

## GENESE MASSIVE D'ANALCIMOLITES A PARTIR D'ARGILITES PAR ACIDOLYSE ET HYDROLYSE PUIS DIAGENESE PHREATIQUE BASIQUE<sup>1</sup>

Georges CONRAD,<sup>2-3</sup> Lionel MICHAUD,<sup>2-4</sup> et Bernadette ODIN<sup>2</sup>

(3 figures et 1 planche)

**RESUME.**- Au Sahara Central, les argilites dévoniennes marines à kaolinite dominante et dépourvues d'éléments d'origine volcanique sont profondément altérées par des pédogenèses acidolytique (natroalunite) et hydrolytique (gibbsite), puis transformées par des diagenèses phréatiques basiques dans un paysage de playa.

L'analcime se forme au cours de la première diagenèse; elle est accompagnée d'une néoformation d'illite ferrifère. Le profil d'altération, d'une trentaine de mètres de puissance et nourri secondairement par les diagenèses, est scellé par des recouvrements détritiques villafranchiens qui l'ont protégé des érosions quaternaires. une pédogenèse subaride (palygorskite) affecte ces recouvrements.

Les processus géochimiques mis en évidence sont transposables à l'évolution de tout matériel sédimentaire aluminosilicaté et alcalin, riche en sulfures, soumis à ces types de pédogenèse et de diagenèse en milieu intertropical.

**ABSTRACT.**- In Central Sahara, Devonian marine argilites with dominant kaolinite and lack of elements of volcanic origin are deeply altered by acidolytic (natroalunite) and hydrolytic (gibbsite) pedogenesis and afterwards transformed by basic phreatic diagenesis in a playa landscape.

Analcite was formed during the first diagenesis and was accompanied by neoformation of ferriferous illite. The approximately thirty meter thick alteration profile was secondarily nourished by diagenesis and sealed by Villafranchian detrital materials which protected it from Quaternary erosions. This cover was affected by subarid pedogenesis.

The described geochemical mechanisms can be applied to the evolution of all aluminosilicates and alkaline sedimentary material with a high sulfide content when submitted to these types of pedogenesis and diagenesis and diagenesis in intertropical environments.

### I.- INTRODUCTION

Dans le «Pays-Bas de l'Ahnet» (Conrad, 1969), au NW du Hoggar, la série dévono-carbonifère plissée du pays pré-tassilien (Follet, 1952) est masquée par des recouvrements continentaux formant le Djebel Chaab qui passe, vers le SW, à l'immense reg villafranchien du Tanezrouft (fig.1). Les évolutions minéralogiques décrites se placent dans un profil d'altération qui se développe sur une trentaine de mètres d'épaisseur et qui révèle la transformation, progressive, depuis la base, par l'intermédiaire d'interstratifiés, d'argilites marines à kaolinite dominante du Dévonien supérieur à

des argilites à smectites et feldspaths potassiques néoformés. Ce profil est scellé par les épandages détritiques continentaux d'âge Villafranchien et mis en relief par les érosions quaternaires. Ce paléoprofil très bien conservé livre une succession de paragenèses minérales qui permettent de reconstituer l'évolution de la série argileuse

