

Amélioration des caractéristiques pétrophysiques des calcaires crayeux pélagiques par les processus de dolomitisation-dédolomitisation. Exemple des carbonates du Sénonien supérieur de Tunisie centrale

Mohamed El Hédi NEGRA et Ali M'RABET

Résumé – Les calcaires crayeux, en partie conglomératiques, du Campanien-Maastrichtien (formation Abiod), se caractérisent à Maknassy (Tunisie centrale) par de bonnes valeurs de porosité (jusqu'à 19 %) mais par de faibles valeurs de perméabilité (inférieures à 1 md). Les processus de dolomitisation-dédolomitisation qui sont souvent à l'origine de la création d'une porosité secondaire (intercristalline et intracristalline), améliorent la porosité et plus particulièrement la perméabilité des calcaires affectés. Cette amélioration est particulièrement nette dans les calcaires crayeux lorsqu'ils sont totalement dolomitisés; leur porosité moyenne augmente de 5 % (de 14 à 19 %) et leur perméabilité moyenne est multipliée par 300 (de 0,2 à 302 md). Ces bonnes valeurs de porosité et de perméabilité caractérisant les calcaires crayeux, surtout lorsqu'ils sont fracturés et/ou totalement dolomitisés, permettent d'accorder à ces séries une importance particulière en tant qu'objectif pétrolier, au moins, en Tunisie.

Improvement of petrophysical characteristics of chalky limestones by dolomitization-dedolomitization processes. Example of the Upper Senonian carbonates in Central Tunisia

Abstract – The Upper Senonian chalky and partly conglomeratic limestones, constituting the Abiod Formation in Maknassy area, exhibit relatively high porosity values (up to 19%) but low permeability (less than 1 md). Dolomitization-dedolomitization processes which create a secondary porosity (mainly intercrystalline and intracrystalline) improve the porosity and, especially, the permeability values. The improvement of petrophysical properties is particularly obvious within the chalky limestones when they are completely dolomitized; their average porosity is increased by about 5% (from 14 to 19%) and their permeability is multiplied by 300 (from 0.2 to 302 md). These porosity and permeability values which, at least locally, are relatively high, indicate that the Abiod Formation carbonates are considered as potential reservoir rocks in Tunisia.

Abridged English Version – The Upper Senonian chalky limestones in Tunisia correspond, at least locally, to a source rock [1]. Moreover, they frequently constitute potential reservoir rocks in several oil fields in Tunisia (recent discoveries of Sidi el Kilani, Zinia, Tiref) and in other parts in the world (North Sea, for example). Porosity values are frequently high in chalk (average values may reach 35% in the Ekofisk area fields, [2]) and in other micrites ([3], [4]). Values of permeability, in contrast, are generally low (less than 1 md). Penecontemporaneous fracturation and elevated pore-fluid pressures [2] seem to be the main processes enhancing the effective production from micritic facies. This contribution demonstrates that diagenetic processes, especially dolomitization-dedolomitization ([6], [7]), can improve, sometimes considerably, the permeability of *certain* limestones, particularly of pelagic limestones.

The Upper Senonian of Central Tunisia in Maknassy area ([8], [9]) exhibits several carbonate facies whose constitution and texture change vertically and laterally; values of porosity and permeability in the different limestone textures are compared. In addition, all limestones can be dolomitized; the total dolomitization frequently led to a clear variation of porosity and permeability values. In this case, dolomitization, dissolution and secondary porosity development are intimately associated [6], the result being the creation of new pore

Note présentée par Jean DERCOURT.

spaces, frequently rhombohedral [5] or irregular [6] in form. Four types of limestones can be distinguished: (1) Pelagic chalky limestones which correspond to wackestones containing planktonic and benthonic foraminifera; (2) Bioclastic limestones corresponding to packstones, locally cross-bedded, rich in molluscan, crustacean and echinoderm debris, pelletoids and large benthonic foraminifera; (3) Debris-flow deposits; (4) Turbiditic grainy limestones overlying the debris-flow deposits. The pelagic chalky limestones (1) and the bioclastic packstones (2) can be partially dolomitized and dedolomitized.

