

# Analyse géochimique par spectrométrie gamma et par fluorescence X (EXDRF) des dépôts mésozoïques des forages OYB-1 et NDK-2 (bassins de Doukkala et d'Essaouira, Maroc)

Saïd FAKHI<sup>1</sup>, Malika AADJOUR<sup>2</sup>, Bouaza FEDAN<sup>3</sup>, Yves ANDRES<sup>4</sup>, Jean Charles ABBE<sup>4</sup>, Mokili Marcel BANDOMBELE<sup>4</sup>, Almoundir MORABET<sup>5</sup> & Abdelkhalek EL MORABET<sup>5</sup>

1. Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Département de Physique, Laboratoire de Radiochimie, B.P. 7955 Sidi Othmane, Casablanca, Maroc. e-mail : fakhi@caramail.com
2. Université Hassan II-Mohammedia, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Département de Géologie, Laboratoire de Biostratigraphie, B.P. 7955 Sidi Othmane, Casablanca, Maroc. e-mail : aadjour@yahoo.fr
3. Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Département de Géologie, B.P. 703 Agdal, Rabat, Maroc. e-mail : fedan@israbat.ac.ma
4. Ecole des Mines, Laboratoire SUBATECH, UMR 6457, B.P. 20722, 44307 Nantes cedex 3, France
5. ONAREP, 34, Avenue Al Fadila, 10050 Rabat, Maroc. e-mail : onarep@acdim.net.ma

**Résumé.** Dans le cadre global de l'investigation des gisements d'hydrocarbures de la marge atlantique marocaine en général et des bassins de Doukkala et d'Essaouira en particulier, les dépôts triasico-jurassiques et crétacés des forages OYB-1 et NDK-2 ont fait l'objet d'une étude géochimique. La démarche utilisée est basée sur le comportement de certains radionucléides et éléments stables. L'identification et la mesure des radionucléides (<sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ...) ont été effectuées par spectrométrie Gamma. Quant aux éléments stables, ils sont analysés par fluorescence X. Cette contribution, une fois couplée avec les caractéristiques faciologiques des dépôts, a permis d'obtenir des résultats géochimiques intéressants et indispensables aux études géologiques, tels que le lien des phénomènes d'altération avec la porosité des dépôts, mis en évidence par la migration ou la rétention des éléments chimiques. Au cours de ce travail, une attention particulière a été portée sur le comportement de l'uranium, de ses descendants et éléments stables pour déceler l'existence de la matière organique, qui reflète un milieu réducteur qui concentre l'uranium à l'état (IV).

**Mots clés :** Maroc, bassin de Doukkala, bassin d'Essaouira, Mésozoïque, géochimie, isotopes.

**Gamma spectrometry and X-fluorescence (EXDRF) geochemical analysis of the Mesozoic deposits of wells OYB-1 and NDK-2 (Doukkala and Essaouira basins, Morocco).**

**Abstract.** Within the global framework of the investigation of the hydrocarbon layers of the Moroccan Atlantic margin in general and the Doukkala and Essaouira basins in particular, the Triassic-Jurassic and Cretaceous deposits of wells OYB-1 and NDK-2 were the subject of a geochemical study. The study is based on the behavior of some radionuclides and stable elements. Identification and measurement of the radionuclides (<sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th) were analysed by Gamma spectrometry. Stable elements were analysed by X-ray fluorescence. This contribution, once coupled to the faciological characteristics of the deposits, made it possible to obtain interesting geochemical results, essential to the geological and geochronologic investigations, such as the link of the phenomena of alteration with the porosities of the deposits, which are emphasized by the migration or the retention of the chemical elements. In this work, a particular attention concerned the behavior of uranium, of its daughters and stable elements in order to detect the existence of the organic matter, which reflects a reducing environment which concentrates uranium at state (IV).

**Key words:** Morocco, Doukkala basin, Essaouira basin, Mesozoic, geochemistry, isotopes.

## INTRODUCTION

La marge atlantique marocaine en général et les bassins d'Essaouira et de Doukkala en particulier sont bien connus par leurs potentialités en hydrocarbures (Michard 1976, Broughton & Trepanier 1991, Bouchta 1992 et Zarhloue 1994), reflétés par la découverte de plusieurs gisements de gaz et de pétrole depuis 1950 et 1961 dans le bassin d'Essaouira.

Bien que l'évolution de cette marge passive soit bien cernée dans ses grandes lignes, elle est entachée d'aléas en ce qui est du calage des événements majeurs l'ayant marquée. L'aspect géochimique n'a pas été assez étudié dans cette marge, d'où l'intérêt de cette contribution qui vise à caractériser géochimiquement les dépôts triasico-jurassiques et crétacés. Il s'agit d'étudier les propriétés physico-chimiques des éléments stables et radioactifs et les teneurs associées pour décrire, en fonction de la lithologie, les caractéristiques des dépôts analysés. Au cours de ce travail, l'exploitation des teneurs et activités spécifiques déterminées respectivement par fluorescence X et

spectrométrie gamma, repose sur la recherche des indications géochimiques caractéristiques des éléments identifiés et les corrélations associées.

## CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

La marge atlantique marocaine située entre El Jadida au nord et Agadir au sud, correspond au "Bassin du Sud-Ouest marocain" de Duffaud *et al.* (1966) et au "Bassin de l'Ouest marocain" de Jaffrezo *et al.* (1985) ou "Bassin d'El Jadida – Agadir" (Medina 1994). Les dépôts mésozoïques, dominés par les sédiments crétacés, sont connus à l'affleurement et en subsurface. Ils forment l'essentiel de la série de remplissage des sous-bassins de Doukkala, Abda et Essaouira.

Cette marge s'est différenciée et individualisée au cours des temps mésozoïques. Le Trias supérieur (ou Permien terminal-Lias basal) est marqué par la naissance et l'évolution de bassins subsidents suite à la réactivation d'accidents tardi-hercyniens en failles normales. Ces bassins sont comblés essentiellement par des évaporites et

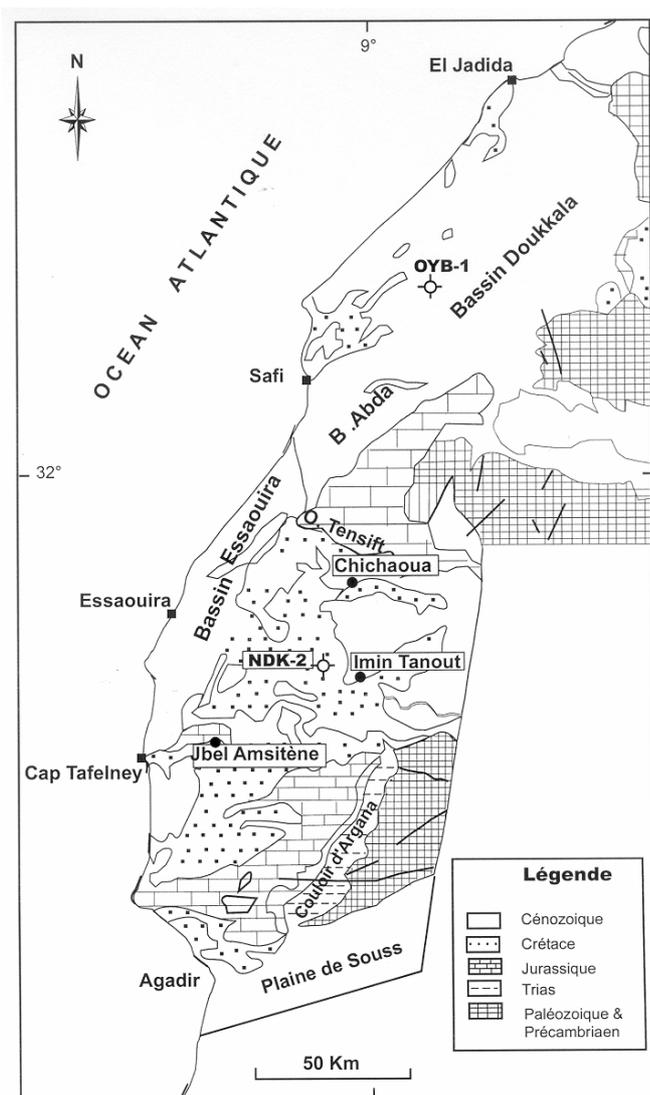


Figure 1. Carte géologique simplifiée des bassins d'Essaouira, d'Abda et de Doukkala, avec localisation des forages OYB-1 et NDK-2.

des argilites silteuses où s'intercale(nt) un ou deux complexes basaltiques. Le développement de cette marge continentale passive s'est effectué durant le Jurassique et le Crétacé suite à une subsidence essentiellement thermique (Labbassi 1998). La structure d'ensemble est dominée par une organisation en zones hautes à sédimentation réduite et en dépressions très subsidentes, qui a perduré durant le Jurassique et le Crétacé (Duffaud *et al.* 1966).

