

Évolution de la glauconitisation dans le bassin offshore ivoirien : étude chimique et ultrastructurale des glauconites

Evolution of glauconitization in Ivorian offshore basin: chemical and ultrastructural study of glauconites

ASSALE Fori Yao Paul¹,
AKOBE Apie Colette¹,
AMANI Etche Mireille¹
et KPLOHI Yaba Hervé²

Géologie de la France, n° 2, 2020, p. 26-40, 13 fig., 3 tab.

Mots-clés : Glauconite, Pyrite framboïde, Kaolinite, suboxydé, sulfuré.

Keywords: *Glauconite, Framboid pyrites, Kaolinite, Suboxidized, Sulfurized.*

Résumé

Cette étude chimique et ultrastructurale des glauconites est basée sur 31 grains de glauconites issus d'un forage offshore du bassin ivoirien. Réalisée au MEB-EDS, elle a permis de comprendre l'évolution des glauconites depuis un stade précurseur jusqu'à leur maturation ainsi que des modifications structurales qu'elles peuvent présenter.

Les résultats révèlent que la glauconitisation débute au cours des phases transgressives dans un milieu marin suboxydé peu profond riche en ions dissous et à l'abri des flux continentaux. En zone tropicale, ces milieux sont riches en kaolinites héritées des sédiments continentaux. Ces argiles, en absence d'une quantité significative de smectite, se transformeraient en précurseurs glauconieux qui ne sont que des smectites très pauvres en potassium. L'incorporation progressive de potassium et du fer transforme le précurseur glauconieux en glauconites naissantes à légèrement évoluées dans le milieu devenant profond et réducteur. La glauconitisation s'achève en milieu marin profond à très profond et anoxique peu sulfuré avec l'apparition de craquelures sur les grains.

Le milieu marin devenu sulfuré favorise la formation de pyrites framboïdes en lieu et place des glauconites qui pourront comporter des inclusions de

ces pyrites. La conservation des glauconites en l'état dans les sédiments est fonction de la durée de transgression bien avant la diagénèse. Des périodes courtes donnent des glauconites peu évoluées et de longues périodes, des glauconites très évoluées.

Durant les phases régressives, le remaniement entraîne un blanchissement et une oxydation de certaines faces des glauconites. Leurs ultrastructures témoignent d'une transformation de la glauconite en kaolinite ; l'altération de la glauconite est donc le revers de sa formation. Les glauconites constituent donc des marqueurs des variations chimiques des environnements de dépôt ainsi que de la durée des variations eustatiques.

Abstract

This chemical and ultrastructural study of glauconites is based on 31 grains of glauconites from an offshore drilling of Ivorian basin. Carried out at SEM-EDS, it permitted to understand the evolution of glauconites from a precursor stage until their maturation as well as the structural modifications which they can present.

The results show that glauconitization begins during the transgressive phases in dissolved ion-rich shallow suboxidized marine environment and sheltered from continental flows. In tropical zones, these environments are kaolinite-rich inherited from continental sediments. These clays, in the absence of a significant amount of smectite, would transform into glauconitic precursors which are only smectites very poor in potassium. The gradual incorporation of potassium and iron transforms the glauconous

¹Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Abidjan, Côte d'Ivoire

²PETROCI, Centre d'Analyses et de Recherche (CAR), Abidjan, Côte d'Ivoire

*Correspondant : foripaul@live.fr

Manuscrit soumis le 24 mai 2019, accepté pour publication le 2 juin 2020

precursor into nascent to slightly evolved glauconites in environment becoming deep and reducing. Glauconitization completes in deep to high-deep and anoxic low sulphide marine environment with the appearance of characteristic fractures at grain surfaces.

The marine environment which has become sulphurized favors the formation of framboid pyrites instead of glauconites which may include inclusions of these pyrites. The preservation of glauconites in sediments depends of transgression duration before diagenesis. Short periods give slightly evolved glauconites and long periods, highly evolved glauconites.

During regressive phases, the reworking causes bleaching and oxidation on certain faces of glauconites. Their ultrastructures attest to a transformation from glauconite to kaolinite; the alteration of glauconite is therefore the reverse of its formation. Glauconites therefore constitute markers of chemical variations in the depositional environments as well as of the duration of eustatic variations.

1. Introduction

La glauconie est une roche sédimentaire autochtone se formant typiquement dans les environnements marins sous des conditions de basse énergie caractérisées par une sédimentation lente, dans un milieu à tendance réductrice. Dans ce faciès à grains verts, appelé « glauconie » par G.S. Odin et R. Létolle (1980) ont mis en évidence une structure minéralogique phylliteuse dioctaédrique (feuillet de type 2:1) du groupe des illites et des micas, mais cryptocristalline et souvent mal cristallisée. Les grains de glauconite apparaissent généralement comme de minuscules boulettes vert clair à vert sombre, de taille millimétrique, riches en potassium (jusqu'à 8 % de K_2O) et encore plus en fer ; sous forme bivalente (jusqu'à 50 % et plus de FeO) ou trivalente, dans les faciès oxydés.

La glauconitisation se fait par l'incorporation progressive de potassium et de fer. On observe un changement de la structure minéralogique vers un membre extrême (non expansible ou gonflant) riche en potassium appelé mica glauconieux (Odin et Matter, 1981 ; Odin et Fullagar, 1988) ou glauconite (Burst, 1958 ; Hower, 1961).

En fonction de la durée de séjour des glauconites à l'interface eau-sédiment avant son enfouissement, la maturation peut donner quatre types de glauconites : 1/ les glauconites naissantes, 2/ les glauconites légèrement évoluées, 3/ les glauconites évoluées, 4/ les glauconites très évoluées. Cette

évolution est fonction de la durée de non-dépôt avant l'enfouissement. Les grains de glauconite sont stables durant les différents stades de la diagenèse et instables dans les conditions métamorphiques (Frey *et al.*, 1973). Donc, plus le séjour est long, mieux est l'évolution de la glauconite.

Quelles sont les modifications chimiques et structurales des glauconites lors de leur formation en zone tropicale (glauconites autochtones) ou encore lors d'un remaniement (glauconites para-autochtones) ? Pour répondre à ces questions nous avons étudié l'évolution micro-structurale de grains de glauconites durant leur maturation et leur post-dépôt. Comme nous le verrons, cette typologie interprétative sera confirmée par nos observations ; nous la conserverons dans notre étude.

2. Contexte géologique

La Côte d'Ivoire est un pays de l'Afrique de l'Ouest situé en zone tropicale. Ce pays est caractérisé par deux unités géologiques inégalement réparties : un socle précambrien qui couvre 97,5 % du territoire et un bassin sédimentaire couvrant 2,5 % du territoire. Ce bassin doit son existence à l'ouverture de l'océan Atlantique, à la fin du Jurassique, et occupe une superficie de 30 000 km², s'étendant de Sassandra à l'Ouest jusqu'à Axim (Ghana) à l'Est. Il présente une partie émergée et une partie immergée. Sa structuration s'est faite en quatre phases (Sombo, 2002) : 1/ la phase rifting, d'âge Barrémien-Albien, 2/ la phase d'océanisation initiale, au Cénomani-Sénonian, 3/ la phase d'océanisation maximum, qui part du Campanien au Maastrichtien et 4/ la phase d'océanisation finale, au Tertiaire. C'est dans sa partie

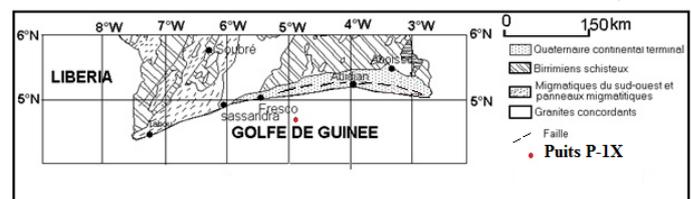


Fig. 1 : Localisation du puits P-1X dans le bassin ivoirien.

Fig. 1: Localisation of drilling P-1X in the Ivorian basin.

offshore que le forage P-1X a été réalisé au large de la ville de Fresco (fig. 1).

La connaissance stratigraphie du puits P-1X s'est basée sur les études sédimentologiques, micropaléontologiques et palynologiques (fig. 2). La stratigraphie est établie comme suit (Petroci, 2014) :

- ♦ **l'Albien** a une épaisseur de 710 m, de la cote 6 520 m à la cote 5 810 m. Les formations de l'Albien sont composées d'une alternance d'argilites gris-sombre et de grès avec des traces de calcaires. Dans ces argilites, on rencontre des

glauconites et des pyrites framboïdes qui sont en traces. Les grès sont constitués de grains de quartz à ciment siliceux et calcitique. Ils sont de couleur gris-clair. Des kaolins blanchâtres sont également présents dans les formations albiennes. Le contenu floristique et faunistique traduit une alternance de milieu marin néritique et de milieu continental ;

◆ **le Turonien** repose en discordance sur l'Albien et se situe entre les profondeurs 5 810 m et 5 750 m, soit 60 m d'épaisseur. L'étude biostratigraphique montre que les formations du Turonien comportent des microfaunes et microflore aussi bien du Turonien que du Cénomaniens et de l'Albien supérieur ; cela traduit un remaniement des formations sédimentaires sous-jacentes (Albien supérieur et Cénomaniens) lors du dépôt des formations du Turonien. Les formations ainsi remaniées sont constituées de marnes à intercalations de calcaires et d'argilites gris-sombre. Ces formations sont riches en grains de glauconites. Quelques pyrites framboïdes oxydées y sont également présentes. L'environnement de dépôt est celui d'un plateau continental moyen à externe ;

◆ **le Campanien** est constitué principalement d'argilites micacées gris-sombre avec des traces de calcaires. Ces argilites comportent de rares grains de glauconites. Il a une épaisseur de 420 m (5750–5330 m). La biostratigraphie indique un milieu bathyal inférieur à moyen. Le Campanien est discordant sur le Turonien ;

◆ **le Maastrichtien** est composé majoritairement d'argilites gris-sombre accompagnées de bancs sporadiques de sables très fins gris-clair et de traces de calcaires sur une épaisseur de 1830 m (5330–3500 m). Ces argilites sont micacées et très riches en glauconites. Ces minéraux (micas et glauconites) sont aussi présents dans les sables très fins. Les microflore et microfaunes présentes dans ces formations sont caractéristiques d'un milieu marin bathyal inférieur à supérieur.