Within the non-dolomitized facies, porosity values range from 4.5% (in the turbiditic grainy limestones) to 18.7% (in the pelagic chalky limestones). The highest porosity values (average 14%) are measured in the pelagic chalky limestones which are characterized by intergranular and intraparticle porosities. Values of porosity decrease within the other limestones: Bioclastic limestones (2), characterized by intergranular and moldic voids, have an average porosity of 12.4%; Conglomeratic limestones (3), exhibiting breccia, intergranular and moldic porosities, have an average porosity of 9.4%; Turbiditic grainy limestones (4), showing intergranular and sometimes a moldic porosity, have the lowest values of median porosity (6.5%). The permeability values are less than 0.1 md, but can reach 2.6 md in the conglomeratic limestones.

In conclusion, the chalky limestones have good porosity but weak permeability. In addition to penecontemporaneous fracturation, dolomitization-dedolomitization processes have led to the upgrading of the porosity and especially the permeability of the chalky limestones. The proposed model, which involves a peripheral dolomitization of chalky limestones from a non-chalky central conduit, has generated good reservoir rocks within the Upper Senonian of Central Tunisia and may be applied to other chalky facies.

I. INTRODUCTION. — Les calcaires crayeux du Sénonien supérieur peuvent être des roches-mères [1], mais constituent surtout des réservoirs potentiels dans de nombreux gisements pétroliers en Tunisie (récentes découvertes de Sidi el Kilani, Zinia, Tiref) ou dans d'autres endroits (Mer du Nord, par exemple). Si les valeurs de porosité sont souvent bonnes dans la craie ou dans d'autres types de micrite ([3], [4]), les valeurs de perméabilité sont, en revanche, souvent faibles (inférieures à 1 md). La fracturation, surtout lorsqu'elle est synsédimentaire, est généralement considérée comme le facteur principal assurant une perméabilité « en grand » dans ces faciès. La présente Note montre qu'en plus de la fracturation, la diagenèse, en l'occurrence la dolomitisation, peut également améliorer, parfois considérablement, les valeurs de perméabilité de *certaines* calcaires, notamment des calcaires crayeux ([5], [6], [7]).

II. CADRE GÉOLOGIQUE. — Le secteur de Maknassy-Mezzouna ([8], [9]) est situé en Tunisie centrale, à 150 km au Sud de la ville de Kairouan (*fig. 1 a*). Il constitue une zone charnière entre l'axe N-S et la chaîne de Gafsa [9]. Le Sénonien supérieur correspondant à la formation Abiod [10], englobe quatre faciès sédimentaires de constitution, de texture, et de caractéristiques diagénétiques différentes : (1) des calcaires crayeux pélagiques, de texture « wackestone », à foraminifères planctoniques et benthiques; (2) des calcaires bioclastiques chenalisés de texture « packstone », riches en débris de mollusques, d'échinodermes, de pelletoids et de foraminifères benthiques, fossilisant parfois des stratifications obliques; (3) des calcaires conglomératiques souvent polygéniques de type « debris-flow »; (4) des calcaires grenus turbiditiques surmontant les dépôts de type debris-flow. Dans la

vallée de l'Oued Abiod (*fig. 1*), ce sont surtout des calcaires crayeux pélagiques (1) et des calcaires bioclastiques (2) qui sont dolomités. Au Jebel Jebb (*fig. 1*), la dolomitisation peut affecter tous les types de calcaires, y compris les calcaires conglomératiques.

III. CARACTÈRES SÉDIMENTAIRES DE LA FORMATION ABIOD. — A l'Oued Abiod, la formation Abiod est constituée de deux membres carbonatés séparés par une combe principalement marneuse (60 m), admettant des intercalations de bancs centimétriques de calcaires argileux (*fig. 1*).

Le premier membre calcaire, épais de 27 m, est constitué de deux corps carbonatés, massifs, principalement conglomératiques. Le premier corps (12 m d'épaisseur) correspond à un calcaire conglomératique polygénique à galets calcaires de diamètre millimétrique à centimétrique (6 mm de diamètre moyen). Ces calcaires conglomératiques sont surmontés d'abord par des calcaires micritiques et argileux à « microslumps », puis par des marnes; ils correspondent à des fluxoturbidites [12]. Le deuxième corps conglomératique (de 2 m d'épaisseur) montrant à sa base des « flute casts », contient des galets légèrement plus grossiers (de 1 cm de diamètre moyen) enveloppés par une matrice micritique riche en débris de mollusques (lamelibranches et scaphopodes, surtout). Les « microslumps » et « flute casts » témoignent d'une pente orientée du NW vers le SE.