1. Manuscrit révisé, reçu le 10 novembre 1991.

2. Laboratoire de Sédimentologie de l'Université d'Aix-Marseille III case 421, 13397 Marseille Cedex 13

3. URA 723 du CNRS

4. Musée de géologie provençale de la Roque d'Antéron (B. du R.)

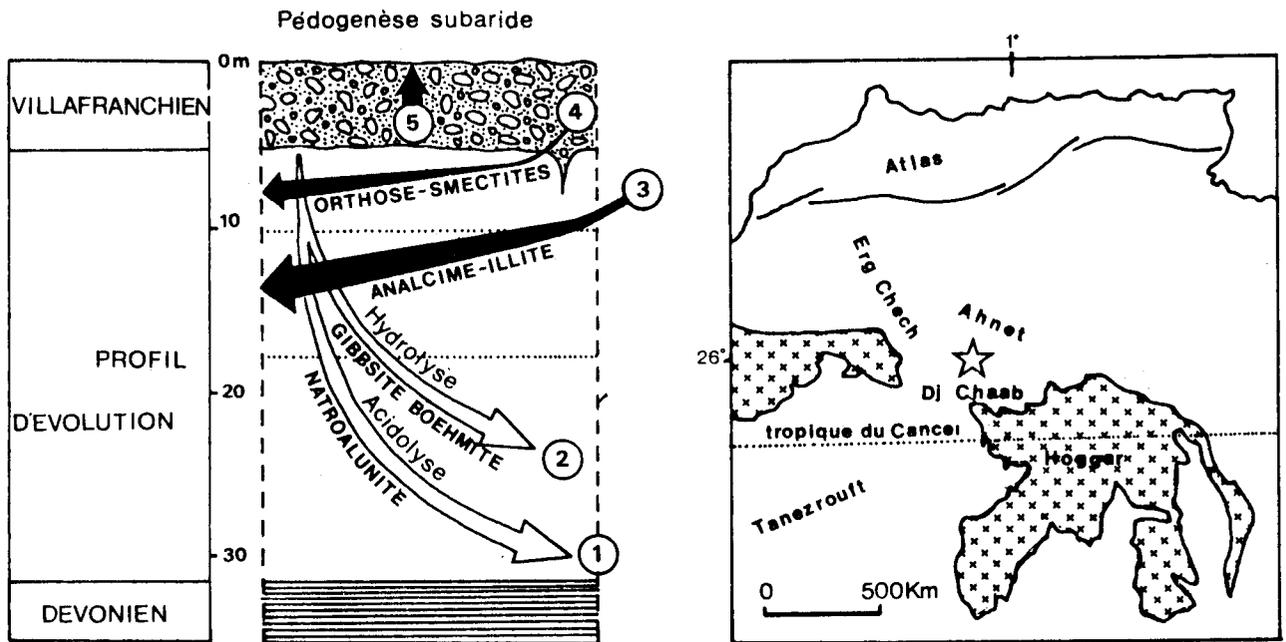


Fig. 1.- Carte de situation de la Gara Azzel Matti dans le Pays-Bas de l'Ahnet (Sahara central). Coupe simplifiée de la gara et schématisations des évolutions géochimiques affectant le paléoprofil, scellé par les recouvrements du Djebel Chaab.

soumise à des pédogenèses (acidolyse puis hydrolyse) ensuite à des diagenèses basiques grâce à des circulations de nappes d'eau souterraine dans un paysage de playa. Au sein du profil, vers la base du tiers supérieur, les analcimolites représentent 60 à 80% de la masse de la roche et sont accompagnées dans la fraction  $\leq 2 \mu\text{m}$  par la néoformation d'illite ferrifère.

Cette paragenèse, à analcime et illite ferrifère, formée dans des conditions supergènes aux dépens d'argilites et en l'absence de tout contexte volcanique est, à notre connaissance, l'exemple le plus probant d'une origine purement diagenétique de ces zéolites à partir d'un matériel sédimentaire.

## II.- PRESENTATION DU PROFIL D'ALTERATION ET DE SON EVOLUTION POLYPHASEE

Les paragenèses successives (fig.2) de la Gara Azzel Matti ont été décrites sur la base d'un échantillonnage qui a été repris et serré en 1989 au vu de la complexité des phénomènes observés (Conrad et Michaud, 1987). L'évolution schématique présentée ici tient compte de l'ensemble des observations.

- **Le matériel initial** est constitué par des argilites détritiques marines à kaolinite dominante et à illite, riches en plagioclases (environ 10%) et en sulfures (pyrite) avec quelques pourcents de matière organique. Ces argilites noires, organiques, ont été antérieurement soumises à une