3. Matériel et méthodes

Les travaux antérieurs ont révélé la présence de glauconite dans les argilites gris-sombre et les marnes de ce puits qui sont rares à très abondantes en fonction de l'étage stratigraphique (Petroci, 2014). Les étages stratigraphiques concernés sont l'Albien, le Turonien, le Campanien et le Maastrichtien.

C'est donc dans ces roches, qui sont sous forme de déblais, que les glauconites ont été sélectionnées.

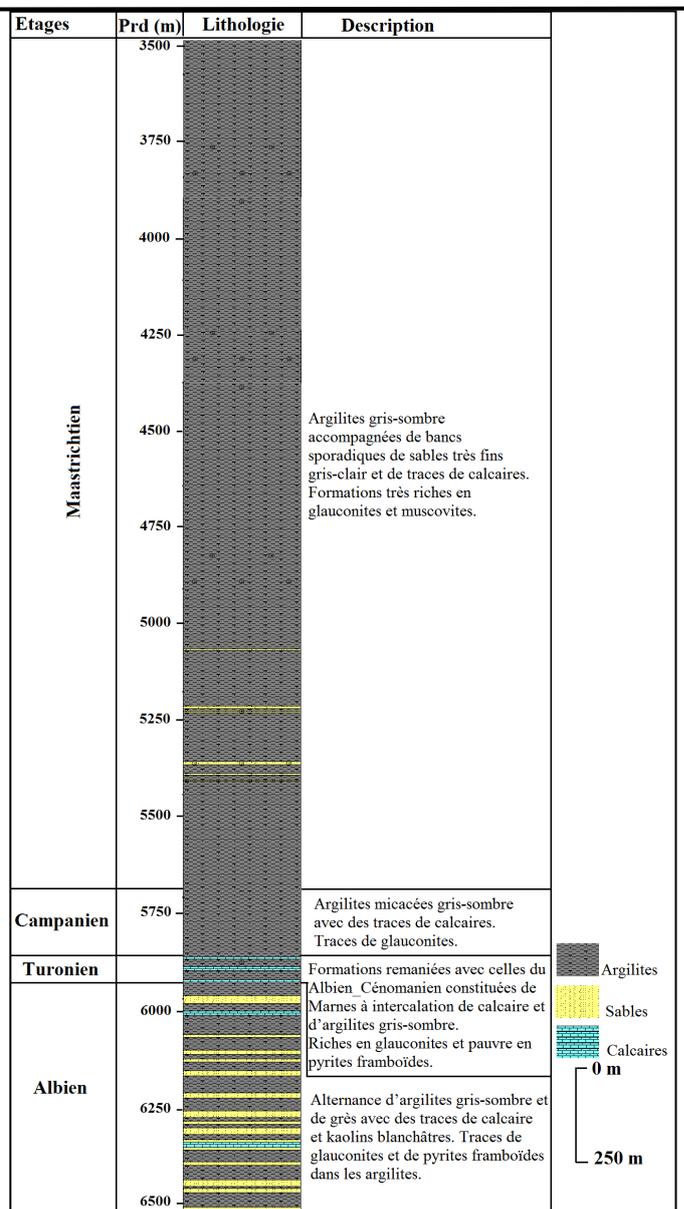


Fig. 2 : Stratigraphie du puits P-1X.

Fig. 2 : Stratigraphy of drilling P-1X.

Bien avant la sélection, les déblais de forage sont lavés au travers d'une colonne de 4 tamis à maille décroissante (500 μm -250 μm -125 μm -63 μm) puis séchés à l'étuve à 60 °C. Le but est d'éliminer la boue de forage et d'effectuer un tri granulométrique pour une observation plus aisée à la loupe binoculaire.

À la fin du lavage, on obtient quatre fractions pour chaque échantillon de déblais. Dans ces différentes fractions, on sélectionne un maximum de grains de glauconites en fonction de leur abondance (cinq à une vingtaine de grains par échantillon de déblais). Dans ce puits, les grains de glauconite sont plus concentrés dans les déblais ayant des tailles comprises entre 63 et 125 μm .

Ces grains sont par la suite décrits à la loupe binoculaire. En fonction de la couleur et de la forme des grains de glauconite, on choisit un à deux grains

par échantillon de déblais pour une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) de type FEG Supra 40VP de Zeiss. Ce microscope est couplé à un micro-analyseur de Rayons X EDS (Spectromètre à Dispersion d'Énergie) qui permet d'effectuer des analyses chimiques dont les résultats sont donnés en pourcentages d'oxydes.

Au total, 31 glauconites ont été sélectionnées pour l'analyse au MEB : 9 à l'Albien, 6 au Turonien, 4 au Campanien et 12 au Maastrichtien.

Au cours de l'observation des grains au MEB, on parcourt chaque glauconite, puis on sélectionne une à deux faces en fonction de la distribution des feuillettes sur l'ensemble de la glauconite. Lors de l'observation au MEB, des minéraux (kaolinite, pyrite framboïde, sels, halloysite...) pourront être identifiés sur la base de leur structure et en comparaison à la base de données des photos dont dispose le laboratoire de Géologie Marine. Ce sont ces faces qui sont analysées au micro-analyseur afin de comprendre la distribution des éléments chimiques dans la glauconite. Toutes ces analyses ont été réalisées au Centre d'Analyses et de Recherche de la PETROCI (Société d'Opérations Pétrolières de Côte d'Ivoire).

La nomenclature des glauconites se fera avec le sigle « **Echt** » accompagné d'un entier naturel (Echt1, Echt2, ...). Comme le travail est effectué sur 31 échantillons, on aura donc Echt1, Echt2, ..., Echt31 depuis le Maastrichtien jusqu'à l'Albien. Si le nom de la glauconite est encore suivi des chiffres 1 et 2, cela traduit l'analyse de deux faces sur la glauconite (Echt1-1 et Echt1-2, Echt2-1 et Echt2-2, ...) dans le cas contraire, seule une face est analysée.

La méthodologie utilisée pour identifier les différentes sortes de glauconites ainsi que leur environnement de dépôt est celle proposée par G.S. Odin et A. Matter (1981) et A. Amorosi (1997).

Selon G.S. Odin et A. Matter (1981), sur la base de la quantité de K_2O présente dans la glauconite, on peut distinguer quatre stades d'évolution : 1/ les glauconites naissantes ($K_2O = 2\%$ à 4%), 2/ légèrement évoluées ($K_2O = 4\%$ à 6%), 3/ évoluées ($K_2O = 6\%$ à 8%) et 4/ très évoluées ($K_2O > 8\%$). Ces auteurs affirment également que les naissantes et les légèrement évoluées présentent une coloration vert-pâle à vert-clair, tandis que les évoluées et les très évoluées une couleur verte à vert-sombre et montrent des craquelures sur la surface des grains.

Les grains de glauconites se forment typiquement en milieu marin. Mais le remaniement de ces grains par les tempêtes, les courants de marée et les vagues ou le remaniement causé par l'exposition

subaérienne du plateau continental au cours d'une régression peuvent apporter une concentration importante de grains de glauconite dans une variété d'environnements pauvres ou non-appropriés à la glauconitisation. Sur cette base, A. Amorosi (1997) a mis en évidence trois types de dépôt glauconieux : 1/ les glauconites autochtones, 2/ les glauconites parautochtones et 3/ les glauconites allochtones.

Les glauconites autochtones sont les glauconites formées sur place dans le milieu marin et non remaniées. Les deux derniers types sont des glauconites initialement autochtones qui ont subi un remaniement. Les grains para-autochtones ont des craquelures émoussées pour les grains évolués à très évolués. Quant aux glauconites allochtones, elles sont associées aux dépôts non-marins (dépôts fluviaux) qui ont subi un transport plus ou moins long.

4. Résultats

4-1 - Résultats chimiques et ultrastructure des grains de glauconite

Cette étude a concerné deux types de glauconite : 1/ les glauconites autochtones (Albien), 2/ les glauconites para-autochtones (du Turonien au Maastrichtien).

4.1.1. Glauconites autochtones

En se basant uniquement sur les différentes colorations que présentent les glauconites autochtones, un seul type peut être distingué : les glauconites naissantes.

Les naissantes ont été rencontrées uniquement dans les argilites gris-sombre de l'Albien. La couleur des grains de glauconite dans ces argilites est vert-clair (fig. 3).



Fig. 3 : Grains de glauconites autochtones naissantes de la cote 6 139 m (fraction 63 μm - 125 μm ; Photo loupe binoculaire).

Fig. 3: Particles of nascent autochthonous glauconites of depth 6139 m (fraction of 63 μm - 125 μm ; Photo of binocular lens).