Le deuxième membre carbonaté, épais de 80 m, est constitué d'alternances de bancs centimétriques à décimétriques de calcaires crayeux blancs à fréquents moules d'Inocérames et de passées décimétriques de marnes et de calcaires argileux. Ces alternances sont dolomitées sur une épaisseur de 50 m. Les calcaires dolomités constituent souvent des corps lenticulaires gris-brun. Ces lentilles dolomitées encaissées dans les calcaires pélagiques se caractérisent par une morphologie concavo-plane à biconvexe. Elles ont une épaisseur moyenne d'environ 20 m et une extension latérale de 200 m. Le passage du calcaire crayeux à la dolomie est progressif et montre que les limites de chaque lentille sont purement diagénétiques. L'analyse pétrographique fine montre que les dolomies sont, au moins, de deux types : des dolomies poreuses (type 1) correspondant à la dolomitisation du calcaire crayeux pélagique et des dolomies denses (type 2) correspondant à la dolomitisation du calcaire bioclastique d'origine gravitaire, formant des « chenaux » métriques encaissés dans les calcaires crayeux. Les dolomies poreuses sont volumétriquement les plus importantes (95 % des lentilles).

Les dolomies de type 1 (poreuses), colorées en brun clair, correspondent à des dolosparites à rares fantômes d'organismes (foraminifères, surtout). Elles sont formées de cristaux euhédraux, plus ou moins jointifs et dont la taille atteint (surtout à la base) 0,5 mm. Ces cristaux sont souvent zonés et montrent un cœur sombre coloré en brun noir par des oxy-hydroxydes de fer. Ce cœur ferruginisé des rhomboédres est souvent dissous, engendrant une porosité intracristalline s'ajoutant à la porosité intercristalline.

Les dolomies de type 2 (denses) brunes et à base ravinante, sont constituées de strates obliques organisées en microséquences bioclastiques granodécroissantes. Elles correspondent également à des dolosparites à rares fantômes d'organismes (mollusques, surtout), mais avec des cristaux plutôt xénomorphes.

A l'origine (avant dolomitisation), les dolomies de type 1 correspondaient à des calcaires crayeux en bancs de 30 à 60 cm alternant avec des passées décimétriques de calcaires argileux et des marnes. Les dolomies de type 2 correspondaient à des calcaires bioclastiques à stratifications obliques, de type chenaux turbiditiques, constituant des lentilles concavo-planes de 50 à 80 cm d'épaisseur.

Lithologie et caractères sédimentaires	Nature de la porosité	Valeurs de la porosité $\bar{\phi}$ mini- $\bar{\phi}$ max ($\bar{\phi}$) en %	Valeurs de la perméabilité Ka mini-Ka max (Ka) en md
Calcaire crayeux pélagique	intergranulaire, intraparticulaire	9,8 - 18,7 14	0,1 - 0,3 0,2
Calcaire grenu turbiditique (terme a)	intergranulaire, de moule	4,51-8,31 6,45	< 0,1
Calcaire bioclastique à stratifications obliques	de moule, intergranulaire	6,16 - 16,02 12,43	< 0,1
Calcaires conglomératiques de l'Oued Abiod	de brèche, de moule, intergranulaire	6,93 - 11,28 9,36	0,1 - 2,58 0,95
Calcaires conglomératiques du Jebel Jebb	de brèche, intergranulaire	11,86	0,47

(a)

Localités	Caractères sédimentaires	Nature de la porosité	Valeurs de la porosité $\bar{\phi}$ mini- $\bar{\phi}$ max ($\bar{\phi}$) en %	Valeurs de la perméabilité Ka mini-Ka max (Ka) en md
Oued Abiod	Calcaire crayeux pélagique partiellement dolomitisé	intergranulaire, intraparti- culaire, intercrystalline	8,6 - 15,57 12,08	0,14 - 0,35 0,24
	Dolomie de type 1 (ancien calcaire crayeux)	intercrystalline, intra-cristalline	14,48 - 28,25 19,14	27,41 - 952,33 302,56
	Dolomie de type 2 (ancien calcaire bioclastique)	de moule, intercrystalline	2,91 - 7,27 4,47	< 0,1
Jebel Jebb	Calcaire conglomératique dolomitisé	de brèche, vacuolaire	2,82 - 6,59 4,84	< 0,1
	Calcaire grenu à stratifica- tions obliques, dolomitisé	intergranulaire, intercrystalline	2,18 - 12,61 6,85	< 0,1

(b)

Fig. 4. — a. Variation des valeurs de porosité et de perméabilité en rapport avec les textures initiales. b. Variation des valeurs de porosité et de perméabilité en rapport avec les processus de dolomitisation-dédolomitisation.