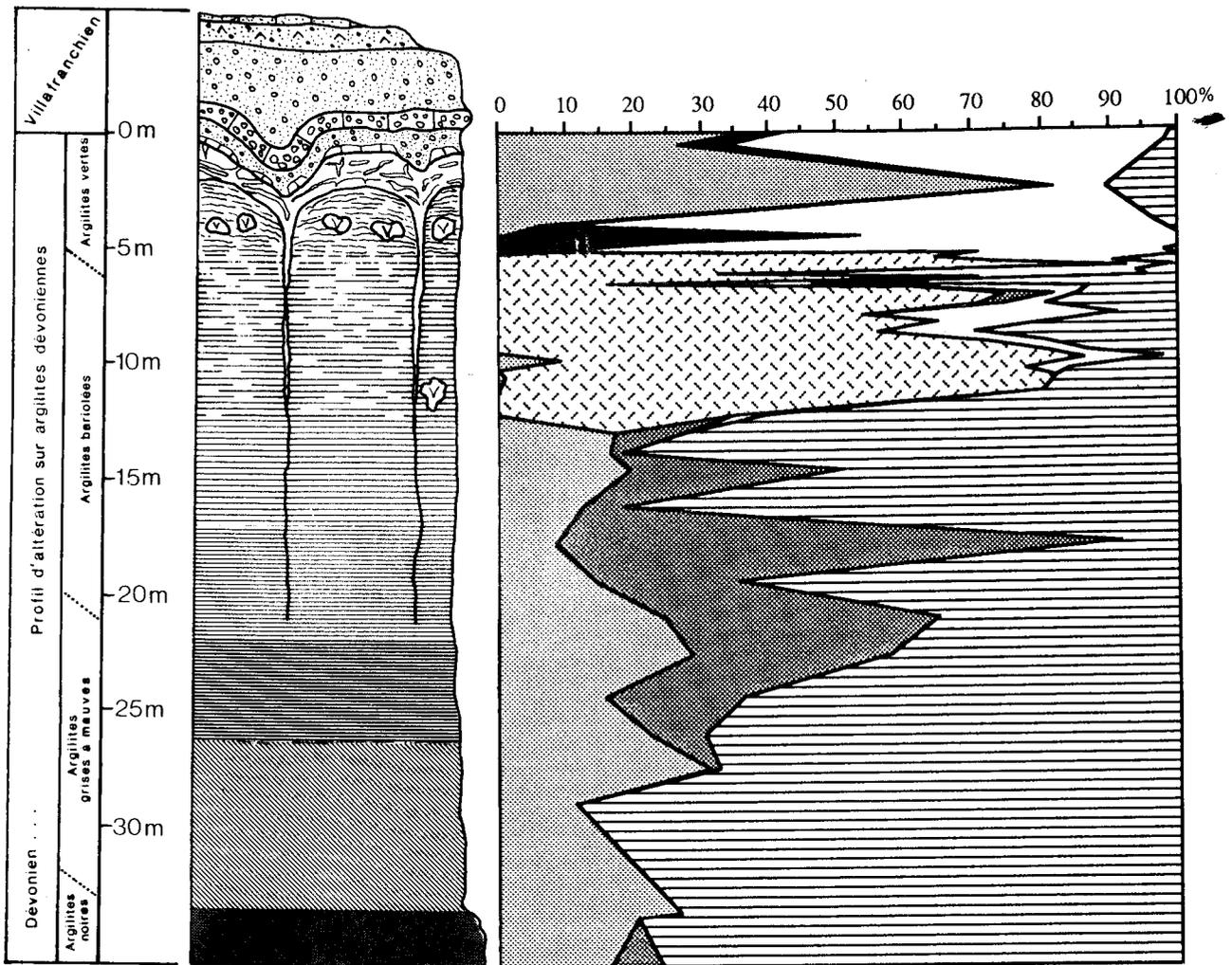
diagenèse poussée par enfouissement du bassin dévono-carbonifère (Robert, 1985), ont subi successivement une structuration varisque, une distension jurassique, une structuration mésozoïque (Conrad, 1984) qui se marquent par un feuilletage et des réseaux de diaclases. Ces dernières vont faciliter l'altération méso-cénozoïque des argilites portées à l'affleurement.

- **Une altération acidolytique** (1, fig.1) constitue la première étape de cette évolution. Les pH très acides ( $< 4$ ) des solutions dans un milieu oxydant provoquent la mise en solution totale et le transfert vers le bas du profil des cations alcalins, alcalino-terreux mais surtout de la silice et de l'aluminium des phyllites et des plagioclases attaqués par les eaux de lessivage. L'oxydation des sulfures (Pl. I: 8) est à l'origine de cette acidolyse. Les ions  $\text{Al}^{3+}$  déplacés vont nourrir la néoformation de sulfates d'alumine (surtout de natroalunite, Pl. I: 7) que l'on trouve accumulés au bas du profil.

- **Une altération hydrolytique** (2, fig.1) succède à la précédente dès que l'oxydation de la pyrite contenue dans les argiles est achevée. L'hydrolyse dans un contexte climatique intertropical libère les ions alcalins et alcalino-terreux et draine une partie de la silice libérée par l'attaque des plagioclases et des illites détritiques contenus dans les argilites oxydées.

