par une conclusion générale.

Chapitre I: Bibliographie

Introduction

Les croûtes calcaires sont des formations très répandues dans les régions semi-arides. Elles ont été décrites et étudiées par de nombreux auteurs, en particulier au Maghreb où des faciès-types ont pu être reconnus (Boudet et Laouina, 1989).

1-Genèse des croûtes calcaires

Le débat sur la genèse des croûtes calcaires continentales a commencé il y a plus d'un siècle. Plusieurs théories ont été proposées :

- **L'hypothèse per ascensum** fait appel aux processus liés à l'évaporation. Selon Ben Akacha et al. (2005), l'ascension et l'évaporation des eaux de la nappe phréatique ou de la zone vadose à la surface du sol provoquent la cristallisation des minéraux qu'elles contiennent. Ces eaux d'origine phréatique remontent par capillarité jusqu'à la surface, puis s'évaporent en cristallisant les sels solubles tels que les gypses, les carbonates et plus rarement de la silice.
- **L'hypothèse per descensum** est retenue par Ruellan (1967) et Vogt (1984). Sous climat aride ou semi-aride, la croûte se forme par lessivage de la partie supérieure du sol et l'accumulation carbonatée s'opère à la base de la zone lessivée ; l'horizon B migre vers le bas, de quelques centimètres à plus de 2m et la croûte s'épaissit grâce à cette descente. L'érosion peut décaper entièrement l'horizon A, faisant affleurer l'encroûtement. Aux carbonates provenant du lessivage peuvent s'ajouter des apports latéraux en solution. Cette théorie n'a plus subi de modifications significatives jusqu'à nos jours.
- **L'hypothèse sédimentaire** est née dans les années 1937-1938. Selon Durand (1959, 1963), ces croûtes seraient des constructions sédimentaires dues aux eaux de ruissellement laminaire ; mais cette hypothèse n'a été que rarement suivie.
- Ces trois hypothèses ne prennent en considération que la circulation du carbonate de calcium à l'état dissous, or la mise en solution du calcaire est un phénomène très lent et ne peut expliquer les énormes volumes mobilisés dans les croûtes calcaires. D'autres modèles ont été alors envisagés.
- **Le modèle in situ** : le carbonate provient ici directement de l'altération (amenuisement, désagrégation jusqu'au stade pulvérulent, puis recristallisation) d'une roche mère carbonatée (craie, calcaire, dolomie). C'est ce que l'on trouve par exemple dans les rendzines grises actuelles sur colluvions sur craie (Freytet et Plaziat, 1979).
- **Le modèle géochimique** : il s'agit de l'épigénie calcaire. C'est la transposition ou remplacement iso structural et iso volumétrique des minéraux lors de l'altération ferrallitiques au domaine carbonaté. La croûte se développe sur des roches non

carbonatés à partir d'apport éolien ; le carbonate corrode son substrat et le remplace (Freytet et Verrecchia, 1989).

· **Le modèle biologique** : l'évaporation au niveau des racines des solutions du sol produit un remplacement de l'ion Mg^{++} par Ca^{++} sur le complexe absorbant. Boulaine (1961) observe que les racines jouent un rôle fondamental dans l'accumulation du calcaire. En plus de cette évaporation, il existerait peut être des accumulations à partir de déjections et sécrétions de certains animaux du sol (Benmaati, 1993).

2 - Conditions de formations de croûtes calcaires

2.1- Les conditions climatiques

La majorité des auteurs reconnaissent comme climat de formation des croûtes calcaires un climat aride ou semi-aride avec des précipitations moyennes comprises entre 100 et 500 mm /an et pour avoir un optimum de formation des précipitations moyennes comprises entre 150 et 250 mm/an (climat subaride) (Briot, 1976).

Carnicelli et al (1989) notent que les conditions climatiques idéales pour la formation des croûtes calcaires sont ni trop sèches ni trop humides. Ces auteurs indiquent que les conditions optimales se vérifient en général avec une pluviométrie moyenne de 350 mm. De même Djili et al (1999) confirment que la distribution verticale et latérale des teneurs et des formes du calcaire dans les sols est en relation étroite avec le régime pluviométrique actuel à partir d'une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 350 mm. Cependant, des divergences existent. Ruellan (1967), par exemple, écrit que l'optimum pour la formation des croûtes calcaires du point de vue des précipitations se situe entre 500 et 700 mm/an et que pour des précipitations inférieures à 200 mm/an, les croûtes calcaires ne peuvent pas se former. Par contre, pour Boulaine (1966), la formation des croûtes s'effectue sous un climat xérothermique, selon la classification climatologique de Gaussen, avec des précipitations moyennes annuelles entre 450 et 500mm, une sécheresse de 100 à 150 j/an et une température moyenne annuelle de 18° C.

Plet-Lajoux (1971) montre que les encroûtements importants de carbonate de calcium formés à partir des eaux d'une nappe phréatique ne nécessitent pas de phases de dessiccation, ils peuvent apparaître et se consolider en milieu saturé en eau, sous la seule influence d'une élévation de température. Cet auteur conclue que les encroûtements calcaires peuvent se former au sein du milieu naturel, dans des situations extrêmement variées.

2.2- La roche d'accueil

Il existe de nombreuses roches d'accueil. Les plus favorables sont les roches riches en carbonate de calcium (calcaires marneux, grès calcaires). Mais les roches riches en silicates servent également de roche d'accueil. Les alluvions grossières peuvent servir aussi de roche d'accueil ainsi que des sédiments, carbonatés ou non, plus fins (Briot, 1976).

2.3- La topographie

Gouidie (1972) observe que les calcrêtes dans les régions semi arides sont fréquentes sur des pentes de 25%. Elles peuvent s'installer sur des pentes allant jusqu'à 17,3% mais, en général elles se trouvent sur des surfaces légèrement pentues mais aussi en plaine et dans les dépressions. Bahri et al (1987), en étudiant la morphologie des accumulations calcaires d'une séquence de la région de Beja en Tunisie, ont montré la forte variation verticale puis latérale de ces accumulations et ce, sur des distances très courtes, d'ordre métrique. De même, cette étude a montré que la dynamique actuelle du calcaire en relation avec cette forte différenciation morphologique varie en fonction de la position topographique de ces sols le long de la même séquence.

3- Classification de croûtes calcaires

Certains auteurs, tel que Ruellan (1976) font intervenir la dureté et la teneur en carbonate de calcium parmi d'autres facteurs dans leur classification (Tableau I). Brown (1956) cité par Briot (1976) a basé sa classification principalement sur la dureté. Ainsi, il a distingué deux grands types de croûtes calcaires, les indurées et les friables. Ce même auteur indique que de nombreux auteurs utilisent la morphologie dans leur classification mais uniquement pour des subdivisions. Seuls les auteurs allemands utilisent celle-ci comme facteur déterminant dans leur classification.

Boulaine (1966) classe les croûtes calcaires en stade jeune et stade évolué. Cette classification est basée sur l'augmentation du carbonate de calcium et sur la dureté. Reeves (1970) divise sa classification en trois stades (jeune-mature-sénile). La croûte calcaire jeune est généralement un carbonate blanc, pulvérulent entourant les grains du matériel parental. La croûte calcaire mature est une croûte calcaire supérieure avec accessoirement des bandes horizontales de carbonates, entourés par une profusion de petits nodules et des carbonates relativement bien cimentés, et la croûte sénile est un horizon complètement induré.

Sans en déduire un mécanisme quelconque, Buol (1965) constate dans un sol du désert de l'Arizona, par une datation au carbone 14, que l'âge de la croûte calcaire augmente avec la profondeur. Gile et al (1966) développent une classification uniquement pédologique, basée sur le principe qu'une croûte calcaire n'est le résultat que d'un seul mécanisme de formation.

Dénomination des types de répartition et d'individualisation		Définitions et descriptions sommaires	Netteté des limites des horizons	Épaisseur des horizons	Couleurs	Durété des horizons	Teneur en calcaire dans les horizons	Divers
Concentrations continues - encroûtements	Encroûtements non-feuilletés	Encroûtements massifs Horizons très calcaires, de couleur claire, à structure nodulaire et polyédrique	Limite généralement nette au sommet s'il n'y a pas de croûte, diffuse s'il y en a une. Limite diffuse à la base	Horizons Bca d'encroûtement non-feuilleté				Sous les encroûtements non-feuilletés, il y a toujours des horizons à amas friables, avec ou sans nodules
	Encroûtements nodulaires	Horizons très calcaires, de couleur massive ou polyédrique		Quelques dizaines de centimètres à quelques mètres : le plus souvent 30 à 200 cm	Rose, crème ou blanc ; plus ou moins homogène ; petites taches noires	Moyenne à forte	> 60 % Augmentation progressive du bas vers le haut	
	Encroûtements feuilletés	Croûtes Horizons très calcaires, à feuillets superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire. Épaisseur des feuillets croissante du bas vers le haut : quelques mm à quelques centimètres.	Limite : nette au sommet, diffuse à la base, diffuse entre la croûte et la dalle	Horizons Bca d'encroûtement feuilleté				Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non-feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes
Dalles compactes	Horizons très calcaires, à feuillets de croûte pétrifiés. Épaisseur des feuillets : quelques centimètres, jusqu'à 20 cm.		Quelques centimètres à plus d'un mètre	Croûte : blanc à blanc, crème parfois rose ; taches noires. Dalle : Gris ou saumon ; zones blanchâtre	Forte à très forte. Augmentation du bas vers le haut	> 70 % Augmentation progressive du bas vers le haut		
	Encroûtements pelliculaires rubanées lamellaires	Feuillets très calcaires à structures finement lamellaire, recouvrant des surfaces dures, calcaires ou non.	Limites nettes	Horizons Bca de pellicule rubanée				Se situent au sommet des encroûtements durs, feuilletés ou non. Ils peuvent aussi recouvrir des roches dures peu perméables, en général calcaires, et envelopper des rognons.
				Quelques millimètres à quelques centimètres	Blanc à saumon. Filet et lamelles sombres.	Très forte	> 80 %	

Tableau I : Les principaux types d'horizon Bca. Description macromorphologique et classification (Ruellan, 1976).

4- Description des formes individualisation et d'accumulation du calcaire

Dans les dépôts quaternaires, Ruellan (1969) indique que l'accumulation ou l'individualisation du calcaire peut se réaliser sous les formes suivantes :

- **Accumulations diffuses** : c'est un premier stade peu accentué de l'accumulation en profondeur dans un sol. C'est une accumulation sans individualisation, le calcaire restant en éléments fins mais s'accumulant surtout dans la fraction 2-20 microns. Cependant, des pseudo-mycéliums peuvent apparaître, soulignant la porosité du sol (trace des racines en particulier).
- **Amas friables, granules et nodules** : Présents dans les dépôts quaternaires et dans les sols, ce sont des concentrations de calcaire dispersées dans la masse d'un ou plusieurs horizons. De formes et de dimensions très variées (quelques mm à quelques cm), les granules et les nodules sont plus ou moins durcis alors que les amas friables ne le sont pas. Les granules ont un volume inférieur à 1 cm³.
- Les amas friables, de couleur blanche à crème, ont des contours plus ou moins nets. Il peut s'agir d'une forte concentration de calcaire bien délimitée, très blanchie. Mais cela peut être aussi de fines pellicules pénétrant la microstructure, une concentration assez faible du calcaire qui imprègne, en partie ou en totalité, un ou plusieurs agrégats. Plus ou moins durcis (souvent en fonction de l'humidité), les granules et nodules sont de couleur saumon quand ils sont très durs et tendent vers le blanc quand ils sont plus tendres. Ils sont très riches en calcaire, mais leur constitution est souvent hétérogène.
- **Encroûtements** : Quand, dans un horizon, l'accumulation du calcaire (diffuse, amas, granules ou nodules) devient telle qu'elle fait disparaître la couleur brune

ou rougeâtre des sols et des dépôts, il y a encroûtement, la teneur en calcaire dépassant 60%. L'encroûtement peut être crayeux ou tufeux, de couleur claire assez homogène ; la structure est massive ou polyédrique, parfois finement feuilletée ; le durcissement est faible. ou nodulaire : c'est un horizon à granules et nodules pris dans une gangue très calcaire ; la structure est à la fois nodulaire et polyédrique et peut être finement feuilletée ; le durcissement est à la fois nodulaire et polyédrique et peut être finement feuilletée ; le durcissement est assez marqué.

- **Croûtes** : La croûte calcaire est une formation très calcaire (plus de 70%), durcie, à structure feuilletée. Il s'agit de la superposition de feuillets pouvant atteindre quelques cm d'épaisseur mais de plus en plus fins quand on va du sommet vers la base. Ces feuillets ne sont pas continus, ils sont séparés par des fentes sub-horizontales s'anastomosant entre elles, fentes de plus en plus fines quand on va du haut vers le bas. La croûte est généralement de couleur blanc- crème ; quand elle est très durcie, elle tend vers le rose, c'est la transformation de la croûte en dalle compacte. Après une limite supérieure toujours très nette, la teneur en calcaire et le durcissement de la croûte diminuent toujours du sommet vers la base où elle passe progressivement à un encroûtement.
- **Dalle compacte** : La dalle compacte (plus de 90% de calcaire) est constituée par un ou plusieurs feuillets de calcaire, très durs, de couleur grise ou saumon, chaque feuillet, généralement très continu, à structure massive, pouvant atteindre 10 à 20 cm d'épaisseur. En profondeur, la dalle compacte passe progressivement à la croûte.
- **Pellicule rubanée** : Il s'agit d'une formation stratifiée, constituée par la superposition de lamelles très fines. Très calcaire (plus de 80%) et très dure, son épaisseur varie de quelques mm à quelques cm. Elle est en général blanche ou saumon, mais présente toujours plusieurs filets plus ou moins sombre. Cette pellicule ne se développe qu'au sommet des dalles compactes, des croûtes (quand la dalle compacte n'existe pas) ou des encroûtements (quand il n'y a pas de croûte). Quand il s'agit d'une croûte dont le feuillet supérieur est brisé verticalement, ce qui est fréquent, la pellicule tapisse toutes les surfaces supérieures et latérales des morceaux du feuillet brisé, mais pas la base. Elle peut également se développer sur les parois inférieures des fentes subhorizontales les plus larges qui séparent les feuillets de croûte.

5- Répartition des croûtes calcaires

Leur domaine de prédilection est en effet les régions semi-arides et sub-arides chauds, où elles se concentrent essentiellement sur les glacis. Les principaux gisements, à travers le monde, sont les hautes plaines des U.S.A. , les bassins d'Amérique centrale, la bande côtière la plus sèche d'Argentine, les déserts du Kalahari et de Namibie et le sud de l'Angola pour l'Afrique australe, l'Afrique orientale, l'Afrique occidentale (Sénégal, Mauritanie) ; le désert du Rajasthan aux Indes, la partie occidentale de l'Australie et le pourtour de la Méditerranée (Liban, Syrie, Lybie, Tunisie, Algérie, Maroc, Espagne, France, Italie) (Briot, 1976).

Selon Durand (1959), en Algérie (figure 1) la croûte zonaire peut se rencontrer partout où de l'eau chargée de calcaire a pu ruisseler en nappe. Elle est fréquente au Sahara, où elle forme de nombreux placages sur des calcaires ou des poudingues d'origines variées. Elle se rencontre sur les calcaires pulvérulents de la région des chotts. Elle recouvre les

calcaires pulvérulents de Marnia, Sidi Bel-Abbès, Mascara et une partie de ceux de Sersou. Elle recouvre aussi certaines terrasses de la vallée du chélif, des poudingues des environs de Bouira et les calcaires pulvérulents de Sétif et des hautes plaines de Constantine.

L'encroûtement calcaire se trouve sur le littoral Nord de l'Algérie. Il se développe surtout aux abords d'Alger, depuis la région à l'Est d'Ain-Taya jusqu'au massif du Chenoua. Il réapparaît à Cherchell et se prolonge jusqu'à Tenes.

Vers l'intérieur, ce type d'encroûtement est rare peut-être parce qu'il n'est pas facile à voir ; le seul gisement connu est celui des Zibans où le « deb-deb » est un encroûtement mixte calcaréo-gypseux.

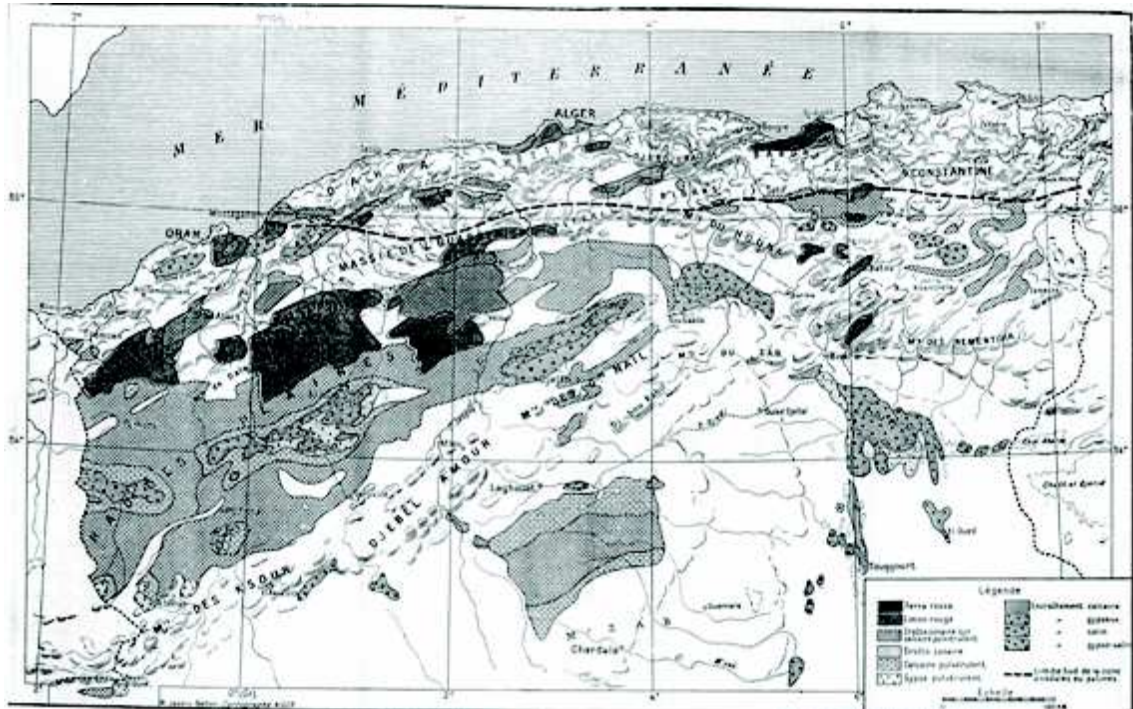


Figure 1 : Carte de répartition des croûtes calcaires en Algérie (Durand, 1959).

6- Caractéristiques physico-chimiques des accumulations calcaires

6.1- Le calcaire total

Vogt (1984) souligne que l'utilisation des données de calcaire total en vue de la caractérisation des accumulations calcaires n'aurait aucun fondement. Il est en effet apparu que la teneur en calcaire pouvait varier autant dans le même affleurement qu'entre affleurements différents. Ainsi, par exemple, pour une terrasse d'âge quaternaire ancien de la Nesque (Vaucluse), le conglomérat de base contient de 73 à 93% de CaCO_3 , et la croûte feuilletée sommitale de 69 à 81 % ; pour une croûte de type zonaire d'une terrasse pré-Mindel de la Durance moyenne, de 82 à 96 % ; pour une dalle attribuée au Villafranchien de Rians (Var), de 45 à 84 %. Ces variations s'expliquent par l'hétérogénéité pétrographique

du matériau sédimentaire consolidé, même à la taille des sables et limons, ainsi que par l'altération qui peut décarbonater localement la formation, sans que cela apparaisse à l'œil nu.

D'autre part, le durcissement n'est pas lié directement à la quantité de calcaire, mais à sa distribution, à sa cristallinité. Des cimentations de type phréatique dans un sédiment très quartzueux peuvent produire des dalles plus solides, avec une teneur en carbonates inférieure à 50 %, que certaines croûtes friables constituées presque exclusivement de calcaire.

6.2- Porosité et densité

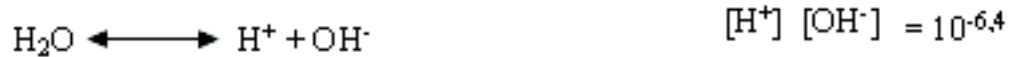
Plusieurs auteurs tel que Durand(1959), Bock (1983) et Vogt (1984) indiquent que les techniques de mesure de la porosité ont été conçues pour des matériaux (roches et sols) relativement homogènes ; il s'agit par ailleurs de mesures indirectes, avec des marges d'erreur sensibles, et que la plupart des recherches menées à ce sujet l'ont été en effet dans des buts agronomiques, donc en fonction de l'alimentation des plantes et des techniques de travail du sol.

Hennin (1976) a apporté d'autres données qui peuvent aider à la compréhension de la genèse et de l'évolution des croûtes par le fait que les pores à paroi rigide de diamètre inférieur à 0.1 mm ne permettent pas la pénétration des racines, et que le durcissement précoce d'un sédiment, surtout s'il est à granulométrie fine, rend son attaque par les racines fort difficile ; le fait que l'eau adsorbée ne serait pas susceptible de dissoudre les sels, ceci expliquerait du moins en partie, la faiblesse d'altération dans les croûtes. Wilding et Drees (1990) souligne que les difficultés que posent les techniques de mesure de la porosité font que l'observation des vides au microscope optique et électronique est de plus en plus pratiquée, car elle seule permet de connaître leur agencement.