Fig. 4. — a. Variation of porosity and permeability values with respect to the initial textures. b. Variation of porosity and permeability values with respect to dolomitization-dedolomitization processes.

Latéralement, au Jebel Jebb, les calcaires crayeux pélagiques et les marnes diminuent volumétriquement, alors que les calcaires conglomératiques et les calcaires bioclastiques deviennent plus fréquents et plus épais. De plus, les calcaires conglomératiques contiennent des galets et blocs dont la taille atteint 4 m de diamètre. L'augmentation de la taille des galets indique une proximité de la zone nourricière. L'épaississement des calcaires grenus à stratifications obliques témoigne d'une chenalisation plus accentuée en bordure de plate-forme carbonatée.

III. VARIATIONS DES VALEURS DE POROSITÉ ET DE PERMÉABILITÉ DANS LES DIFFÉRENTS CALCAIRES. — Les valeurs de porosité (fig. 2a) varient de 4,5 % (dans les calcaires grenus turbiditiques) à 18,7 % dans les calcaires crayeux pélagiques dont la porosité est principalement intergranulaire et intraparticulaire. Les calcaires bioclastiques, à porosité intergranulaire et de moule et les calcaires conglomératiques, à porosité de brèche, intergranulaire et de moule, ont des valeurs intermédiaires de porosité : respectivement 12,4 et 9,4 %.

Les valeurs de perméabilité sont souvent inférieures à 0,1 md dans la plupart des sédiments mais peuvent atteindre 2,6 md dans les calcaires conglomératiques. Au sein des calcaires conglomératiques, les valeurs de porosité et de perméabilité varient en fonction de la taille des galets; les valeurs les plus élevées sont mesurées dans les calcaires conglomératiques à galets relativement grossiers (1 mm à 3 cm de diamètre) dans lesquels, elles atteignent respectivement 10,2 % et 2,6 md. Dans les calcaires conglomératiques à

galets relativement fins (millimétriques), ces valeurs diminuent, elles sont de 1 % et de 1 md.

Latéralement, vers une zone plus proximale (au Jebel Jebs, par exemple), les valeurs de porosité peuvent être améliorées, mais les valeurs de perméabilité restent faibles (inférieures à 1 md). Les valeurs moyennes de porosité des calcaires conglomératiques atteignent 12 %. Les valeurs moyennes de porosité des calcaires grenus turbiditiques passent de 6,4 % (à l'Oued Abiod) à 13,6 % (au Jebel Jebs). Par contre, la porosité moyenne des calcaires bioclastiques à stratifications obliques diminue par rapport à celle de l'Oued Abiod, elle passe de 12,4 à 7,6 %.