Les preuves de cette évolution et du lessivage poussé sont:

- la perte de matière des argilites en partie vidées de leur substance, par altération isovolumétri-



Argiles + Mnx acces.
  Carbonates
  Natroalunite
  Analcime
  Feldspath K
  Quartz

Fig. 2.- Coupe de la Gara Azzel Matti montrant le paléoprofil développé en conditions continentales supergènes aux dépens des argilites marines du Dévonien. Ce profil est scellé par les recouvrements alluviaux villafranchiens eux-mêmes soumis à une pédogénèse subaride. En regard du profil, les reliques actuelles des paragenèses qui se sont succédées au sein des argilites ou des recouvrements durant l'évolution mésozoïque. Les étapes (1 à 5 de la fig. 1) sont interprétatives et déduites de ces données. Les caissons du bas se rapportent uniquement au diagramme minéralogique.

que (Millot et Bonifas, 1955); la densité passe de 2,5 à 1,4;

- la présence de minéraux caractéristiques de ce type de pédogénèse avec gibbsite, boehmite et oxydes de fer qui sont conservés dans la partie médiane du profil.

Une modification régionale du système des écoulements superficiels, jointe au fait que le climat tropical change de nature et tend dès lors vers l'aridité, provoque un changement radical dans la composition des eaux souterraines superficielles. On passe d'un milieu acide à un milieu basique et confiné caractéristique d'un paysage de playa subaride.

- **Une première diagenèse phréatique** (3, fig.1) baignant le profil lessivé provoque la

néoformation d'une paragenèse à analcime (Pl. I: 1-4) et à illite ferrifère (Pl. I: 6). On observe la disparition de la natroalunite instable dans ce milieu. Ce minéral libère les éléments nécessaires à la néoformation d'analcime. Le fer engagé dans les sulfates complexes mais dissociés (natrojarosite, jarosite) se fixe sur les illites néoformées bien représentées dans la fraction argileuse associée à l'analcime.

- **Une deuxième diagenèse phréatique** (4, fig.1), basique, se surimpose à la première dans le haut du profil. Elle se marque par une paragenèse à feldspath potassique et à smectites, avec des carbonates, calcite et dolomite; elle est directement liée à l'action d'une nappe d'eau souterraine qui circule dans les recouvrements villafranchiens scellant le profil d'altération.

