



HAL
open science

Chronostratigraphie de travertins de plusieurs régions du Maroc et leurs relations avec le contexte paléoclimatique global

Louis Rousseau, Hassan Aouraghe, Jean-Jacques Bahain, Jacques Beauchamp,
Mohamed Benabdelhadi, Larbi Boudad, Kamal Elhammouti, Abderrahmane
El Harradji, Christophe Falguères, Elisabeth Nicot, et al.

► To cite this version:

Louis Rousseau, Hassan Aouraghe, Jean-Jacques Bahain, Jacques Beauchamp, Mohamed Benabdelhadi, et al.. Chronostratigraphie de travertins de plusieurs régions du Maroc et leurs relations avec le contexte paléoclimatique global. CHRONOSTRATIGRAPHIE DE TRAVERTINS DE PLUSIEURS RÉGIONS DU MAROC ET LEURS RELATIONS AVEC LE CONTEXTE PALÉOCLIMATIQUE GLOBAL, 2008, Oujda, Maroc. pp.197-208. halshs-00356291

HAL Id: halshs-00356291

<https://shs.hal.science/halshs-00356291>

Submitted on 27 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CHRONOSTRATIGRAPHIE DE TRAVERTINS DE PLUSIEURS RÉGIONS DU MAROC ET LEURS RELATIONS AVEC LE CONTEXTE PALÉOCLIMATIQUE GLOBAL

Chronostrgraphy of travertines from lot of regions of Morocco and their relation with the paleoclimatic global context

التأريخ الإشعاعي المطلق لرصاصات عدة جهات بالمغرب وعلاقتها مع التغيرات المناخية العالمية

Louis ROUSSEAU¹⁻², Hassan AOURAGHE³, Jean-Jacques BAHAIN¹, Jacques BEAUCHAMP¹⁻², Mohamed BENABDELHADI⁴, Larbi BOUDAD⁵, Kamal EL HAMMOUTI⁵, Abderrahmane EL HARRADJI⁶, Christophe FALGUERES¹, Elisabeth NICOT⁷, Jean-Pierre POZZI⁸ & André WEISROCK⁹

¹Département de Préhistoire du Muséum national d'histoire naturelle, UMR 5198, Institut de Paléontologie humaine, 1 rue René Panhard, 75013 Paris ; lrousseau@mnhn.fr

²Laboratoire de Sédimentologie et de Géochimie, Université de Picardie Jules Verne, 33 rue Saint-Leu, 80039 Amiens

³ Université Mohamed 1^{er}, Faculté des Sciences, Centre Universitaire de Recherches en Archéologie, Laboratoire des Géosciences Appliquées, Oujda, Maroc

⁴ Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc

⁵ Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences et Technique, Département de Géologie, Errachidia, Maroc

⁶ Université Mohamed 1^{er}, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Laboratoire de Géomorphologie, Oujda, Maroc

⁷ Laboratoire de Stratigraphie et Paléontologie, BP 111, UPMC, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

⁸ Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Géologie, 24 rue Lhomond, 75 005 Paris

⁹ Université de Nancy2, C.E.R.PA, BP 33-9, 54015 Nancy Cedex.

ملخص

تعتبر الرصاصات وفيرة بالمغرب، وترتبط بالشلالات والينابيع حيث تطورت خلال الزمن الجيولوجي الرابع. وتتنمي التكوينات الرصاصية التي خضعت للتأريخ الإشعاعي المطلق إلى مختلف جهات المغرب، ومنها الرشيدية وللا ميمونة وفاس ووجدة وورزازات. ويساعد هذا التأريخ على تحديد تزامن التغيرات المناخية في الميدان القاري على المستوى الجهوي، في محاولة لربط الفترات المطيرة بالأمطار الموسمية القديمة في سياق التغيرات المناخية العامة. ويقصد بالأمطار الموسمية القديمة اكتساح الكتل الهوائية المحيطية للقارات. وتمتاز الرصاصات على أرضية الصواعد بتوفرها على قابلية للتسجيل أكثر اكتمالاً، غير أن التعرية قد تنقص من ذلك. وللتعرف على دورات المبادرات (23000 سنة) وجب استعمال القياس الكتلي للأطياف (TIMS أو ICP-MS)، من أجل الحصول على تدقيق أكبر للفترات التي تتراوح بين 500000 و 100000 سنة.