Cette évolution est marquée par la succession d'épisodes transgressifs et régressifs généralisés (Rey *et al.* 1989, Taj-Eddine *et al.* 1989, Taj-Eddine 1991).

Au niveau des forages, ces remontées eustatiques majeures ont favorisé l'instauration de régimes néritiques carbonatés :

- plate-forme carbonatée proximale évaporitique au ?Sinemurien–Lotharingien puis distale au Lotharingien–Domérien ;
- plate-forme carbonatée proximale et évaporitique au Toarcien–Aalenien (terme 4) ;

- plate-forme ouverte au Bathonien–Kimméridgien (terme 7) avec développement des faciès bioconstruits (récifs) au « Rauracien–Sequanien » ;

- plate-forme carbonatée ouverte au Valanginien (terme 11).

Les chutes eustatiques sont caractérisées par une sédimentation détritique et l'apparition de milieux restreints propices à la précipitation de sel gemme et d'anhydrite. La saline du Jurassique supérieur–Crétacé basal (Kimméridgien–Berriasien) est régie par l'apparition d'une barrière récifale à coraux dès le Callovien–Oxfordien (Adams *et al.* 1980).

Cette marge a fait l'objet de plusieurs travaux de terrain (Duffaud *et al.* 1966) ayant servi de base pour l'implantation d'un grand nombre de forages offshore et onshore. Elle est caractérisée par la découverte de gisements de gaz et de pétrole respectivement en 1950 (Kechoula, Toukkimt, N'Dark et Jeer) et depuis 1961 (Sidi Rhalem), par la Société Chérifienne du Pétrole (SCP).

Les forages OYB-1 et NDK-2 ont été choisis comme support de cette approche géochimique. Ce choix est fondé sur leur position structurale, ainsi que leurs caractéristiques stratigraphiques et sédimentologiques, particulièrement intéressantes dans la recherche des gisements d'hydrocarbures.

## DONNEES STRATIGRAPHIQUES

### Forage NDK-2

Le forage NDK-2 est situé dans la région de N'Dark ( $x=42,18$  ;  $y=101,52$ ), localisée entre Essaouira et Chichaoua (Fig. 1). Les dépôts triasico-jurassiques et du Crétacé inférieur, recoupés entre les côtes  $-907$  m et  $-3500$  m, sont coiffés par des argilites silteuses rougeâtres, attribuées à l'Hauterivien. Ils sont agencés en onze termes (Fig. 2), dont la nomenclature a changé selon les auteurs (Medina 1994). Le découpage chronostratigraphique adopté est celui admis dans la littérature géologique, relative aux bassins de Doukkala et d'Essaouira (Duffaud *et al.* 1966, Bouaouda, 1987, Medina 1994, Labbassi 1998).

Terme 1 – Sel gemme blanc et rose (630 m) avec rares passées de grès fins rougeâtres et intercalations d'argilites rouges et gris-vert que surmontent des argilites salifères silteuses (304 m) avec passées de sel gemme blanc et rose, d'argilites gris-vert et de grès fins rouges.

Terme 2 – Complexe basaltique (130 m) organisé en plusieurs coulées de basalte gris-vert et gris-olive que séparent des niveaux interstratifiés d'argilites consolidées rouge-brun .

Terme 3 – Sel gemme massif (98 m) avec passée médiane de sel potassique (sylvinite et carnallite) et niveaux d'argilites rouges et vertes; sel gemme massif (178 m) où s'intercalent des argilites rouges et vertes, avec un niveau conglomératique au sommet ; argilites silteuses rouges (142 m) avec passées de grès fins à moyens et traces d'anhydrite et sel gemme ; au sommet se développent un banc de dolomie, un niveau d'anhydrite et des grès grossiers.

Les termes 1 et 2, ainsi que la base du terme 3 sont datés du Trias supérieur. Le sommet du terme 3 est attribué au Lias inférieur–moyen et au Toarcien ;

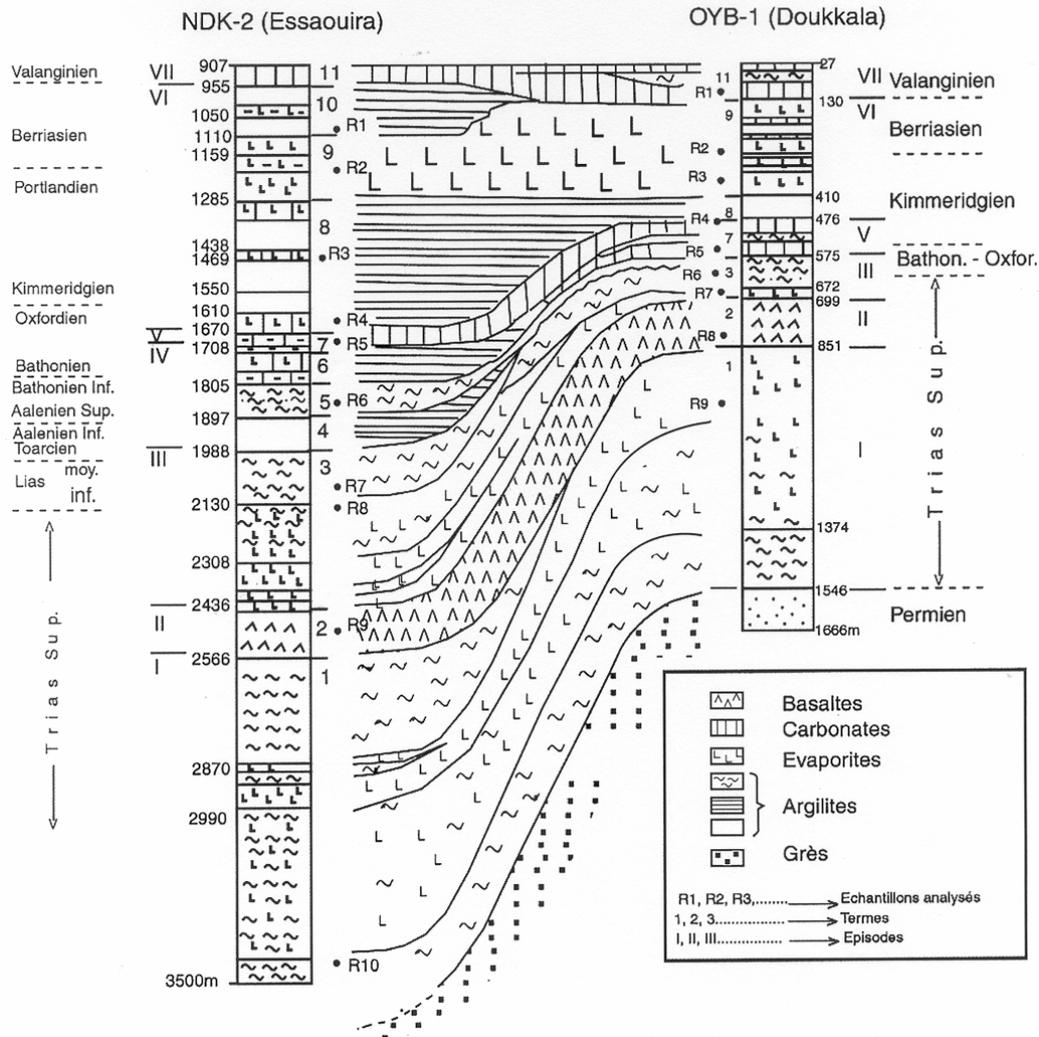


Figure 2. Colonnes lithostratigraphiques et localisation des échantillons des forages OYB-1 et NDK-2.