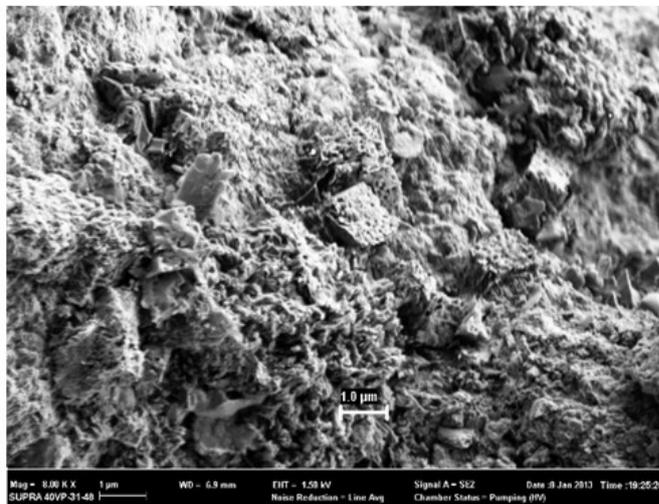
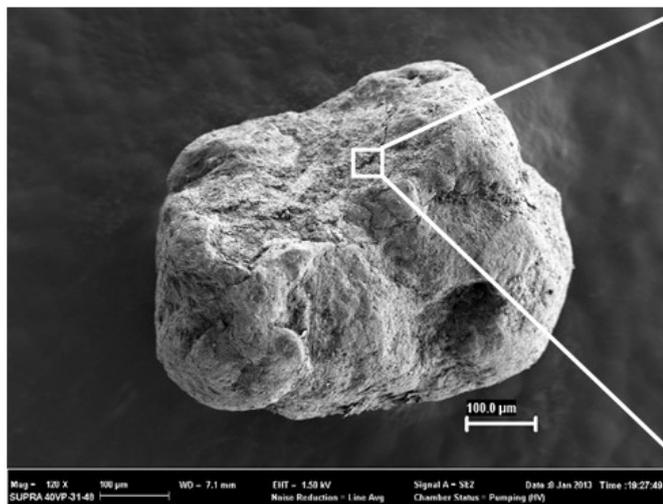


Fig. 4 : Glauconite naissante de la cote 6 100 m présentant une surface non-individualisée (Echt25-1).

Fig. 4: Nascent glauconite of depth 6100 m with not individualized surface (Echt25-1).

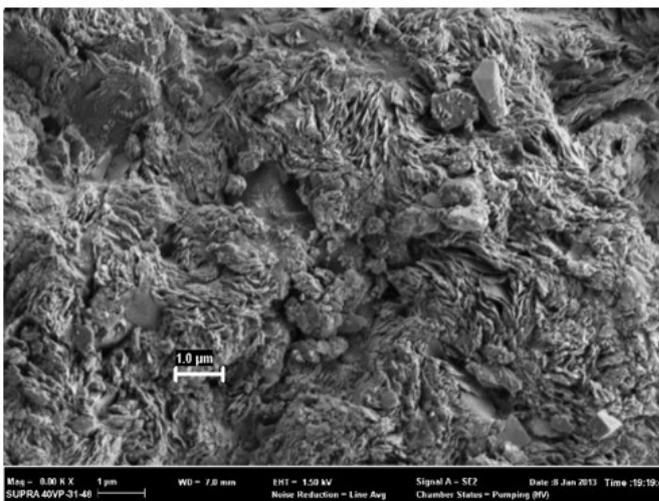
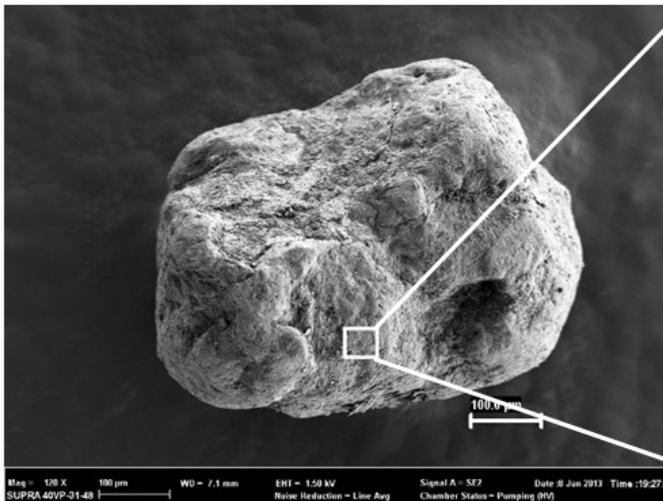


Fig. 5 : Glauconite naissante de la cote 6100 m avec des feuillets peu-individualisés (Echt25-2).

Fig. 5: Nascent glauconite of depth 6100 m with little individualized sheets (Echt25-2).

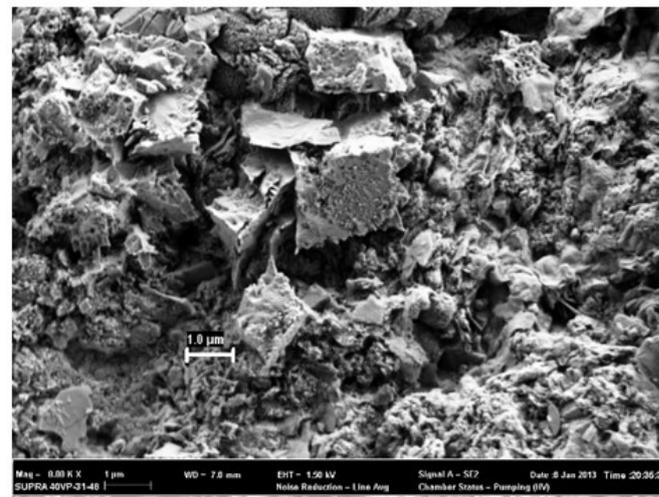
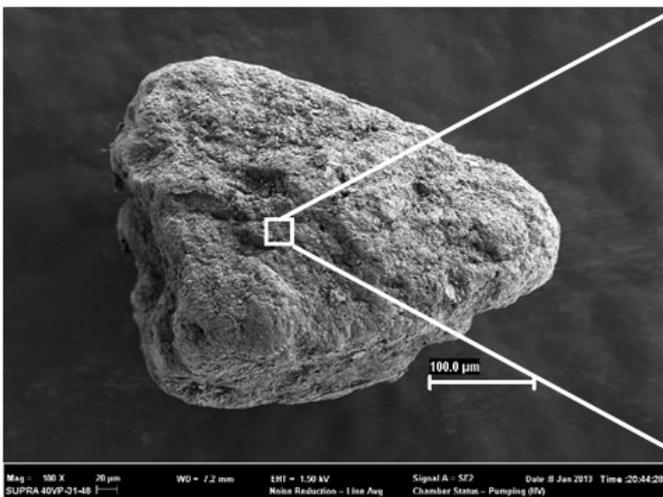


Fig. 6 : Glauconite naissante de la cote 6 175 m présentant une surface non-individualisée (Echt31-1).

Fig. 6: Nascent glauconite of depth 6175 m with not individualized surface (Echt31-1).

Puits	Cote (m)	Étage	Glauconitisation	Echt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃
P-1X	6121	Albien	Précurseur glauconieux	Echt23-1	1,1	14,95	2,1	53,9	0,84	0	19,84	0,33	0	6,9
				Echt23-2	0,89	25,57	5,53	53,4	0	0	9,08	0,49	0	5,06
				Echt24	0,97	21,8	1,62	54,5	0	0,3	17,28	0	0,3	3,28
	Moyenne				0,98	20,77	3,08	53,9	0,28	0,1	15,4	0,27	0,1	5,08

Tabl. 1 : Résultats chimiques sur deux précurseurs glauconieux.

Tabl. 1: Chemical results of two glauconitic precursors.

Puits	Cote (m)	Étage	Glauconitisation	Echt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
P-1X	6100 6112 6118 6121 6130 6139 6175	Albien	Glauconites naissantes	Echt25-1	1,28	1,94	16	44,1	14,3	2,33	12,38	1,3	6,45
				Echt25-2	0,3	3,52	9,06	55,4	0	6,08	7,45	0,14	18,02
				Echt26	0	4,35	7,62	59,6	0	6,05	3,71	0	18,64
				Echt27	0	2,83	6,55	51,1	0	6,13	11,2	0	22,2
				Echt28-1	0,44	3,37	19,9	39,8	4,77	2,45	20,17	2,19	5,73
				Echt28-2	0,6	4,19	9,49	56,1	0	5,94	6,52	0	17,2
				Echt29	1,41	8,08	22,8	52,6	2,18	1,91	4,75	0,65	5,64
				Echt30	0	3,1	6,64	55,2	0	7,05	2,42	0	25,59
				Echt31-1	0	2,54	14	52	1,31	1,04	26,36	0,51	2,19
				Echt31-2	0,49	1,99	11,2	43,3	1,8	0,93	35,97	0,44	2,86
				Moyenne				0,45	3,59	12,3	50,9	2,43	3,99

Tabl. 2 : Résultats chimiques des glauconites naissantes du forage P-1X.

Tabl. 2: Chemical results of nascent glauconites of P-1X drilling.

Par contre, sur la base de la proportion de K₂O, deux types de glauconites peuvent être identifiés parmi les glauconites autochtones : 1/ précurseurs glauconieux, 2/ glauconites naissantes à légèrement évoluées. Les résultats chimiques de ces glauconites sont consignés dans les tabl. 1 et 2.