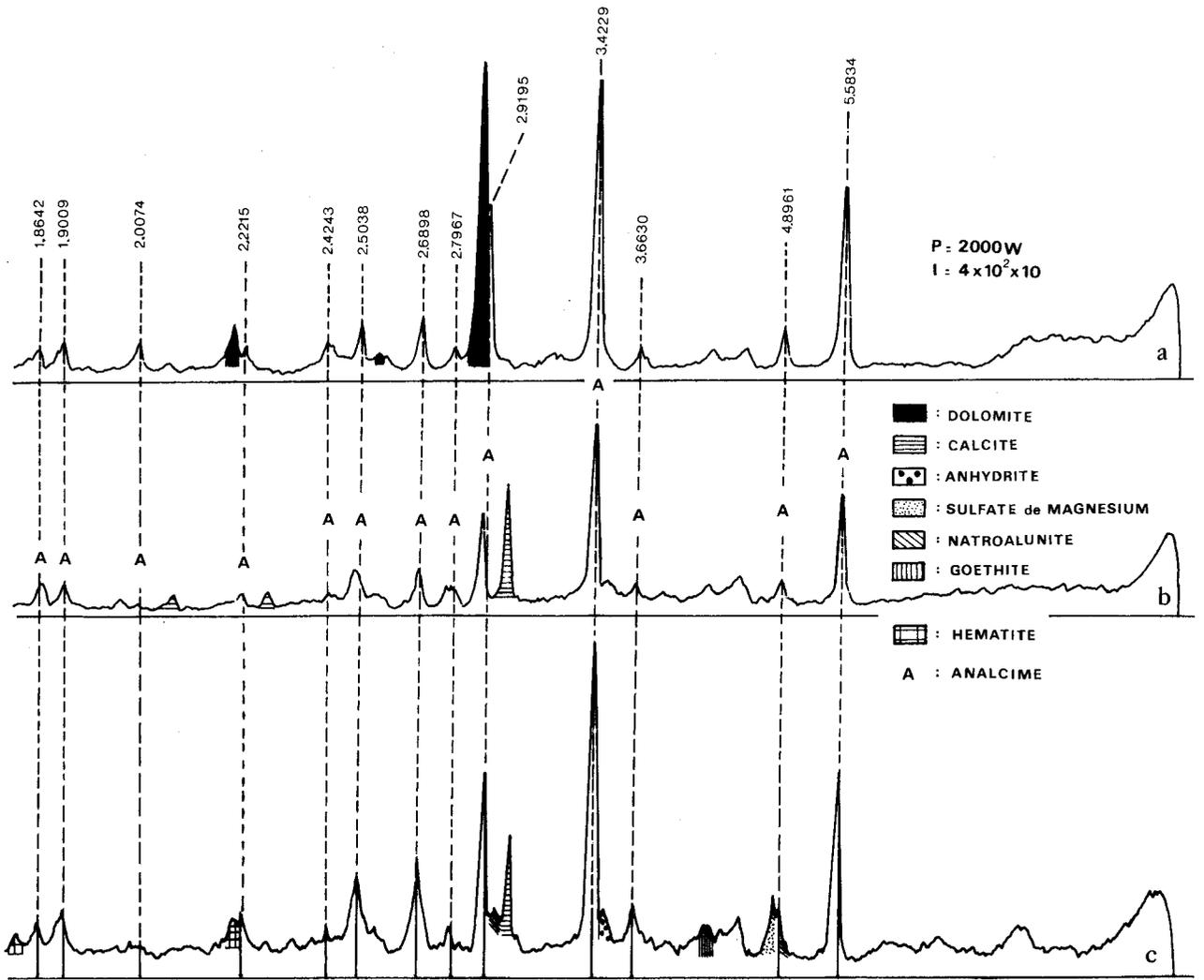


Fig. 3.- Caractérisation de l'analcime aux rayons X. Trois diffractogrammes réalisés sur poudre désorientée et choisis parmi les 21 échantillons du niveau à analcime:

- a.- analcime et dolomite;
  - b.- analcime et calcite;
  - c.- analcime, sulfate de magnésium, goéthite, hémateite, natroalunite et anhydrite.
- La mesure du paramètre de la maille donne  $a = 13,69 \text{ \AA}$  pour l'analcime.

- Une **pédogenèse subaride** (5, fig.1), marquée par la carbonatation des alluvions villafranchiennes et par la néoformation de palygorskite. Elle achève l'évolution complexe du paléoprofil.

### III.- ETUDE DE LA NEOFORMATION D'ANALCIME

#### 1.- L'étude aux RX

Les analcimolites qui dominent le cortège minéralogique se développent (3, fig.1) d'une manière assez brutale dans le profil et semblent relayer vers le haut la paragenèse à natroalunite laquelle subsiste à l'état de traces dans la zone à analcime. Les diffractogrammes réalisés sur poudres broyées révèlent une analcime bien cristallisée, avec une succession de pics ou de

raies caractéristiques et conforme à la fiche ASTM (fig.3). En nous référant aux caractéristiques des niveaux les plus riches en analcime bien cristallisée, nous avons calculé le paramètre de la maille cubique du minéral:  $a = 13,69 \text{ \AA}$  (la fiche ASTM 7340 donne  $a = 13,72 \text{ \AA}$ ).

Les déterminations sur la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  minoritaire révèlent un cortège argileux constitué d'illite ferrifère, de kaolinite désordonnée associées à des interstratifiés kaolinite-vermiculite dérivant des kaolinites détritiques et néoformées de la partie médiane du profil.

Dans cet ensemble où l'analcime domine (Pl. I: 1-4), les minéraux secondaires rencontrés sont soit des reliques de l'évolution antérieure, soit des minéraux associés à la paragenèse analcime-illite ferrifère, soit des minéraux liés à des diagenèses ultérieures.

- Les reliques sont: la natroalunite (Pl. I, ph. 7), la goethite, la gibbsite (Pl. I: 5) et la boehmite.
- Les minéraux associés à la paragenèse: une anhydrite peu abondante à ce niveau mais se présentant en gros nodules vers la base du profil, un sulfate de magnésium et l'hématite. Ces minéraux se forment aux dépens de la natroalunite instable en milieu basique.
- Les minéraux liés aux diagenèses ultérieures: la calcite, la dolomite, l'aragonite.