Terme 4 – Alternance d'argilites silteuses rouges ou vertes, de dolomies grenues grises et d'anhydrite blanchâtre (91 m), où se développent de rares niveaux de grès moyens à grossiers. Ce terme est rapporté au Toarcien et à l'Aalénien.

Terme 5 – Argilites silteuses rougeâtres (92 m) avec passées de grès fins à moyens et rares niveaux de dolomies argileuses; dans la partie médiane se développe un microconglomérat polygénique à ciment argileux brun rouge. Ce terme est daté de l'Aalénien supérieur–Bathonien inférieur.

Terme 6 – Alternance de carbonates (dolomies, calcaires dolomitiques et dolomies argileuses), d'anhydrite et d'argilites silteuses rouges (97 m) avec rares passées de grès brun rougeâtre; cette alternance est plus argileuse à la base et plus carbonatée au sommet.

Terme 7 – Dolomies grenues à lentilles d'anhydrite, grès dolomitiques au sommet et semelle de marnes bioclastiques (38 m).

Terme 8 – Alternance d'anhydrite blanchâtre et de carbonates gris à pellets (60 m) avec rares niveaux d'argilites rougeâtres; alternance de carbonates gris à gris beige à pellets, d'anhydrite massive blanchâtre et d'argilites silteuses indurées rouges et vertes (141 m); alternance de carbonates gris à pellets et d'anhydrite blanchâtre (31 m), alternance d'argilites brun rouge et gris - vert, de carbonates gris à pellets et d'anhydrite massive blanchâtre (153

m); cette alternance est plus argileuse à la base et plus carbonatée au sommet.

Les termes 6 et 7 et la base du terme 8 sont attribués au Bathonien–Oxfordien.

Terme 9 – Anhydrite massive blanchâtre (175 m) avec passées d'argilites brun-rouge. Dans la partie médiane se développent des argilites et au sommet des dolomies grises. Le terme 8 non basal et la base du terme 9 sont rapportés au Kimméridgien–Portlandien.

Terme 10 – Alternance d'anhydrite massive blanchâtre et de carbonates gris à oolithes et pellets (155 m) où se développent des passées d'argilites brun rouge et gris vert, la partie médiane est plus argileuse.

Terme 11 – Calcaires dolomitiques et dolomies bioclastiques gris-beige (48 m), mouchetés d'anhydrite à la base.

Le sommet du terme 9, le terme 10 et la base du terme 11 sont datés du Berriasien. Le terme 11 non basal est attribué au Valanginien.

### Forage OYB-1

Le forage OYB-1 est localisé dans la région d'oued Yacoub (x=183,55; y=230,82), située à l'est d'El Oualidia (Fig. 1). Les dépôts triasico-jurassiques et du Crétacé inférieur, recoupés entre les côtes -27 m et -1546 m sont encadrés

par des argilites silteuses rougeâtres avec des intercalations microconglomératiques rapportées au Permien, et des calcaires graveleux attribués au Valanginien.

Ils sont organisés en sept termes, avec lacune de termes 4 à 6 (Fig. 2) :

Terme 1 – Argilites brun rouge (172 m) avec passées de grès argileux que surmonte un sel massif (523 m) à intercalations d'argilites brun chocolat.

Terme 2 – Complexe basaltique (152 m).

Terme 3 – Sel massif (27 m) et argilites silteuses consolidées, rouges ou vertes (97 m) avec des passées de grès fins à ciment argileux.

Les termes 1, 2 et le terme 3 non sommital sont datés du Trias supérieur.

Terme 7 – Calcaires et calcaires argileux (99 m) à plages d'anhydrite et une passée médiane d'argilites brun rouge, les calcaires contiennent oolithes, gravelles, foraminifères, bivalves et gastéropodes.

Le sommet du terme 3 et la base du terme 7 sont attribués au Bathonien–Oxfordien.

Terme 8 – Alternance de dolomies et d'anhydrite (66 m) ; à la base les dolomies sont argileuses alors qu'au sommet elles présentent des fantômes d'oolithes et de rares bioclastes au sommet.

Terme 9 – Anhydrite (280 m) avec intercalations de dolomies à pellets et crustacés ; au sommet les dolomies sont argileuses.

Le terme 7 non basal, le terme 8 et la base du terme 9 sont rapportés au Kimméridgien.

Terme 11 – Dolomies (103 m) bioclastiques (échinodermes, bivalves) au sommet, azoïques et laminitiques à la base ; elles renferment une passée médiane d'argilites microconglomératiques grises. Ce terme est attribué au Valanginien.

### Comparaison des forages OYB-1 et NDK-2

La comparaison des deux forages (Fig. 2) montre que le bassin d'Essaouira, où le Lias supérieur et le Dogger sont bien représentés, est plus subsident (2593 m) que le bassin de Doukkala (1519 m). L'évolution spatio-temporelle de ces deux bassins, déduite de l'analyse de ces deux sondages, peut être résumée en sept épisodes :

**I** – Précipitation de sel gemme et sédimentation d'argilites salifères au Trias supérieur (terme 1) ;

**II** – Mise en place d'un complexe basaltique durant le Trias supérieur, voire le Lias basal (terme 2) ;

**III** – Précipitation de sel gemme massif et dépôt d'argilites salifères pendant le Trias supérieur et le Lias inférieur – moyen (terme 3) ;

**IV** – Précipitation d'anhydrite synchrone de la sédimentation des carbonates et d'argilites du Toarcien au Bathonien (termes 4 à 6) ;

**V** – Instauration d'un régime néritique carbonaté que caractérise la précipitation d'anhydrite du Bathonien au Kimméridgien (terme 7) ;

**VI** – épisode de confinement généralisé avec précipitation d'anhydrite et développement des carbonates et d'argilites du Kimméridgien au Berriasien (termes 8 à 10) ;

**VII** - Retour aux conditions néritiques carbonatées durant le Valanginien (terme 11).

### ETUDE GEOCHIMIQUE

L'étude géochimique des dépôts des deux forages, repose sur le comportement du potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ) et des radionucléides des deux séries de décroissance radioactives naturelles : séries de l'uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ) et du thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ ), ainsi que des éléments stables. Les radionucléides ont été identifiés et mesurés par spectrométrie gamma, les éléments stables, par fluorescence X (EXDRF).

#### Techniques utilisées

##### Spectrométrie gamma

L'identification et la détermination de  $^{40}\text{K}$  et des radionucléides des deux séries de décroissance radioactives naturelles  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  ont été menées par spectrométrie gamma. La mesure est effectuée à l'aide d'un détecteur Germanium Hyper Pur (GeHP, CAMBERA), d'efficacité 40% et de résolution 1.8 keV pour  $^{60}\text{Co}$ . Le détecteur est protégé du bruit de fond par blindage de plomb. Les spectres gamma délivrés par le détecteur, sont analysés par le programme GENIE-PC offert par l'AIEA.

Après étalonnage du système de détection en énergie et en efficacité, les échantillons des deux forages sont analysés. Les sédiments n'ont subi aucun traitement spécifique préalable, afin de rester dans les conditions naturelles de ces dépôts.

##### Fluorescence X

L'appareillage utilisé est de type «energy dispersive X rays fluorescence», de marque ED 2000. Le tube de rayons X est composé d'une anticathode d'argent et le détecteur d'un semi-conducteur au Si refroidi par de l'azote liquide. Ce type d'instrument permet la caractérisation et la quantification des éléments compris entre le sodium et l'uranium. Pour augmenter l'efficacité de la réponse, notamment pour les éléments légers, l'analyse a été réalisée sous vide d'air (absorption des rayons X de faible énergie par l'air). Pour une meilleure réponse, quatre conditions de filtre, de courant de tube et d'échelle en énergies sont utilisées (Tabl. I).

Tableau I. Conditions de filtre, de courant de tube et d'échelle en énergies utilisées en fluorescence X.