Le précurseur glauconieux (grain vert clair) est caractérisé principalement par la présence des oxydes suivants (tabl. 1) : MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO et Fe₂O₃. Sur la base de la moyenne calculée de ces oxydes, l'ordre d'abondance est : silicium (53,93 %), magnésium (20,77 %), calcium (15,4 %), fer (5,08 %) et aluminium (3,08 %).

Parmi ces oxydes, seul le silicium est presque uniformément réparti dans les grains de glauconite. Les autres sont inégalement répartis.

Dans ce précurseur, les oxydes tels que Na₂O (0,98 %), SO₃ (0,28 %) et Cr₂O₃ (0,27 %) sont rares. Le potassium (0,1 %) et le manganèse (0,1 %) sont pratiquement inexistantes.

Ce précurseur serait de la smectite très pauvre en potassium.

Les données ultrastructurales montrent qu'aucun feuillet de phyllite ne se rencontre dans le précurseur glauconieux. Les différentes faces des glauconites sont non-individualisées (fig. 4).

Les glauconites naissantes à légèrement évoluées montrent une composition chimique constituée principalement de MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO et Fe₂O₃ (tabl. 2). Elles sont très riches en

silicium (50,92 %) qui a une concentration presque uniforme dans l'ensemble des sept grains. L'aluminium, le calcium et le fer sont peu abondants ; les proportions moyennes respectives sont de 12,3 %, 13,19 % et 12,45 %. Quant aux magnésium (3,59 %), soufre (2,43 %) et potassium (3,99%), ils sont rares, voire inexistantes sur certaines faces (cas du soufre). La proportion de soufre est significative sur la face Echt25-1 (14,3 %).

Les concentrations des éléments peu abondants et rares sont inégales d'une face à l'autre et même d'une glauconite à l'autre. Les éléments chimiques très rares dans ces glauconites sont : Na₂O et TiO₂. Ces constituants ne sont présents que sur certaines faces.

Dans les glauconites naissantes à légèrement évoluées, le potassium devient un constituant principal comparativement aux précurseurs glauconieux. La proportion du magnésium chute tandis que celles du fer et de l'aluminium augmentent. Le silicium et le calcium sont relativement constants. Le chrome et le manganèse disparaissent dans ces glauconites. Cette variation des proportions traduit l'existence d'un milieu qui devient de plus en plus réducteur. Les milieux de formation des glauconites naissantes à légèrement évoluées sont plus réducteurs que ceux des précurseurs glauconieux.

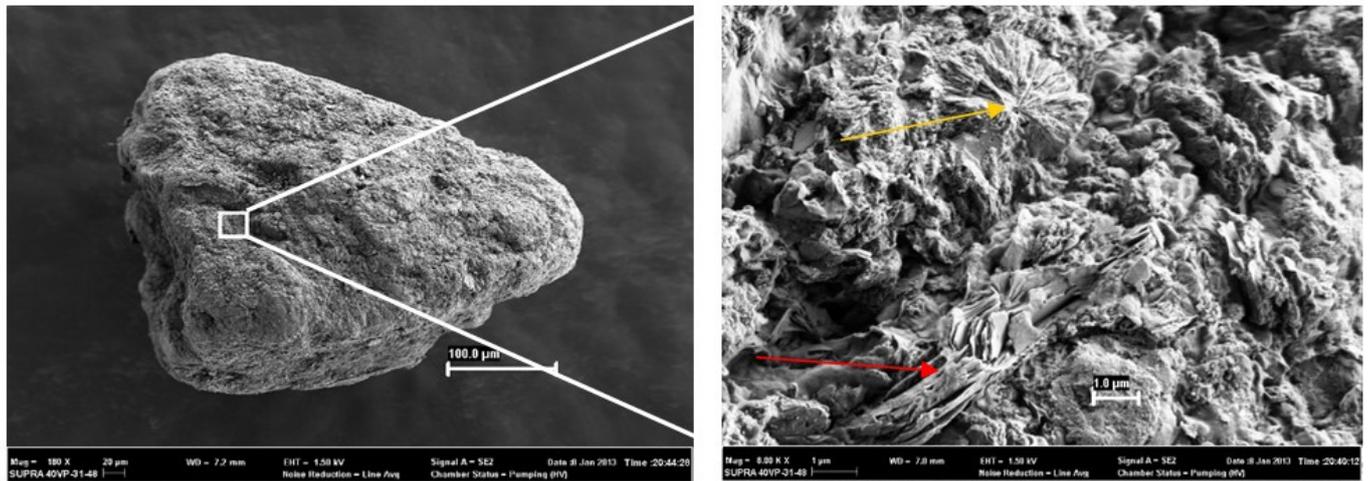


Fig. 7 : Glauconite naissante de la cote 6 175 m (Echt31-2 : flèche jaune - cristallisation de gypse ; flèche rouge - feuillet de kaolinite).

Fig. 7: Nascent glauconite of depth 6175 m (Echt31-2: yellow arrow - crystallization of gypsum; red arrow - sheet of kaolinite).

L'ultrastructure de ces glauconites montre d'une part des surfaces non-individualisées et d'autre part des surfaces où les feuillets de phyllite sont moins bien à bien individualisés (fig. 4 à 7). Cela concorderait avec la valeur moyenne de 3,99 % mesurée pour le potassium. Ce sont les feuillets individualisés qui présenteraient des proportions élevées de potassium (> 4 %).

L'observation de la glauconite Echt31 au MEB, révèle des cristallisations d'évaporites en rosette (gypse) de la taille du micron (2 à 5 μm) et la présence de feuillets de kaolinite. La forte concentration de calcium et la présence de soufre dans cette glauconite sont en grande partie dues aux sels précipités. En l'absence de francs dépôts d'évaporites dans le bassin ivoirien, on pense qu'elles proviennent de la précipitation des sels d'une saumure interstitielle dans les pores des sédiments au cours des régressions ; ce sont donc des évaporites capillaires.

Au regard du pourcentage de potassium dans la glauconite Echt31 qui reste inférieur à 2 %, cette glauconite marquerait la transition entre les précurseurs glauconieux et les glauconites naissantes.

D'après ce qui précède, on peut envisager qu'en début de glauconitisation, l'environnement de formation est riche en sels dissous (Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{-2} et Ca^{2+}) et en kaolinite.

On remarque que l'Albien ivoirien est caractérisé par des précurseurs glauconieux et des glauconites naissantes à légèrement évoluées. Les précurseurs glauconieux se situent à la cote 6121 m de l'Albien. A cette cote, ils cohabitent avec les glauconites naissantes à légèrement évoluées.

Les glauconites de l'Albien n'ont donc pas atteint

la maturité avant leur enfouissement (diagénèse). Selon A. Amorosi (2003), la maturité de la glauconite est fonction de la durée de non dépôt (durée de la transgression) avant l'enfouissement. Donc, le séjour des glauconites de l'Albien à l'interface eau-sédiment a été moins long avant la diagenèse ; ce qui explique la conservation des précurseurs glauconieux et des glauconites naissantes à légèrement évoluées dans les argilites gris-sombre de l'Albien.

L'enfouissement rapide de ces glauconites s'explique très bien au regard de la lithologie de l'Albien. Cette lithologie est composée principalement d'une alternance d'argilites gris-sombre et de grès. Les grès, qui sont constitués principalement de quartz, témoignent du renouvellement du flux détritique dans l'environnement marin dû à de courtes variations du niveau marin (rapides jeux de transgression et régression). Cette assertion est confirmée par le milieu de dépôt de l'Albien qui est une alternance entre milieu marin néritique et milieu continental (Petroci, 2014), et correspond à la phase rifting dans le bassin ivoirien (Sombo, 2002).

En somme, pendant les phases transgressives, les argiles gris-sombre se déposent dans le milieu néritique qui reste à l'abri des flux détritiques (sédiments sableux) venant du continent. C'est dans ces conditions que les précurseurs glauconieux se forment et évoluent par enrichissement progressif en potassium et en fer pour donner des glauconites naissantes à légèrement évoluées. La maturation vers le stade évolué à très évolué n'a pu être possible à cause de l'enfouissement par les flux détritiques pendant les phases régressives. Cela a entraîné l'enfouissement et la conservation des précurseurs glauconieux et des glauconites naissantes à légèrement évoluées dans les argilites gris-sombre transformées en argilites gris-sombre du fait de la

diagenèse (compaction). Il est bon de noter que les glauconites sont stables durant les différents stades de la diagenèse et instables dans les conditions métamorphiques (Frey *et al.*, 1973).

Ce processus s'étant répété plusieurs fois donne aujourd'hui des précurseurs glauconieux et des glauconites naissantes à légèrement évoluées dans les argilites gris-sombre qui s'alternent avec des grès dans l'Albien de ce puits. Les différents passages des phases transgressives aux phases régressives ont donc été de courtes durées.

4.1.2. Glauconites para-autochtones

Considérant la couleur verte à vert-sombre et des craquelures que présentent les glauconites des étages allant du Turonien au Maastrichtien, on peut déduire qu'il s'agit de glauconites évoluées à très évoluées. Ces glauconites comportent de nombreuses inclusions de pyrites sous forme framboïde. Ces pyrites sont pour la plupart oxydées.

Au Turonien, les glauconites ont été échantillonnées dans les marnes et les argilites gris-sombre. Ces glauconites sont très évoluées (coloration vert-sombre) et très pyritisées (fig. 8). Les craquelures sont plus ou moins émoussées. Certaines glauconites présentent une perte de coloration due soit à une oxydation (coloration brune), soit à un lessivage (coloration vert-clair).