IV. VARIATIONS DES VALEURS DE POROSITÉ ET DE PERMÉABILITÉ EN FONCTION DE LA DOLOMITISATION ET DE LA DÉDOLOMITISATION. — Les valeurs de porosité et de perméabilité varient nettement en passant du calcaire crayeux pélagique au même calcaire partiellement ou totalement dolomitisé (*fig. 2 b*). De plus, au sein des lentilles dolomitisées, les valeurs de porosité et de perméabilité varient en fonction du pétrotype des dolomies. Les valeurs de porosité les plus élevées (jusqu'à 28,3 %) sont mesurées dans les dolomies de type 1 (calcaires crayeux pélagiques dolomitisés). Ces valeurs diminuent nettement dans les dolomies de type 2 (calcaire bioclastique dolomitisé) où elles ne dépassent pas 7,3 %. Dans ce cas, les processus de dolomitisation-dédolomitisation, la dissolution et le développement d'une porosité secondaire sont intimement associés [11]; les processus de dolomitisation-dédolomitisation sont à l'origine de la création de nouveaux espaces poreux qui peuvent être de forme rhomboédrique [5] ou irrégulière [6]. L'essentiel de la porosité paraît être, dans ce cas, intercrystalline et intracrystalline. Ce sont surtout les valeurs de perméabilité qui sont nettement améliorées par la dolomitisation, elles atteignent 952 md dans les dolomies poreuses de type 1. Les valeurs moyennes de perméabilité passent, en effet, de 0,2 md (dans les calcaires crayeux pélagiques) à 302 md (dans les dolomies de type 1). Dans les dolomies denses de type 2, les valeurs de perméabilité sont, par contre, nettement diminuées et ne dépassent pas 0,1 md. Les « packstones » originels, suffisamment poreux et perméables sont « surdolomitisés », leur porosité initiale est, en grande partie, oblitérée par une dolosparite de type ciment [7]. La dolomitisation s'avère donc très bénéfique pour les calcaires crayeux quant à l'amélioration de leurs caractéristiques pétrophysiques mais semble, par contre, destructive pour les calcaires bioclastiques. Ces derniers, initialement poreux et perméables par rapport aux calcaires micritiques et aux calcaires argileux encaissants, ont dû, vraisemblablement, servir de conduits aux fluides dolomitisants qui ont pu traverser ensuite les calcaires crayeux pélagiques. Après leur dolomitisation, ces calcaires pélagiques ont été partiellement dédolomitisés; leur dédolomitisation, vraisemblablement sénonienne, s'accompagne de processus de dissolution préférentielle de certains tests de mollusques (pouvant être originellement aragonitiques). Pour les calcaires bioclastiques et les calcaires conglomératiques, la dolomitisation a engendré, en revanche, une poronécrose. Les valeurs de perméabilité, déjà faibles, sont encore diminuées; les valeurs de porosité sont diminuées de 1 % dans les calcaires bioclastiques (de 7,6 à 6,8 %) et plus que de moitié (de 12 à 5 %) dans les calcaires conglomératiques, lorsqu'ils sont dolomitisés.

V. CONCLUSIONS. — 1. La dolomitisation affecte, dans le secteur étudié, des calcaires déposés par des processus gravitaires dans un milieu relativement profond; la formation Abiod constitue ainsi dans la région de Maknassy un modèle peu habituel.

2. Les facteurs hydrologiques responsables de cette dolomitisation ne sont pas encore établis. D'autre part, le fait que la dolomitisation soit suivie d'une dédolomitisation implique que les eaux parentales aient évoluées durant cette diagenèse biphasée.

3. Cette étude montre l'importance des variations sédimentaires comme facteurs qui influencent non seulement la localisation et la géométrie du corps dolomitique, mais également les variations pétrophysiques au sein de ce corps lenticulaire.

4. Enfin, cette étude confirme le rôle de la dolomitisation en tant que processus diagénétique susceptible d'améliorer la perméabilité et, de ce fait, le potentiel réservoir des sédiments à texture fine.

Nous remercions Monsieur le professeur B. H. Purser pour son apport scientifique et pour ses critiques fort constructives lors de la réalisation de cette Note. Nous tenons à remercier également l'E.T.A.P. et M. H. Bismuth (S.E.R.E.P.T.) pour leur aide logistique et scientifique.

Note remise le 19 décembre 1991, acceptée après révision le 7 août 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. H. NEGRA et A. M'RABET, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312, série II, 1991, p. 1033-1039.
 [2] P. A. SCHOLLE, *Am. Ass. Petr. Geol. Bull.*, 61, n° 7, 1977, p. 982-1009.
 [3] M. H. NEGRA et A. M'RABET, *Actes des 1^{res} Journ. Tunis. Géol. Appl. et Jubilé de A. Azzouz*, II, 1988, p. 180-189.
 [4] M. H. NEGRA et B. H. PURSER, *Geol. Medit. XVI*, n° 2-3, 1989, p. 99-119.
 [5] B. D. EVAMY, *Journ. Sedimentary petrology*, 37, 1967, p. 1204-1215.
 [6] B. H. PURSER, in *Carbonate Petroleum Reservoirs*, Perry O. ROEHL et Philip W. CHOQUETTE ed., Springer Verlag, New York, 1985, p. 343-355.
 [7] M. H. NEGRA, A. M'RABET et B. H. PURSER, *Porosity evolution in dolomitized pelagic Senonian limestones of Central Tunisia*, Dolomieu Conference, Ortisei, Italie, abstracts, 1991, p. 192-193.
 [8] M. KHESSIBI, *Études géologiques du Secteur de Maknassy-Mezzouna et du Jebel Kébar*, Tunisie Centrale, Thèse, Univ. Lyon, 175 p.
 [9] N. BOUKADI, *Évolution géométrique et cinématique de la zone d'interférence de l'Axe Nord-Sud et de la chaîne de Gafsa, Maknassy-Mezzouna et Jebel Bouhedma*, Tunisie, Thèse, Univ. Strasbourg, 1985, 155 p.
 [10] P. F. BUROLLET, *Ann. Mines et Géol.*, Tunis, 18, 1956, 345 p.
 [11] E. A. JOACHIM et G. M. FRIEDMAN, *Sedimentology*, 38, 1991, p. 343-362.
 [12] A. SLACZKA et S. THOMPSON, *Ann. Soc. Geol. Poloniae*, 51-1/2, Krakow, 1981, p. 3-4.