Eléments	Voltage (kV)	Résolution	Limite supérieure d'énergie (keV)	Echelle Energie (keV)	Filtre
Mg, Al, Si, P, S, Cl et K	5	160	12	0 à 10	aucun
Ca, Ti, Cr, Mn et Fe	10	160	12	0 à 10	aucun
Co, Ni, Cu, Zn et Mo	35	175	37	0 à 40	Filtre fin d'argent
As, Br, Rb, Sr, Zr, Cd, Sn, Ba, Pb, Th et U	50	175	52	0 à 40	filtre épais de cuivre

Tableau II. Echantillons analysés dans le forage NDK-2.

Ech.	Ages	Prof. (m)	Lithol.
R1	Berriasien	1100	Argilites gris-vert à anhydrite
R2	Berriasien	1170	Calcaire dolomitique, bioclastique gris-beige à anhydrite
R3	Malm	1416	Argilites grises à anhydrite
R4	Malm	1608	Argilites silteuses rouges à anhydrite
R5	Malm	1700	Dolomie gréseuse gris-beige
R6	Lias- Dogger	1893.8	Grès argileux brun-rouge
R7	Lias- Dogger	2083.5	Argilites silteuses brun-rouge
R8	Trias sup.	2141	sel blanc mélangé avec des argilites
R9	Trias sup.	2541	Basalte gris vert
R10	Trias sup.	3463	Argilites rouge violacé

Tous les éléments ont été caractérisés et quantifiés à partir des raies K, à l'exception de Pb, de Th et de U pour lesquels les raies L ont été utilisées.

La détermination de la concentration des éléments des échantillons des forages OYB-1 et NDK-2 est réalisée par comparaison avec un échantillon standard de référence (AIEA/soil-7).

### Echantillonnage

Les échantillons prélevés à différentes profondeurs des deux sondages, sont représentatifs des différentes lithologies. Ils se répartissent comme suit : dix échantillons (R1 à R10) dans NDK-2 (Fig. 2 et Tabl. II) et neuf échantillons (R1 à R9) dans OYB-1 (Fig. 2 et Tabl. III).

### Résultats et interprétation

#### Spectrométrie Gamma

Les résultats de mesure par spectrométrie gamma des 19 échantillons des deux forages sont donnés sous forme de courbes. Ces graphiques sont représentatifs de la variation de l'activité spécifique de chaque radionucléide, identifié en fonction de la profondeur de l'échantillon. Les valeurs de l'activité spécifique en mBq/g sont déterminées à  $1\sigma$  près.

L'allure générale des courbes représentatives (Figs. 3 et 4), montre que les activités spécifiques en  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  dans les dépôts des deux sondages sont indépendantes de la profondeur. La disposition de ces variations en dents de scie laisse prévoir que la distribution est plutôt fonction de la lithologie. C'est la raison pour laquelle nous avons jugé utile de dresser les variations possibles des rapports des activités des deux séries de décroissances radioactives naturelles de l'uranium-238 et thorium-232.

Les rapports isotopiques sont très utiles dans l'exploitation des valeurs expérimentales des activités spécifiques.

Les rapports isotopiques d'une même série de décroissance radioactive naturelle renseigne sur l'état d'équilibre séculaire entre chaque précurseur et ses produits de décroissance. Dans de tels cas, l'activité est constante le long de la série et par conséquent, le dépôt est exempt de toute altération de ses structures et de tout fractionnement

Tableau III. Echantillons analysés dans le forage OYB-1.

Ech.	Ages	Prof. (m)	Lithol.Nature
R1	Berriasien	100	Dolomie argileuse gris-vert
R2	Malm	280	Argilites grises à anhydrite
R3	Malm	350	Argilites grises
R4	Malm	480	Calcaire argileux gris à anhydrite
R5	Malm	552	Calcaire argileux gris
R6	Trias sup.	628	Argilites silteuses indurées rougeâtres
R7	Trias sup.	684	Sel blanc massif
R8	Trias sup.	812	Basalte verdâtre
R9	Trias sup.	1000	Sel blanc et argilites brun-chocolat

élémentaire.

Les rapports isotopiques des radionucléides de deux séries distinctes rendent compte de l'origine du dépôt analysé.

#### 1. Rapport $^{232}\text{Th} / ^{238}\text{U}$

Dans le forage OYB-1, les échantillons analysés d'âge triasico-jurassique et crétacé, sont à dominante marine puisque les valeurs du rapport Th/U sont en général inférieures à 1 (Fig. 5). Les plus faibles valeurs sont observées dans les carbonates où le rapport augmente avec la profondeur, selon la séquence R1-R2-R3-R4-R5, suivie par R7 et R8. Ces résultats concordent avec les travaux antérieurs. En effet, pour Molinari & Snodgrass (1990), les faibles valeurs du rapport Th/U sont observées dans les roches sédimentaires d'origine chimique (carbonates et évaporites). Les argilites de R6 sont d'origine terrigène du fait que la valeur du rapport Th/U est voisine de 1, alors que dans R3 et R7, les valeurs du rapport Th/U sont supérieures à 1, ce qui peut être expliqué par un fractionnement ménagé de l'uranium par dolomitisation (Ivanovich & Harmon 1982), ou par lixiviation des eaux d'inclusion, principalement marines. Dans ces conditions, le thorium, que caractérise un produit de solubilité très faible, reste piégé dans les dépôts.

La valeur du rapport Th/U des basaltes de l'échantillon R8 est légèrement inférieure à 1. Or, Selon Tatsumoto *et al.* (1965), les basaltes primaires sont caractérisés par un rapport dont les valeurs sont comprises entre 1 et 2, ce qui suggère un certain enrichissement en thorium des basaltes au détriment de l'uranium durant l'évolution du minéral. La valeur inférieure à 1 notée dans R8 peut être attribué, à l'enrichissement en U des basaltes, qui est favorisé par le phénomène d'hydrothermalisme. La friabilité de cet échantillon conforte cette hypothèse.

Au forage NDK-2, les minéraux argileux de R4 et R7, dont les valeurs du rapport Th/U sont voisines de 1 (Fig. 5), sont d'origine terrigène.

La plus forte valeur est observée dans les grès argileux de R6, ce qui confirme la concentration du thorium dans les grès par des processus mécaniques (Ivanovich & Harmon 1982).

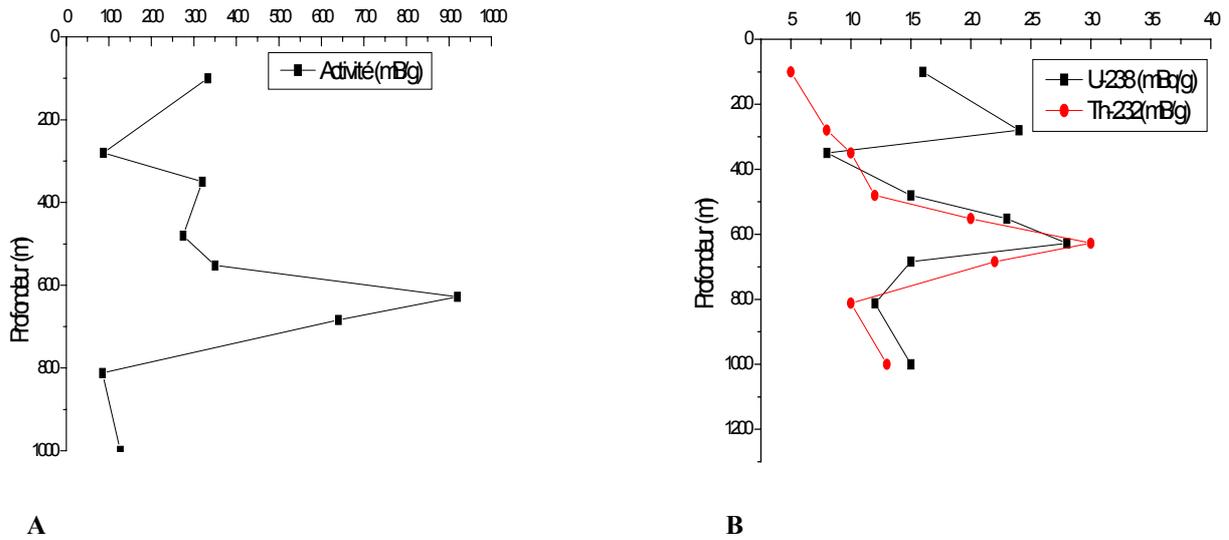


Figure 3. Variation des activités spécifiques en K40 (A), en U 238 et en Th 232 (B) en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1