الكلمات الدالة : الرصاصات, للتأريخ الإشعاعي المطلق, القياس الكتلي للأطياف TIMS, المغرب

Résumé

Les travertins sont abondants au Maroc oriental, et correspondent à des formations largement développées au niveau des sources et des cascades au cours du Quaternaire. Les formations travertineuses soumises ici aux analyses radiochronologiques sont réparties dans différentes régions du Maroc (Errachidia, Lalla Mimouna, Debdou et Fès). On tente ainsi de définir le synchronisme des changements climatiques à une échelle continentale régionale et d'associer les périodes de forte humidité responsables des dépôts de travertins à des « paléo-moussons » issues de changements climatiques globaux, le terme « paléo-mousson » étant utilisé dans le

sens anglo-saxon qui évoque le déplacement de masses d'air océanique vers le continent. Les travertins sont susceptibles d'avoir un enregistrement plus complet que ceux enregistrés dans les planchers stalagmitiques, mais l'érosion peut en supprimer une partie. Les résultats préliminaires montrent que pour essayer de retrouver des cycles de précession de 23.000 ans responsables de ces paléo-moussons avec de faibles incertitudes durant les périodes comprises entre 500.000 et 100.000 ans, la spectrométrie de masse (TIMS ou ICP-MS) devra être utilisée.

Mots clés : Travertins, Stades isotopiques, Radiochronologie, Méthode U/Th par spectrométrie alpha, TIMS, Maroc

Abstract

We studied here travertines of Eastern Morocco. For this part of Africa, these concretions indicate ancient humid phases which are suspected to be linked with palaeo-monsoons and the precession cycle of 23,000 yrs. Our principal aim is to precise the planetary configuration which is associated with the climatic conditions of their construction and to determine the chronological frequency of the travertine deposits. In fact, travertines, like speleothems, can be regarded as valuable archives of climatic conditions on the continent. The major difference is that the formation of the speleothems is generally discontinuous and all the isotopic stages are not recorded, while the travertines are continuously recorded at least travertine sequences are very thicken and can cover huge geological periods. However, erosion could unfortunately suppress a part of climatic information. The preliminary results show that in order to find the precession cycles of 23 000 yrs and to obtain a weak uncertainty for the periods comprised between 500,000 and 100,000 yrs., the development of mass-spectrometry by ICP-MS should to be used.

Key words : Travertines, Isotopic stage, Radiochronology, Uranium series dating, TIMS, Morocco

1. Introduction

Les travertins, au sens large du terme, comprennent toutes les accumulations carbonatées non marines se formant dans les lacs, les rivières, les ruisseaux et les grottes (Sanders et Friedman, 1967). Dans un sens plus restreint le terme travertin est utilisé pour désigner les précipitations rapides de carbonates inorganiques à partir des eaux de résurgence froides ou thermales, tandis que les formations de calcite par précipitation dans les grottes sont communément appelées spéléothèmes.

Dans certains cas, le concrétionnement des travertins est catalysé par la présence de bactéries ou d'algues, souvent incrustées dans la matrice calcitique. Néanmoins, on peut considérer que ce type de formations n'est généralement pas dû à une précipitation organique dans la mesure où les réactions métaboliques ne sont vraisemblablement pas impliquées dans le processus de concrétionnement (Rousseau et al., 2004 a & b).