6.3- La solubilité de carbonate de calcium

Garrels et Crist (1967) notent que le problème de la solubilité dans l'eau du CaCO_3 n'est pas encore résolu de manière satisfaisante à cause des constantes d'équilibres des carbonates de calcium qui sont très faibles (10^{-8} à 10^{-9}). Les constantes d'équilibres engendrent ainsi des écarts relativement importants, non seulement en fonction des techniques expérimentales mises en œuvre mais aussi en fonction du degré de pureté et de la granulométrie des cristaux utilisés. Vatan (1967) souligne que la solubilité du calcaire déjà précipité ou déposé à l'état de fins débris, est naturellement d'autant plus rapide que les particules sont plus fines.

La dissolution du CaCO_3 dans le système « $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ » est caractérisée par une succession de réactions chimiques (Garrels et Crist, 1967 ; Callot et al., 1978) telles que spécifiées ci-dessous :



En se basant sur les mécanismes fondamentaux qui régissent l'équilibre du système «CaCO₃ – CO₂ – H₂O », les recherches sur la solubilité des carbonates de calcium ont mis en évidence les relations qui existent entre :

- La variation du pH de la suspension calcaire en fonction de la pression partielle de CO₂.
- La variation du pH de la suspension calcaire en fonction de la concentration en ions calcium.
- La variation de la concentration en ions calcium en fonction de la pression partielle.

Il apparaît donc que selon les équations établies par Roque (1964) et Muxart (1967) cités par Gras (1974) que :

- Le pH diminue en fonction de l'élévation de la pression partielle en CO₂ pour des valeurs inférieures à 0,001 atmosphères.
- La concentration en ions Ca⁺⁺ augmente avec la diminution du pH.
- La concentration en ions Ca⁺⁺ augmente avec la pression en CO₂.

Cependant, les relations entre le pH, le CO₂ et le calcium sont plus ou moins marquées suivant le sol calcaire ou le matériau calcaire considéré. Chaque échantillon constitue un système particulier qui manifeste des réactions propres en présence de gaz carbonique (Gras, 1974). A cet effet, ce dernier attribue ces spécificités à l'action des facteurs suivants :

- La taille des minéraux carbonatés.
- La nature des carbonates.
- L'interaction possible avec les autres constituants solides, en particulier les argiles dont la nature peut varier d'un sol calcaire à un autre.
- Le rôle des ions étrangers dans la solution du sol (cas de magnésium qui peut accroître la solubilité de la calcite ou l'aragonite) (Roques, 1964 in Gras, 1974).

- Il est souvent admis que sous l'action du CO_2 et des composés organiques, le CaCO_3 est solubilisé dans l'eau sous forme de bicarbonate et transporté à travers les horizons du sol (Belouam, 1976).

Djili et Daoud, (1999) soulignent que de nombreux facteurs interviennent dans la solubilité du carbonate de calcium et qui induit une valeur de pH différente de 8,4. Il s'agit en particulier de l'état hydrique du sol qui provoque une concentration ou une dilution de la solution du sol qui détermine le temps de contact entre les particules de carbonate de calcium et la solution du sol. Des composés organiques, en particulier les polysaccharides qui inhibent la précipitation du carbonate de calcium. De la pression partielle en CO_2 de l'atmosphère du sol et de la taille des particules et le taux de substitution en magnésium.

Les travaux de Berner et Morse (1974), Plumer et al (1978) et Sjoberg (1983) montrent que la cinétique de dissolution de la calcite présente deux domaines distincts. Pour des pH inférieurs à 4, la vitesse de dissolution est proportionnelle à l'activité de H^+ , et la cinétique est exclusivement sous contrôle de la diffusion des ions intervenant dans les réactions de surface. Pour des pH supérieurs à 5.5, la vitesse de dissolution est indépendante du pH de la solution, et la cinétique est mixte, sous contrôle à la fois de la diffusion et des réactions de surface.

Jaillard (1987) souligne que dans les sols, les phénomènes d'inhibition dus à des substances adsorbées à la surface des cristaux de CaCO_3 sont importants et ils confèrent au système $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CaCO}_3$ une forte inertie réactionnelle. Ainsi, dans de nombreux sols calcaires, la solution n'est pas à l'équilibre avec la calcite. Le produit des activités de Ca^{2+} et de CO_3^{2-} dans la solution est généralement plus élevé que le produit de solubilité de la calcite, et différent des produits de solubilité des autres variétés cristallines. Ce constat a amené différents auteurs tel que Suarez (1977) et Levy (1981) à définir des pk_s apparents.

Cailleau (1982) a montré que la solubilité du carbonate de calcium augmente lorsque la température est élevée (tableau III).

	Variation	Température (°C)	Solubilité en mg/l	Formule chimique
Carbonates de Mg ⁺⁺	Magnésite	25°	106	Mg CO ₃
	Hydromagnésité	20°	400	3 Mg CO ₃ , Mg (OH) ₂ , 3H ₂ O
		20°	110	
	Lansfordite	7° à 20°	1 760 à 3 750	Mg CO ₃ , 5 H ₂ O
Nesquéonite	25°	1 290	Mg CO ₃ , 3 H ₂ O	
	16°	1 790		
Carbonates de Ca ⁺⁺	Aragonite	25°	15,3	Ca CO ₃
		75°	19	
	Calcite	25°	14	Ca CO ₃
		75°	18	

Tableau III : Solubilités des carbonates de magnésium et de calcium, en fonction de la température (cailleau.1982).

7 - Forme et taille de cristaux de calcite

Prince et walch (2006) notent que le carbonate de calcium est un minéral particulièrement courant, la calcite est incolore, blanche, ou colorée par des impuretés. Les cristaux (figure2) sont des scalénoèdres, des rhomboèdres ou des prismes. Les prismes à terminaison assez plate sont dits « têtes de clou » et les cristaux pointus « dents de cochon ». Les rhomboèdres de clivage transparents forment la variété appelée spath d'Islande. La calcite, constituant majeur des calcaires, des marbres et autres roches sédimentaires et métamorphiques, se forme aussi dans des veines hydrothermales.

Jaillard (1987) définit le carbonate de calcium comme un sel polymorphe dont trois variétés allotropiques sont connues. La vatérite qui appartient au système hexagonal, l'aragonite qui appartient au système orthorhombique, et la calcite qui appartient aux systèmes rhomboédrique. Cet auteur note que sous les conditions de pression et de température de l'atmosphère, la vatérite, l'aragonite et la monohydrocalcite sont métastables. Seule la calcite est stable. Ce même auteur confirme que la calcite est la variété allotropique dominante de toutes les formations calcaires terrestres et marines, et que les variétés métastables sont parfois représentées, car, sous certaines conditions, ces variétés peuvent être produites au cours de réactions de précipitation.

Selon Butel (1982), ces variétés métastables ont une tendance à évoluer vers la calcite et que l'inventaire minéralogique de la phase carbonatée des encroûtements calcaires a toujours montré qu'elle était essentiellement constituée de calcite. Cet auteur note que la calcite peut exister sous forme de calcite magnésienne dans les horizons d'accumulation et sous forme de dolomite associée à l'attapulgitite à la base de l'encroûtement. Lucas et Cros

(1976) indiquent que la taille de cristaux de calcite est à la base de certaines classifications des roches carbonatées, mais les limites et les termes employés varient avec les auteurs.

D'après Durand (1978) et Pouget (1980), la calcite apparaît sous forme de rhomboédres et de scalénoédres, mais également sous le faciès aciculaire. Ces auteurs montrent que la taille et la forme des cristaux de la calcite sont en relation avec plusieurs facteurs tels que l'influence du système racinaire, la présence d'ions étrangers (Mg) et de composés organiques.

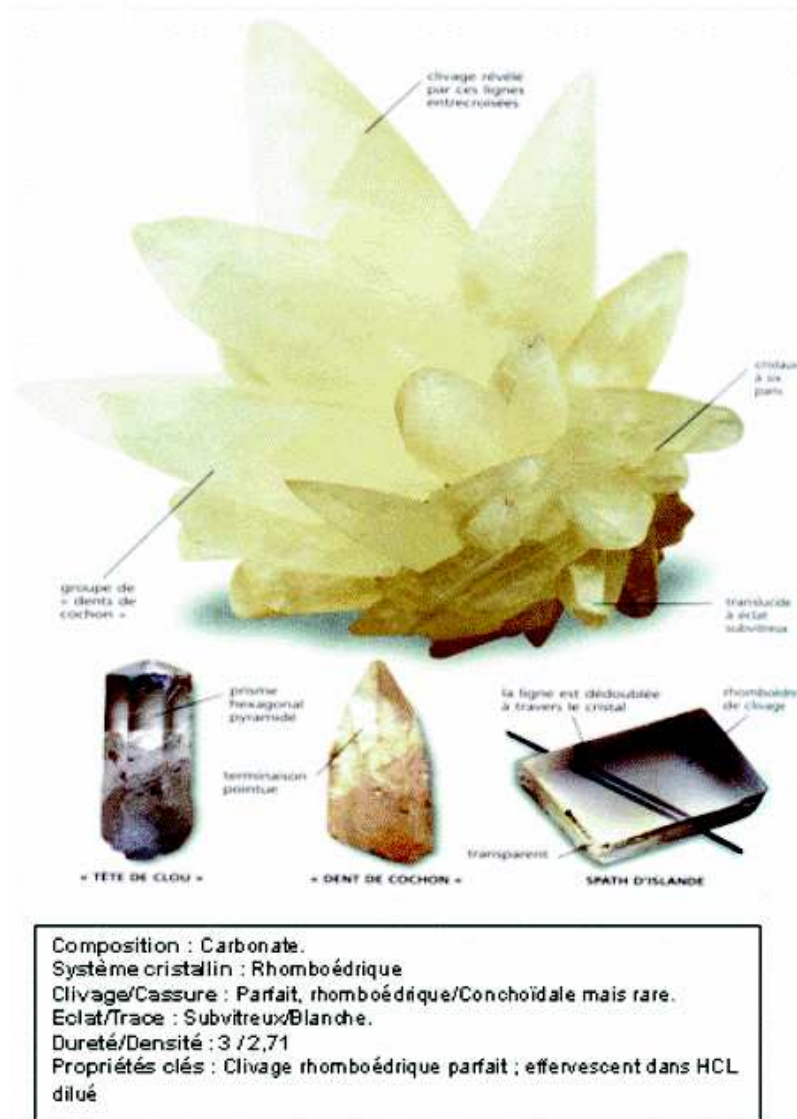


Figure 2 : Différente structure de cristaux de calcite (Price et Walch, 2000).

L'étude pétrologique expérimentale de la cimentation calcitique et aragonitée réalisée par Cailleau (1982) confirme que dans la nature, la calcite est la forme la plus stable, puis vient ensuite la calcite peu magnésique, et la calcite fortement magnésique. Ce même auteur rapporte que l'élévation de température fait accroître la taille des cristaux de calcite qui précipitent

(exemple 25°C → 60µm et à 75°C → 240µm).

mais elle n'induit pas à des nouvelles formes de cristaux.

L'observation de lames minces de sols au microscope optique a permis à de nombreux auteurs de préciser l'organisation micromorphologique des horizons à accumulation calcaire et les principaux types de cristallisation du carbonate de calcium (Sehgal et al. 1972). En fonction de la taille et la forme des cristaux de calcite, on distingue la sparite (de taille supérieure à 10 μ) avec, en particulier, un faciès de calcite aciculaire (lublimite) et la microsparite (de taille inférieure à 4 μ) (Pouget et Rambaud, 1985).

Selon Blancaneaux et al. (1987), les différentes formes de cristallisation de la calcite reconnues par observation microscopique, de même que la taille des cristaux, semblent être essentiellement sous la forte dépendance de la texture des horizons, par conséquent de la porosité. En effet, celle-ci conditionne la plus ou moins grande rapidité des alternances de phases de dissolution et de dépôt.

Ainsi, la précipitation de la calcite en aiguilles ou en bâtonnets se manifeste toujours dans les horizons très calcaires les plus poreux où la forte macroporosité favorise une intense évaporation ainsi qu'une diffusion rapide dans la microporosité (Blancaneaux et al. 1987). La vitesse de cristallisation de la calcite à partir de solution fortement sursaturée en calcium serait donc élevée dans une telle ambiance physico-chimique. La calcite en rhomboèdres est particulièrement reconnue dans les niveaux les plus indurés (croûte compacte, dalle) où la diffusion des solutions de calcite proche de la saturation se fait lentement, les équilibres étant longs à s'établir à travers la microporosité (< 0,2 μ). La vitesse de cristallisation de la calcite serait donc très lente dans une telle ambiance physico-chimique (Blancaneaux et al. 1987).

A mesure que décroît la dureté des faciès d'accumulation dans les encroûtements calcaires plus ou moins friables, on assiste à un « affaissement » des structures géométriques, à la dissolution des rhomboèdres qui, en se disjoignant, créent une augmentation de la microporosité du milieu (Blancaneaux et al. 1987) ; La diffusion plus rapide des solutions riches en calcite provoque alors la recristallisation de cristaux de formes allongée et de taille variables.

Dans une étude micro morphologique comparative des horizons pétrocalciques de quelques mollisols des Pouilles en Italie et alfisols de Sardaigne, Magaldi (1983) a souligné le rapport entre les caractéristiques physiques particulières des croûtes et les modalités du processus général de transfert des carbonates. Dans les mollisols à texture modérément fine, la croûte apparaît feuilletée avec des lamines qui alternent de façon irrégulière avec des niveaux nodulaires cimentés, en général assez poreux ; au microscope, les niveaux nodulaires apparaissent constitués d'une matrice micritique sombre, avec nodulisation, et comprenant des réseaux de cristaux aciculaires de calcite. Les Alfisols à texture plus grossière présentent au contraire une croûte massive, faiblement laminée et nodulaire, très peu poreuse, constituée microscopiquement d'une matrice plus hétérogène micritique à microsparitique (limite micrite, microsparite à 10 μ m). Les cristaux se distribuent au hasard et donnent lieu à une structure plutôt compacte et homogène.

Quelques hypothèses sur les conditions de dépôt de la calcite

Les travaux de Durand (1978) permettent de préciser, au niveau des hypothèses, les conditions de dépôt de la calcite.

La calcite en aiguilles (lublinite) supposerait une vitesse très rapide de cristallisation dans des solutions fortement sursaturées ; il en serait ainsi dans les macropores ($\varnothing > 10 \mu$) où l'évaporation est intense et où la diffusion est rapide vers la microporosité ($\varnothing < 0,2$

μ). Il y aurait donc une certaine indépendance vis-à-vis de l'activité racinaire. En outre, la forme allongée des cristaux serait peut-être à rattacher à la présence d'ions étrangers, en particulier le magnésium ;

- La calcite micritique en rhomboèdres indiquerait, par contre, une vitesse très lente de cristallisation en dehors de l'influence racinaire directe et sans interférence d'ions étrangers (dalles et croûtes compactes, intérieur d'un agrégat). La diffusion des solutions se ferait lentement, les équilibres étant longs à s'établir à travers la microporosité. La concentration lente et régulière des solutions s'effectuerait, pour la calcite, dans une solution proche de la saturation ;
- La calcite en bâtonnets s'observe le plus fréquemment dans la zone d'activité du système racinaire, dans un milieu à la fois très poreux, très calcaire et riche en matière organique. Trois facteurs seraient susceptibles d'intervenir pour expliquer la taille et la forme des cristaux :
 - les alternances rapides (dissolution-dépôt) créent les conditions favorables pour une cristallisation en micrite d'autant qu'il existe de nombreux sites de croissance ;
 - la présence d'ions étrangers peut favoriser la formation de cristaux allongés. Le magnésium est, en effet, assez abondant (destruction de l'attapulgite, salure souvent élevée) ;
 - la présence de composés organiques adsorbés sur les sites de croissance est susceptible d'intervenir, compte tenu de la teneur et de la nature de la matière organique dans ces horizons.

8- Diagenèse du calcaire

On appelle diagenèse toutes les transformations dans des conditions de températures et de pression normale, qui affectent un sédiment dès sa mise en place. Freytet et Verrecchia (1989) définissent la diagenèse comme un ensemble des changements qui affecte un sédiment ; elle comprend les effets de la bioturbation et autres modifications liées aux facteurs biologiques et mécaniques en plus des changements liés aux processus physico-chimiques.

Les phénomènes diagénétiques les plus fréquents ont pour conséquence une induration du matériau originel. On a :

8.1- Dessiccation

C'est le premier stade de la diagenèse lié à la perte d'eau par évaporation et par infiltration. Selon la granulométrie du sédiment, elle se manifeste de façon différente ; dans les matériaux grossiers (galets et sables), la simple dessiccation n'aura pas d'effet, mais une cimentation par précipitation des carbonates pourra avoir lieu quand la teneur des colloïdes sera supérieure à 10 % (Vogt, 1984).

8.2- Cimentation

La cimentation est l'un des principaux processus de lithification, c'est à dire de consolidation d'un sédiment meuble ou construit (Cailleau, 1982). Cette cimentation est provoquée par la précipitation des carbonates dont les cristaux ont des propriétés optiques, des formes et des faciès différents suivant l'environnement physico-chimique du milieu de formation (Cailleau, 1982). Ce même auteur souligne que la cimentation est l'effet le plus visible et le plus important ; elle est, avec la compaction, à l'origine de la diminution de la porosité primaire inter granulaire qui peut atteindre des valeurs de 50 à 70 % dans les récifs (Cailleau, 1982).

La cimentation est une précipitation secondaire cristalline. Les cimentations peuvent être dues à un apport secondaire de carbonates par une nappe phréatique autant qu'à la dissolution in situ à partir des carbonates contenus dans le sédiment (Vogt, 1984).

Différents types du ciment carbonatés

Dans les calcaires actuels ou récents, le ciment remplissant les pores est constitué de calcite fortement magnésienne, ou d'aragonite. Dans les calcaires anciens il est uniquement formé de calcite presque toujours faiblement magnésienne. Cette différence s'explique par l'instabilité de la calcite fortement magnésienne et de l'aragonite. Ces deux variétés allotropiques de carbonate de calcium se transforment assez rapidement en calcite faiblement magnésienne au cours de la diagenèse (Cailleau, 1982).

Les principaux types de ciments observés dans la nature peuvent être différenciés de la façon suivante (tableau IV) (Cailleau, 1982) :

- **Ciment micritique** : il est constitué par une mosaïque de tous petits cristaux cryptocristallins à microcristallins, difficiles à distinguer de la matrice boueuse lithifiées.
- **Ciment fibreux** : il peut aussi bien être calcitique qu'aragonitique. Il se présente en frange cristalline autour des grains, et existe sous deux formes. On peut rencontrer des cristaux allongés dont le sommet est en forme de scalénoèdre. Mais des cristaux en forme d'aiguilles sont aussi fréquents. La plupart des auteurs pensent que se sont toujours des ciments précoces dans les réservoirs carbonatés, car ils sont directement au contact des grains ; ils précipitent donc les premiers. Les ciments fibreux colmatent rarement la totalité des pores.
- **Ciment sparitique** : c'est le ciment le plus fréquent, il est toujours calcitique. Plusieurs types ont pu être recensés selon les dimensions et la forme des cristaux. Citons les ciments dont les cristaux sont équidimensionnels et ceux dont les cristaux sont hétéromorphes. Ils existent également des ciments sparitiques en grandes plages cristallines et des ciments syntaxiques. Le ciment sparitique, constitué d'une mosaïque de petits cristaux, laisse très souvent une porosité résiduelle intercristalline, tandis qu'au contraire, les ciments constitués de gros cristaux de calcite colmatent presque toujours complètement le réseau poreux.







Nom, abréviation ou ancien:	Schéma des cristaux:	Type de ciment	Milieu de formation	Variétés altéropiques	Rapport Mg/Ca dans la solution mère	Mg dans les cristaux de calcite
R (A)		Micritique (cristaux irréguliers en contact par leurs faces)	* Marin	Calcite et aragonite	Élevé $\left(\frac{(Mg)}{(Ca)} \rightarrow 2 \right)$	Calcite peu magnésienne (de 5 à 10% de Mg) aragonite peu magnésienne (jusqu'à 10% de Mg)
R (A)		Filonite (cristaux en aiguilles) (Ciment de bordure)	* Marin	Aragonite et calcite	Élevé	(faiblement magnésienne) (moins de 5% de Mg)
R		Filonite Allonge et en forme de scalénoèdre (cristaux de classe)	* Mésozoïque Pliocène	Calcite	* Faible à moyen * Faible à moyen	Faiblement magnésienne
R A		Spathitique Cristaux en triangles	* Mésozoïque pliocène	Calcite	* Moyen $\left(0,3 \frac{(Mg)}{(Ca)} \rightarrow 2 \right)$ * Faible $\left(\frac{(Mg)}{(Ca)} \rightarrow 0,3 \right)$	Faiblement magnésienne
R (A)		Spathitique cristaux en triangles	* Mésozoïque pliocène	Calcite	* Moyen * Faible	* Faiblement magnésienne à peu magnésienne * Faiblement magnésienne
A		Spathitique En grains plus gros	* Pliocène	Calcite	* Faible	* Faiblement magnésienne
A (R)		Brachyprisme (Euhédre)	* Mésozoïque Pliocène	Calcite	Faible à moyen	* Faiblement magnésienne

Tableau IV : Principaux types de ciment observés dans la nature, leur milieu de formation et leur caractéristique d'après Cailleau (1982).

8.3- Recristallisation

le passage de la micrite à la microsparite et à la sparite ne semble pas demander un apport secondaire du calcaire, mais serait dû simplement au réarrangement in situ des carbonates (Vogt, 1984). La recristallisation rend la roche plus résistante à l'altération, phénomène devenant impossible à partir d'une texture en colloïdes très faible (2 %).

Dans les croûtes étudiées par James (1972) cité par Vogt (1984), la forme de cristallisation la plus fréquente est le changement de la micrite (0,0015 à 0,003 mm) en microsparite (0,004 à 0,006 mm). Cette modification semble être courante lorsque les calcaires sont au contact avec les eaux douces et en particulier avec la matière organique fraîche.