*Université de Tunis, Faculté des Sciences de Tunis,
 Laboratoire de Sédimentologie et Bassins sédimentaires, Campus Universitaire, 1020 Tunis, Tunisie.*

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Carte de localisation. 1 : Carbonates du Campanien-Maastrichtien; 2 : Carbonates du Crétacé supérieur; 3 : Évaporites du Trias.

Fig. 1. — Location map. 1 : Campanian-Maastrichtian carbonates; 2 : Upper Cretaceous carbonates; 3 : Triassic evaporites.

Fig. 2. — Coupe lithostratigraphique dans le Sénonien supérieur de l'oued Abiod.

Fig. 2. — Lithostratigraphic section within the Upper Senonian of wadi Abiod.

Fig. 3. — Carte lithologique d'une lentille dolomitisée encaissée dans les calcaires crayeux de l'oued Abiod.

Fig. 3. — Lithologic map of a dolomitized lens intercalated within the chalky limestones of wadi Abiod.

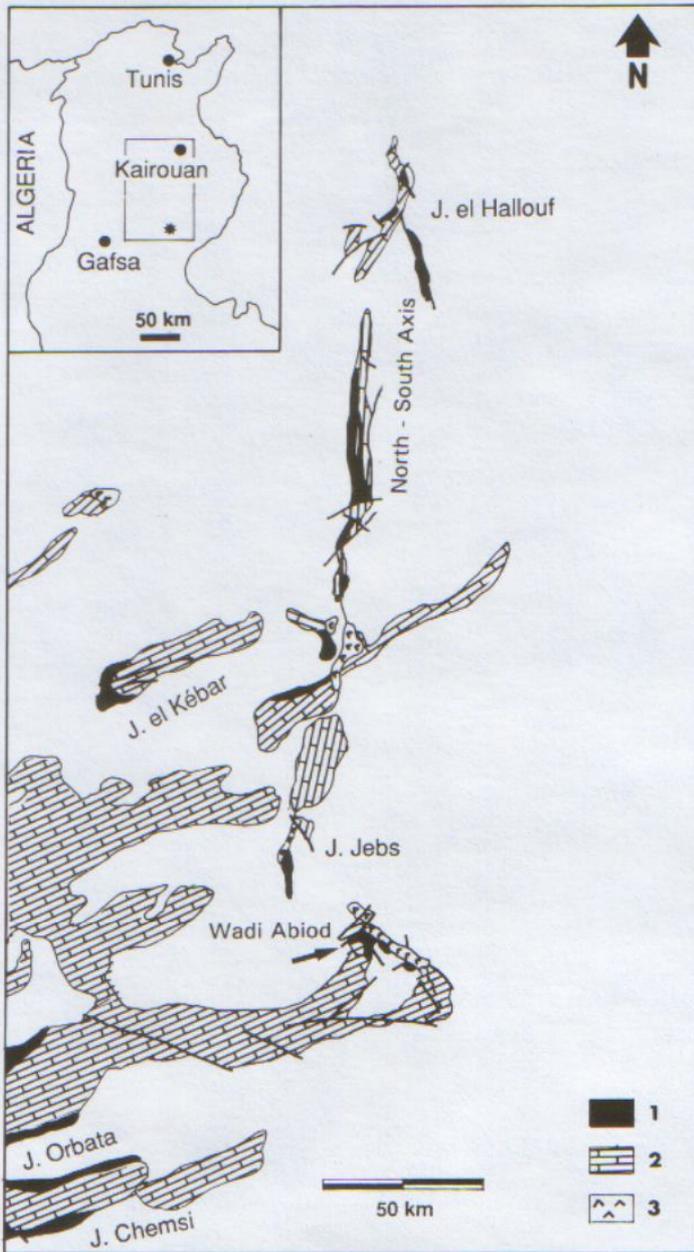


Fig. 1

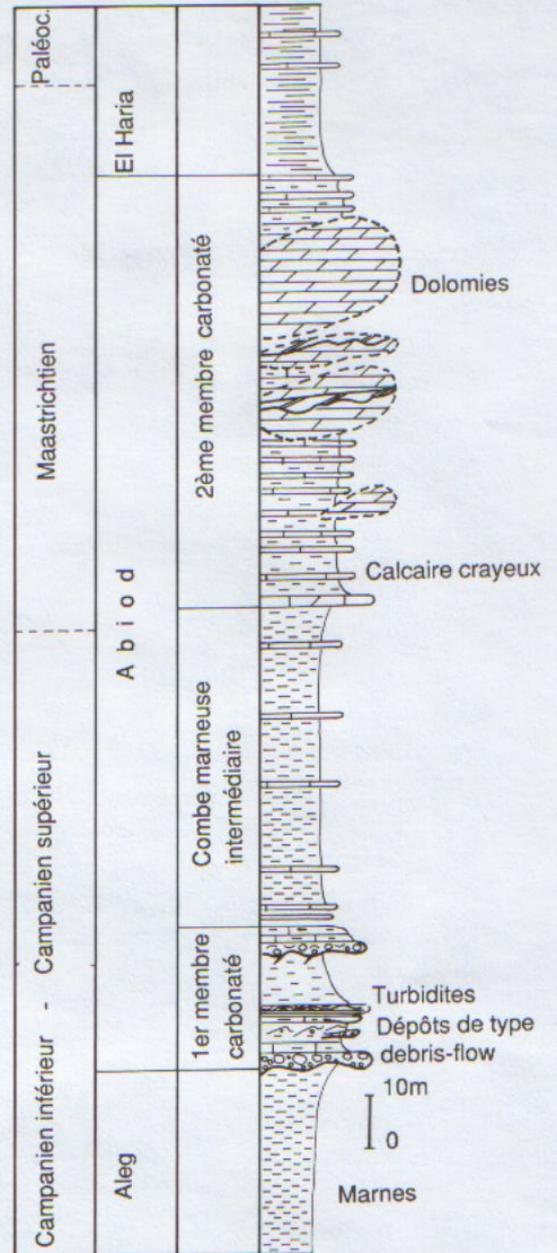


Fig. 2

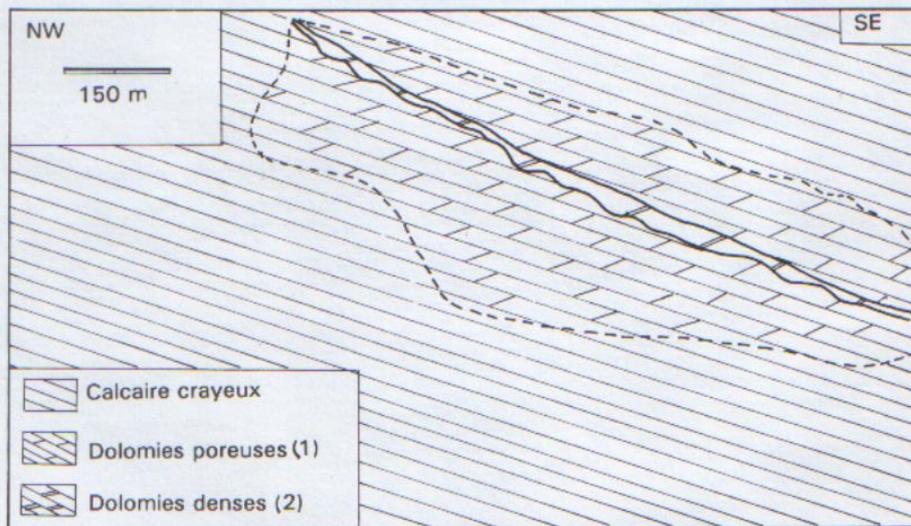


Fig. 3