Il est possible de reconstituer les variations climatiques ayant affecté une région à partir de l'étude de la distribution des isotopes stables du carbone et de l'oxygène de ces carbonates. Cette approche présente un intérêt particulier dans la mesure où la calcite est d'une grande pureté et des analyses radiochronologiques ont montré qu'elle s'est comportée comme un système clos. Toutefois, l'acide carbonique se trouvant dans les solutions aqueuses à partir desquelles se forment les travertins provient de plusieurs sources : CO₂ organique,

atmosphérique ou provenant de la roche encaissante ou des roches profondes. Des composés tels que les sulfures et les sels de strontium, présents en faible quantité dans la calcite, peuvent être utilisés pour identifier l'éventuelle implication des eaux hydrothermales dans ces précipitations carbonatées.

La présente étude concerne la distribution chronologique de travertins du Maroc oriental dans l'échelle chronostratigraphique du Quaternaire afin de les relier aux changements climatiques survenues à l'échelle globale. Des études isotopiques et géochronologiques, mais aussi palynologiques relatives à ce même matériel, devraient conduire à une meilleure compréhension des modifications climatiques et de l'éventuelle abondance du couvert végétal au cours de ces périodes humides. Les formations étudiées correspondent principalement à des unités contenant des bancs calcitiques compacts, finement cristallisés et très purs, qui se prêtent bien aux analyses pluridisciplinaires. L'objectif principal est de tenter d'établir une corrélation entre les périodes glaciaires et interglaciaires (ou périodes pluviales et interpluviales) déterminées en milieu marin et les âges des dépôts travertineux étudiés.

2. Les glaciations au cours du Quaternaire

2.1. L'origine des glaciations et la circulation thermohaline

Depuis plusieurs dizaines d'années les variations climatiques enregistrées dans les océans, les calottes polaires et les concrétions calcitiques sont déduites de l'analyse des isotopes stables de l'oxygène. En effet, des relations existent entre les glaciations, la circulation thermohaline profonde et le principe des reconstitutions climatiques à partir des isotopes stables de l'oxygène (Gordon, 1986).

L'origine des glaciations serait précédée par des modifications de la circulation thermohaline. Des cellules de Convection aqueuses, isolées thermodynamiquement les unes des autres, circulent

dans les océans. Ainsi, dans l'Atlantique, les eaux chaudes s'écoulent en surface depuis l'hémisphère sud et la zone intertropicale vers le nord puis, au niveau du Groenland, l'air arctique les refroidit et l'augmentation de densité qui en découle les fait plonger en profondeur. A cette latitude, il se forme alors un courant profond qui se déplace vers le sud et le continent Antarctique. Ce courant thermohalin est associé à deux configurations liées à la tectonique globale (Broecker et Denton, 1990 ; Fig. 1 et Fig. 2) :

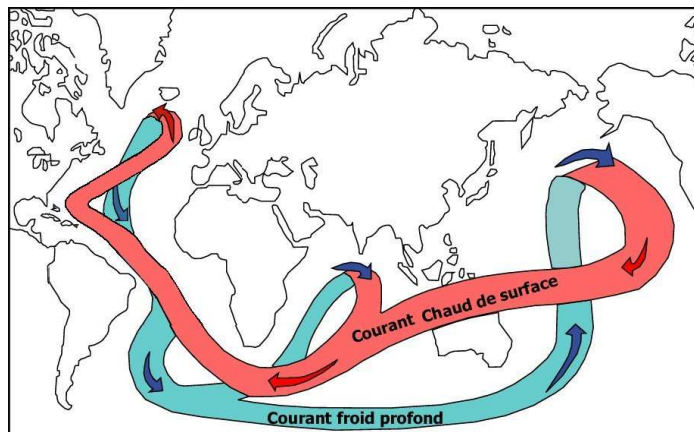


Fig.1. Circulation thermohaline au cours des interglaciaires.