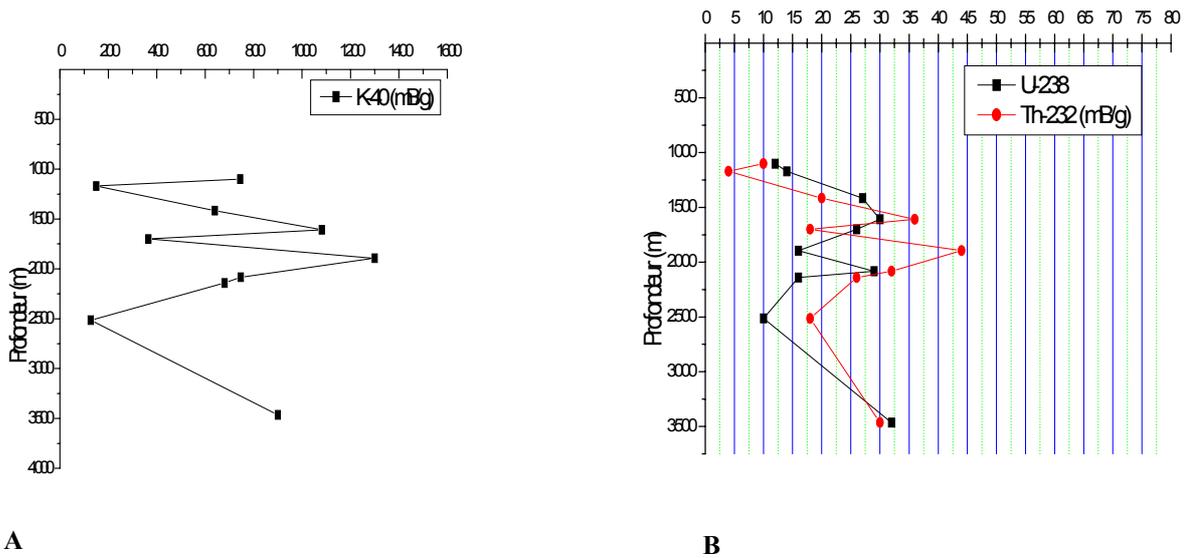


Figure 4. Variation des activités spécifiques en K40 (A), en U 238 et en Th 232 (B) en fonction de la profondeur dans le forage NDK-2.

Les échantillons R1, R2 et R3, dont la valeur du rapport  $^{232}\text{Th} / ^{238}\text{U}$  est inférieure à 0,3, se sont déposés dans un milieu marin réducteur. Ceci est en accord avec les travaux de Ivanovich & Harmon (1982), qui démontrent que les calcaires peuvent contenir jusqu'à 2 ppm d'uranium et du thorium en faible proportion. Selon ces mêmes auteurs, la corrélation de la concentration en thorium avec le contenu détritique indique que le thorium est largement associé aux argilites et à la fraction carbonatée des sédiments.

Dans l'échantillon R5, le rapport  $^{232}\text{Th} / ^{238}\text{U}$  est inférieur à 1, ce qui confirme que le milieu de dépôt de R5 est réducteur, du fait que l'uranium est enrichi au détriment du thorium. Shawe (1976) a proposé un modèle selon lequel l'uranium, éjecté des argilites par compaction, précipite en fin de parcours dans les dolomies gréseuses et les grès de

milieux réducteurs riches en matière organique. Par ailleurs, selon le modèle des activités hydrothermales de Bloch (1980), la variation non linéaire de la teneur en U (ppm) en fonction de celle de Fe, Mn, Al et Si (Fig. 6) exclut toute association de l'uranium avec les formes hydro- et ou hydroxy- de Fer et de Mn. L'uranium IV est piégé principalement par les sédiments réducteurs où il est adsorbé ou complexé par la matière organique (Veeh 1967, Kolodny & Kaplan 1973, Mo *et al.* 1973).

## 2. Rapports isotopiques $^{226}\text{Ra} / ^{238}\text{U}$ et $^{214}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$

Dans le forage OYB-1, les rapports  $^{226}\text{Ra} / ^{238}\text{U}$ , supérieurs à 1 (Fig. 7), indiquent que l'équilibre est dévié en faveur de  $^{226}\text{Ra}$  au détriment de son précurseur  $^{238}\text{U}$ . Ce déséquilibre révèle que le système est ouvert et que les dépôts sont plus

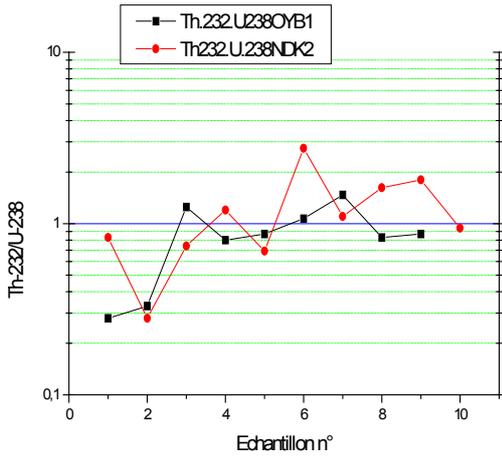


Figure 5. Variation du rapport Th 232/U 238 dans les forages OYB-1 et NDK-2.

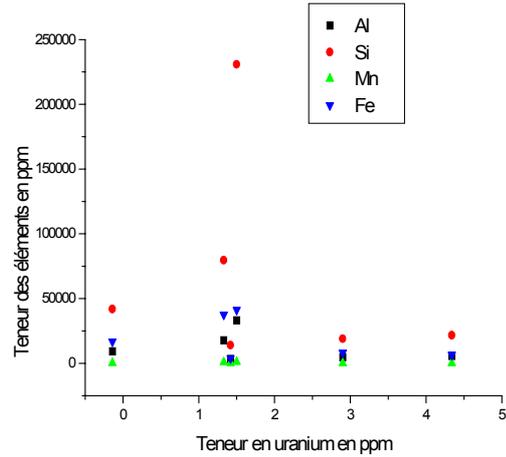


Figure 6. Variation des teneurs en Al, Si, Mn et Fe en fonction de celle de U.

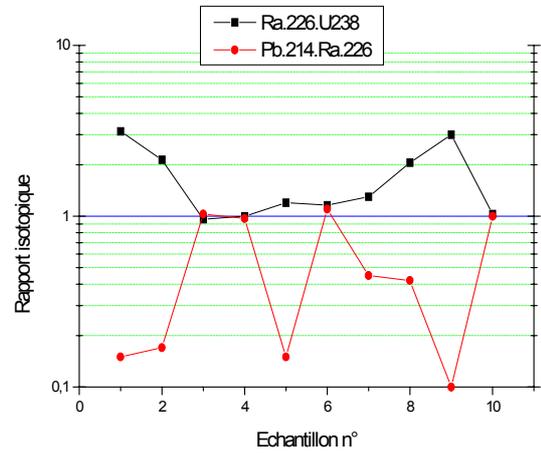
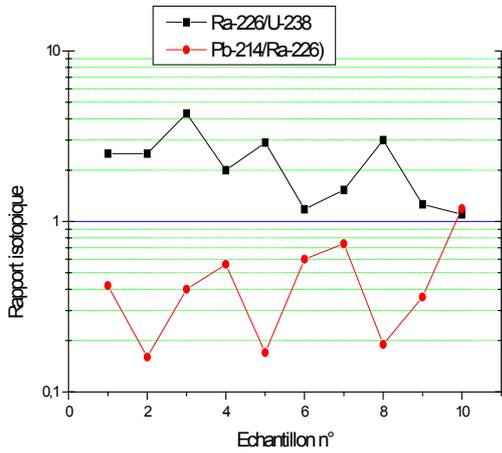