8.4- L'épigénie calcaire

l'épigénie est étymologiquement le remplacement d'une roche ou d'un minéral par un autre minéral (Halitim et al. 1983). Dans le cas de l'épigénie calcaire, Vogt (1984) a expliqué l'épigénie calcite / quartz par la mobilisation de la silice dans le milieu très basique (pH 8 ou 9) des roches calcaire ; la silice peut reprécipiter sur place ou être exportée, selon les conditions de drainage. De même, l'étude expérimentale de Halitim et al. (1983) sur l'épigénie calcaire, dont l'aspect le plus simple est représenté par le système binaire « quartz-calcite » a montré que le phénomène nécessite l'alternance de deux phases évolutives ; la première en milieu humide où la présence de solutions carbonatés calciques provoque une dissolution du quartz ; la deuxième phase en milieu évaporatoire où il y a concentration des solutions calciques et où on aboutit à une précipitation de la calcite. Dans le cas de l'épigénie calcaire, Millot et al (1977) ont montré qu'il pouvait y avoir remplacement, quelque fois isovolumique, de diverses roches (granite, schiste et quartzite) par la calcite.

9- Décarbonatation

D'après Durand et Dutil (1972), la décarbonatation est le processus dominant de l'évolution des roches carbonatées. De plus, ils remarquent que, si le rôle de la roche mère est prépondérant de par sa structure, sa porosité et la nature minéralogique des carbonates, le climat conditionne la nature du processus de décarbonatation, règle la vitesse de dissolution des minéraux carbonatés et agit sur les composés sialferriques. Ainsi, ils montrent que la dynamique de ces composés est en accord avec les processus d'altération et que l'évolution des minéraux argileux demeure très faible tant que le processus majeur de décarbonatation n'est pas achevé. Selon Torrent (1995), la décarbonatation dans les horizons de surface dépend de la dissolution du calcaire par les eaux de pluie qui sont chargées en gaz carbonique. Ce phénomène s'accompagne par une accumulation relative en éléments insolubles. Lors de ce processus, le carbonate de calcium passe à l'état de bicarbonate soluble facilement lixiviable. Van Den Berg et Loch (2000) soulignent que la décarbonatation complète entraîne une diminution du pH. Le calcaire dissout est lixivié dans le profil et précipité en profondeur suite à la diminution de la pression partielle du CO₂.

10- L'altération

Landry et Mercier (1983) réservent le terme altération aux changements qui touchent la composition minéralogique des roches et qui sont provoqués par l'action de solutions hydrothermales. Dupuis (1975) note que les problèmes d'altération de roches carbonatées sont liés à leurs caractères pétrographiques (taille, cristallinité, nature minéralogique) et à la vitesse de dissolution des éléments carbonatés qui est en relation étroite avec le diamètre des particules. Robert (1984) souligne que l'altération est commandée essentiellement par les caractéristiques physiques des roches. La taille des cristaux, en liaison avec leur surface externe, est le premier facteur qui gouverne la dissolution. La micrite se dissout plus vite que la sparite. L'altération des roches commence par une déconsolidation, c'est-à-dire par la création d'un réseau de fissures où vont circuler les solutions. C'est l'évolution chimique

des minéraux au contact de ces solutions qui se traduira finalement par la formation de minéraux secondaires.

Selon Chamayou et Legros (1989), l'altération chimique se produit parce que les roches et les minéraux sont rarement en équilibre. Elle est constituée d'une série de réactions chimiques entre les minéraux primaires, l'atmosphère et l'eau. Duchaufour (1968) montre de manière très explicite la dépendance étroite existant entre le type de sol formé et le mode d'altération de la roche qui dépend en première ligne de la nature, la dimension et la disposition respective des éléments carbonatés et non carbonatés dans la roche.

Chapitre II: Matériel et méthodes

Introduction

La présente recherche a porté sur l'étude de vingt et une (21) croûtes calcaires échantillonnées à partir de sols situés dans la frange la plus septentrionale de l'Algérie (Tableau V). Ainsi, huit croûtes proviennent de la région Algéroise (Staouali, Mazafran, Koléa, Hydra, Tipaza et Baba Ali), six croûtes de la région Nord Ouest d'Algérie (Fornaka, Yellel, El-Attaf) et les sept dernières de la région situées entre Berrouaghia et Beni Slimane.

Tableau V : Localisation et roche mère des croûtes étudiées.

Caractérisation physico-chimique, micromorphologique et minéralogique de quelques croûtes calcaires du nord de l'Algérie

N° d'échantillon	Localisation	Coordonnées UTM	Roche-Mère	Climat
1	Staouali	X : 490 700 m Y : 4 067 100 m	Sable dunaire consolidé	Sub-humide
2	Mazafran	X : 483 600 m Y : 4 056 800 m	Grès calcaires	Sub-humide
3	Koléa	X : 478 20m Y : 4053 200m	Grès calcaires	Sub-humide
4	Hydra	X : 501 700 m Y : 4 067 300 m	Molasse calcaire	Sub-humide
5	Ain Tagouraitte (Tipaza)	X : 464 580m Y : 4049 410m	Formation sable	Sub-humide
6	Tipaza	X : 454 940m Y : 4048 470m	Grès calcaires	Sub-humide
7	Tipaza	X : 448 800m Y : 4045 600m	Grès calcaires	Sub-humide
8	Bab Ali	X : 505 700m Y : 4056 600m	Formation tuffeuse	Sub-humide
9	Fornaka	X : 227 000 m Y : 3 960 670 m	Grès	Semi- aride
10	Fornaka	X : 228 000 m Y : 3 962 000 m	Grès	Semi -aride
11	Fornaka	X : 228 000 m Y : 3 962 000 m	Grès	Semi -aride
12	Fornaka	X : 228 000 m Y : 3 962 000 m	Grès	Semi -aride
13	Yellel (Ghelizane)	X : 278 200 m Y : 3 954 600 m	Formation sableuse	Semi -aride
14	El-Attaf (Ain-Defla)	X : 418 900 m Y : 4011 100 m	Formation sableuse	Semi-aride
15	Berrouaghia	X : 492 00m Y : 399 6500m	Matériau alluvial	Semi-aride
16	Berrouaghia	X : 492 00m Y : 399 6500m	Matériau alluvial	Semi-aride
17	Berrouaghia	X : 492 000m Y : 3995 900m	Matériau alluvial	Semi-aride
18	Berrouaghia	X : 492 000m Y : 3995 900m	Matériau alluvial	Semi-aride
19	Sidi-Naaman	X : 489 100m Y : 3988 100m	Matériau alluvial	Semi-aride
20	Sidi-Naaman	X : 487 900m Y : 3987 000m	Matériau alluvial	Semi-aride
21	Guelb-El Kebeir	X : 526 600m Y : 4008 200m	Matériau alluvial	Semi-aride

Chacune de ces croûte a fait l'objet d'une caractérisation morphologique et d'analyses au laboratoire qui ont porté sur la détermination chimique, physique, micromorphologique et minéralogique.

1- Les analyses chimiques

La réalisation des analyses chimiques a nécessité le broyage puis le tamisage à 2 mm des échantillons de croûtes calcaires, ce qui a présenté des difficultés pour les échantillons les plus durs.

La fraction inférieure à 2 mm a subi les analyses suivantes :

- Le calcaire total : le dosage du carbonate de calcium a été effectué par la méthode volumétrique (calcimètre de Bernard).
- LepH : mesuré dans une suspension terre/eau de 1/2.5 par le pH-mètre.
- Le test de solubilité : ce test a été effectué sur de particules calcaires de diamètre inférieur à 2 mm et sur des particules calcaires grossières (diamètre compris entre 2 et 3 cm).
- La solubilité a été déterminée à partir d'une suspension sol/eau = 1/5, agitée pendant quelques minutes et laissée au repos pendant 24h. Le calcium est déterminé par le spectrophotomètre à flamme. Cette mesure a été réalisée selon les méthodes de l'United States Salinity Laboratory (1954) cité par Daoud et al (1993).

2- Les analyses physiques

- La densité apparente est mesurée sur des particules calcaires de diamètre compris entre 2 et 3 cm par la méthode de la paraffine.
- La densité réelle : les échantillons calcaires ont été broyés et tamisés à 0.315mm, puis séchés à 105 degré. La densité réelle a été déterminée par la méthode de pycnomètre à air. Cette dernière a été utilisée par Besnard (2000) lors de son étude sur l'évolution physico-chimique des roches carbonatées.
- La porosité totale : la porosité totale a été calculée à partir des données de densité réelle (d_r) et densité apparente (d_a) selon la formule :

$$pt \% = \frac{d_r - d_a}{d_r} \times 100$$

3- L'analyse micro morphologique

La confection des lames minces des croûtes calcaires étudiées a été réalisée à l'Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM) de Boumerdes. Les observations ont été réalisées par un microscope polarisant.

Les étapes de la confection de la lame mince sont les suivantes :

- L'identification : c'est le classement des échantillons suivant le numéro d'ordre.

- Le sciage : cette étape consiste à couper une tranche de roche d'environ 5 cm d'épaisseur pour obtenir un morceau « sucre » pour la lame mince. Il convient de trancher perpendiculairement à la foliation ou à la linéation.
- Le dressage : c'est de repérer la face à dresser pour user les rayures tracées par la scie.
 - a-** Dressage à l'émeri 320 : Enduire le plateau de la polisseuse avec l'émeri 320 mélangé à l'eau, puis amener la vitesse de rotation de la polisseuse à 250t/mn et passer l'échantillon sur toute la surface du plateau jusqu'à l'obtention d'une surface homogène.
 - b-** Dressage à l'émeri 600 : même opération que la précédente. Afin de rendre la surface de l'échantillon plus lisse, en utilisant l'émeri 600.
- Le séchage et le collage : c'est le séchage pendant 1h le morceau « sucre », classer par ordre et surfacé sur une plaque chauffante à 60°C de température, puis ramener la température à 30°C. Coller le porte –objet (face dépolie et numérotée) sur « sucre » en appuyant au centre puis vers le périphérique pour chasser les bulles d'air. Laisser « sucre » durcis pendant 1h à une température de 30°C.
- L'usinage : cette étape consiste à réduire le « sucre » collé sur les porte-objets jusqu'à 40µ à l'aide de la rectifieuse multiplaque « automatique ».
- La mise à l'épaisseur de 30µ : cette étape consiste à réduire à la machine ou à la main sur une dalle de verre, l'épaisseur de la lame mince à 30µm. Pour contrôler l'épaisseur (30µ) on observe à chaque fois la lame mince au microscope polarisant. Lorsque le quartz est blanc en lumière naturelle, l'épaisseur est bonne.

4- La minéralogie

La diffraction des rayons X est la méthode la plus employée pour l'identification des minéraux cristallisés (Robert, 1975 ; Fitzpatrick, 1992). L'analyse a été effectuée par la technique de diffraction X par un diffractogramme Philips pw. 1830. L'analyse a été réalisée à l'Office National de Recherches Géologiques et Minières (ORGM) de Boumerdes.

La diffraction des RX a été effectuée sur poudre du sol broyée finement (40µ) par un broyeur à cylindre. Cette identification est non destructive et qualitative. Les minéraux sont identifiés en se référant aux raies caractéristiques des minéraux à partir des fiches ASTM (Américain society for testing materials).

La technique d'analyse est basée sur la diffraction des rayons X par les plans réticulaires des cristaux contenus dans l'échantillon selon la loi de Bragg (Dejou et al, 1977) :

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

d : distance réticulaire

λ : longueur d'onde du faisceau de RX

θ : angle d'incidence

n : ordre de réflexion

Chapitre III: Résultats et discussion

1- La morphologie des croûtes

Dans ce qui suit nous présenterons successivement la morphologie, la micromorphologie, les résultats physicochimiques et la minéralogie des croûtes étudiées.

- La croûte 1

Elle provient d'un sol rouge lessivé de la région de Staouali (photo 1). La croûte se situe au niveau le plus élevé de la zone de prélèvement (photo 1) ; elle s'est développée sur un sable consolidé. Sa couleur est beige à grisâtre (7.5YR 8/1) ; peu épaisse (environ 20 cm) ; la partie supérieure de la croûte est constituée par une superposition de feuillets de quelques millimètres (pellicule rubanée) durs et compacts ; vers le bas, la croûte devient moins dure (photo2).



a : croûte prélevée

Photo 1 : Profil 1



Photo 2 : Croûte 1

- La croûte 2

C'est une croûte qui provient de la région de Mazafran. Elle est prélevée d'un sol rouge lessivé développé sur du grès calcaire (photo 3). Le sol contient quelques éléments grossiers, les racines sont profondes et pénètrent jusqu'au grès calcaire.

La croûte (photo 4) s'est développée sur du grès calcaire. Sa couleur est blanche (7.5YR8/4), son épaisseur varie entre 10 et 15cm ; elle est dure et compacte.



a : croûte prélevée

Photo 3 : Profil 2



Photo 4 : Croûte 2

- La croûte 3

C'est une croûte qui provient de la région de Koléa. Elle est échantillonnée à partir d'un sol rouge développé sur du grès calcaire.



Photo 5 : Croûte 3

La croûte (photo 5) à une couleur blanche à grisâtre (10YR8/1) ; son épaisseur est d'environ 25 cm ; dure ; présence de pores inférieurs à 1mm visible à l'œil nu.

- La croûte 4

Cette croûte provient de la région de Hydra. Elle est échantillonnée à partir d'un sol rouge lessivé développé sur du tuff calcaire (molasse de Bir Mourad Rais).



Photo 6 : Croûte 4

La croûte (photo 6) a une couleur blanchâtre (5Y8/2) ; elle a un aspect lumineux et une structure massive ; son durcissement est faible ; son épaisseur varie de 20 à 25 cm ; les pores sont visibles à l'oeil nu.

- La croûte 5

C'est une croûte qui provient de la région de Ain Tagourait. L'accumulation calcaire se trouve sur une formation sableuse ; au-dessus de cette accumulation, le sol est rouge lessivé (photo 7).



a : croûte prélevée

Photo 7 : profil 3



Photo 8 : Croûte 5

La croûte (photo 8) est de couleur beige à marron (10YR7/4), peu épaisse (environ 10cm), très dure, compacte et comporte de nombreux débris de coquilles et quelques traces de végétaux.

- La croûte 6

Cette croûte provient de la région de Tipaza (environ 2 km à l'entrée de Tipaza) à partir d'un sol rouge lessivé.



Photo 9 : Croûte 6

La croûte calcaire (photo 9) est beige foncée (7.5YR8/2) ; son épaisseur est d'environ 20 cm ; elle est dure et compacte ; présence de quelques fragments de coquilles.

- La croûte 7

Elle est issue de la région de Tipaza (en face du complexe touristique Mataresse). Les échantillons de cette croûte ont été récupérés de la surface du sol.



Photo 10 : Croûte 7

La croûte calcaire (Photo 10) est de couleur saumon (7.5YR8/4). Le haut de la croûte est constitué par une superposition de feuillets durs de quelques millimètres d'épaisseur ; vers le bas, la croûte devient moins dure. Elle est peu poreuse (diamètre inférieurs à 1mm).

- La croûte 8

Elle provient de la région de Baba Ali (Nouvelle zone industrielle). Elle s'est développée dans un sol rouge lessivé (photo 11). Il n'y a pas d'effervescence à l'HCl dans le solum.



a : croûte prélevée

Photo 11 : profil 4



Photo 12 : Croûte 8

Cette croûte (photo 12) a une couleur rouge jaunâtre (7.5YR7/6), elle est friable, peu épaisse, poreuse (pores inférieures à 1mm), et on note la présence de traces de racines,

- La croûte 9

Elle se situe à l'amont de la séquence de Fornaka (Macta). Les affleurements (croûte ou grés encroûté) sont nombreux.



Photo 13 : Croûte 9

La croûte (photo 13) a une couleur qui varie du beige au rose (2.5Y6/2) ; son épaisseur est d'environ 20 cm dont le sommet (5 cm) est constitué par une superposition de lamelles

très fines et très dures (pellicule rubanées) ; la partie inférieure de la croûte est peu dure et peu poreuse.

- La croûte 10

La croûte se situe à mi-pente de la séquence de Fornaka. Elle s'est formé sur du grès. Le sol est rouge lessivée ; là où le sol a été érodé, les croûtes apparaissent comme de petits chicots.



Photo 14 : Croûte 10

La croûte (photo 14) présente une couleur rose clair (10YR8/2), friable, son épaisseur est d'environ 10 cm, présence de pores de 1mm de diamètre environ.

- La croûte 11

Cette croûte se situe à la base de la séquence de Fornaka. Elle se trouve dans un sol rouge formé sur du grès.



Photo 15 : Croûte 11

La croûte calcaire (photo 15) a une couleur blanche rosée (7.5YR8/2) ; son épaisseur est de 15 cm environ ; le sommet de la croûte est constitué par une fine couche de quelque millimètre très dure (pellicule rubanée) ; ce durcissement diminue à la base de la croûte.

- La croûte 12

Elle se situe à l'avale de la séquence de Fornaka. Le sol est rouge lessivé. La croûte a été récupérée à partir des morceaux en surface (labour ou autre travaux).



Photo 16 : Croûte 12

La croûte (photo 16) est de couleur beige claire (7.5YR8/4), dure, non friable, son épaisseur est d'environ 25 cm ; le sommet de la croûte est constitué par une superposition

de feuillets séparés par des fentes sub-horizontales. Le durcissement diminue du sommet vers la base de la croûte.

- La croûte 13

Cette croûte provient de la région de Yellel où elle s'est développée sur une formation sableuse.



Photo 17 : Croûte 13

Elle est de couleur rose à blanchâtre (10Y8/2) ; son épaisseur est d'environ 15 cm, non poreuse. C'est une masse compacte et très dure ; présence de quelques fragments de coquilles. Elle est illustrée par la photo 17.

- La croûte 14

a croûte provient d'un sol rouge encroûté de la région d'El Attaf.

La croûte (Photo 18) est de couleur blanche qui tend vers le rose (7.5Y8/2) ; son épaisseur est de 20 cm environ ; elle est très dure, massive et non poreuse. Le sommet de la croûte est constitué par une superposition de fines lamelles (pellicule rubanée) très dures. Ce durcissement diminue vers la base de la croûte.



Photo 18 : Croûte 14

- Les croûtes 15 et 16

L'accumulation calcaire (Photo19) se trouve sur une ancienne terrasse alluviale localisée à 7 Km à l'est de Berrouaghia. Elle se situe à plus de 50 cm de profondeur du sol. Le sol qui se trouve au dessus de cette accumulation est rouge lessivé, caillouteux et non calcaire. Dans cette accumulation (profil 5) nous avons prélevé deux croûtes calcaires, la première (croûte 15) est indurée et la deuxième (croûte 16) qui se trouve au dessous est massive.



a : croûte prélevée N° 15
b : croûte prélevée N° 16

Photo 19 : profil 5

- La croûte 15

La croûte (photo 20) est indurée ; sa structure est feuilletée, son épaisseur est d'environ 15 cm ; sa couleur est jaune rougeâtre (5YR7/6) ; la croûte englobe des cailloux (plus de 1cm de diamètre) ; présence de pores de 1mm de diamètre ; le haut de la croûte est constitué par une fine couche dure de quelques millimètres (pellicule rubanée). Ce durcissement se diminue vers la base de la croûte.



Photo 20 : Croûte 15

- La croûte 16

Cette croûte (photo 21) a une couleur marron clair (7.5YR8/3) ; elle est massive et son épaisseur varie entre 15 cm et 20 cm. Elle est dure et compacte et englobe quelques cailloux.



Photo 21 : Croûte 16

- les croûtes 17 et 18

L'accumulation calcaire (photo 22) se situe à 3 Km environ à l'est de la l'accumulation précédente. Elle provient d'un sol rouge développé sur une ancienne terrasse alluviale. Au dessus de cette accumulation le sol est rouge et moins caillouteux. Dans cette accumulation (profil 6), nous avons prélevés deux croûtes calcaires, la première (croûte 17) est indurée et la deuxième (croûte 18) qui se trouve au dessous est massive.



a : croûte prélevée N° 17
b : croûte prélevée N° 18

Photo 22 : Profil 6

- La croûte 17

Cette croûte (photo 23) est feuilletée et indurée ; sa couleur est beige claire (7.5YR8/6) ; son épaisseur est d'environ 15 cm. Son sommet est constitué par une superposition de fines lamelles très dures (pellicule rubanée). Ce durcissement se diminue vers la base de la croûte.



Photo 23 : Croûte 17

- La croûte 18

La croûte (photo 24) est massive ; sa couleur est beige claire (7.5YR8/6) avec des taches blanchâtres ; elle englobe quelques cailloux (plus de 1cm) et traces de quelques racines ; son épaisseur est d'environ 25 cm ; très dure ; non friable ; non poreuse.



Photo 24 : Croûte 18

- La croûte 19

La croûte provient de la région de Sidi-Naaman, elle a été prélevée d'un sol rouge lessivé.

La croûte (photo 25) a une couleur jaune rougeâtre (5YR7/8) ; son épaisseur est d'environ 10 cm ; friable ; elle englobe des galets et de nombreux cailloux.



Photo 25 : Croûte 19

- La croûte 20

Cette croûte (photo 26) a été prélevée à 10 Km à l'est de Sidi Naaman dans un sol rouge lessivé. Elle se trouve à 30cm de la surface du sol.



Photo 26 : Croûte 20

La croûte a une couleur de (5YR8/1) ; son épaisseur est de 25cm ; son sommet est constitué par une superposition de feuillets horizontaux durs. La croûte devient moins dure vers sa base.

- La croûte 21

L'accumulation calcaire a été prélevée à 5 Km de Guelb Elkébér. Elle se localise à 1.5 m de profondeur d'un sol rouge lessivé.