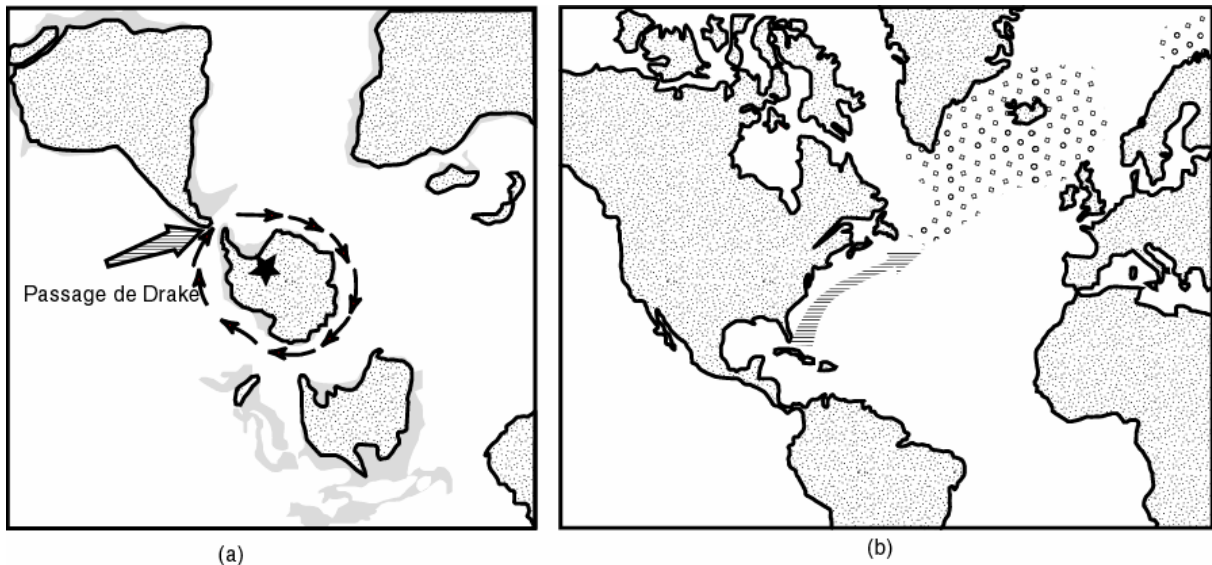


Fig. 2. a : Formation du passage de Drake (les flèches indiquent le courant circumpolaire). b : Circulation des courants superficiels et zones d'évaporation (figurées par des cercles blancs).

a – L'ouverture du passage Drake, entre l'Amérique du Sud et le continent antarctique, il y a environ 15 millions d'années, a permis l'organisation d'un fort courant circumpolaire antarctique ininterrompu. Celui-ci est à l'origine de

la double circulation planétaire induite par les eaux de fond d'origine antarctique et les eaux profondes un peu moins denses, nées dans le bassin antipodal arctique. L'ouverture entre l'Australie et le continent antarctique s'était déjà produite

plusieurs millions d'années auparavant (Mikolajewicz et Maier-Reimer, 1993).

b – La fermeture de l'isthme de Panama, aux alentours de 2,7 millions d'années, a conduit à supprimer la circulation hydrologique préexistante. La nouvelle configuration des plaques lithosphériques entraîne, dans cette zone, l'arrêt des courants océaniques chauds et sursalés qui sortaient de l'océan Atlantique et s'engouffraient dans l'océan Pacifique, ainsi que des courants froids et hyposalés qui circulaient dans le sens inverse.

La circulation thermohaline, dont le débit est cent fois supérieur à celui de l'Amazone, constitue une formidable source de chaleur, car l'eau qui s'écoule vers le nord est en moyenne de 8°C plus chaude que celle qui circule vers le sud. Le transfert de cette chaleur aux masses d'air de l'Arctique, au-dessus de l'Atlantique nord, est à l'origine du climat anormalement chaud de l'Europe. Les eaux froides profondes de la région antarctique gagnent l'Océan Indien et le Pacifique, puis remontent, se réchauffent et retournent en surface dans l'Atlantique Nord, où elles subissent de nouveau un refroidissement et une augmentation de densité sous l'effet des échanges avec l'atmosphère (Fig. 1). La différence principale entre les périodes glaciaires et interglaciaires correspond à la position de la zone latitudinale de l'enfoncement du courant océanique profond dans l'océan Atlantique nord. Ainsi au cours des dernières glaciations, la circulation thermohaline aurait subi des modifications entraînant une chute des températures en Europe de quelque 10°C en moyenne annuelle.