Figure 7. Variation des rapports Ra 226/U 238 et Pb 214/U 238 dans les forages OYB-1 (à gauche) et NDK-2 (à droite).

ou moins altérés, c'est le cas des échantillons R1 à R5 et R8. L'enrichissement en  $^{226}\text{Ra}$  par rapport à  $^{238}\text{U}$  est dû à la lixiviation chimique continue des dépôts (Ivanovich & Harmon 1982). L'uranium contenu dans les dépôts, une fois libéré par l'action de l'eau, migre sous forme de complexes stables, tels que les carbonates. En revanche, ses produits de décroissance ( $^{230}\text{Th}$  et  $^{226}\text{Ra}$ ), hydrolysés et fortement adsorbés, forment des composés insolubles. Kurbach *et al.* (1977) considèrent que le rapport d'équilibre  $^{226}\text{Ra} / ^{238}\text{U}$  n'est déplacé en faveur du  $^{226}\text{Ra}$  que dans l'interface eau-pétrole. L'uranium extrait de ces eaux est intensivement lixivié des roches dans les conditions de génération du pétrole. Les échantillons R6, R7 et R9 sont peu altérés, ce qui suppose qu'une grande partie de l'uranium insoluble est piégée dans la phase résistante des argilites (Ku 1976). En général, les rapports  $^{214}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$  sont inférieurs à 1 et augmentent avec la profondeur, à l'exception des échantillons R2, R5 et R8 où des valeurs très faibles sont observées. Le déséquilibre dans la sub-série de décroissance de  $^{226}\text{Ra}$  en faveur de cet élément est attribuée aux pertes du

$^{222}\text{Rn}$ , gaz radioactif, situé entre  $^{226}\text{Ra}$  ( $T= 1600$  ans) et  $^{214}\text{Pb}$ . L'émanation de  $^{222}\text{Rn}$  est favorisée par la perméabilité des dépôts. Il semble que les échantillons carbonatés sont plus poreux et que cette porosité diminue avec la profondeur. On note également que le taux de dégagement de  $^{222}\text{Rn}$  et par conséquent la perméabilité des sédiments sont étroitement liés au degré d'altération des dépôts, ce qui se traduit par une lixiviation de U (VI). Ceci est en bon accord avec les résultats expérimentaux de Dyck *et al.* (1987) : la lixiviation permet au  $^{226}\text{Ra}$  de passer aux surfaces inter-granulaires, facilitant par la même occasion le dégagement du  $^{222}\text{Rn}$  l'air libre.

L'échantillon R9, dont la teneur en  $^{232}\text{Th}$  est plus élevée, possède un taux d'émanation plus élevé que celui de R7. Par conséquent, ces deux échantillons caractériseraient deux environnements différents.

Dans le forage NDK-2, le rapport  $^{226}\text{Ra} / ^{238}\text{U}$  a une valeur qui est voisine de 1 pour les échantillons R3, R4 et R6 (Fig. 7). L'état d'équilibre séculaire entre  $^{238}\text{U}$  et  $^{226}\text{Ra}$  traduit la

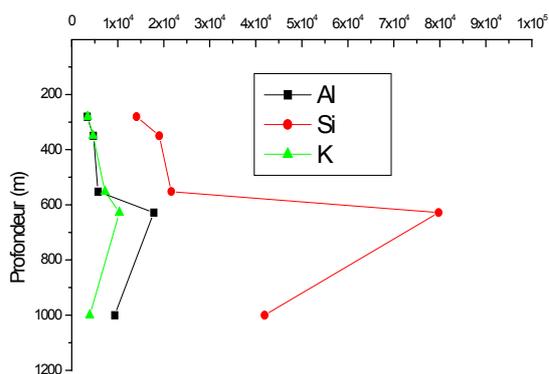


Figure 8. Variation des teneurs en Al, Si et K en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1.

fermeture du système et l'absence d'altération pendant au moins  $10^7$  années, compte-tenu de la période de  $^{238}\text{U}$  ( $T = 4,7.10^9$  ans). Les échantillons R5 et R7 sont très faiblement fractionnés en  $^{238}\text{U}$ . Dans les autres échantillons (R1, R2, R8 et R9), le déplacement de l'équilibre en faveur de  $^{226}\text{Ra}$  ne peut être expliqué que par la lixiviation de l'uranium (VI).

Le rapport  $^{214}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$  est pratiquement égal à l'unité dans les échantillons R3, R4 et R6 (Fig. 7). Cet équilibre séculaire est à mettre en relation avec la compaction de ces dépôts. En revanche, dans les échantillons R1 et R8, la valeur de ce rapport est inférieure à 1. Ce déséquilibre en faveur de  $^{226}\text{Ra}$  est causé par l'échappement de  $^{222}\text{Rn}$ . Notons que la plus faible valeur du rapport  $^{214}\text{Pb} / ^{226}\text{Ra}$ , liée à une émanation excessive de  $^{222}\text{Rn}$ , est notée dans R5.

## Fluorescence X

### 1 - Forage OYB-1

#### Eléments majeurs

Les résultats de l'analyse par fluorescence X sont exprimés sous forme de courbes qui sont représentatives de la variation de la teneur (ppm) des éléments chimiques en fonction de la profondeur.

Les variations des teneurs en Al, Si, K, Ti et Fe sont représentées sur les figures 8 et 9 : les teneurs des échantillons carbonatés sont plus faibles que celle des échantillons argileux ; dans l'échantillon de sel blanc (R9), où les teneurs sont minimales, les éléments majeurs sont corrélés positivement deux à deux (Fig. 10); au niveau de l'échantillon R6, la valeur du rapport Mg/Ca est de 0,3 (Fig. 11); dans les échantillons carbonatés, les valeurs du rapport Mg/Ca sont dix fois inférieures à celles des échantillons argileux; le caractère magnésien du rapport Mg/Al diminue avec la profondeur dans les échantillons carbonatés et anhydritiques (Fig. 11); l'échantillon formé de sel montre un caractère magnésien bien prononcé.

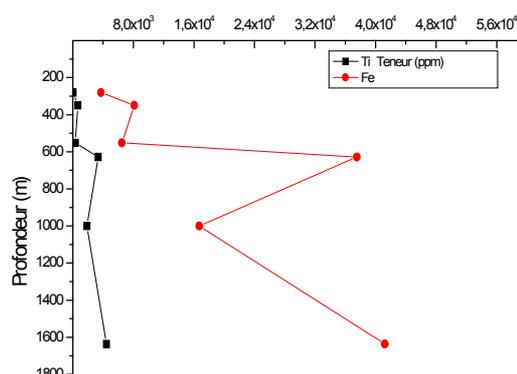


Figure 9. Variation des teneurs en Ti et Fe en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1.

#### Eléments traces

Le strontium présente deux comportements distincts (Fig. 12) : dans les échantillons, sa teneur augmente en général avec la profondeur. Selon les travaux de Jarousse *et al.* (1981), le strontium dont les teneurs sont comprises entre 1000 et 5000 ppm est un indicateur de dépôts sulfatés ; dans les échantillons argileux, la teneur en strontium diminue avec la profondeur :  $R2 > R3 > R6$ .

Le brome se comporte comme suit (Fig. 13) : sa teneur augmente avec la profondeur ; dans les échantillons argileux, les valeurs sont largement supérieures à celles des échantillons carbonatés. Notons que dans R6, la teneur du brome est de 66 ppm, ce qui reflète des conditions de paléosalinité élevées. La très faible valeur (1,3 ppm) contenue dans R2 est de l'ordre de grandeur de son abondance dans la croûte terrestre (Allègre & Michard 1973) ; la teneur de R9 est de 80 ppm, il a subi de fortes évaporations sous des conditions de paléosalinité élevées (Jarousse *et al.* 1981).

Le baryum varie en fonction de la lithologie (Fig 14) : pour les échantillons carbonatés, son comportement est similaire à celui du Sr et diffère de celui du Ca ; les échantillons d'argilites sont relativement plus riches en Ba. Le comportement de Ba diffère de ceux de Sr et de Ca, mais il est en général similaire à celui des éléments majeurs (Si, Al, Fe ...); la teneur de R9 en Ba est de 110 ppm.