La croûte est de couleur blanchâtre (7.5YR8/2) et son épaisseur est d'environ 20 cm. Elle est dure et son sommet est constitué par une superposition de lamelles fines et très dures (pellicule rubanée). Elle la croûte à sa base devient moins dure vers sa base.

Toutes les croûtes calcaires étudiées sont prélevées de sols rouges lessivés . Elles sont développées sur des roches mères différentes. Les croûtes de la région algéroise sont développées sur du grès calcaire, du tuff et du sable consolidé. Les croûtes de la région Nord Ouest d'Algérie se sont formées sur du grès et des formations sableuses alors que les croûtes de Berrouaghia se sont développées sur d'anciennes terrasses alluviales.



Photo 27 : Croûte 21

Les croûtes qui proviennent de Berrouaghia et du Nord Ouest sont généralement proches de la surface du sol. Par contre, les croûtes d'Alger se situent généralement en profondeur.

Les croûtes de Berrouaghia englobent beaucoup de cailloux et des galets. L'accumulation calcaire se présente du bas en haut par une croûte calcaire massive, une croûte feuilletée et une pellicule rubanée (exemple Berrouaghia).

Les croûtes développées sur les formations sableuses sont les plus dures (croûte 5 de Ain Tagourait, 13 de Yellel et 14 d'El Attaf). Selon Lacroix et Mathieu (1979), la plus grande cohérence et la dureté des croûtes sont induites par une cimentation calcaire plus importante. Dans les dalles conglomératiques ou sableuses, la calcite cristallise en grands cristaux de spathite tandis que les faciès plus fins, c'est la micrite qui est de règle.

Les croûtes d'Alger ont une couleur qui varie généralement du blanc au beige alors que celles du Nord Ouest du beige au rose et celles de Berrouaghia du beige au marron.

Le sommet des croûtes est constitué généralement par une superposition de feuillets horizontaux très durs (pellicule rubanée). Ce durcissement se diminue du haut vers le bas de la croûte.

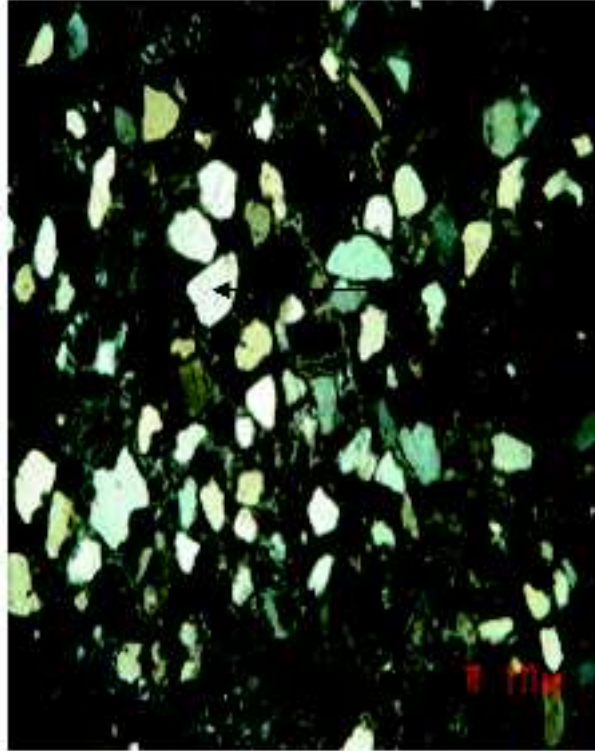
2- La micro-morphologie des croûtes

Les observations micromorphologiques ont été effectuées sur vingt croûtes calcaires.

- La croûte 1

La lame mince (photo 28) indique que la masse basale est calcitique (micrite et microsparite). Le matériel grossier est constitué par des grains de quartz de forme subarrondie, de feldspaths et de plagioclases. Il y a la présence de petits nodules de calcite

de forme plus au moins arrondie. Le matériel fin est formé essentiellement de calcite. La distribution relative est chetonique et le rapport matériel grossier sur matériel fin c/f varie entre 30% et 35%. Il y a la présence de quelques chambres et de nombreux vides et vésicules qui témoignent d'une dissolution des minéraux altérables ; Il y a également de la calcite autours des vides (remplissage de calcite). Le remplissage des vides par de la calcite et la présence du cutanes de calcite (calcite solubilisée et reprécipitée) constituent les principaux traits pédologiques de cette croûte.

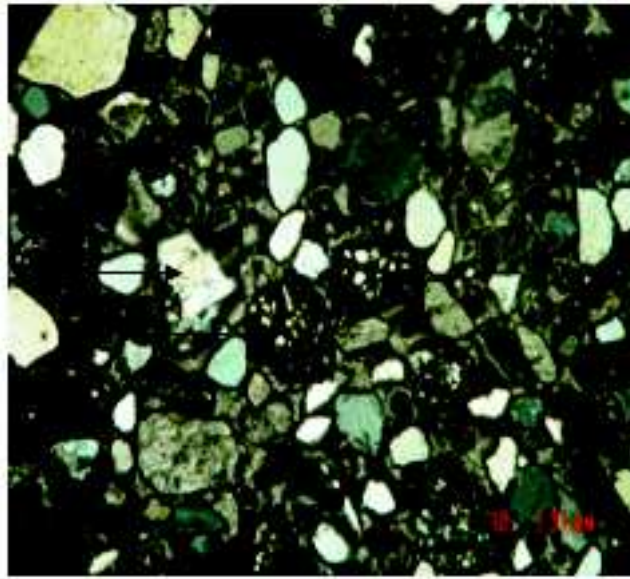


a : Grain de quartz

*Photo 28 : Micromorphologie de la Croûte 1 G*5*

- La croûte 2

La photo 29 indique que le matériel grossier est formé essentiellement de quartz de forme sub-arrondie, de petits conglomérats constitués par des minéraux altérables, beaucoup de calcite primaire en altération et quelques nodules de fer. La masse basale est carbonatée (sparite et microsparite), et sa distribution relative est porphyrique fermée avec un rapport de 40 à 50%. Il y a la présence de nombreuses vésicules et cavités ainsi que des chenaux qui témoignent d'une ancienne activité biologique (faune et flore).



a : Calcite
b : Conglomérat

*Photo 29 : Micromorphologie de la Croûte 2 G*5*

- La croûte 3

L'observation de la lame mince (photo 30) révèle que le matériel grossier est constitué de grains de quartz de forme sub-arrondie qui représente 5% environ de la masse total. Il y a aussi la présence de quelques grains de calcite primaire, de quelques fragments de coquilles et de microfaciès biologiques. La masse basale est calcitique (micrite et microsparite). La distribution relative est géométrique et le rapport matériel grossier sur matériel fin est de 30%. Les vides représentent 10% du volume total. Ils constituent des zones de cristallisation d'eau saturée en CaCO_3 .

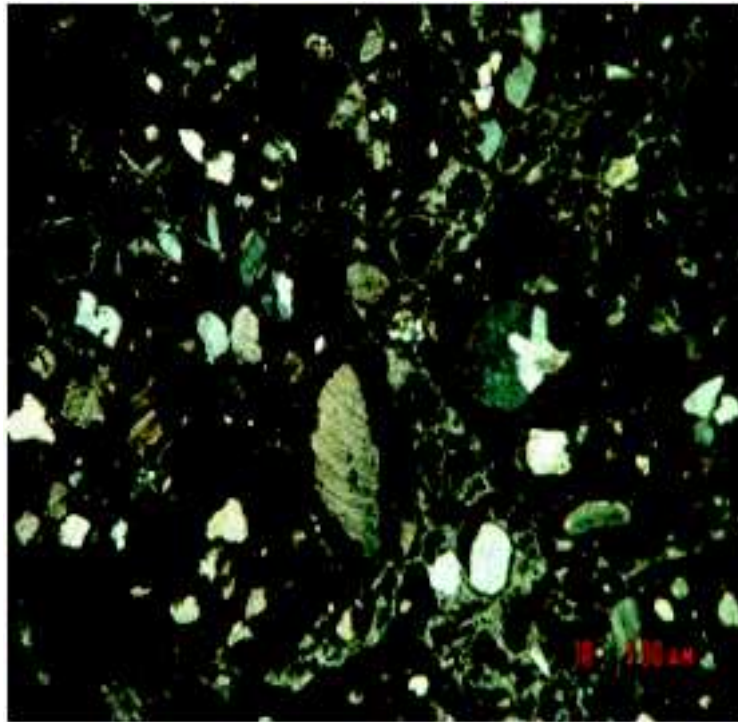
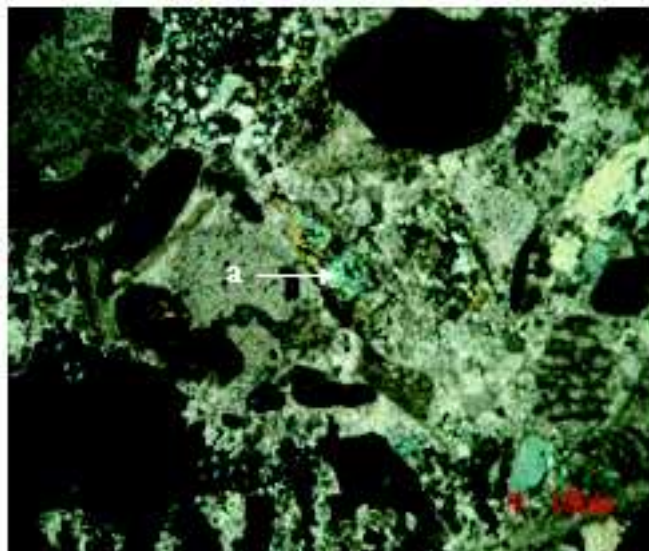


Photo 30 : Micromorphologie de la Croûte 3 G*5

- La croûte 4

L'observation en lame mince de la croûte 4 (photo 31) fait ressortir la présence de calcite primaire, des grains de quartz, de la muscovite, des minéraux riches en fer et de quelques fragments de coquilles. La masse basale est calcitique (micrite et microsparite).

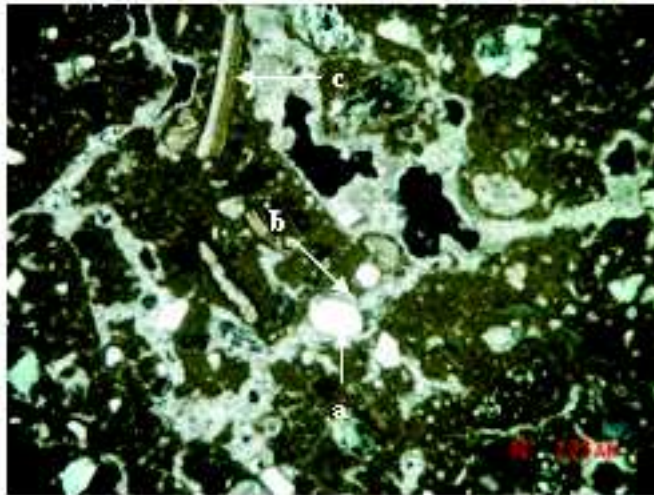


a : Muscovite

Photo 31 : Micromorphologie de la Croûte 4 G*5

- La croûte 5

La description de la croûte 5 (photo 32) indique que la masse basale est calcitique (micrite et microsparite). Le matériel grossier est constitué essentiellement de grains de quartz de forme sub-arrondie. On observe la présence de quelques fragments de coquilles sous forme d'arc qui représentent des traits biologiques. La distribution relative est porphyrique et le rapport c/f est de 20%. Les vides représentent 10% environ du volume tota. Les parois des vides sont revêtues de sparite et microsparite.

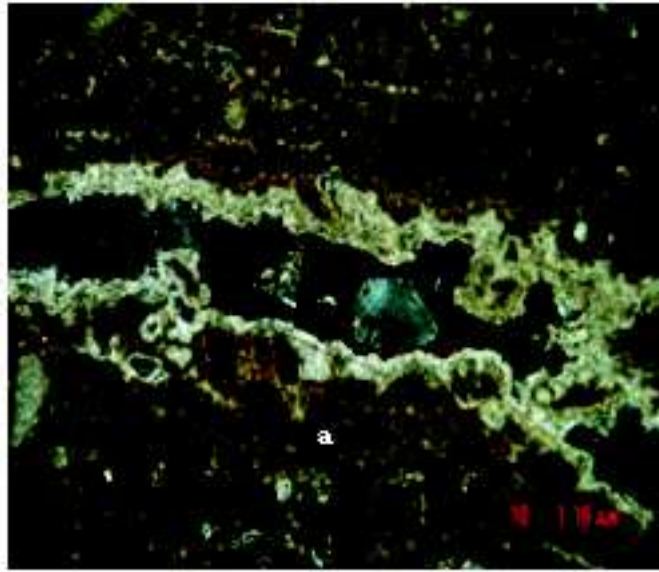


a : Quartz / b : Microsparite / c : Débris de coquille

*Photo 32 : Micromorphologie de la Croûte 5 G*5*

- La croûte 6

L'observation en lame mince de cette croûte (photo 33) révèle le remplissage d'un chenal par la calcite primaire. De même, on observe quelques remplissages de fer dans les petites cavités et on note la présence de quelques nodules calcaires et de quelques fragments de coquilles. Le matériel grossier est constitué par des grains de quartz de forme sub-arrondie qui représentent moins de 6% du total. Les vides représentent moins de 10% du volume total. Il existe très peu de traits pédologiques.

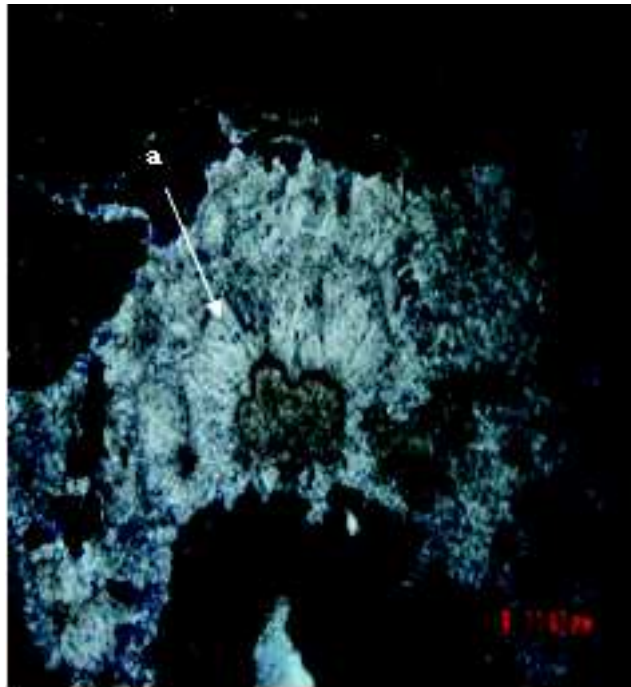


a : Remplissage d'un chenal par la calcite primaire

*Photo 33 : Micromorphologie de la Croûte 6 G*5*

- La croûte 7

La photo 34 montre le remplissage d'un chenal par la calcite. Le matériel grossier est formé par des grains de quartz de forme sub-arrondie qui représentent 5 à 20% de la masse totale, par quelques fragments de coquilles et par quelques nodules de fer. Le matériel fin est plus au moins argileux. La masse basale est carbonatée (sparite et microsparite). Elle constitue une distribution relative géométrique. Les vides sont représentés par des chenaux colmatés par la calcite sparitique et microsparite. On observe aussi la présence de nombreuses vésicules et cavités.

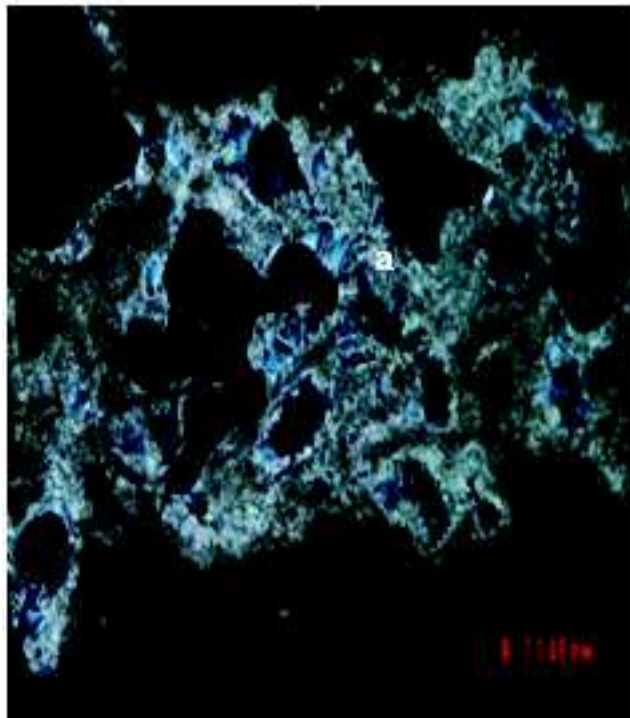


a : Remplissage d'un chenal par la calcite primaire

Photo 34 : Micromorphologie de la Croûte 7G*5

- La croûte 8

On observe en lame mince (Photo 35) la présence de quelques remplissages de vides par la calcite en aiguilles (calcite secondaire) ainsi que quelques zones de dissolution et recristallisation de calcite. La masse basale est calcitique (micrite et microsparite). Le matériel grossier représente moins de 5% de la masse totale. Le matériel fin est constitué d'argile, de limon et par beaucoup de calcite. Les vides représentent 2% du volume total.

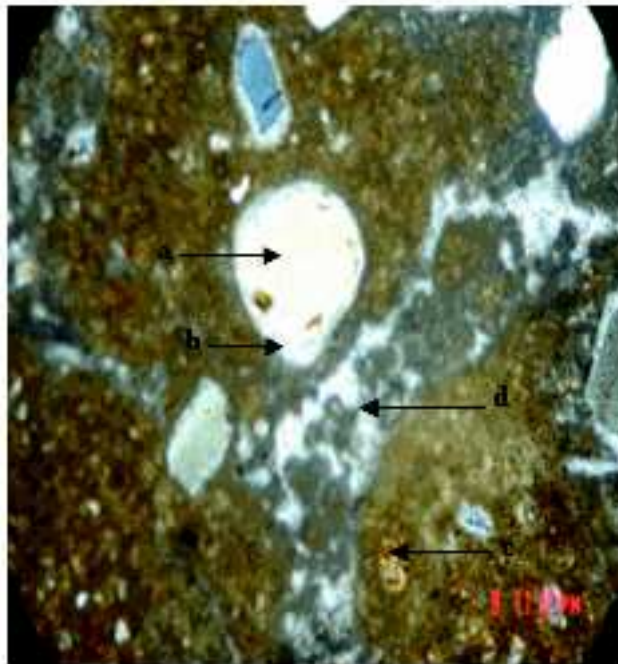


a : Calcite aciculaire associée au vide de dissolution

*Photo 35 : Micromorphologie de la Croûte 8 G*5*

- La croûte 9

Le matériel grossier de cette croûte est formé essentiellement par des grains de quartz de forme sub-arrondie, de calcite secondaire, de nodule de fer (photo 36). On observe aussi la présence de quelques fragments de calcite primaire en altération. Le matériel grossier présente moins de 50% de la masse basale. Le matériel fin est constitué de calcite. La masse basale est sparitique. Les vides sont représentés par de nombreux chenaux remplis par la calcite sparitique. On note aussi la présence de cutanes de calcite. Les vides représentent moins de 20% du volume total.

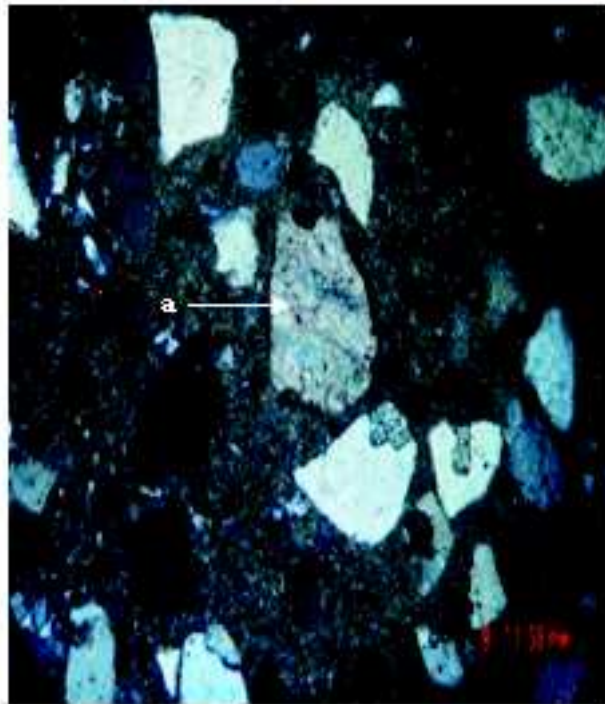


a : Grain de quartz /b : Microsparite /
c : Nodule de fer /d : Chenal rempli par la calcite

*Photo 36 : Micromorphologie de la Croûte 9 G*5*

- La croûte 10

Le matériel grossier de cette croûte est constitué par des grains de quartz en altération de forme sub-arrondie, par quelques nodules de fer en formation, par de petits nodules de calcaire et par quelques fragments de coquilles. La masse basale calcitique (micrite et microsparite) est faiblement structurée. La distribution relative est porphyrique avec un rapport c/f de 50%. Les vides sont représentés par des vésicules et cavités qui constituent les zones de circulation d'eau saturé en CaCO_3 . Les parois des vides sont revêtues de calcite sparitique. Ils représentent 20 à 30% du volume total.