Les travaux antérieurs (Petroci, 2014) suggèrent un remaniement des formations sédimentaires de l'Albien supérieur et du Cénomanien au cours du Turonien. Ce remaniement a aussi occasionné une reprise sédimentaire des glauconites préalablement formées en entraînant une oxygénation, d'où le lessivage et l'oxydation de certains grains.

Le Turonien et le Sénonien inférieur sont connus pour leur caractère régressif, dans le bassin sédimentaire offshore ivoirien, qui a entraîné l'érosion complète des formations du Cénomanien et de l'Albien supérieur par endroits (Kouao, 2017 ; Ouattara, 2017). Turonien et Sénonien se retrouvent en lambeaux dans le bassin ivoirien ou créent une discordance entre le Campanien et le Cénomanien lorsque ce dernier n'est pas complètement érodé.

Les glauconites, se formant dans le milieu marin, n'ont pu être formées au Turonien et Sénonien inférieur dans le bassin ivoirien vu le caractère régressif et parfois turbulent de ces étages. Celles identifiées au Turonien dans ce puits ont donc été formées entre l'Albien supérieur et le Cénomanien durant de lentes variations du niveau marin d'où l'apparition de craquelures sur les grains. Vu la présence de craquelures émoussées, de grains lessivés et oxydés, ces glauconites sont d'anciennes glauconites très évoluées de l'Albien-Cénomanien qui ont été remaniées dans les sédiments du Turonien. Les différentes inclusions de pyrites framboïdes présentes sur ces glauconites sont antérieures au remaniement, d'où l'explication de leur oxydation. Selon Petroci (2014), les microflores et microfaunes identifiées dans les formations remaniées sont toutes marines (plateau continental moyen à externe) témoignant ainsi d'un remaniement en milieu marin. Ces formations n'étant pas associées à des dépôts continentaux, on peut déduire que les glauconites sont para-autochtones.

Les glauconites du Campanien et du Maastrichtien ont les mêmes caractéristiques que celles du Turonien, à l'exception de grains évolués qui sont associés aux grains très évolués (fig. 9). Ils sont plus délavés à ces étages et sont parfois enrobés

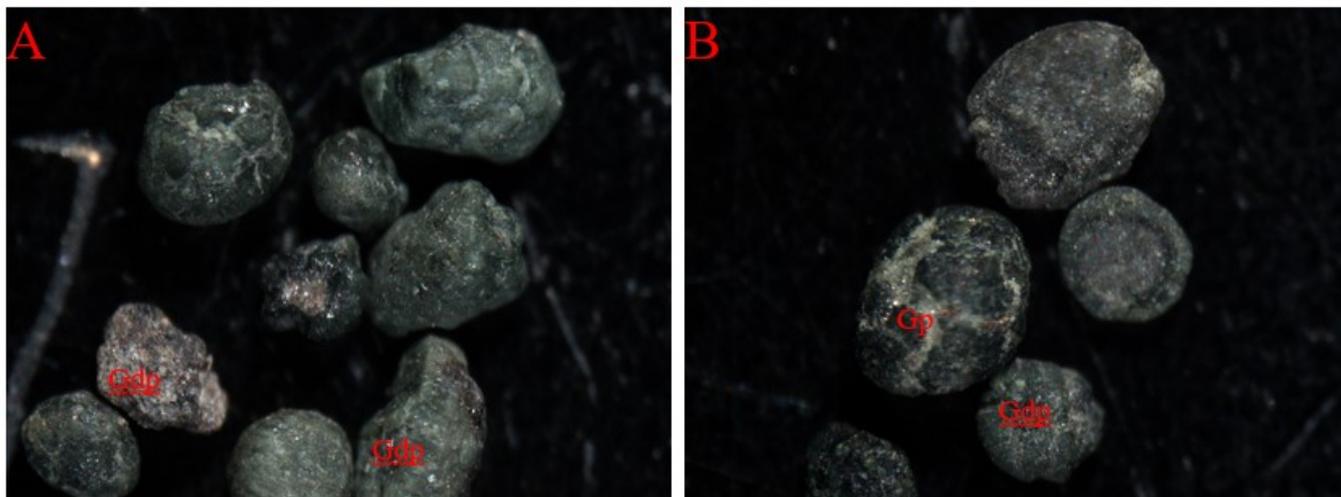


Fig. 8 : Glauconites très évoluées à inclusions de pyrites oxydées du Turonien (fraction 63 μ m). A - Glauconites de la cote 5775 (Gdp : glauconites dénaturées et pyritisées). B - Glauconites de la cote 5787 (Gp : glauconites à inclusion de pyrite).

Fig. 8 : Highly evolved glauconites with inclusions of oxidized pyrite (63 μ m fraction). A: glauconites of depth 5775 m (Gdp : denaturalized and pyritous glauconites). B: glauconites of depth 5787 m (Gp: glauconites with inclusions of pyrite).

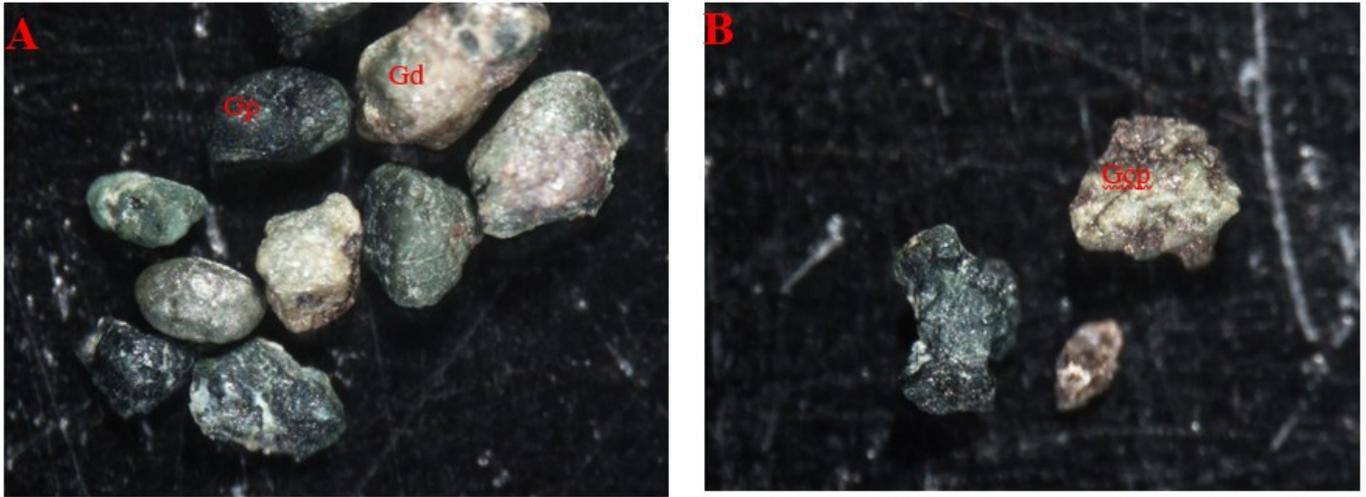


Fig. 9 : Glauconites évoluées à très évoluées (fractions 63 μm). A : glauconite à inclusions de pyrite (Gp) et glauconite dénaturée (Gd). B : glauconite complètement pyritisée (Gcp).

Fig. 9: Evolved to highly evolved glauconites (63 μm fraction). A: glauconite with inclusions of oxidized pyrite (Gp) and denaturalized glauconite (Gd). B: completely pyritized glauconite (Gcp).

dans de l'argile kaolinique. Ils peuvent également comporter des inclusions de pyrites oxydées. Le Campanien est discordant sur le Turonien. Quant au Maastrichtien, sa base a été érodée créant ainsi une discordance sur les formations du Campanien (Petroci, 2014).

Le lessivage et l'oxydation des grains ont été occasionnés par les différentes régressions qui ont entraîné l'érosion des formations sous-jacentes. Ces glauconites sont para-autochtones, provenant d'anciennes glauconites évoluées à très évoluées qui ont été oxygénées durant les régressions (Campanien et Maastrichtien).

Les compositions chimiques des glauconites para-autochtones (tabl. 3) sont caractérisées principalement par six éléments : Mg, Al, Si, K, Ca et Fe. Leur répartition dans les différents grains est uniforme à inégale. Ainsi, le silicium est l'élément le plus abondant avec 60,53 % de la proportion moyenne totale. Il est uniformément réparti tandis que le magnésium, l'aluminium et le calcium sont moins bien répartis. Les proportions moyennes de ces éléments chimiques sont 3,01 % (Mg), 13,8 % (Al), 1,22 % (Ca). Le fer et le potassium sont inégalement répartis (fortement variables) d'un grain à l'autre. Les concentrations du fer varient de 1,33 à 48,2 % avec une moyenne de 15,46 %. Quant au potassium, les concentrations oscillent entre 0,44 % et 8,65 % avec une moyenne de 4,25 %.

Sur la base des différentes concentrations, on pourrait dire que tous les types de glauconites sont présents dans ces étages du Crétacé supérieur, plus précisément entre le Campanien et le Maastrichtien (précurseurs glauconieux, glauconites naissantes, légèrement évoluées ...). Cependant la morphologie des grains (craquelures émoussées, grains dénaturés

et oxydés) montre qu'il s'agit d'anciennes glauconites très évoluées qui ont connu des modifications suite aux différentes régressions produites à ces étages. Ce phénomène a entraîné un déséquilibre chimique des grains et une baisse des teneurs en potassium et fer, par endroit, mais aussi une perte de la coloration verte. Les fortes variations de fer observables sur certains grains de glauconites correspondent à ces zones oxydées.