2.2. L'enregistrement des variations climatiques

L'enregistrement des variations climatiques au cours des dernières périodes géologiques est mémorisé à l'échelle globale dans les océans et ces variations peuvent être déduites des analyses isotopiques de différents organismes constituant le plancton, tels que les foraminifères ubiquistes. En effet, la composition isotopique des tests de foraminifères reflète celle de l'eau de mer à l'époque de leur vie, ce qui a permis de définir la répartition stratigraphique des glaciations au cours du Quaternaire. Ces mêmes tests mémorisent, au cours des différentes générations, les variations climatiques à travers les changements de leur teneur en ^{18}O . Ainsi la variation du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des tests de foraminifères a permis de révéler les variations des masses de glaces piégées sur les continents lors des périodes glaciaires au cours du Quaternaire. Comme le montre la figure 3, relative aux carottes océaniques, le $\delta^{18}\text{O}$ des tests de foraminifères est élevé en période glaciaire et faible au cours des périodes interglaciaires.

Ainsi, l'alternance des phases glaciaires et interglaciaires est initialement déterminée dans les milieux marins. Aux très hautes latitudes, des archives paléoclimatiques précieuses sont scellées dans les carottes de glaces prélevées au Groenland et en Antarctique. En revanche, aux basses latitudes, les édifices continentaux susceptibles d'être soumis aux analyses radiochronologiques et susceptibles d'avoir mémorisé les variations climatiques sont assez rares, en dehors des travertins.

3. Calcite et changements climatiques : application aux travertins du Maroc oriental.

3.1. Dépôts de calcite et analyses radiochronologiques

La spécificité de la calcite, système thermodynamiquement clos, présente de façon continue dans les travertins, permet de valider les résultats isotopiques en les comparant aux données obtenues par la géomorphologie, la radiochronologie, la palynologie, le paléomagnétisme, la minéralogie et la sédimentologie. De par l'importance de l'épaisseur des travertins, il paraît possible, sur la base de ces résultats, d'analyser les modifications des variations climatiques locales, puis de les confronter aux données globales.

Des études antérieures (Falgüères, 2003 ; Rousseau et al., 2005) ont été focalisées sur la détermination des variations climatiques survenues au cours de l'évolution des Néandertaliens et des Anté-Néandertaliens. Celles-ci sont définies à partir des analyses isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) réalisées sur divers planchers stalagmitiques de remplissage de grottes préhistoriques (la Chaise-de-Vouthon, Charente ; Kalamakia, Grèce ; Lazaret, Alpes-Maritimes ; Caune de l'Arago, Pyrénées Orientales). Elles ont montré que les planchers stalagmitiques ont bien enregistré les stades isotopiques déterminés en milieu marin (Rousseau et al., 2005). Il est donc possible d'étendre l'étude des changements climatiques aux formations calcitiques continentales et notamment aux formations travertineuses marocaines à partir de l'analyse des isotopes stables (^{18}O et ^{13}C). En effet, la pureté de la calcite composant les travertins laisse entrevoir que les enregistrements isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, U/Th, ESR) palynologiques et paléomagnétiques y sont bien conservés. Ces édifices correspondent, en général, à des milieux isolés qui semblent, au moins pour certains d'entre eux, protégés de l'érosion et des dégradations humaines.