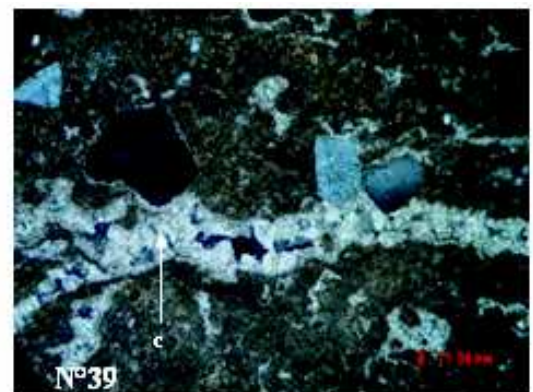
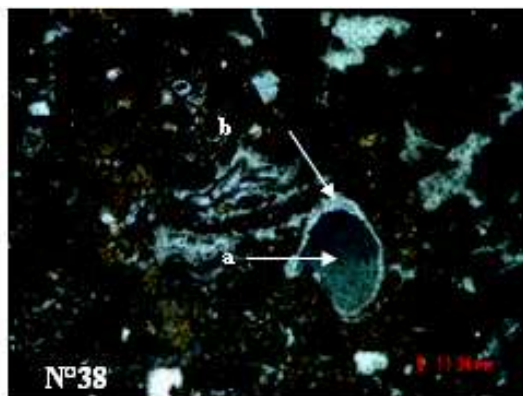


a : Grain de quartz en altération

Photo 37 : Micromorphologie de la Croûte 10 G*5

- La croûte 11

L'observation de lame mince (photo 38 et 39) révèle la présence d'un chenal rempli par la calcite. Le matériel grossier est constitué de quelques grains de quartz, de la biotite, de plagioclases, de quelques fragments de coquilles et de calcite secondaire autour des grains. Le matériel grossier représente 10 à 15 % et vers le bas, il représente 50% de la masse basale. On y observe aussi quelques cutanes constituées de grains de calcite, ainsi que la présence de cavités et très peu de vide.

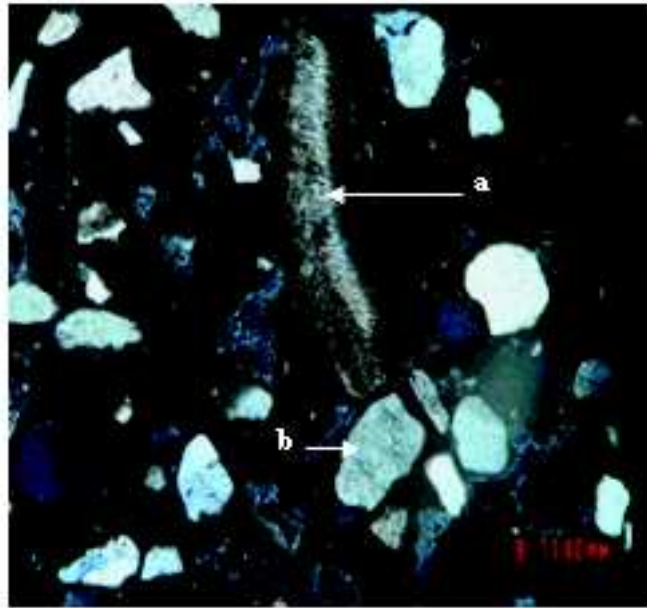


a : Grain de quartz
b : Microsparite
c : Remplissage d'un chenal par la calcite

Photo 38 et 39 : Micromorphologie de la Croûte 11 G*5

- La croûte 12

L'observation de la lame mince (Photo 40) montre que le matériel grossier est constitué de grains de quartz de forme sub-anguleuse, de plagioclases et de quelques fragments de coquilles. Le matériel fin est formé de calcite et de limon. La masse basale est carbonatée (sparite et microsparite). La distribution relative est géfurique avec un rapport c/f de 50%. Les vides sont représentés par des vésicules et cavités qui constituent les zones de circulation d'eau saturée en CaCO_3 .

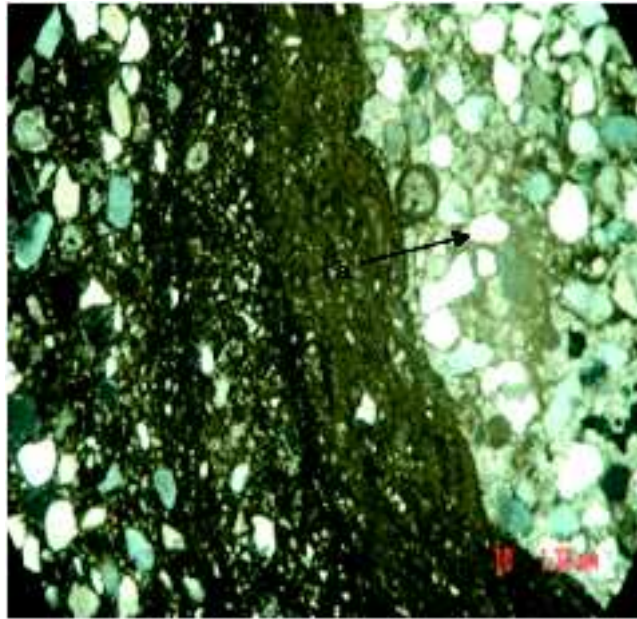


a : Bioclaste / b : Quartz

Photo 40 : Micromorphologie de la Croûte 12 G*5

- La croûte 13

L'étude de la lame mince (Photo 41) montre que le matériel grossier est formé de quartz de forme sub-anguleuse, de plagioclases, de quelques fragments de calcite primaire et d'un nodule de calcaire. Le matériel fin est constitué de calcite secondaire et par endroit de calcite primaire. Le rapport matériel grossier sur matériel fin est de 50%. La masse basale est carbonatée (sparite et microsparite). Très peu de vides (moins de 10%) représentés par un grand chenal avec cutanes de calcite primaire et des vésicules.

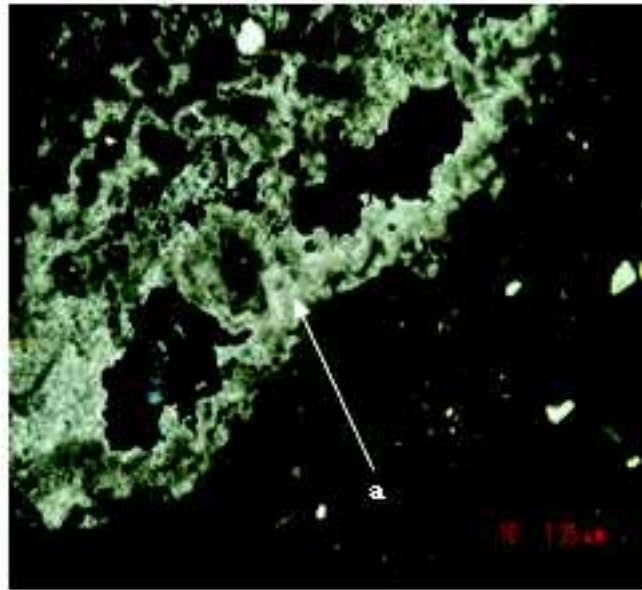


a : Quartz

*Photo 41 : Micromorphologie de la Croûte 13 G*5*

- La croûte 14

L'observation de la lame mince de cette croûte (Photo 42) indique que le matériel grossier est quartzueux, présence aussi de quelques nodules de calcaires et de fer. Le matériel grossier représente moins de 2% de la masse basale. Le matériel fin est constitué de limon, de calcite et d'un peu d'argile. La masse basale sparitique et microsparitique est plus au moins stratifiée. Il y a très peu de vides (moins de 7%) représentés essentiellement par des chenaux colmatés par de cristaux de sparite et par quelques cutanes de calcite.

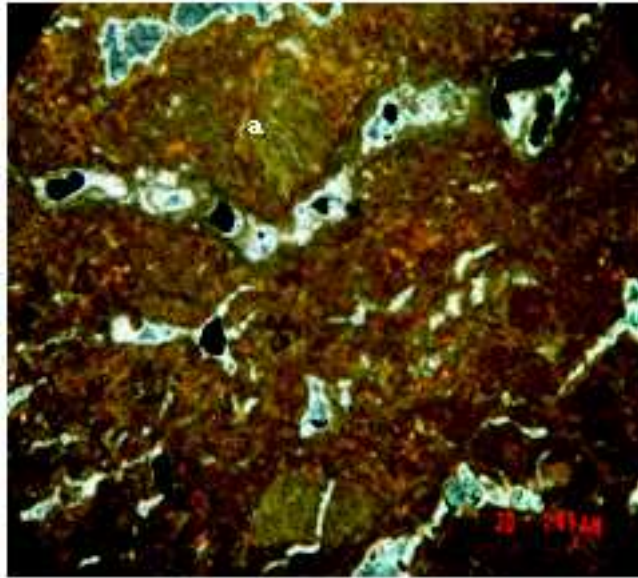


a : Calcite primaire dans un chenal

*Photo 42 : Micromorphologie de la Croûte 14 G*5*

- La croûte 15

La description de cette croûte indique la présence de chenaux avec remplissage total ou partiel de calcite et la présence aussi d'endroits enrichis en fer (photo 43). Cette croûte se distingue par l'absence de matériel grossier. Le matériel fin est constitué de limon et de calcite. La masse basale est sparitique et microsparitique.

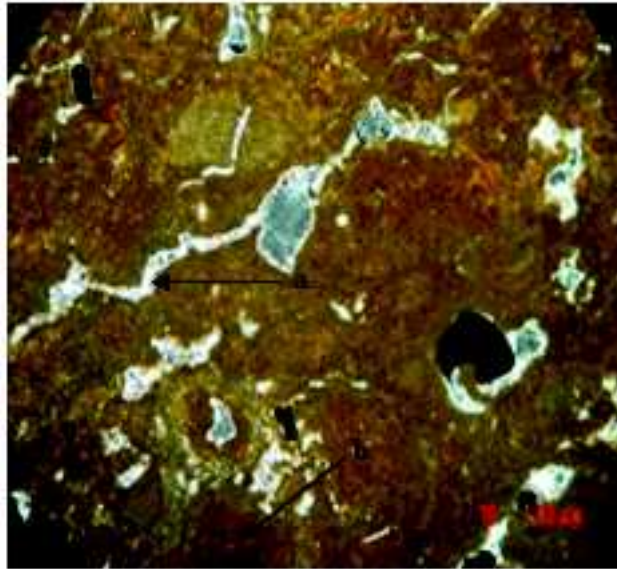


a : Endroit enrichis de fer

Photo 43 : Micromorphologie de la croûte 15G*5

- La croûte 16

L'étude de la lame mince (photo 44) indique l'absence de matériel grossier. Le matériel fin est constitué de limon et de calcite. La masse basale est homogène, sparitique et microsparitique dense, formant une plage grisâtre avec des zones ferrugineuses. Il y a des chenaux remplis total ou partiellement de calcite. Les vides sont constitués de vésicules avec cutanes de calcite.

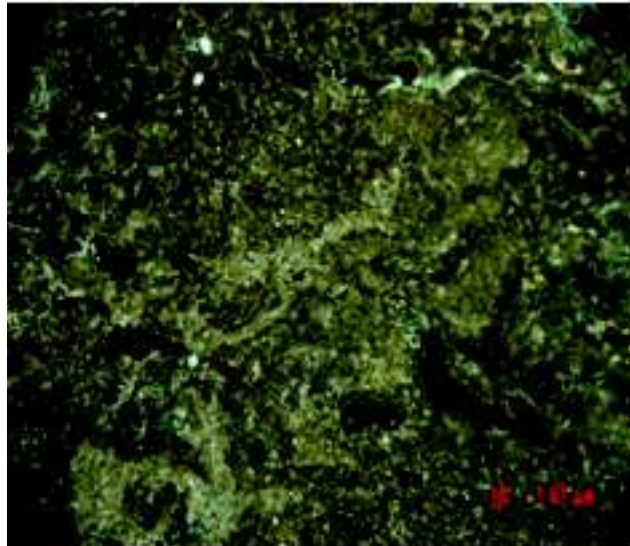


a : Canal rempli par la calcite
b : Traces de fer

*Photo 44 : Micromorphologie de la Croûte 16 G*5*

- La croûte 17

L'observation micromorphologique de cette croûte indique l'absence totale de matériel grossier. Le matériel fin est constitué de calcite, de limon et de peu d'argile. Les vides sont constitués par des vésicules qui représentent 30% du volume total. Leurs parois sont tapissées par la microsparite et par un matériau ferrugineux.

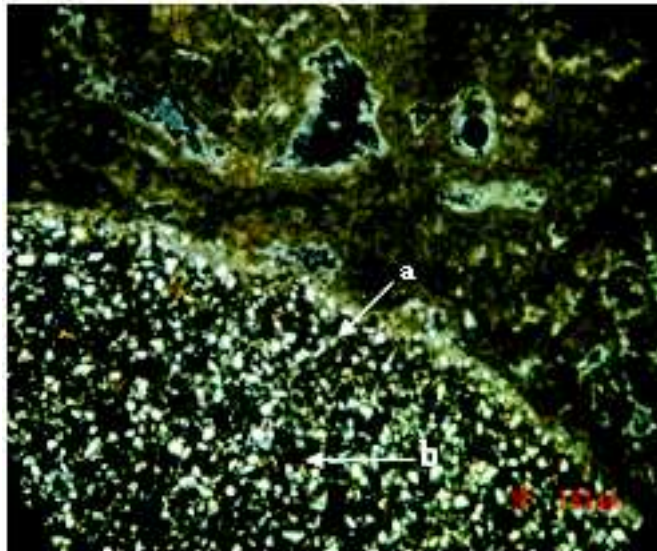


*Photo 45 : Micromorphologie de la Croûte 17 G*5*

- La croûte 18

On observe en lame mince (photo 46) la présence d'un gravier avec de nombreux quartz de forme sub-anguleuse à l'intérieur. Le matériel grossier est négligeable. La masse basale est carbonatée (sparite et microsparite).

Les vides représentent 20% du volume total. Ils sont constitués de vésicules avec cutanes de calcite ; Présence de remplissage de fer dans certains vides.

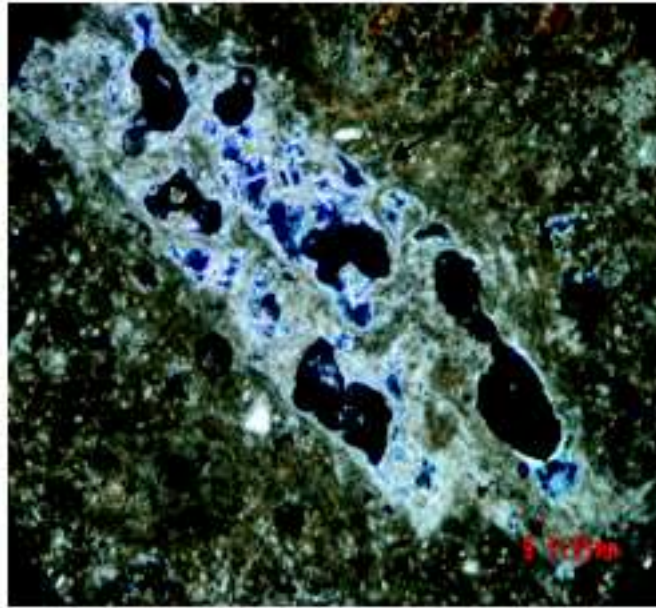


a : Graviers avec minéraux à l'intérieure
b : Nodule de fer

*Photo 46 : Micromorphologie de la Croûte 18 G*5*

- La croûte 19

L'observation de la lame mince montre la présence de calcite en aiguilles dans certains vides (cristallisation rapide). Le matériel grossier (moins de 5%) est formé par de quartz. On y observe aussi la présence de quelques nodules de fer. Le matériel fin est constitué de calcite et de limon (photo 47). La masse basale sparitique est homogène. Les vides sont représentés par des vésicules et des cavités avec parfois remplissage de calcite. Il y a également la présence de quelques grandes cavités et cutanes de calcites en aiguilles. Les vides représentent 10 à 20% du volume total.



a : Calcite en aiguilles

Photo 47 : Micromorphologie de la Croûte 19 G*5

- La croûte 20

L'observation de la lame mince (photo 48) indique que la masse basale est entièrement carbonatée (microsporite et micritique) et qu'elle constitue une organisation pédologique calcitique. Le matériel grossier est formé de grains de quartz de forme sub-arrondie avec une abondance de 2 à 5%.

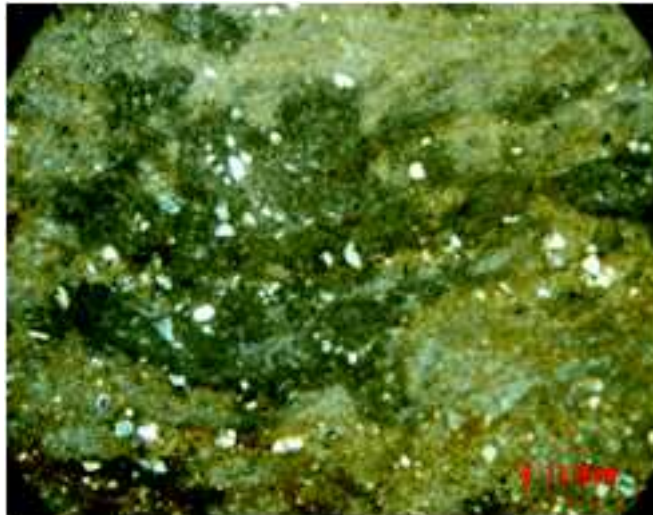


Photo 48 : Micromorphologie de la Croûte 20 G*5

3- les caractéristiques analytiques des croûtes étudiées

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées sur les vingt et une croûtes calcaires provenant de trois régions étudiées sont présentés dans le tableau VI.

Croûte	Lieu	CaCO ₃ %	pH	da	dr	Porosité %	Solubilité CaCO ₃ mg/l	
							CaCO ₃ mg/l Particules <2mm	CaCO ₃ mg/l Particules grossières (2 à 3 cm)
1	Staouali	98	8.60	2	2.43	17.70	18.75	8.55
2	Mazafran	82	8.42	1.93	2.36	16.94	21.87	6.87
3	Koléa	80	8.02	1.83	2.70	32.22	23.75	6.87
4	Hydra	90	8.41	1.90	2.65	28.30	20	7.5
5	Ain Tagourait	87	8.55	2.24	2.65	15.47	28.75	7.5
6	Tipaza	67	8.25	2.17	2.60	16.63	24.37	6.87
7	Tipaza	96	8.35	2.11	2.63	19.77	25	6.87
8	Baba Ali	95	8.70	2.04	2.60	21.53	36.87	8.75
9	Fornaka	71	7.65	2	2.24	10.71	15.62	9.82
10	Fornaka	72	7.78	1.62	2.40	32.50	18.12	10.22
11	Fornaka	75	8.00	1.98	2.34	15.38	18.75	10.22
12	Fornaka	79	8.51	1.98	2.63	24.71	20	10.63
13	Yellel	98	8.69	2.18	2.50	12.80	15.35	11.67
14	El-Attaf	88	8.38	2.22	2.34	5	18.12	11.25
15	Berrouaghia	83	8.45	1.84	2.63	30.03	13.92	10
16	Berrouaghia	80	8.48	2	2.43	14.81	13.52	13.52
17	Berrouaghia	92	8.64	1.90	2.50	24	13.10	11.25
18	Berrouaghia	75	8.09	2.14	2.26	5	14.37	11.25
19	Sidi Naaman	87	7.90	1.48	2.26	34.5	13.10	10
20	Sidi Naaman	90	8.61	2.16	2.69	24.53	13.52	10.63
21	Gelb-El Kebeir	80	8.20	1.86	2.48	25	11.47	10.63

Tableau VI : Caractéristique analytique brute des croûtes calcaires étudiées.

L'analyse statistique du tableau précédant est présentée dans le tableau VII.

Tableau VII : Résultats statistiques des paramètres étudiés

	Paramètres statistiques	CaCO ₃ %	pH	da	dr	Porosité	Solubilité fin	Solubilité gorssière
L'ensemble des croûtes	Minimum Maximum type C.V %	67.98 84.17	7.67 8.17	1.83 2.24	2.20 2.50	12.19 34.15	36.87	68.96 16.22 30
Les croûtes d'Alger	Minimum Maximum type C.V %	67.98 87.10	7.60 8.27	1.83 2.24	2.20 2.75	12.47 32.22	36.87	68.96 16.54 23
Les croûtes du Nord Ouest	Minimum Maximum type C.V %	71.98 80.10	7.55 8.05	1.83 2.24	2.20 2.50	10.16 35.12	36.87	68.96 16.62 10.63
Les croûtes de Berrouaghia	Minimum Maximum type C.V %	75.98 84.08	7.60 8.14	1.83 2.24	2.20 2.50	12.16 34.21	36.87	68.96 16.52 11704

L'analyse du tableau VII indique que les taux de calcaire des croûtes étudiées varient entre 67 % (croûte 6) et 87 % (croûte 1 et 13) avec une moyenne de 84 %. Ce résultat signifie que les croûtes sont très riches en calcaire. Le calcul des taux moyens en calcaire des croûtes d'Alger (87 %), des croûtes du Nord Ouest (80 %) et de celle de Berrouaghia (84 %) révèlent que les teneurs en calcaire dans les croûtes sont très fortes et qu'elles ne varient pas d'une région à l'autre. De même, les différences des moyennes entre les teneurs en calcaire des croûtes de chaque région pris deux à deux sont toutes non significatives (annexe1, tableau 1). Les taux de calcaire des croûtes sont donc statistiquement non différents selon les régions. Les statistiques indiquent que la variabilité spatiale est faible aussi bien pour l'ensemble des croûtes (CV= 11 %) que pour les croûtes d'Alger (CV= 12 %), les croûtes de Nord Ouest (CV= 13%) et les croûtes de Berrouaghia (CV=7 %).