Le haut du profil est marqué par de nouvelles transformations minéralogiques qui entraînent une régression très nette de cette paragenèse au profit de néoformations de feldspath potassique, de smectites, de carbonates authigènes et palygorskite, développés lors d'une deuxième diagenèse phréatique alcaline (4, fig. 1) elle-même suivie d'une pédogenèse subaride (5, fig. 1).

## 2.- Les analyses chimiques

Elles portent sur les niveaux riches en analcimolites rencontrés dans le profil d'altération. Au sein de cette masse, les niveaux nodulaires en amas de forme cérébroïde constitués par des carbonates sont les témoins d'évolutions plus tardives (4 et 5, fig. 1).

La composition du niveau à analcimolite (moyenne de 21 échantillons) est la suivante en pour cent:

SiO <sub>2</sub> : 36,2	MgO : 2,2	K <sub>2</sub> O : 1,1	TiO <sub>2</sub> : 0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 21,9	CaO : 7,3	MnO : 0,1	OH <sub>2</sub> <sup>-</sup> : 1,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 6,1	Na <sub>2</sub> O : 6,9	FeO : 0,1	OH <sub>2</sub> <sup>+</sup> : 15,9

Par rapport à la base du profil l'évolution chimique peut être définie sur les critères suivants:

- une augmentation de la teneur en Na<sub>2</sub>O parallèle à celle de l'analcime.
- une bonne corrélation entre les pics de diffraction et les régressions de Na<sub>2</sub>O et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ces deux oxydes ont une évolution liée) ainsi que, dans une moindre mesure, entre SiO<sub>2</sub> et TiO<sub>2</sub>.
- en dehors des niveaux nodulaires, la moindre abondance en analcime se traduit par une progression nette des carbonates et de la perte au feu. Celle-ci traduit la présence de minéraux dissociables tels les sulfates et les carbonates mis en évidence par diffractométrie X.

Entre la base argileuse et le niveau à analcime, les rapports Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont invariants alors que l'on constate une culmination du rapport Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> et Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et une régression du rapport K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>.

Le bilan entre l'ensemble de base à natroalunite et l'ensemble médian à analcime se traduit par:

- une stabilité de la silice combinée
- une régression de l'alumine combinée
- un enrichissement en Na<sub>2</sub>O, CaO et, dans une moindre mesure, en MgO.

## 3.- Les observations en microscopie électronique et les microanalyses

Les analcimolites sont intimement liées à des enveloppes argileuses d'illite ferrifère. Seule l'approche à l'échelle du micromètre permet une bonne définition des structures néoformées tant sur le plan morphologique que géochimique. L'illite néoformée se présente en baguettes aux extrémités arrondies (Pl. I: 6); les microanalyses correspondantes révèlent l'importance du fer dans le réseau de ce minéral. L'analcime présente un faciès en glomérules d'environ 100 μm de diamètre liés à des enveloppes phylliteuses; ces glomérules sont eux-mêmes formés de plus petits, de 5 à 10 μm, réunis par des filaments (Pl. I: 1-4). Ces deux minéraux sont les plus importants mais on observe également les minéraux reliques détectés en diffractométrie X: gibbsite (Pl. I: 5), boehmite, goethite, natroalunite (Pl. I: 7), et des carbonates formés plus tardivement.

## IV.- INTERPRETATION DES NIVEAUX A ANALCIMOLITES ET CONCLUSION

La partie supérieure du paléoprofil argileux conserve donc la marque dominante de la paragenèse à analcime-illite. L'analcime est le minéral principal de cette paragenèse; elle est toujours associée à des minéraux phylliteux soit néoformés comme l'illite ferrifère soit en voie de transformation comme les kaolinites désordonnées et les interstratifiés kaolinite-vermiculite. Ces derniers se développent dans la partie médiane du profil à partir des kaolinites détritiques et néoformées pro parte.

Les enchaînements minéralogiques et géochimiques qui permettent la néoformation des analcimolites sédimentaires peuvent être reconstitués:

- *Les transformations pédologiques en milieu lessivé.* L'oxydation de la roche mère dans un contexte climatique intertropical provoque l'acidolyse et le déplacement de l'aluminium vers le bas du profil. Elle est suivie d'une hydrolyse classique après oxydation totale de la roche-mère.