Aussi, lors de l'évolution depuis les glauconites matures jusqu'aux glauconites para-autochtones, il se produit une augmentation des proportions moyennes d'aluminium et de silicium et la réapparition du calcium et du sodium, mais seulement sur certaines faces des grains. Le magnésium reste stable. Le titane et le soufre sont très rares ; ils n'apparaissent que sur quelques grains. La plus forte concentration du soufre est identifiée sur la deuxième face de l'échantillon (Echt11). Sa présence serait due aux pyrites framboïdes observables sur ces grains. La présence de soufre, ne serait-ce que sur une petite surface d'une glauconite, peut fortement influencer la proportion des éléments principaux responsables de la glauconitisation.

L'ultrastructure des glauconites para-autochtones du puits P-1X montre des feuillets bien développés (fig. 10 et 11) et des surfaces comportant des inclusions de pyrites framboïdes (fig. 12 et 13) et des feuillets de kaolinite.

Sur la surface 2 de l'échantillon Echt11 qui a présenté une forte concentration de soufre, on remarque très bien la présence de pyrites framboïdes dont les grains individuels de pyrite ont une taille de 0,5 μm (500 nm). On peut donc affirmer que les concentrations de soufre signalées par l'analyse chimique proviennent des pyrites framboïdes présentes sur les grains de glauconites.

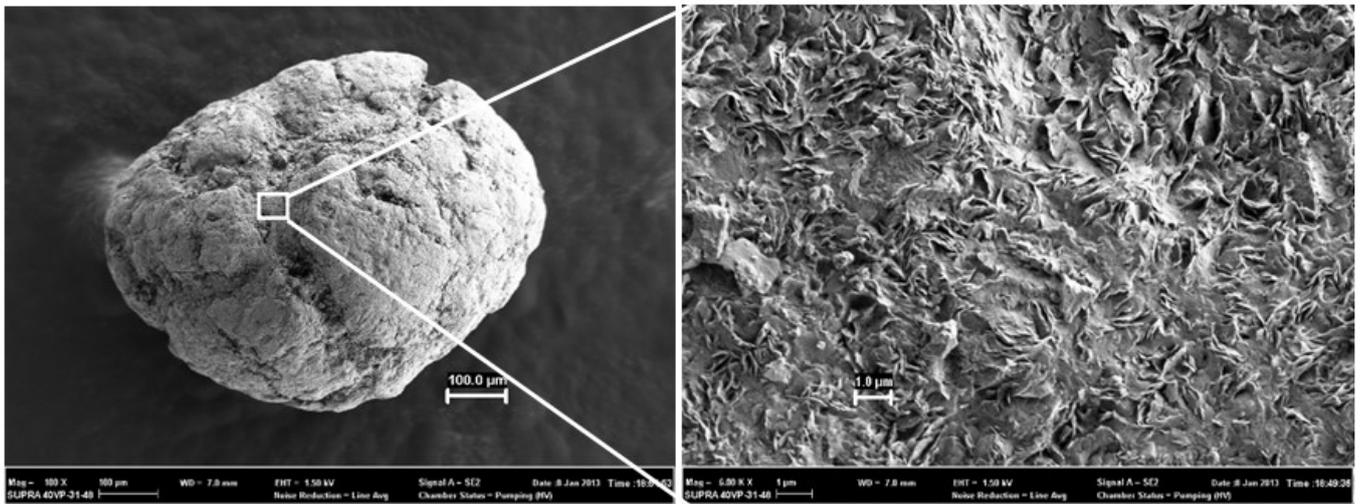


Fig. 10 : Feuilles de glauconite très évoluée para-autochtone de la cote 5 787 m (Echt21).

Fig. 10 : Sheets of highly evolved para-autochthonous glauconite of depth 5787 m (Echt21).

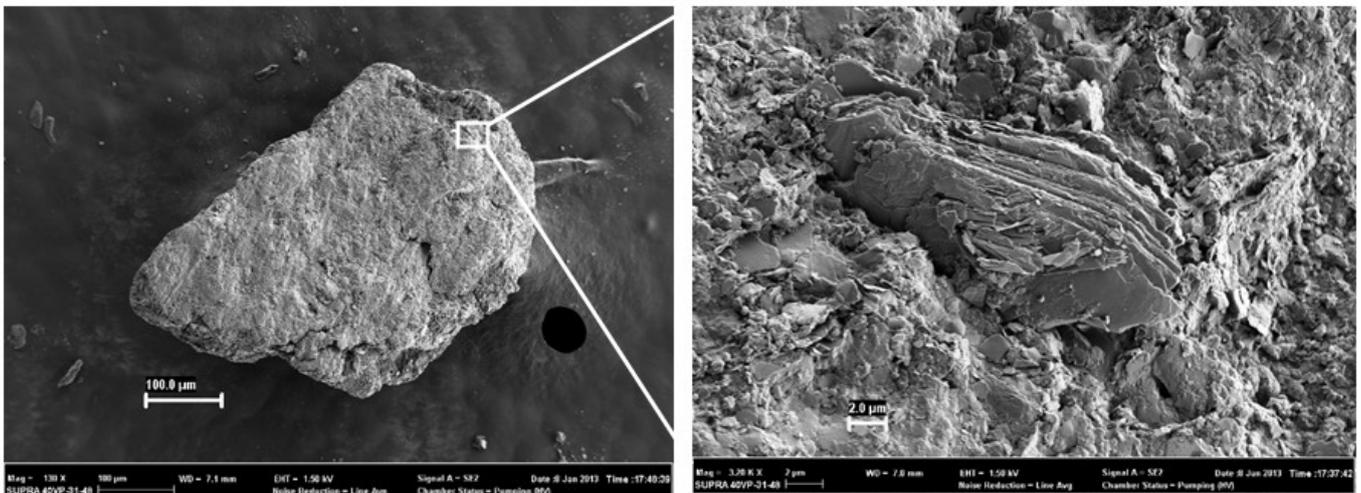


Fig. 11 : Glauconite para-autochtone de la cote 5 720 m présentant un développement de feuillets de kaolinite (Echt14).

Fig. 11: Para-autochthonous glauconite of depth 5720 m showing sheets of kaolinite (Echt14).

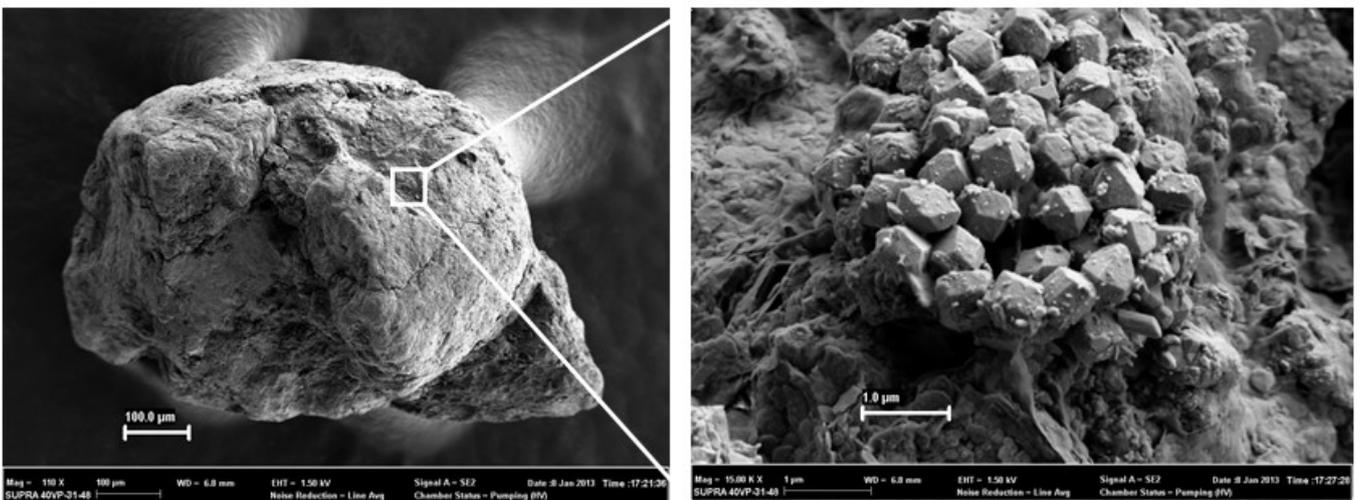


Fig. 12 : Développement de pyrite framboïde sur une surface de glauconite de la cote 5 700 m (Echt13)

Fig. 12: Development of framboid pyrite on a surface of a glauconite of depth 5700 m (Echt13)

Quant aux feuillets de kaolinite, ils ne s'observent que sur les faces dénaturées dont le plus long diamètre de ces feuillets est compris entre 14 et 16 µm (fig. 11) ; ceci indiquerait une transformation de la glauconite en kaolinite (Echt14). L'analyse chimique

de l'échantillon Echt14 montre une forte concentration en aluminium (29,6 %) accompagnée d'une proportion très faible de potassium (0,8 %).