### 2- Forage NDK-2

L'analyse des courbes représentatives de la variation des teneurs en éléments des différents échantillons montre que : les éléments chimiques Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, Ti, Cr, Zr, As et Th présentent tous une valeur minimale dans R8 (Fig. 15) ; les éléments Ba, Mn, Sr, Pb et Br sont caractérisés par la valeur la plus forte qui est enregistrée dans R8 (Fig. 15).

La normalisation par rapport à l'abondance de ces éléments dans la croûte terrestre (Allègre & Michard 1973) montre que leurs teneurs sont en général inférieures à leurs abondances dans cette croûte.

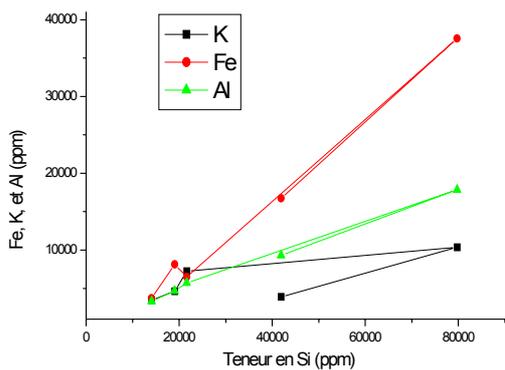


Figure 10. Variation des teneurs en Fe, K, et Al en fonction de celle de Si dans le forage OYB-1

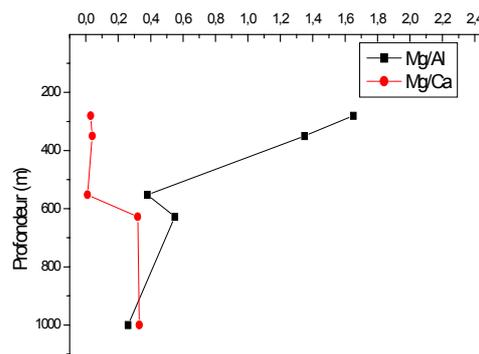


Figure 11. Variation des rapports Mg/Al et Mg/Ca en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1.

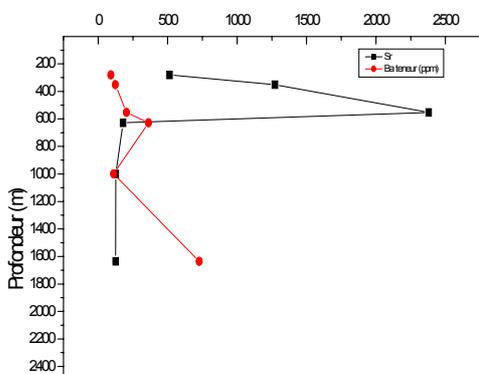


Figure 12. Variation des teneurs en Sr et Ba en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1.

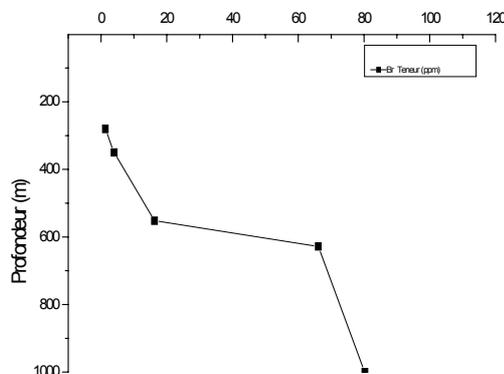


Figure 13. Variation des teneurs en Br en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1.

Le rapport Mg/Ca (Tabl. IV) montre que le caractère magnésien de R10 est plus faible que ceux de R7 et R8.

Les valeurs respectives du rapport Th/U de R7 et R10 sont 2,35 et 2,95 (Tabl. IV). Ces deux échantillons sont donc d'origine terrigène, comme le confirme leurs teneurs en Th qui sont identiques. Quant à R8, dont le rapport Th/U est faible, il est d'origine marine ; il est précipité dans un milieu réducteur où se concentre l'uranium sous forme de U (IV).

Tabl. IV. Rapport Mg/Ca, Mg/Al et Th/U dans le forage NDK-2.

Ech.	Prof. (m)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U	Mg/Al	Mg/Ca
R7	2083.5	7.60	3.23	2.35	0.66	0,56
R8	2141	3.85	6.46	0.60	0.73	0,54
R9	3463	7.98	2.70	2.95	0.31	0,20

## CONCLUSIONS

L'étude préliminaire a été effectuée en appliquant la spectrométrie gamma et la fluorescence X (EXDRF) à l'analyse des échantillons des forages OYB-1 et NDK-2, implantés respectivement dans les bassins de Doukkala et

d'Essaouira. L'adjonction de ces résultats aux données lithologiques a permis d'établir une approche géochimique des différents termes de la série de remplissage de ces deux bassins. Les activités spécifiques des radionucléides identifiés et les teneurs en éléments stables sont indépendantes de la profondeur. Ils semblent plutôt liés à la nature des dépôts, à celle de l'élément chimique et aux processus d'assimilation appropriés.

Dans les deux forages, la distribution des radionucléides et éléments stables révèle en général, que ces éléments sont plutôt concentrés dans les argilites.

Les dépôts du forage OYB-1 attestent essentiellement de milieux marins, et la majorité des échantillons sont plus ou moins altérés. La porosité diminue, en général, avec la profondeur et augmente avec le degré d'altération ; les échantillons salifères matérialisent un milieu ayant subi une forte évaporation dans des conditions de paléosalinité très intenses, c'est le cas des argilites de l'échantillon R6 qui reflètent une évaporation intense et une paléosalinité élevée ; ces résultats peuvent être exploités dans la quantification et la reconnaissance des cycles climatiques.

L'exploitation des résultats d'analyse du forage NDK-2 a permis de distinguer l'existence des échantillons d'origine

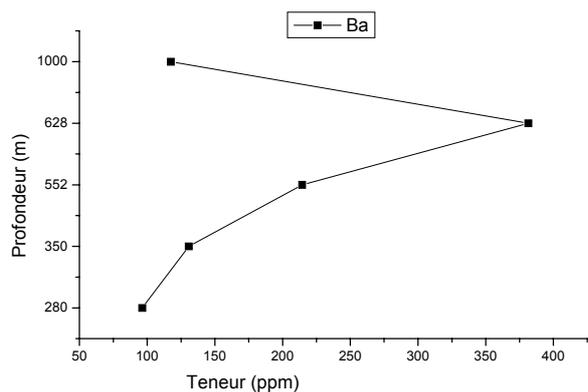


Figure 14. Variation des teneurs en Ba en fonction de la profondeur dans le forage OYB-1

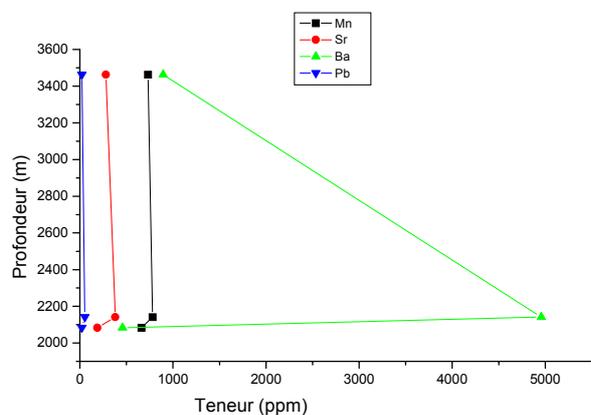
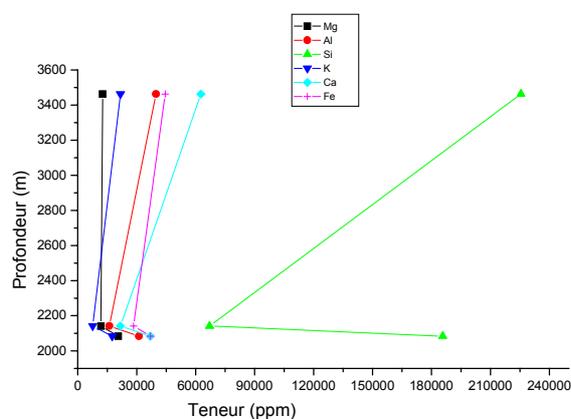


Figure 15. Variation des teneurs en éléments majeurs (haut) et en éléments traces (bas) dans le forage NDK-2.

terrigène, principalement des argilites, des dépôts sédimentaires altérés et poreux, en l'occurrence, les basaltes et les sels. Les échantillons à dominance d'argilites sont à structure compacte et non altérées. Le dépôt constitué de calcaire avec un caractère anhydritique qui est très peu altéré présente une structure très poreuse.