- *Les transformations diagénétiques en milieu alcalin.* Le passage d'un milieu lessivé (sol) à un milieu confiné (playa) entraîne des évolutions au

sein de l'ensemble argileux riche en kaolinite et en natroalunite. Les transformations se marquent par une déstabilisation de la kaolinite qui donne des kaolinites désordonnées, des interstratifiés kaolinite-vermiculite, de l'illite ferrifère néoformée et surtout par l'analclime.

La transformation d'un matériau silico-alumineux et alcalin, de granulométrie fine et à l'état réduit, peut conduire, dans des conditions supergènes, à la formation d'analclimolites lorsque la roche mise à l'affleurement est soumise aux conditions hydrolysantes des climats intertropicaux. La surimposition d'une diagenèse phréatique basique est cependant nécessaire pour parvenir à l'analclime et ceci implique un paysage de playa.

Des exemples de néoformation d'analclime par diagenèse dans des bassins sédimentaires sont connus: Millot (1964) en cite de nombreux exemples. Cependant, chaque fois que les études minéralogiques et géochimiques sont affinées, on retrouve un apport volcano-détritique dans ces bassins: bassin playa d'Agades au Niger (Pacquet, 1968), bassin lacustre évoluant en playa de Lodève (Odin, 1986; Odin et Conrad, 1987).

Par contre, l'étude de la Gara Azzel Matti démontre une néoformation d'analclime qui obéit ici à des règles purement géochimiques commandées par des mécanismes pédogénétiques et diagénétiques. Cet exemple tranche le lien formel qui associe toujours la genèse de zéolites sédimentaires à un contexte volcanique proche ou lointain.

## BIBLIOGRAPHIE

CONRAD, G., 1969.- L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Ed. du CNRS, Paris, 527 p.

CONRAD, G., 1984.- Les séries carbonifères du Sahara central algérien: stratigraphie, sédimentation, évolution structurale. Thèse Doctorat Sciences Université Aix-Marseille III, 370 p.

CONRAD, G & MICHAUD, L., 1987.- Contribution à l'histoire climatique, post-hercynienne à villafranchienne, de l'Afrique tropicale par l'étude des pédogenèses et des diagenèses affectant les argilites du Dévonien du Sahara central (Algérie). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 305, sér. II: 715-719.

FOLLOT, J., 1952.- Ahnet et Mouydir, *XIX<sup>e</sup> Congr. intern. géol., Alger. Monogr. régionales*, 1<sup>o</sup> Sér., n<sup>o</sup> 1, 80 p.

MILLOT, G., 1964.- *Géologie des argiles*. Ed. Masson, Paris, 429 p.

MILLOT, G. & BONIFAS, M., 1955.- Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et de bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 8: 3-10.

ODIN, B., 1986.- Les formations permienes, Autunien supérieur à Thuringien, du «bassin» de Lodève (Hérault, France): stratigraphie, minéralogie, paléoenvironnements, corrélations. Thèse Doctorat Université Aix-Marseille III, 392 p.

ODIN, B. & CONRAD, G., 1987.- Les cinérites, marqueurs aséquentiels au sein de la sédimentation permienne, continentale et rythmique, du bassin de Lodève (Hérault, France). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 110: 271-278.

PACQUET, A., 1968.- Analclime et argiles diagénétiques dans les formations sédimentaires de la région d'Agadès (République du Niger). *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 27: 221 p.

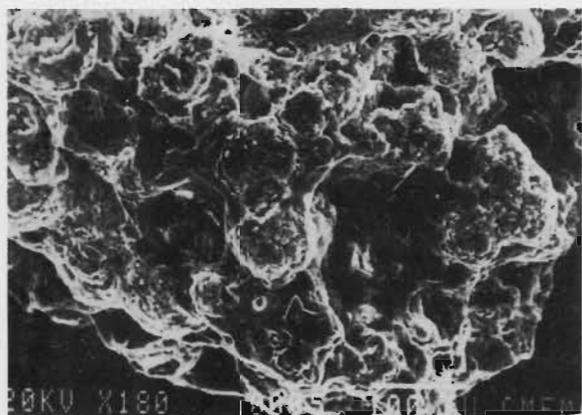
ROBERT, P., 1985.- Histoire géothermique et diagenèse organique. *Bull. Centres Rech. Exploration-Production Elf-Aquitaine*, Pau, Mém. 8: 345 p.