La densité apparente des croûtes est élevée, elle varie entre 1.48 (croûte 19) et 2.24 (croûte 5), la moyenne générale étant de 1.98. La moyenne et le coefficient de variation pour les croûtes d'Alger (M = 2.02, CV = 7 %), les croûtes du Nord Ouest (M= 1.99, CV = 10 %) et les croûtes de Berrouaghia (M = 1.91 et CV = 12 %) montrent que les densités des croûtes des trois régions varient très peu. Ce résultat est confirmé par les différences des moyennes qui sont dans tous les cas statistiquement non différentes (annexe1, tableau2). Le tableau VI montre que la croûte 19 de Sidi Naaman est celle qui présente la plus faible densité (1.48) et la croûte 5 de Ain Tagourait est celle qui a la densité apparente la plus élevée (2.24) malgré que ces deux croûtes ont le même taux de calcaire (87 %). Le durcissement n'est pas lié à la quantité de calcaire mais serait dû au niveau de cristallisation du carbonate du calcium.

La densité réelle des croûtes étudiées est élevée, elle varie entre 2.24 (croûte9) et 2.70 (croûte 3) avec une moyenne de 2.49 . Ces fortes valeurs sont relativement proches de celle de la calcite pure (2.71). Les statistiques révèlent une faible variation spatiale pour l'ensemble des croûtes (CV = 3 %) et pour les croûtes de chaque région Alger (CV = 4 %) ; Nord Ouest (CV = 5 %) et Berrouaghia (CV = 6 %). On en déduit que la densité réelle varie faiblement d'une région à une autre. Cependant, la différence des moyennes des densités réelles entre les croûtes d'Ager et celle des croûtes du Nord Ouest est statistiquement significative (t= -2.46 , p = 0.02). Par contre cette différence est non significative entre les densités réelles des croûtes d'Alger et celles de Berrouaghia (t= -1.53, p= 0.14) et entre les densités des croûtes du Nord Ouest et les croûtes de Berrouaghia (t=0.65, p=0.52).

La porosité totale des différentes croûtes varie entre 5 % (croûte 14) et 34 % (croûte 19), la moyenne générale étant de 20 %. Les statistiques montrent que la variabilité spatiale pour l'ensemble des croûtes étudiées est élevée (CV = 42 %). Cette variabilité est moyenne pour

les croûtes d'Alger (CV = 29 %), très élevée pour les croûtes du Nord Ouest d'Algérie (CV= 59) et élevée pour les croûtes de Berrouaghia (CV = 43 %).

D'après ces résultats il ressort que la porosité des croûtes varie aussi bien au sein d'une même région qu'entre régions différentes. Cependant, les différences des moyennes de porosité entre les trois régions sont non significatives et ne rendent pas compte de l'hétérogénéité de ce paramètre (annexe1, tableau4). La porosité est donc statistiquement non différente d'une région à une autre.

On remarque d'après le tableau VI que les croûtes qui présentent une faible porosité tel que la croûte 14 d'El-Attaf (5 %) et la croûte 18 de Berrouaghia (5 %), ont une densité réelle et apparente qui se rapproche.

Le pH des croûtes calcaires varie entre 7.65 (croûte 9) et 8.70 (croûte 8) avec une moyenne générale de 8.31. Les pH moyens des croûtes d'Alger (8.41), des croûtes du Nord Ouest (8.16) et des croûtes de Berrouaghia (8.33) indiquent que ce paramètre est peu variable. Ce résultat est confirmé par la faible variabilité spatiale du pH pour l'ensemble des croûtes (CV = 4 %) et pour les croûtes de chaque région (CV = 2 % pour les croûtes d'Alger, CV = 5 % pour les croûtes de Nord Ouest d'Algérie et CV = 3 % pour les croûtes de Berrouaghia). Ce résultat signifie que le pH ne varie pas d'une région à une autre. Par ailleurs, on remarque que les valeurs du pH des croûtes étudiées sont proches du pH d'équilibre de la calcite qui est de 8.4.

La solubilité de la fraction inférieure à 2 mm varie entre 11.47 mg/l (croûte 21) à 36.87 mg/l (croûte 8) avec une moyenne générale de 18.96mg/l. Selon le tableau VII, le coefficient de variation est élevé pour l'ensemble des croûtes (CV = 33 %), moyen pour les croûtes de la région algéroise (CV= 23 %), faible pour les croûtes du Nord Ouest (CV =12 %) et les croûtes de Berrouaghia (CV = 7 %). Les différences des moyennes entre les croûtes des trois régions prises deux à deux sont toutes significatives (annexe1, tableau 6).

la solubilité de la fraction grossière varie entre 6.87mg/l et 13.59 mg/l avec une moyenne de 10mg/l. La variabilité spatiale est moyenne pour l'ensemble des croûtes (CV = 20 %), faible pour les croûtes d'Alger (CV = 10 %), du Nord Ouest (CV = 7 %), et de Berrouaghia (CV= 11%). Les différences des moyennes (annexe1,tableau7) entre les croûtes d'Alger et les croûtes du Nord Ouest, et entre les croûtes d'Alger et les croûtes de Berrouaghia sont significatives. Par contre, les différences des moyennes entre les croûtes du Nord Ouest et les croûtes de Berrouaghia sont statistiquement non significatives.

4- La minéralogie des croûtes

Les résultats du tableauVIII et de l'Annexe1 montrent que toutes les croûtes étudiées sont composées de calcite (représentée par les pics 3.03 A°, 2.28 A° et 2.09 A° vérifiées à l'aide de la fiche A.S.T.M d'identification : 5-586) et de quartz (représenté par les pics de 3.34 A°, 4.25 A° et 1.81 A°, vérifiées à l'aide de la fiche A.S.T.M d'identification : 33-1161). Selon ces résultats, la hauteur des pics n'est pas en rapport avec la teneur en CaCO₃ (cas des croûtes 9 et 10), elle serait plutôt liée au niveau de cristallisation de la calcite. Par ailleurs, ce résultat traduit une grande homogénéité minéralogique des croûtes calcaires du nord de l'Algérie.

Tableau VIII :composition minéralogique des croûtes calcaires.

N° de croûte	La station	Calcite	Quartz
1	Staouli	**	*
2	Mazafron	**	***
3	Koléa	**	*
4	Hydra	***	*
5	Ain Tagouraitte	***	**
6	Tipaza	**	**
7	Tipaza	**	*
8	Baba Ali	**	*
9	Fornaka	***	***
10	Fornaka	*	***
11	Fornaka	**	**
12	Fornaka	**	***
13	Yellel (Ghelizane)	***	***
14	EL Attaf (Ain Defla)	**	*
15	Berrouaghia	***	*
16	Berrouaghia	**	*
17	Berrouaghia	**	*
18	Berrouaghia	**	*
19	Sidi naaman	***	*
20	Sidi naamen	**	*
21	Ghelb elkhebeir	**	*

Discussion générale

Les résultats ont montré que toutes les croûtes étudiées proviennent de la base de sols rouges lessivés. Les horizons situés au dessus de ces croûtes sont généralement dépourvus de calcaire. Néanmoins, dans certain cas, il s'est avéré la présence de calcaire dans les horizons de surface et sub surface. Ce phénomène serait dû à une recarbonatation secondaire du profil. Par ailleurs, ce résultat (présence de la croûte à la base du profil) ne peut être dû qu'à un processus de décarbonatation du profil ou lixiviation et accumulation de calcaire en profondeur. Néanmoins, ces fortes quantités de calcaire à la base de profil ne peuvent être expliquées par le seul lessivage vertical, la remontée capillaire et les transferts latéraux du carbonate de calcium ont probablement une large contribution dans la formation de ces croûtes calcaires dans le profil. Ruellan (1969) souligne que l'épaisseur et la teneur en calcaire des accumulations calcaires sont indépendantes de celles de l'horizon supérieur qui peut être calcaire ou non, quelle que soit son épaisseur. Les résultats ont montré également que lorsqu'on va des régions à climat méditerranéen sub-humide (la région algéroise) vers un climat plus sec (Berrouaghia et le Nord Ouest d' Algérie), les accumulations calcaires se rapprochent progressivement de la surface du sol. Ce phénomène serait du à la compétition entre le drainage et la remontée capillaire et donc à la capacité des eaux des pluies où mobilisation du carbonate de calcium (Dijli, 2000).

Les croûtes calcaires étudiées proviennent de sols développés sur des roches mères différentes. Ces roches sont parfois très pourvues en calcaire (grès calcaire, molasse calcaire, tuf) et parfois elles sont moins (sable consolidé, alluvions). De ce fait, il ressort qu'il n'y a pas de rapport entre la richesse en calcaire de la roche mère et celle des croûtes

calcaires. Ce phénomène a été étudié par de nombreux auteurs (Ruellan, 1969 ; Briot, 1976 ; Vogt, 1984) qui ont conclu que les accumulations calcaires ne sont pas des apports allochtones et que leur calcaire n'a pas été fourni exclusivement par la roche mère.

Les croûtes développées sur une formation sableuse tel que la croûte 5 de Ain Tagourait, 13 de Yellel et 14 d' El Attaf sont les plus dures. Selon Tihay et Vogt (1979), l'importance de la croûte calcaire varie en fonction de la granulométrie, elle est plus épaisse et plus compacte sur des matériaux sableux, plus mince et d'aspect feuilleté sur des sédiments à texture fine.

Par ailleurs, il s'est avéré que l'accumulation calcaire est formée par une succession de formation représentée du bas en haut par un encroûtement massif, une croûte feuilletée surmontant l'encroûtement massif et enfin une pellicule rubanée qui surmonte la croûte feuilletée (exemple de Berrouaghia).

Les analyses ont montré que toutes les croûtes étudiées sont très riches en calcaire (teneur comprise entre 67 % et 98%). Le calcul de la moyenne et la variabilité spatiale du calcaire pour les croûtes d'Alger, de Berrouaghia et du Nord-Ouest a montré que les taux de calcaire des croûtes de ces trois régions sont tous très élevés (M=84%) et ne varient pas selon la région. Ce résultat traduit l'homogénéité des taux de calcaire dans les croûtes calcaires des sols de l'Algérie du Nord. Ayache (1996) et Djili (2000) ont indiqué que les taux de calcaire les plus importants dans les sols d'Algérie du Nord se localisent dans les régions arides et semi aride avec quelques exceptions pour les régions humides et sub-humides, et que l'essentiel des teneurs en calcaires se localisent dans le Nord-Ouest, l'Ouest et le sud, où le calcaire s'individualise beaucoup plus sous forme discontinue et continue, surtout pour les horizons de profondeur.

Lors des analyses effectuées au laboratoire nous avons constaté de légère différence des taux de calcaire dans les croûtes. Dans la présente étude nous n'avons présentés que la moyenne des teneurs en calcaire. Les différences de ces taux de calcaire à l'intérieur d'une même croûte calcaire seraient dues à l'hétérogénéité pétrographique du matériau d'accueil (Vogt, 1984).

La densité apparente croûtes étudiées varie entre 1.48 et 2.24. Ces valeurs sont proches de celles des densités trouvées par Butel (1982) dans les accumulations calcaires des sols de la plaine de Poitevine (France) (valeurs comprise entre 1.50 et 2.50). Les résultats obtenus ont permis de constater que la croûte 19 qui présente la plus faible densité (1.48) et la croûte 5 qui présente la densité la plus élevée (2.24) ont le même taux de calcaire (87 %). Ce résultat signifie que la densité apparente des croûtes n'est pas liée à sa teneur en calcaire. Par ailleurs, nous avons constaté que les croûtes les plus denses sont les plus dures. Ce durcissement ne serait donc pas lié à la teneur en calcaire des croûtes, mais plutôt à sa distribution et à sa cristallinité (Mathieu et Thorez, 1976).

Les valeurs de la densité réelle des croûtes étudiées sont toute élevées (2.24 à 2.70). Elles sont proches de celle de la calcite pure (2.71). Ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par la richesse des croûtes en calcite ; résultat confirmé par l'étude minéralogique qui a montré que ces croûtes sont toute à base de calcite.

La porosité des croûtes varie entre 5 et 34 %. D'après Ballais et Vogt (1979), la porosité des croûtes calcaires à granulométrie relativement homogène peut atteindre 5%. Dans ce sens, Besnard (2000) souligne que les roches calcaires ont généralement une faible porosité comprise entre 1 et 12.5%. Cet auteur souligne que la variation de la porosité dans les croûtes calcaires est due essentiellement au mode de cristallisation de la calcite.

Le pH moyen pour l'ensemble croûtes étudiés est de 8.31, valeur proche de celle du carbonate de calcium pure (pH=8.4) (Daoud et al, 1993). Ce résultat signifierait que le CaCO_3 est le principal sel présent dans les croûtes étudiées.

Les analyses ont montré aussi que la solubilité du carbonate de calcium est faible (11.47 à 36.87 mg/l). Ce résultat concorde avec celui de Bathurst (1971) qui indique que la solubilité de carbonate de calcium, dans l'eau pure et en vase clos, est d'environ 14.3 mg/l et en présence de l'atmosphère elle peut atteindre 50mg/l. Cependant, cette solubilité reste supérieure à celle de la calcite pure ($K = 10^{-8.37}$) (Daoud et al ; 1993). Ces résultats signifient que le carbonate de calcium contenu dans les croûtes étudiées serait plus soluble que celui de la calcite pure. Ce phénomène serait dû au degré de pureté et à la taille de la calcite (Gras, 1974). Nous rappelons que ces résultats sont obtenus à partir des échantillons broyés et tamisés à 2mm. La solubilité déterminé à partir des échantillons grossiers (2 à 3 cm) s'est avérée nettement plus faible (6.85 à 13.52 mg/l) que celle des échantillons broyées. De ce fait, on peut considérer que les croûtes calcaires dans la réalité sont très peu solubles.

Les observations micromorphologiques ont montré que le matériel grossier est constitué essentiellement de quartz de forme subarrondi, sauf pour les croûtes de Berrouaghia (15, 16,17 et 18) qui en sont dépourvus. Une couche de microsparite précipite autour de certains cristaux de quartz (cas des croûtes 5, 9, et 11). Selon Vogt (1984) et Leslie et al. (1991), des auréoles de microsparite se forment généralement autour de grains de quartz. La micrite recristallise en microsparite, d'abord en auréole autour des grains de quartz, puis dans la masse du sédiment et à l'intérieur des grains eux mêmes. Halitim (1988) a indiqué qu'il est souvent possible d'observer à la surface des grains de quartz des précipitations de calcite. Cet auteur considère ces observations comme des traits pédologiques très répandus dans les horizons à fortes accumulations de calcaire.

Dans les zones de circulation d'eau, la calcite secondaire se présente sous forme aciculaire (cas de la croûte 8 de Baba Ali, 9 et 11 de Fornaka et 19 de Sidi Naaman). Butel (1982) et Curtis et Leroy (1991) soulignent que cette forme (la calcite en aiguilles) apparait dans la macroporosité où circulent les solutions. Ces observations révèlent une certaine hétérogénéité micromorphologique dans les croûtes étudiées.

La minéralogie des croûtes étudiées a montré qu'elles sont toutes constituées essentiellement par deux phases minérales, la calcite (CaCO_3), phase minérale la plus abondante et qui a pour principales raies ($d_1 : 3.03$, $d_2 : 2.28$, $d_3 : 2.09$), et de quartz (SiO_2) phase minérale identifiée par ses trois principales raies caractéristiques ($d_1 : 3.34$, $d_2 : 4.25$, $d_3 : 1.81$).

Conclusion générale

Cette étude est une contribution à une meilleure connaissance des accumulations calcaires de Sols d'Algérie. Pour ce faire, la présente recherche s'est focalisée exclusivement sur l'étude des croûtes calcaires des régions les plus septentrionales de l'Algérie. Cet objectif se justifie par le fait que ces croûtes calcaires sont peu connues et par le fait que très peu de travaux ont été consacrés. Ainsi, cette recherche s'est intéressée à l'étude de vingt et une croûtes calcaires provenant de la région Algéroise, de Berrouaghia et du Nord Ouest Algérien. Chaque croûte a fait l'objet d'une caractérisation morphologie, micromorphologique, physico-chimique et minéralogique.

Il y a lieu de remarquer que toutes les croûtes étudiées proviennent d'horizons d'accumulations calcaires, de sols rouges lessivés. Ce résultat signifierait que l'accumulation calcaire dans les régions étudiées serait fortement liée aux processus de décarbonatation des sols, contrairement à celle des régions plus arides qui, elles, seraient plutôt liées aux processus de carbonatation des sols. Dans certain cas, l'accumulation calcaire dans les zones étudiées, en particulier dans les zones plus sèches (Berrouaghia par exemple) est similaire à toutes proportions gardées, à celles des régions arides et semi-arides. En effet, l'accumulation calcaire se caractérise par un encroûtement massif à sa base qui se transforme en une croûte feuilletée et pellicule rubanée sur le sommet. Les croûtes étudiées proviennent toutes de sols rouges lessivés, développées sur des roches mères différentes qui peuvent être calcaires ou non (grés calcaire, tuff, molasse calcaire, sable consolidé et alluvions). L'observation morphologique a montré que ces croûtes sont généralement peu friables quand elles sont blanchâtres et très dures quand elles sont de couleur rosâtre à saumon.

Les observations micromorphologiques ont révélées une certaine hétérogénéité des croûtes étudiées qui se traduit par la présence ou l'absence de matériel grossier, de précipitation de calcite à la surface des grains de quartz et la précipitation de calcite secondaire sous forme aciculaire dans les vides où circulent les solutions.

Les vingt et une croûtes calcaires étudiées sont constituées par pratiquement le même cortège minéralogique constitué par la calcite et le quartz.

Les principaux résultats obtenus ont montré que les vingt et une croûtes étudiées se caractérisent par :

- Des taux de calcaire très élevés (teneur comprise entre 67 et 98%).
- Des densités apparentes très élevées qui varient entre 1.48 et 2.24.
- Des densités réelles également très élevés et qui varient entre 2.24 et 2.70.
- Des porosités variables entre 5 et 34%.
- Des pH compris entre 7.67 et 8.7 avec un pH moyen de 8.31.

Des solubilités faibles qui varient entre 11.47 et 36.87 mg/l pour la fraction fine (2mm) et entre 6.85 et 13.52 mg/l pour la fraction grossière (diamètre compris entre 2 et 3 cm).

Enfin, cette étude a montré que les croûtes étudiées se différencient très peu les une des autres quand elles se situent dans une même région. De même, les résultats obtenus ont montré que même entre région, il n'y a pas de différence significative.

Au terme de cette recherche qui a porté sur l'étude exclusive de la croûte calcaire sans préjuger de son origine pédogénétique ni du contexte naturel dans lequel elle s'est formée, nous pensons que les résultats obtenus contribuent à une meilleure connaissance de ce type de formation pédologique. Cependant, des investigations plus poussées doivent se poursuivre en considérant l'étude pédogénétique du profil calcaire dans son intégralité dans des conditions climatiques, géologiques et géomorphologiques différentes.

Références bibliographiques

- Aubert G., 1967** - Les sols à croûte calcaire Ed. ORSTOM, Paris, 332p.
- Ayache N., 1996** – Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols calcaires de l'Algérie du nord. Mem. Ingénieur, I.N.A. 70p.
- Bahri A., Blancaneaux Ph., Pantanier R. et Zaier M., 1987** - Caractéristique morphologique d'une séquence de sol à accumulation calcaire dans la région de Béja. Rapport du Ministère de l'Agriculture, Direction des sols, Tunisie 21p.
- Ballais J.L et Vogt T., 1979** - Croûtes calcaires quaternaires du piémont nord aures (Algérie). Recherche géographique N°12, pp. 23-34.
- Bathurst R.G.G., 1971** - Carbonate sediments and their diagenesies. Amesterdamthe Netherland, Elsevia 620 p.
- Belouam N., 1976** - Caractéristiques morphologiques et micro-morphologiques de quelques sols à accumulations calcaire du Hodna. Ann – INA, El-Harrach, Vol. VI, pp.53-79.
- Benakacha M., Bouaziaa S. et Sghari A., 2005** - Processus de formation de la croûte calcaire Villafranchienne dans la plate forme orientale de Tunisie. 3^{ème} journées Internationale des Géosciences de l'environnement El-Jadida les 8, 9 et 10 juin 2005. Université Chouaib Doukkali, faculté des sciences pp. 13 – 34.
- Benmati A., 1993** - Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souagh (Beni-Sliman) , relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires, thèse Magister, INA, El-Harrach, Alger, 225 p.
- Berner R. A. et Morse J. W., 1974** - Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water : IV. Theory of calcite dissolution. Am. J. Sci. , 274, 108-134.
- Besnard K., 2000** - Evolution physico-chimique des matériaux carbonatés en milieu triphasique. DEA université Pierre et Marie Curie, France 50 p.
- Blancaneaux P., Houmane B. et Gallali T., 1987** - Les différents faciès d'accumulation calcaires dans la région orientale de la penincile du Cap – Bon (Tunisie septentrionale) Cah. ORSTOM. Ser, Vol. XXIII, N° 4, pp. 253 – 272.
- Bock L., 1983** - l'intégration chrono-spatiale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage demi-aride de l'Atlas tellien (Algérie). Thèse de Doctorat, Université de Genbloux Belgique 447 p.
- Boudet G. et Laouinia A., 1989** - le contexte géomorphologique des encroûtement calcaires généralisés : le cas du Maroc Nord-Oriental – Méditerranée Tome 68, N° 2-3, pp-29-40.
- Boulaine J., 1961** - Sur le rôle de la végétation dans la formtion des carapaces calcaires méditerranéennes. C.R.A. Sc, Paris 253, pp 2363-2570.