Dans ce travail, nous avons montré que les interfaces poreuses sont en général des lieux préférentiels d'altération. Ce phénomène est mis en évidence par le fractionnement de

l'uranium à partir des sites accessibles aux solutions de percolation. Dans de tels cas, l'exploitation des rapports Pb/U pour une éventuelle datation est très difficile.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence que l'uranium est fixé, essentiellement, par la matière organique des échantillons, peu ou pas altérés. Ce phénomène est vérifié dans R6 (forage OYB-1). Dans le forage NDK2, cette condition est observée dans les échantillons R3, R4, R5, R8 et R10.

La corrélation entre la géochimie de l'uranium et la matière organique, peu ou très évoluée, constitue un axe de recherche prometteur dans l'investigation des gisements d'hydrocarbures.

### Remerciements

Ce travail a été conduit grâce à l'appui des projets : PICS n°53, financé par CNRS/IN2P3 (France) et le CNCPRST (Maroc) ; PARS PNC-06, financé par le CNCPRST (Maroc) et par l'Action Intégrée SM214/00 (Maroc/France). Les auteurs adressent leurs vifs remerciements et gratitude aux responsables et personnel de l'ONAREP qui ont mis à leur disposition le matériel géologique. Les auteurs remercient également Dr. Frédéric Vitali (Instituto Tecnológico e Nuclear de Sacavem, Portugal) pour la lecture critique du manuscrit initial, qui était soumis à la revue Gaia (Portugal).

### Références

Adams A.E., Ager D.V. & Harding A.G. 1980. Géologie de la région d'Imouzzer des Ida-ou-Tanane (Haut Atlas occidental). *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 41, 258 p.

Allègre C.J & Michard G. 1973. *Introduction à la géochimie*. Presses Universitaires de France, Collection Sup., Vendôme, 510 p.

Ambroggi R. 1963. Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas occidental et de la plaine du Souss. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 157, 322 p.

Bernardin C. 1988. *Interprétation gravimétrique et structure profonde de la Meseta marocaine et de sa marge atlantique*. Thèse, Univ. Marseille, France, 162 p.

Bloch S. 1980. Some factors controlling the concentration of uranium in the world ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 2, 373 p.

Bouaouda M.S. 1987. *Biostratigraphie du Jurassique inférieur et moyen des bassins côtiers d'Essaouira et d'Agadir (marge atlantique du Maroc)*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Toulouse, France, 213 p.

Bouchta R. 1992. Prospects pétroliers et miniers liés à la marge passive atlantique du Maroc. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 366, 103-112.

Broughton P. & Trepanier A. 1991. Exploration analysis of the Essaouira basin in western Morocco. Rapport Petro-Canada international assistance corporation and ONAREP, 373 p.

Duffaud F., Brun L. & Plauchut B. 1966. Le bassin du sud-ouest marocain. In : Reyre, D.(ed.). Bassins sédimentaires du littoral africain. *Symp. New Delhi, Publ. Assoc. Serv. Géol. Afr.*, Paris, I, 5-7.

Dyck W & Jonasson I.R. 1986. Geochemistry of radon and its application to prospecting from minerals. *Geol. Surv. Canada*, Internal report, Ottawa, 26 p.

Ivanovich. M & Harmon R.S. 1982. Uranium series disequilibrium; application to environmental problems. *Clarendon Press*. Oxford, 32, 39 p.

Jaffrezou M., Medina F. & Chorowicz J. 1985. Données microbiostratigraphiques sur le Jurassique supérieur du

- bassin de l'Ouest marocain. Comparaison avec les résultats du Leg 79 DSDP et de la campagne Cyamaz (1982). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 6, 875-884.
- Jarousse J., Moine B. & Sauvin P. 1981. Etude pétrographique et géochimique des métasédiments évaporitiques du Trias pyrénéen. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 4, 377-386.
- Kolodny Y. & Kaplan I.R. 1973. Uranium isotopes in sea-floor phosphorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 1, 3-24.
- Ku T.L. 1976. The uranium-series methods of age determination. *Rev. Earth & Planet Sci. Lett.*, 4, 347-379.
- Kurbach I. & Weigel F. 1977. Radium, Ergänzungband, Geschichtliches, Kosmochemie, Geochemie, Gemlin Handbuch Dermorganischen Chemie, Springer-Verlag, Berlin, 36 p.
- Labbassi K. 1998. *Subsidence et évolution thermique du bassin d'El Jadida-Agadir: implications géodynamiques dans le cadre de la cinématique de l'Atlantique*. Thèse d'Etat, Univ. Chouaib Doukkali, Fac. Sci. El Jadida, 207 p.
- Le Roy P. 1993. *Interprétation des données sismiques sur la zone des Doukkala (Maroc Occidental): géométrie des bassins triasico-liasiques et cinématique du rifting atlantique*. Mém. D.E.A., Univ. Bretagne occidentale, Brest, France, 66 p.
- Medina F. 1994. *Evolution structurale du Haut-Atlas occidental et des régions voisines du Trias à l'Actuel, dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision Afrique-Europe*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, Fac. Sci., Rabat, 292 p.
- Michard A. 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 252, 408 p.
- Mo T., Suttle A.D. & Sackett W.M. 1973. Uranium concentration in marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1, 35-51.
- Molinari J. & Snodgrass W.J. 1990. *The Chemistry and radiochemistry of Radium and the other elements of the uranium and thorium natural decay series*. AIEA, Technical Report, Vol. 2, 11-27.
- Rey J. & Taj-Eddine K. 1989. Eustatisme et tectonique distensive au passage Jurassique-Crétacé : leur enregistrement dans le bassin de Haha (Haut-Atlas occidental, Maroc). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308, II, 101-106.
- Roch E. 1930. Etudes géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental. *Notes et Mém. Serv. Min. et Carte géol.*, Maroc, 9, 542 p.
- Shawe D.R. 1976. Sedimentary rock alteration in the Slick rock district, San Miguel and Dolores Counties, Colorado. *U. S. Geol. Survey, Paper 576D*, 51 p.
- Taj-Eddine K., Gharib A., Ben Abbes Taarji R.K., Ibnoussina M., Canérot J. & Rey J. 1989. Le Néocomien du versant nord du Haut-Atlas atlantique. Stratigraphie, rôle de l'eustatisme, de la tectonique distensive et de l'halocinèse. *Coll. Géol. franco-marocain, Strasbourg, C.I.F.E.G.*, p. 190.
- Taj-Eddine K. 1991. *Le Jurassique terminal et le Crétacé basal dans l'Atlas Atlantique (Maroc): Biostratigraphie, sédimentologie, Stratigraphie séquentielle et géodynamique*. Thèse d'Etat. Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Marrakech, 323 p.
- Tatsumoto M., Hedge C.E. & Engel A.E.F. 1965. Potassium, rubidium, strontium, thorium and the ratio of strontium-87 to strontium-86 in oceanic tholeiitic basalt. *Science*, 150, 886-888.
- Veeh H.H. 1967. Deposition of uranium from the ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 3, 145-150.
- Weisrock A.L.E. 1980. *Géomorphologie et paléoenvironnement de l'Atlas Atlantique*. Thèse d'Etat, Univ. Paris, 931 p.
- Zarhloule Y. 1994. *Potentialités hydrogéothermiques des réservoirs du Bassin d'Essaouira*. Thèse, Univ. Tunis, 215 p.
- NDLR : Le présent article a été initialement proposé et accepté pour publication au volume de l'année 2002 la revue Gaïa (Lisbonne), dont la parution s'est arrêtée pour des raisons financières. Il a été accepté dans le présent numéro après modifications mineures.