## PLANCHE I

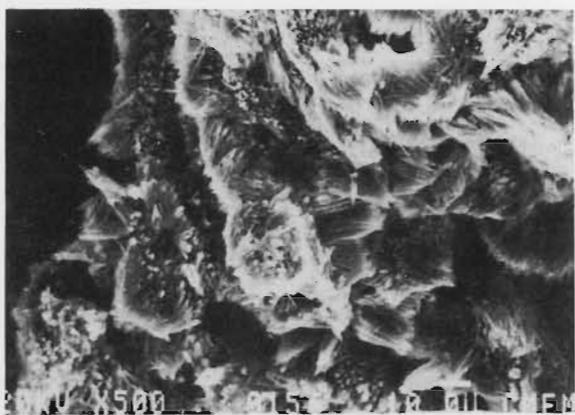
Microphotographies des minéraux caractéristiques de l'évolution du paléoprofil.

- 1 à 4.- Les glomérules d'analclime néoformée sont enveloppés par des phyllites; sur la photo 2, une enveloppe est bien visible, il s'agit d'une illite ferrifère.
- 5.- Amas de gibbsite présentant un faciès en aiguilles; c'est un minéral néoformé relique de l'hydrolyse ferrallitique affectant le profil.
- 6.- Baguettes d'illite ferrifère néoformée; ce minéral est associé à l'analclime.
- 7.- Cristaux de natroalunite néoformée, reliques de l'hydrolyse acidolytique marquant la première étape de l'évolution du profil.
- 8.- Fantômes de cristaux de pyrite contenues dans les argilites dévoniennes non altérées, constituant la roche-mère du paléoprofil.

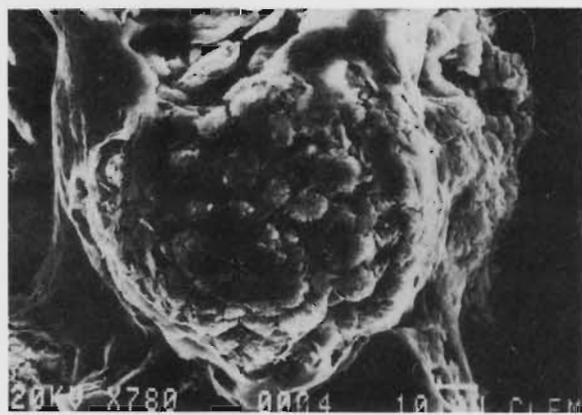
1



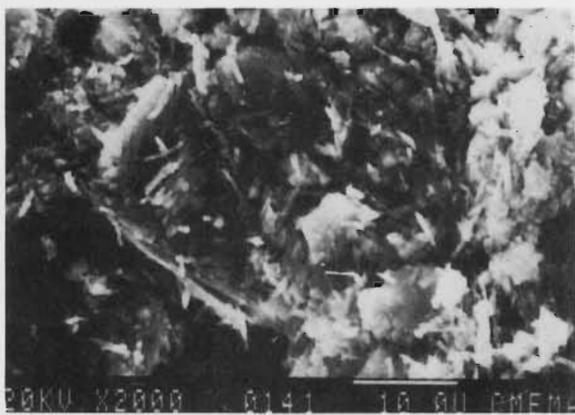
5



2



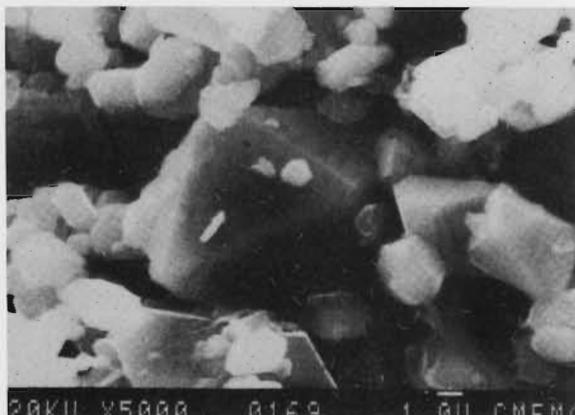
6



3



7



4



8