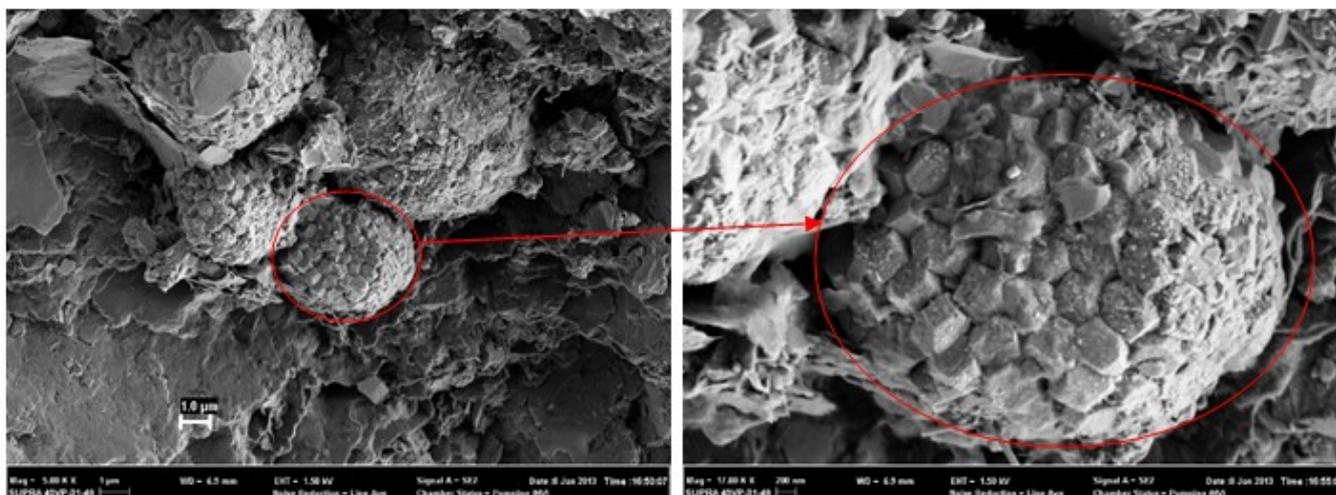
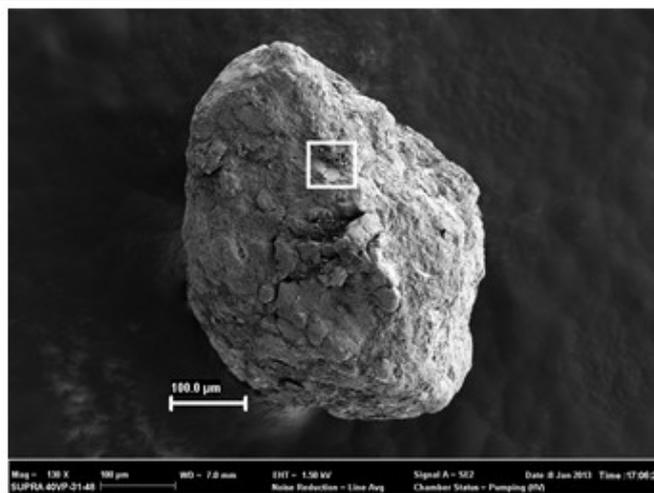


Fig. 13 : Glauconite para-autochtone de la cote 4 900 m (Echt11-2). Le petit carré de la photo du haut indique la localisation des photos du bas qui détaillent les pyrites framboïdes.

Fig. 13: Para-autochthonous glauconite of depth 4900 m (Echt11-2). Small square on top photo corresponds to down photos focused on framboid pyrites.

C'est la présence de la kaolinite et de la pyrite ainsi que de zones oxydées qui entraînent de fortes variations de proportions des éléments chimiques principaux de la glauconitisation (Al, Si, K, et Fe) observées sur les faces des glauconites para-autochtones (tab. 3).

5. Discussion

5.1. Formation des glauconites

La glauconite se forme dans des environnements marins ouverts peu profonds à profonds et loin des zones de sédimentation active, de préférence pendant de longues périodes de non-dépôt dues à la montée relative du niveau de la mer (Odin et Fullagar, 1988).

Selon A. Amorosi (2003), la glauconitisation débute dans un régime redox approprié, appelé milieu suboxydé, qui est situé à l'interface eaux oxydantes et eaux interstitielles légèrement réductrices.

Dans ces milieux, on peut retrouver des dépôts de kaolinite provenant des sédiments continentaux. Dans le bassin ivoirien (onshore et offshore), cette

argile est le principal minéral argileux qui est parfois très riche en fer (Gbango, 2012 ; Assalé, 2013 ; Assalé *et al.*, 2013). Rappelons que la Côte d'Ivoire est située en zone tropicale.

Les glauconites de l'Albien de ce puits ont montré que le début de glauconitisation se produit dans un milieu riche en sel et kaolinite. De part ce constat, on pourrait envisager que la kaolinite héritée des sédiments continentaux soit le catalyseur de la glauconitisation dans un milieu alcalin en présence d'ions dissous (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$). Dans ce milieu riche en sel et en fer, le processus débiterait par la transformation de la kaolinite en smectite pauvre en potassium. Cette smectite n'est autre que le précurseur glauconieux.

Ces hypothèses corroborent les travaux de R.P.A. Gabriel *et al.* (2014) qui ont travaillé sur la transformation de la kaolinite en smectite et en illite riche en fer dans les mangroves du Brésil. Ces auteurs montrent qu'il pourrait exister une transformation authigène de la kaolinite en illite riche en fer, en passant par les phases transitoires de kaolinite-smectite et d'illite-smectite. La transformation

Forage	Cote (m)	Etage	Glauconitisation	Echt	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
P1	3550	Maastrichtien	Glauconites évoluées à très évoluées	Echt1	0,4	3,07	20,7	61	1,3	2,4	1,1	0,9	9,44
	4010			Echt2	0,33	3,19	8,06	57	0	6,8	0,8	0	24,2
	4030			Echt3	0,44	5,07	7,24	61	0	7,3	0,5	0	18,1
	4040			Echt4	0,41	4,05	8,91	61	0	5,5	0,9	0	19
	4070			Echt5	0,4	2,55	16,3	55	0	4,7	1,3	0	19,7
	4200			Echt6	0	3,53	5,5	56	0	8,7	1	0	25,4
	4300			Echt7	0	3,67	6,04	57	0	7,8	0,5	0	24,7
	4400			Echt8	0,67	3,78	12,4	63	0	3,6	1,4	0,5	15
	4510			Echt9	0	2,83	19,5	62	0,8	3,2	1,5	0	10,3
	4800			Echt10	0	2,88	21,8	65	0	1,8	1,4	0	7,68
	4900	Echt11-1		0,47	0,65	12,8	78	1,3	0,4	0,7	0,7	4,64	
		Echt11-2		0,21	0,46	14,9	55	18	1	0,8	0	9,16	
	5100	Echt12		0	4,59	7,51	61	0	6,7	1,6	0	18,4	
	5700	Campanien		Echt13	0	1,39	15,5	70	7,6	0,6	1,1	0,5	3,07
	5720			Echt14	0,37	1,02	29,6	63	2,6	0,8	1	0,5	1,33
	5730			Echt15	0	1,25	21,9	73	0	0,7	0,9	0	1,78
				Echt16	0,76	3,87	15,7	61	0,4	4,3	1,2	0	12,8
	5766	Turonien		Echt17	0	2,19	4,96	38	0	6	0,8	0	48,2
	5769			Echt18	0	2,7	9,49	46	0	7,6	1,7	0	33
	5775			Echt19	0	4,1	18,7	64	0	3,1	1,8	0	8,44
	5778			Echt20	0	4,28	8,06	61	0	6,2	1,2	0	19,7
	5787			Echt21	0	3,92	15,3	63	0	4,5	1,7	0	12,1
5818	Echt22		0,4	4,24	16,6	61	0	4,3	3,4	0	9,66		
Moyenne					0,21	3,01	13,8	60,53	1,39	4,25	1,22	0,13	15,46

Tabl. 3 : Résultats chimiques des glauconites para-autochtones du forage P-1X.

Tabl. 3: Chemical results of para-autochthonous glauconites of P-1X drilling.

a lieu dans un milieu riche en fer et en sels dissous avec un pH approximativement neutre.

Suite à une période de non-dépôt due à la montée relative du niveau marin, le précurseur glauconieux gagne en maturité avec l'incorporation progressive de potassium et de fer (Fe²⁺ et Fe³⁺) dans un milieu marin qui devient de plus en plus réducteur (anoxique). En début de glauconitisation (milieu suboxydé), le fer III est mieux incorporé que le fer II et à mesure que le milieu devient réducteur, c'est plutôt l'incorporation du fer II qui est favorisée suivant la réaction redox du fer. C'est le fer II qui occasionne la coloration verte de la glauconite.

Si la période de non-dépôt est longue, alors on aura des glauconites évoluées à très évoluées puisque selon A. Amorosi (2003), la maturité de la glauconite est fonction de la durée de non-dépôt (durée de la transgression) avant l'enfouissement.

La maturation de la glauconite s'arrête juste avant la production excessive de H₂S qui favorise la formation de la pyrite dans un milieu devenu riche en

fer II. Les travaux de R.A. Berner (1981), confirmés par ceux de F.Y.P. Assalé (2013), révèlent que si la glauconitisation débute dans un milieu marin suboxydé, son évolution (maturation) s'achève dans un milieu marin anoxique peu sulfuré (H₂S ≤ 10⁻⁶ M). Lorsque H₂S > 10⁻⁶ M (milieu sulfuré), c'est plutôt la pyrite qui entame sa formation (Berner, 1981) ; c'est ce qui explique les inclusions de pyrites framboïdes dans les glauconites du Crétacé supérieur de ce puits et même la présence de pyrites framboïdes dans les formations contenant ces glauconites (argilites gris-sombre). La formation de ces pyrites est donc antérieure aux différents remaniements mis en évidence dans ce puits au cours du Crétacé supérieur, d'où l'explication de leur oxydation.