- Boulaine J., 1966** - Sur les relations entre les carapaces calcaires et les sols isohumique des climats xerothérique. *Sci. Sol* 1 pp 3-15.
- Briot Ph., 1976** - Introduction à l'étude des calcrètes. Rapport DEA. Pédologie et aménagement des sols. Paris, 25p.
- Buol S.V., 1965** - Present soil – forming factors and processes in arid and semi-aride regions. *Soil Sc.* 99(1), pp 45 – 49.
- Butel P., 1982** - Formes et mécanismes de l'accumulation carbonatée dans les sols de la plaine poitevine. Thèse, Univ. Poitiers, 122 p.
- Cailleau P., Dragone D., Esclamadon., Girou A., Humbert L., Roques H. et Sellier E., 1980**-cristallisation en milieu libre et en milieu poreux, dissolution et pression-dissolution : principaux résultats expérimentaux. C.R. G.E.S.C., Bordeaux, pp 81-98.
- Cailleau P., 1982** - Etude pétrologique expérimentale de la cimentation calcique et aragonitique. Thèse Docteur en Sciences, Bordeau III, 402p.
- Callot G., Chamayou H. et Dupuis M., 1978** - Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relations avec la dynamique de l'eau éléments d'analyse d'un système carbonate. *Ann. Agron.* , 29 (1) pp. 37-57.
- Carnicelli S., Ferrari G.A., magaldi D., 1989** - les accumulations carbonatées de type « Calcrète » dans les sols et formations superficielles d'Italie Meridionale. *Mediterranée*, Tome 68, N° 2-3, pp. 51-88.
- Chamayou H. et Legros J.P., 1989** - Les bases physiques chimiques et minéralogiques de la science du sol. Cd. P.U.F, Paris, 593 p.
- Curtis H. and Leroy A. 1991** - A Microscopic Examination of Pedogenic Calcite in an Aridisol of Southern New Mexico *Soil Science Society of America. Issu special*, pp 37-60.
- Daoud Y., Chevery C., Robert M., 1993** - Rôle physico-chimique du magnésium dans les soles sales des plaines du Cheliff (Algérie). *Science du sol*, Vol. 31 (4) : 281-293.
- Dejou J., Guyot J., Pedro G., 1977** - Evolution superficielle des roches cristallines et cristallophyliennes dans les regions tempérées. I.N.R.A. Paris. 464 p.
- Djili K. et Daoud Y., 1999** – Relation entre le pH et la teneur en carbonate de calcium des sols. Cas des sols du Nord Algérien. *Agrochimica* ,VLIII,n°3,pp 173- 177.
- Djili K., Daoud Y. et Ayache N., 1999** - Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale étude et gestion des sols. Vol. 6(3), pp 201-218.
- Djili K., 2000** – Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie – création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse de Doctorat d'état en science agronomique. INA. El Harrach.243P.
- Duchaufour Ph., 1968** - Evolution des sols : Essai sur la dynamique des profils. Ed. Masson et Cie ,93p.
- Dupuis M., 1975** - La répartition granulométrique des carbonates dans les sols. *Bull-AFES*, N° 4, pp. 249-270.

- Durand J. H., 1959** - Les sols rouges et les croûtes calcaires en Algérie. Ed. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural, 188p.
- Durand J.H., 1963** - Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. Bull. Soc. Géol. France, Vol. 7, pp. 959 – 968.
- Durand R., 1978** - La pédogenèse en pays de craie dans le Nord-Est de la France. Thèse, Inst. Geol. , Strasbourg, 175 p.
- Durand N., 2005** - Caractérisation et dotation U.T.H de calcrêtes formées sur socle précambrien reconstruction paléoenvironnementales dans l'Inde péninsulaire semi-aride. Université Paul Cezanne-Aix Marseille III 402p.
- Durand R. et Dutil P., 1972** - Contribution à l'étude de l'évolution des sols calcimagnésique. Sc.S.Afes N°1, pp. 25-36.
- Fitzpatrick EA., 1992** - Soil Microscopy and micromorphology. Ed.J Weley. 303 p.
- Freytet P. et Plaziat J-C., 1979** - Les ooides calcaires continentaux : Diversité des formes, des gisements, des modes de formation : croûtes calcaires recherches géographiques N° 12, Strasbourg, Micromorphologie et géomorphologie pp. 69 – 80.
- Freytet P. et Verrecchia E., 1989** - les carbonates continentaux du pourtour méditerranéen : microfaciès et milieux de formations méditerranée TOME 68 N 2-3 pp. 5-25.
- Garrels R.M. et Crist C. L., 1967** - Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Ed. Librairie Gauthiers – Villars, Paris, 335p.
- Gile L.H., Peterson F.F. Grossman R. B., 1966** - Morphological and genetic sequences of carbonates accumulation in desert soils. Soil Sci. N°101, pp. 347- 360.
- Goudie A.S., 1972** - The chimistay of world calcrete deposits J. Geol – 80, p 449 – 463.
- Gras F., 1974** - Application d'un e méthode expérimentale à la détermination du pH et de la solubilité du carbonate de calcium dans les sols calcaires. Bull. AFES, N° 01, pp. 33 – 48.
- Halitim A., 1988** - Les sols des régions arides d'Algérie. Ed.OPU, Alger 361p.
- Halitim A. ; Robert M. et Pedro G., 1983** - Etude expérimentale de l'épigénie calcaire des silicates en milieu confine - caractérisation des conditions de son développement et des modalités de la mise en jeu. Sc. Géol. Mem. , 71, pp. 63-73
- Henin S., 1976** - Cours de physique du sol Tome I. Texture – structure. Aération. Ed. ORSTOM, Paris. 159 p.
- Jaillard B., 1987** - Les structures rhizomorphes calcaires : Modèle de réorganisation des minéraux du sol par les racines. Thèse Doctorat d'Etat en science du sol, Montpellier, 221 p.
- Lacroix D. et Mathieu L., 1979** – Etude pétrographique d'un glacis a croûte calcaire : la Gaada Elhamra (Maroc). Recherches géographiques à Starsbourg –n°12, pp 45-54.
- Landry B. et Mercier M., 1983** - Notions de géologie avec exemple du Québec 2^{ème} édition. Ed. Mont – Royal, Quebec, 437p.
- Leslie D ; Ronald G ; Oliver A., 1991** – Numerical Modeling, Chemical, and Isotopic Studies of Carbonate Accumulation in Soils of Arid Regions. Soil Sci. Soc. Am. J, issu special, pp 17-36.

-
- Levy R., 1981** - Effect of dissolution of aluminosilicates and carbonates on ionic activity products of calcium carbonate in soil extracts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, N° 45, pp. 250-254.
- Lucas G. ; Cros P. et Lang J., 1976** - les roches sédimentaires. 2- Etude microscopique des roches meubles et consolidées. Ed. doin, Pris, 496 p.
- Magaldi D., 1983** - Calcareous crust (caliche) genesis in some Mollisols and Alfisols from Southern Italy: a micromorphological approach. , in BULLOCK P. & MURPHY C.P. (Eds), *Soil Micromorphology*, Vol. 2, Acad. Publ. , Berkhamsted, UK, pp 632-636.
- Mathieu L ., Thorez. J et Ek. C., 1976** - Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils de sol et dans les paysages d'Afrique du Nord-Ouest. *Ann. INA*, Vol. VI, N° 1, pp. 81 – 138.
- Millot G., Nahon. D. et Paquet H ; Ruellan A. et Tardy Y., 1977** - L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride. *Antiatlas, Maroc. Sc. Géol. Bull*, Strasbourg, 30 (3) pp. 129-152.
- Plet_Lajoux C., 1971** - Recherches expérimentales sur la formation des encroûtements calcaires, *Sc.S. Afes N°5*, pp. 7-10.
- Plummer L. N., Wigley T.M.L. et Parkhurst D. L., 1978** - The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5° to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *Am. J. Sci.*, 278, 179-216.
- Pouget M., 1980** - Les sols à croûtes calcaires dans les steppes Algériennes quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. *Cah. ORSTOM, serie Redologie*, vol – XVIII, N° 3-4 pp. 235-426.
- Pouget M. et Rambaud D., 1985** - quelques types de cristallisation de calcite dans les sols à croûte calcaire (steppe Algérienne). *Apport de la Microscopie électronique*. Ed ORSTOM, Paris, 379 p.
- Prince M. et Walsh K., 2006** - Roches et minéraux – collections LAROUSSE, 224p.
- Reeves C.C., 1970** - Origin, classification and geologic history of calich in the Southern High plains, Texas an Eastern New Mexico. *J. Géol.* 78, 3, pp 352-352.
- Robert M., 1975** - Principe de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann.Agron.* Vol 26 (4) : 363-399.
- Robert M., 1984** - La pédologie expérimentale et les aspects géochimiques et minéralogiques de l'évolution des sols. *Livre jubilaire du cinquantenaire, AFES*, 1984, 349 p.
- Ruellan A ., 1967** - Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. *Cahier ORSTOM, sér. Pédol*, vol. V, 4, pp. 421-456.
- Ruellan A ., 1969** - Les Horizons d'individualisation et d'accumulation calcaire dans les sols du Maroc. Ed. ORSTOM, Paris, 510p.
- Ruellan A., 1970** - Les sols à profil calcaire différencié des plaines de Basse-Moulouya (Maroc oriental). *Contribution à la connaissance des sols méditerranéens. Mémoire ORSTOM*, 54- 302 p.
-

- Ruellan A., 1976** - Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la base Moulaya. These Doctorat, 447p.
- Scott E., Conyers M.K., Fisher R., Lill W., 1992** - Particule in size determines the efficiency of calcitic limestone in amending acidic soil. Aust.S.Res Vol 30 (6) 1175-1185.
- Sehgal, J. L. , and, Stoops G., 1972** – Pedogenic calcite accumulation in arid and semi-arid regions of the Indo-Gangetic alluvial plain of erstwhile Punjab (India) – their morphology and origin. Geoderma 8 : 59 – 72.
- Sjoberg E. L., 1983** - Mixed kinetic control of calcite dissolution. Sci. Geol. Mem. , Strasbourg, N° 71, pp. 119-126.
- Suarez D.L., 1977** - Ion activity products of CaCO₃ in waters below root zone soil Sci. Soc-Am-J. , 41 pp. 234 – 241.
- Tihay J.P., Vogt T., 1979** - Observation des croûtes calcaires dans le bassin de Bouira (Vallée de l'Oued Soummam, Algérie). Recherches géographiques strasbourg N°12, pp 35-44.
- Torrent J., 1995** - Genesis and proprieties of the soil of Meditaranean region, uni. Degli studi Di Napoli Fedrricoll Departements Bi Scienza Chimica, 109 p.
- Van Der Berg GA and Loch J.P.G., 2000** - Decalcification of soil subject to periodic Weterlogging. European J.Soil.Sci. Vol.51 (01) pp.27-33.
- Vatan A., 1967** - Manuel de sédimentologie et technique, Paris, 397 p.
- Verrecchia E. et Freytet P., 1987** - Interférence pédogenèse sédimentation dans les croûtes calcaires. Proposition d'une nouvelle méthode d'étude : l'analyse microséquentielle, Soil Micromorphology AFES Ed. , p. 555-561.
- Vogt T., 1984** - Croûtes calcaires -types et genèse : Exemples d'Afrique du Nord et de France Méditerranéenne Doctorat d'Etat en Sciences Naturelles Strasbourg, Paris, 828p.
- Vogt T., 1987** - Quelques microstructures de croûtes calcaires quaternaires d'Afrique du Nord in Micromorphologie des sols. A.F.E.S pp 563 – 569.
- Wilding LP and L.R Drees., 1990** - Removal of carbonates from thin section for microfabric interpretations, pp.613-620. In L.A. Douglas (ed). Soil micromorphology : A basic and applied science. Elsevier, New York.
- William P., Inskeep WP and Blov PR., 1986** - Calcium carbonate supersaturation in Soil. Solutions of calciaquolls, Soil Sc.Soc Am.J. Vol 50 (60) : 1431-1437.

Annexe

Tableau 1 : La différence des moyennes de CaCO₃ des croûtes entre les régions

Paramètre	CaCO ₃		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 1.13	- 0.67	0.61
Probabilité	0.28	0.51	0.48
Signification	ns	ns	ns

Tableau 2 : La différence des moyennes de pH des croûtes entre les régions

Paramètre	pH		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 1.42	- 0.57	0.87
Probabilité	0.17	0.57	0.40
Signification	ns	ns	ns

Tableau 3 : La différence des moyennes de densité apparente des croûtes entre les régions

Paramètre	da		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 0.32	- 1.20	- 0.69
Probabilité	0.74	0.25	0.50
Signification	ns	ns	ns

Tableau 4 : La différence des moyennes de densité réelle des croûtes entre les régions

Paramètre	dr		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 2.46	- 1.53	0.65
Probabilité	0.02	0.14	0.52
Signification	s	ns	ns

Tableau 5 : La différence des moyennes de porosité des croûtes entre les régions

Paramètre	Porosité		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 0.97	0.36	1.04
Probabilité	0.34	0.71	0.31
Signification	ns	ns	ns

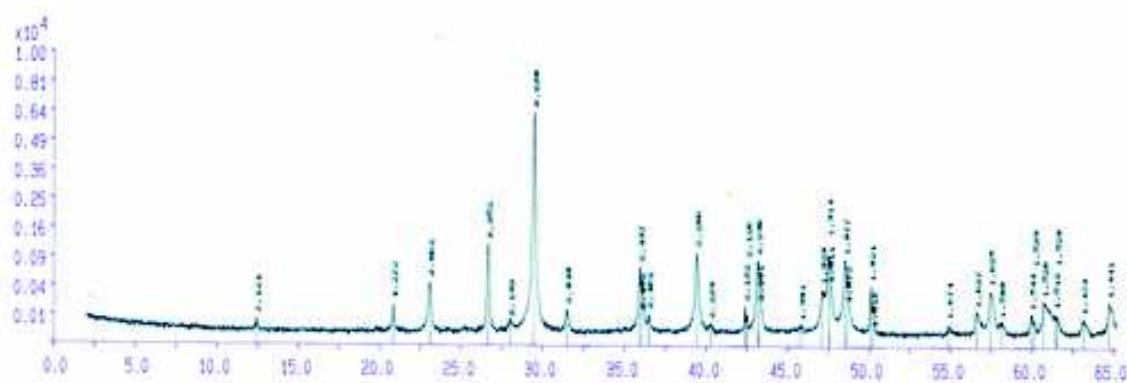
Tableau 6 : La différence des moyennes de solubilité (< 2mm) des croûtes entre les régions

Caractérisation physico-chimique, micromorphologique et minéralogique de quelques croûtes calcaires du nord de l'Algérie

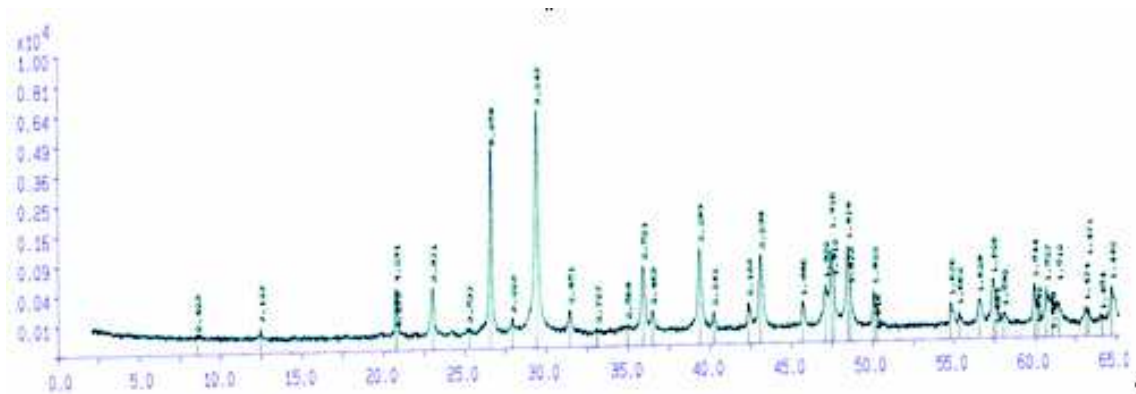
Paramètre	Solubilité (< 2mm)		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	- 2.96	- 5.27	- 5.60
Probabilité	0.01	1.49	1.58
Signification	s	s	s

Tableau 7 : La différence des moyennes de Solubilité (diamètre entre 2 et 3 cm) des croûtes entre les régions

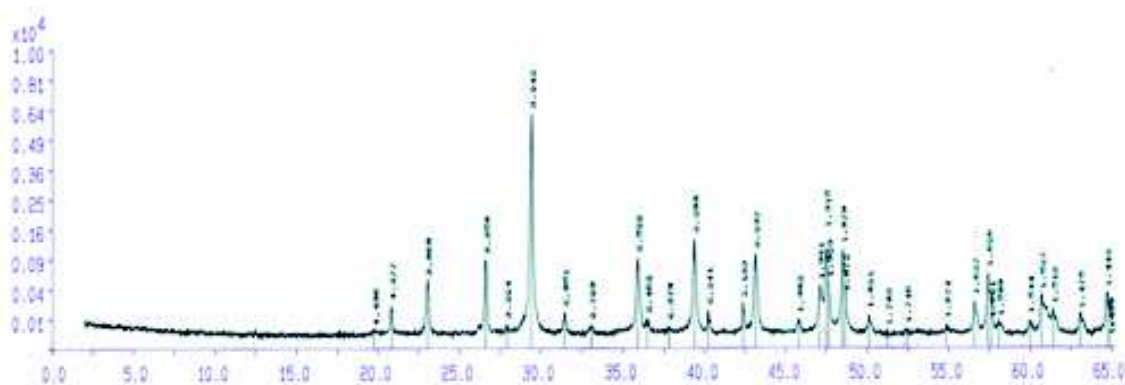
Paramètre	Solubilité (diamètre compris entre 2 et 3 cm)		
Région	Alger et Nord Ouest	Alger et Berrouaghia	Nord Ouest et Berrouaghia
t calculé	7.83	6.89	0.72
Probabilité	4.65	1.08	0.48
Signification	s	s	ns



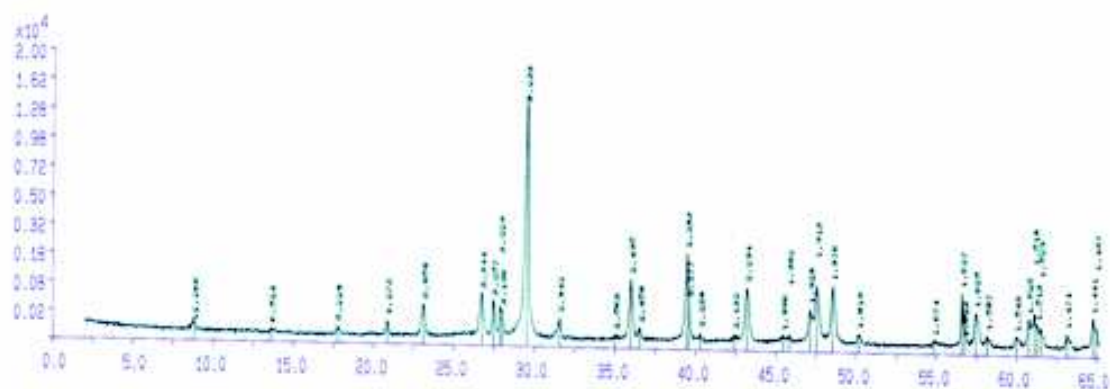
Graphe 01 : Diffractogramme de la croûte 1



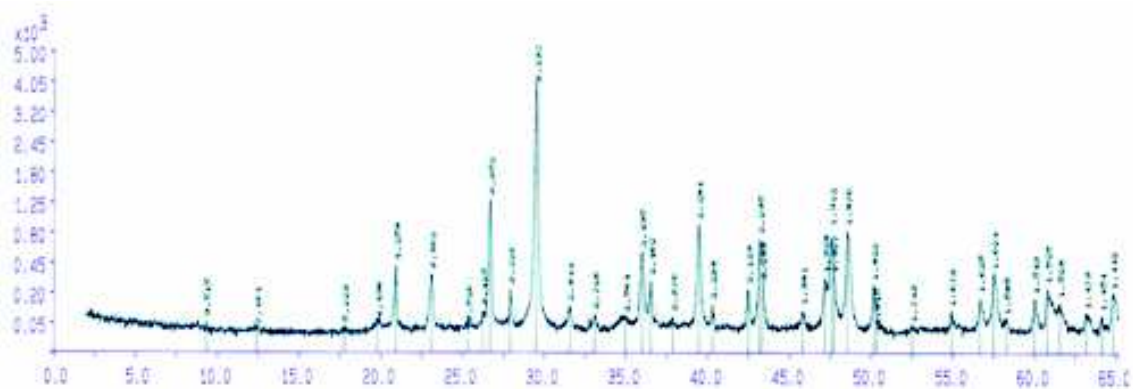
Graphe 02 : Diffractogramme de la croûte 2



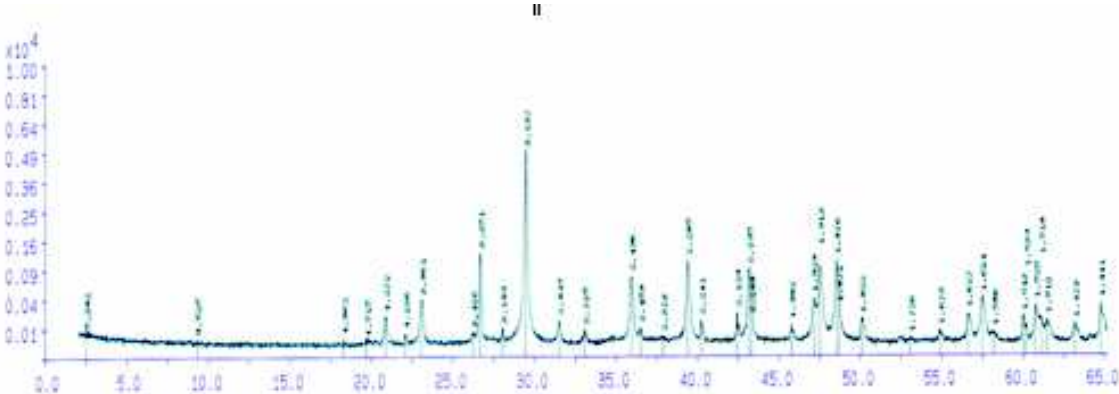
Graphe 03 : Diffractogramme de la croûte 3