Si par contre, la période de transgression est courte ou même très courte, les glauconites sont enfouies en l'état dans les sédiments durant la phase régressive puisqu'elles restent stables durant les différents stades de la diagenèse. On pourra donc avoir des glauconites naissantes à légèrement évoluées ou même des précurseurs glauconieux

présents dans les roches ; tel est le cas des glauconites de l'Albien de ce puits.

Les glauconites sont donc des indicateurs de la variation du niveau marin et même de la durée de cette variation. La formation débute dans un environnement marin peu profond à l'abri des apports continentaux et s'achève dans un environnement marin profond à très profond.

5.2. Formation des glauconites para-autochtones

Les glauconites para-autochtones étudiées ici sont d'anciennes glauconites évoluées à très évoluées qui ont été remaniées au cours des différentes régressions mises en évidence au Crétacé supérieur. Bien qu'ayant conservé des craquelures plus ou moins émoussées, ces glauconites présentent une perte de coloration due soit à une oxydation (coloration brune), soit à un lessivage (coloration vert-clair à beige).

Ces glauconites qui ne sont pas associées à des dépôts continentaux mais à des formations ayant conservé des microfaunes et microflore marines (Petroci, 2014), révèlent un remaniement intra-séquentiel dû probablement à un glissement de terrains dans le milieu marin ; d'où le nom de glauconites para-autochtones.

Selon F.Y.P. Assalé (2013), la stabilité des glauconites est assurée par l'ion K^+ . Une perte de cet ion déstabilise le minéral. Cet auteur indique également qu'un lessivage (partiel ou fort) et une oxydation des glauconites entraînent un appauvrissement en ion K^+ . Le lessivage favorise le passage de coloration verte à la coloration blanchâtre, en passant par les colorations intermédiaires. Dans ces conditions, les faces ou grains lessivés se transforment en kaolinite (cas de la glauconite ECH14). L'altération de la glauconite est donc plus ou moins le revers de sa formation ; cette assertion corrobore les travaux de F. MacKenzie et *al.* (2005).

L'oxydation de la glauconite favorise également une perte de coloration (du vert au brun) résultant de l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} .

6. CONCLUSION

Les analyses chimiques des glauconites et leur ultrastructure, réalisées au MEB-EDS, donnent des informations sur la formation des glauconites et leur évolution durant la diagenèse.

La formation des glauconites a lieu en milieu marin et surtout pendant les phases transgressives, bien avant la diagenèse. Le substratum de

glauconitisation en zone tropicale est un milieu alcalin suboxydé peu profond riche en ions dissous (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Fe^{2+}/Fe^{3+}) et en kaolinite. Ce milieu est à l'abri des flux continentaux. Dans ce milieu riche en sel et en fer, la kaolinite héritée des sédiments continentaux pourrait se transformer en smectite très pauvre en potassium (voire sans potassium). Cette smectite n'est autre que le précurseur glauconieux qui est composé principalement de Mg, Al, Si, Ca et Fe. S'il existe de la smectite dans le milieu, elle peut également se transformer directement en précurseur glauconieux. L'incorporation progressive de potassium et du fer transforme le précurseur glauconieux en glauconite naissante à légèrement évoluée. A ce stade, la quantité de magnésium et calcium diminue, et celle de l'aluminium augmente, du fait du milieu devenant de plus en plus réducteur. La proportion du silicium reste pratiquement stable. La persistance de la transgression (milieu anoxique peu sulfuré) permet la maturation de ces glauconites avec l'apparition de craquelures, d'où le nom de glauconites évoluées ou très évoluées. Dans ce second cas, le calcium tend à disparaître et il ne reste que les cinq éléments chimiques principaux de la glauconitisation : le magnésium, l'aluminium, le silicium, le potassium et le fer. Les proportions de l'aluminium diminuent tandis que celles du potassium et du fer augmentent. Celles du silicium et du magnésium restent pratiquement constantes.

La maturation ne s'achève qu'avec l'apparition des pyrites framboïdes dans les sédiments (milieu anoxique très sulfuré). Les pyrites pourront également apparaître sur les glauconites sous la forme d'inclusions.

La glauconitisation débute donc dans un milieu marin peu profond et s'achève dans un milieu marin profond à très profond, avant la diagenèse ; cela n'est possible que pour de longues périodes de transgression. Par conséquent, la conservation d'un type de glauconite dans les sédiments renseigne sur la durée des phases transgressives. La conservation des précurseurs glauconieux et glauconites naissantes à légèrement évoluées révèle une durée très courte (précurseurs glauconieux) à courte (glauconites naissantes à légèrement évoluées). Des périodes plus longues de transgression donneront des glauconites évoluées à très évoluées, avec parfois des inclusions de pyrites framboïdes.

Les différentes glauconites ainsi formées ne sont pas affectées par la diagenèse. Mais les phases régressives peuvent influencer la structure des glauconites par le remaniement des roches. Ce remaniement en milieu marin, sans contamination par

des apports continentaux, donne des glauconites para-autochtones. Ces glauconites présentent des faces ou grains blanchis et oxydés. L'ultrastructure des faces ou grains blanchis montrent des feuillets de kaolinite traduisant une transformation de la glauconite en kaolinite ; l'altération de la glauconite est donc le revers de sa formation. Sur les grains remaniés, s'observent parfois des dépôts d'évaporite. Leur composition chimique montre l'apparition de calcium et de sodium révélant ainsi le passage vers un milieu marin riche en sel dissous moins profond que le milieu existant avant le remaniement.

Ces résultats confirment que les glauconites constituent des marqueurs des variations chimiques des environnements de dépôt ainsi que de la durée des variations eustatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Amorosi A.** (1997) – Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony; a tool for provenance research. *Sedimentary Geol.*, 109, 1-2, 135-153.
- Amorosi A.** (2003) – Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks: Glaucony and verdine. Edition Springer, pp. 331-333
- Assalé F.Y.P.** (2013) – Caractérisation sédimentologique, palynologique, géochimique et paléoenvironnementale des formations connexes à la faille des lagunes (Est du bassin onshore de Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat univ. Univ. F.H.B, Côte d'Ivoire, 361 p.
- Assalé F.Y.P., Mondé S., Aka K., Koffi T., Kplohi H., Ablé J., Féa I., Ombléa H.L.** (2013) – Caractérisation lithostratigraphique des sondages Adia 5 et Adia 6 d'Adiako : mise en évidence des mouvements eustatiques et influence des glauconites sur les propriétés physiques des sables. *European Sci. J.*, 9, 17, 332-349.
- Berner R.A.** (1981) – A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sed. Petrol.*, 51, 359–365
- Burst J.F.** (1958) – "Glauconite" pellets; their mineral nature and applications to stratigraphic interpretations. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 42, 310-327.
- Frey M., Hunziker J.C., Roggwiler P., Schindler C.** (1973) – Progressive niedriggradige metamorphose glaukonitführender horisonte in den Helvetischen Alpen der Ostschweiz. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 39, 185-218.
- Gabriel R.P.A., Javier C., Valdomiro S.S., Sheila A.C.F., Pedro K.K., Pablo V.T.** (2014) – Transformation of Kaolinite into Smectite and Iron-illite in Brazilian Mangrove Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 655-672.
- Gbango J-M. K.** (2012) – Caractérisation stratigraphique des aquifères des formations de subsurface de la région des lagunes de côte d'ivoire : essai de modélisation des environnements de dépôts du tertiaire. Thèse de doctorat unique. F.H.B Cocody, 163 p.
- Hower J.** (1961) – Some factors concerning the nature and origin of glauconite. *Am. Mineral.*, 46, 313-334.
- Kouao A.** (2017) – Apport des diagraphies à la reconstitution électrofacio-séquentielle des dépôts créacés: paleoenvironnement et eustatisme du bassin ivoirien. Thèse de doctorat unique. F.H.B Cocody, 163 p.
- Mackenzie F.T., Holland H.D., Turekian K.K.** (2005) – Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks, Treatise on Geochemistry Volume 7. Elsevier-pergamon, Oxford, 425 p.
- Odin G.S., Létolle R.** (1980) – Glauconitization and phosphatization environments: a tentative comparison. In Y.K. Bendor (ed.), *Marine Phosphorites - Geochemistry, Occurrence, Genesis*. SEPM Sp. Pub., 29. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 227–237.
- Odin G.S., Matter A.** (1981) – De glauconiarum origine. *Sediment*, 28, 611-641.
- Odin G.S., Fullagar P.D.** (1988) – Geological significance of the Glaucony facies. In : G.S. Odin (ed.), *Green Marine Clay*. Elsevier, Amsterdam, 295-332.
- Ouattara I. B.** (2017) – Impacts de la crise biologique intermédiaire du Cénomaniens-Turonien dans le golfe de Guinée : cas du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire, à partir des études sédimentologique, géochimique, chimostratigraphique et palynostratigraphique. Thèse de doctorat unique. F.H.B Cocody, 219 p.
- Petroci** (2014) – Biostratigraphie des formations du puits P-1X du bassin sédimentaire offshore ivoirien ; Rapport interne de la Société des Opérations Pétrolières de Côte d'Ivoire, 26 p.
- Sombo B. C.** (2002) – Étude de l'évolution structurale et sismo-stratigraphique du bassin sédimentaire offshore de Côte d'Ivoire, marge passive entaillée d'un canyon. Thèse de Doctorat d'Etat Sc. De la Terre. Univ d'Abidjan (Côte d'Ivoire), 304 p.