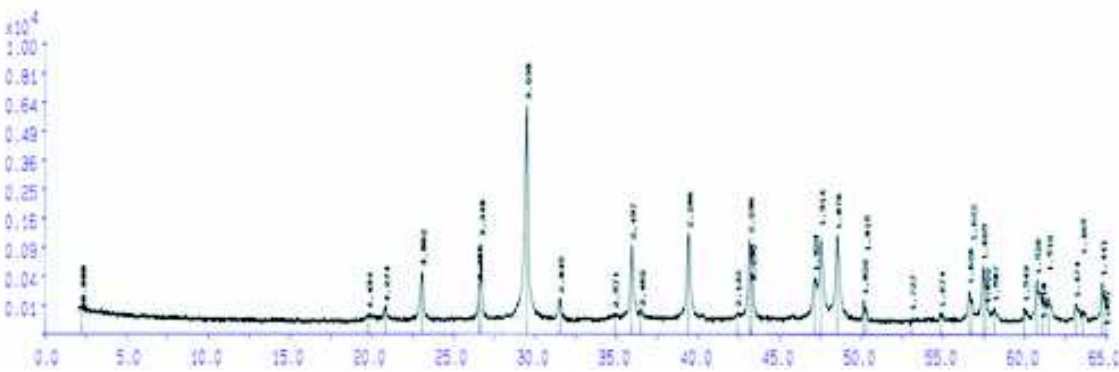
Graphe 04 : Diffractogramme de la croûte 4



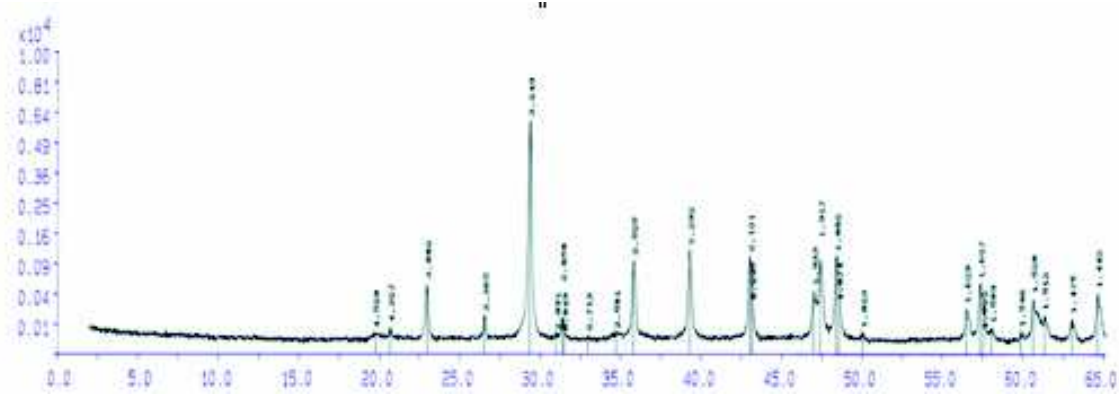
Graphe 05 : Diffractogramme de la croûte 5



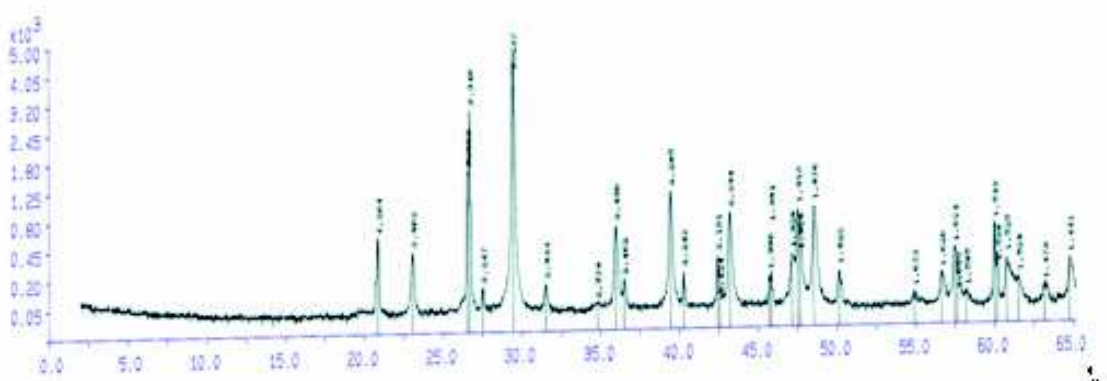
Graph 06 : Diffractogramme de la croûte 6



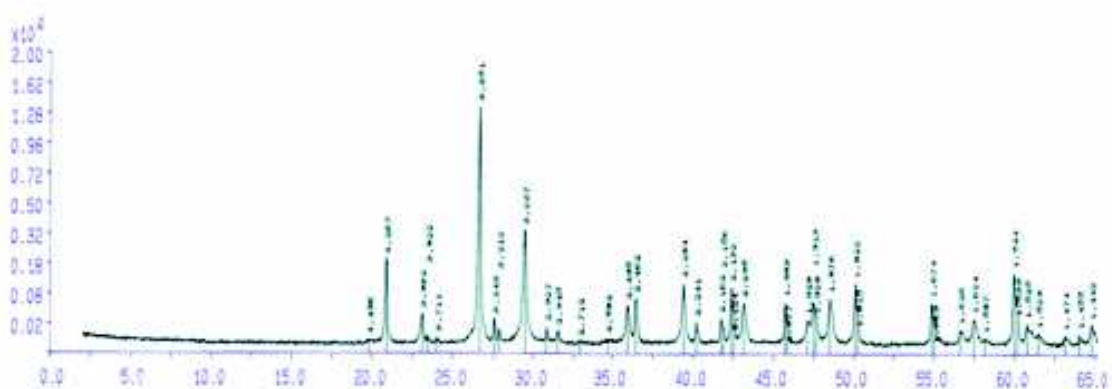
Graph 07 : Diffractogramme de la croûte 7



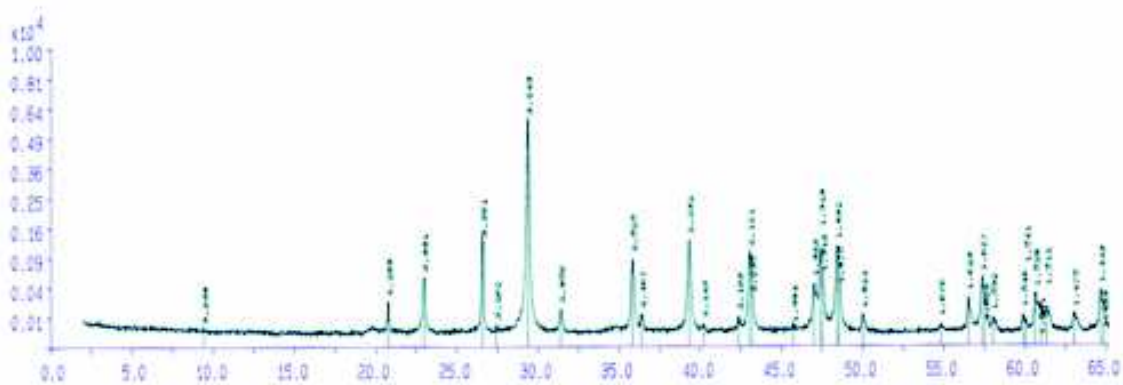
Graph 08 : Diffractogramme de la croûte 8



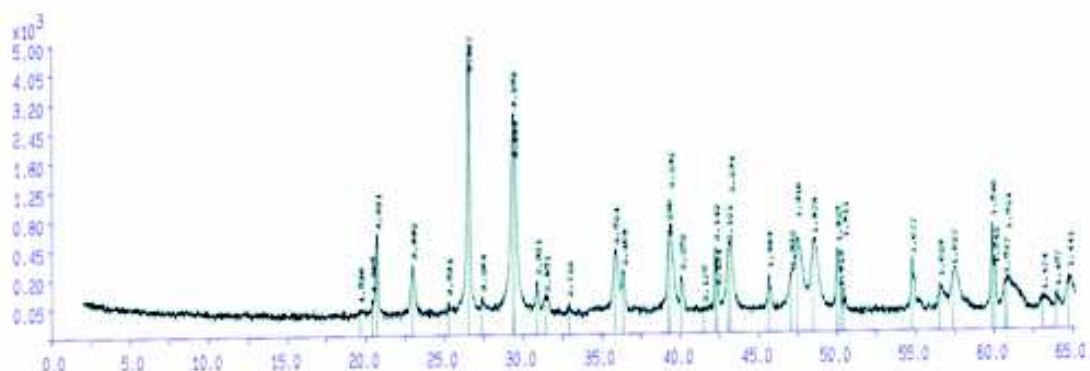
Grphe 09 : Diffractogramme de la croûte 9



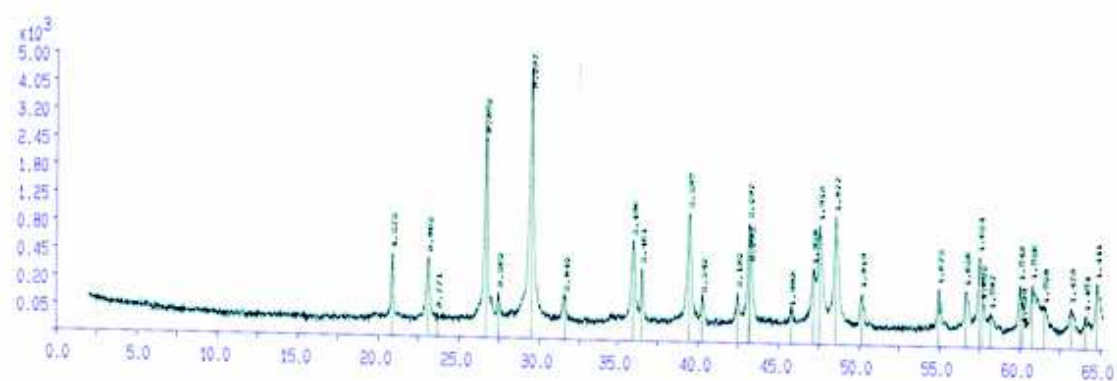
Grphe 10 : Diffractogramme de la croûte 10



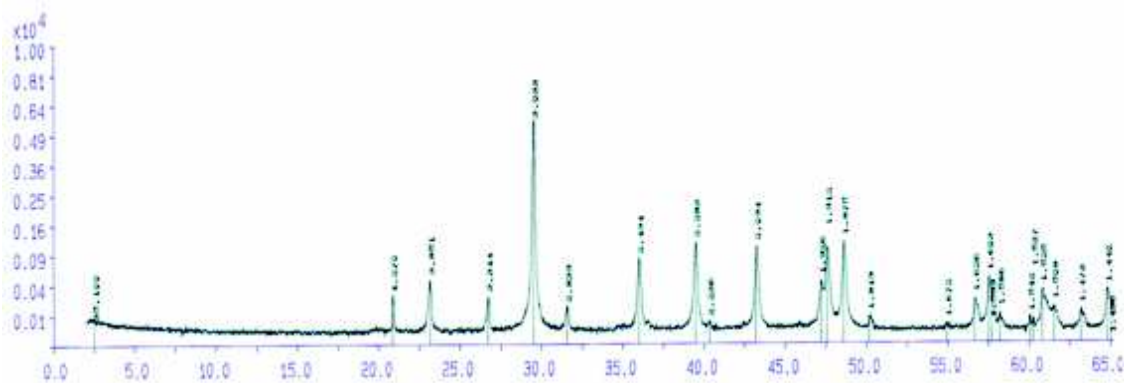
Grphe 11 : Diffractogramme de la croûte 11



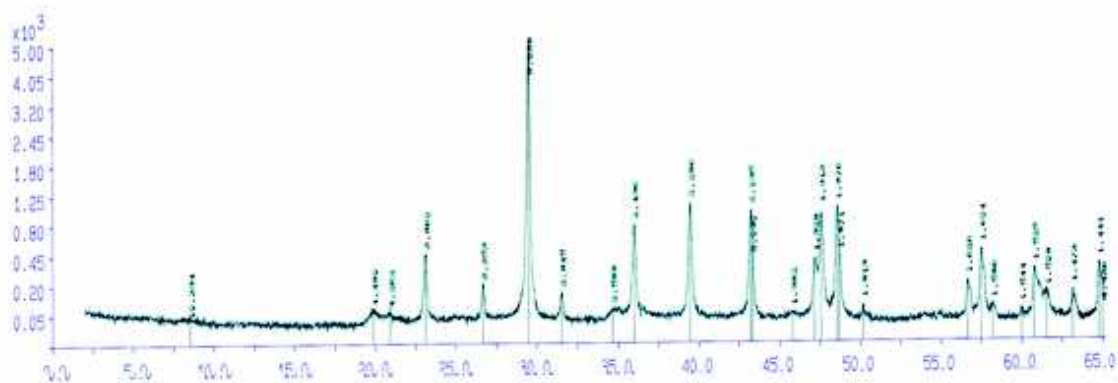
Graphe 12 : Diffractogramme de la croûte 12



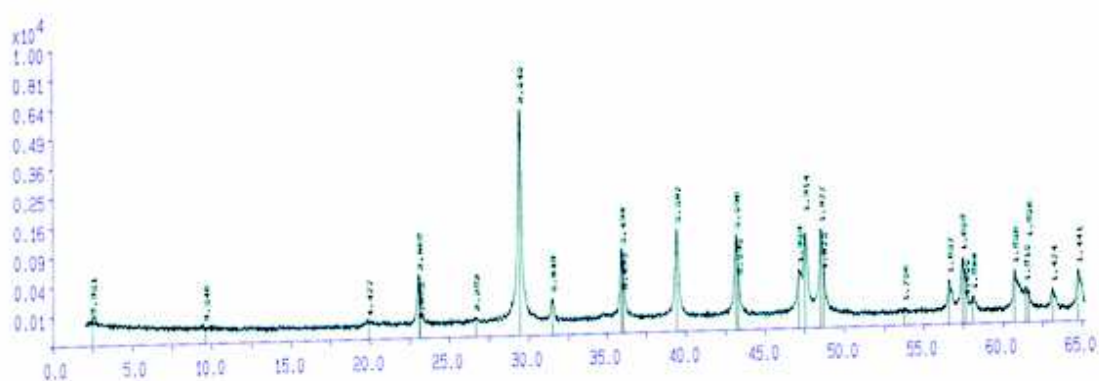
Graphe 13 : Diffractogramme de la croûte 13



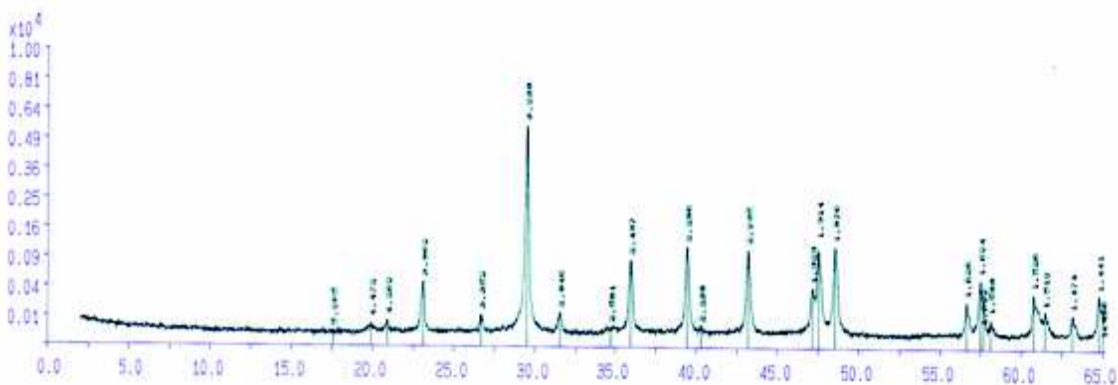
Graphe 14 : Diffractogramme de la croûte 14



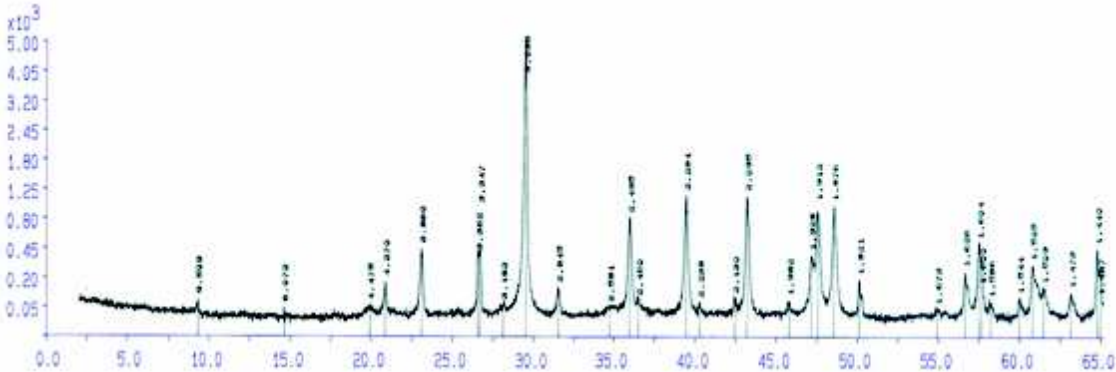
Graphe 15 : Diffractogramme de la croûte 15



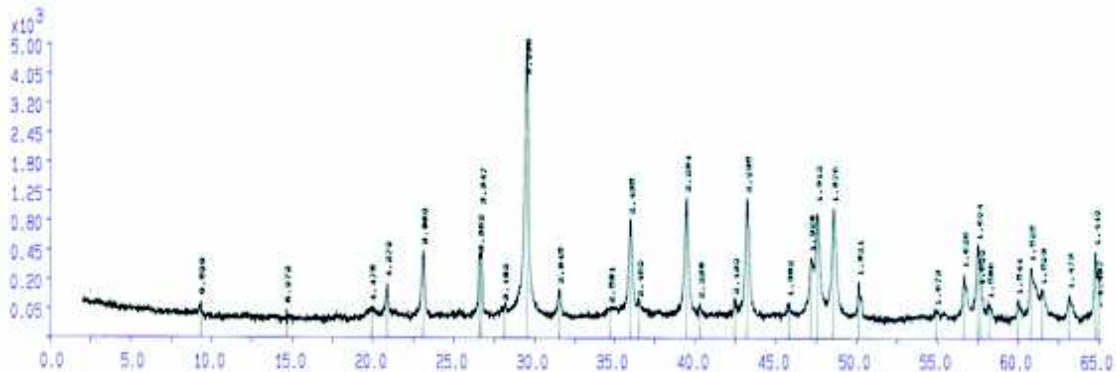
Graphe 16 : Diffractogramme de la croûte 16



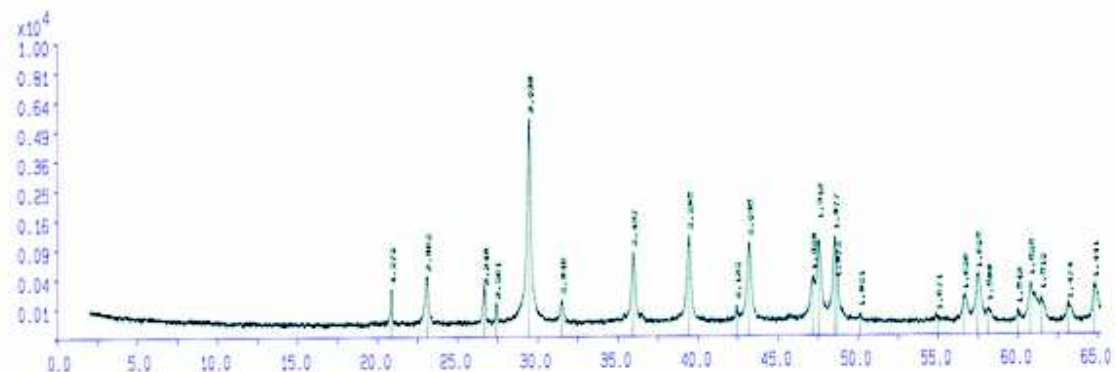
Graphe 17 : Diffractogramme de la croûte 17



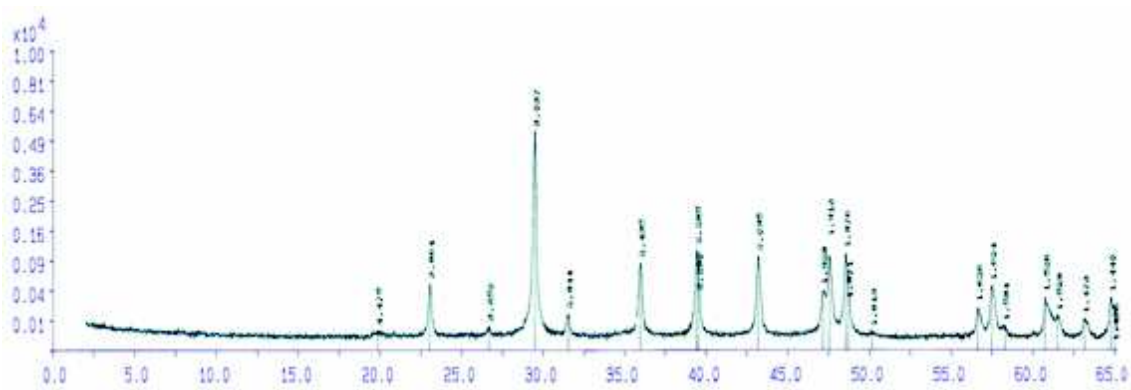
Graphe 18 : Diffractogramme de la croûte 18



Graphe 19 : Diffractogramme de la croûte 19



Graphe 20 : Diffractogramme de la croûte 20



Graphe 21 : Diffractogramme de la croûte 21