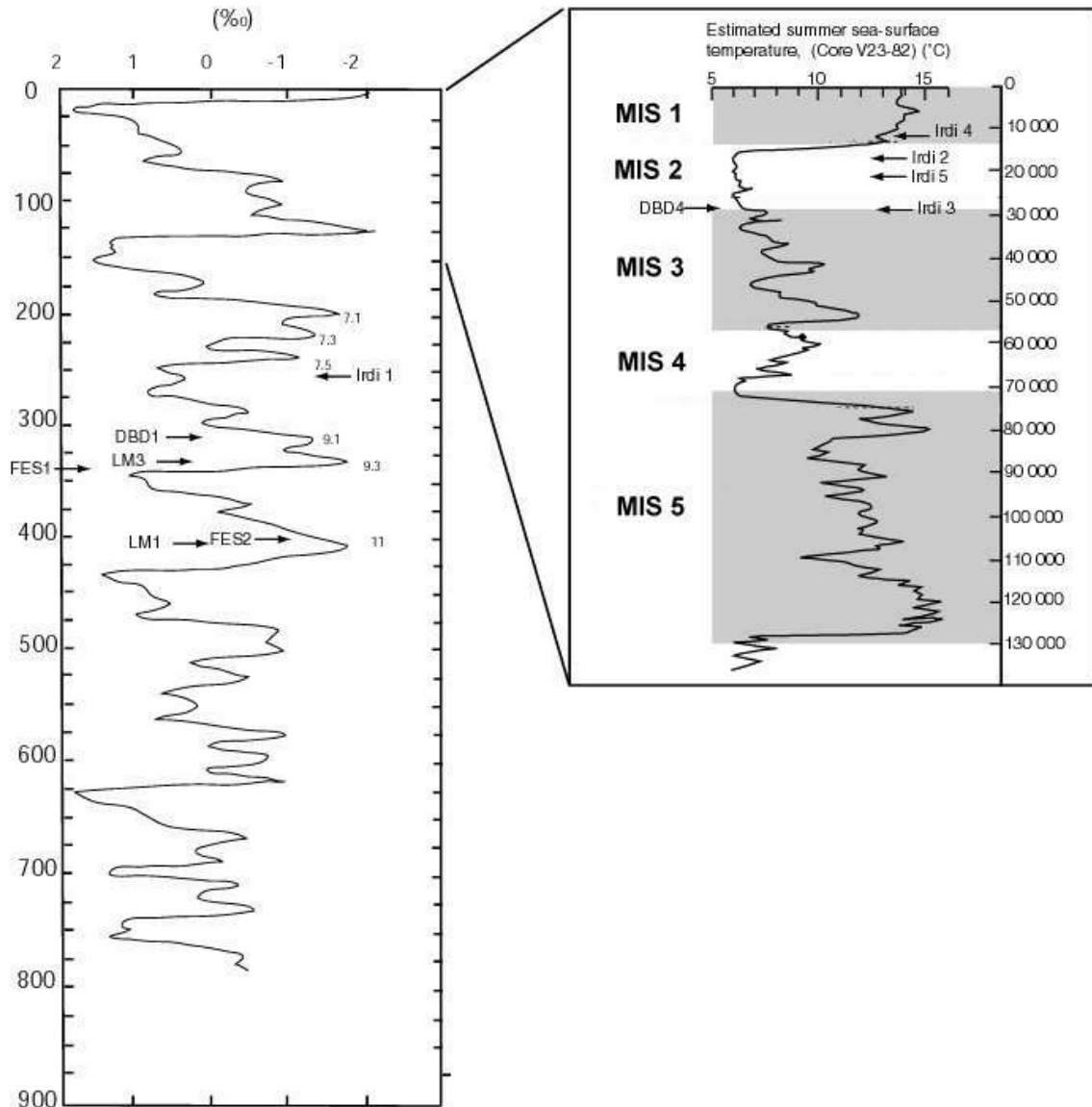


Fig. 3. Courbe SPECMAP, synthèse des variations normalisées de delta O¹⁸ de cinq carottes de sédiments océaniques (Brahic, 1999). Cet enregistrement correspond aux derniers 800 000 ans. Le détail pour le Pléistocène supérieur est établi d'après les données de Shackleton et Opdyke (1973) et celles de Lisiecki et Raymo (2005).

Des résultats radiochronologiques préliminaires ont montré que le concrétionnement des travertins s'est produit au cours de plusieurs stades isotopiques (Boudad et al. 2003a ; Rousseau et al, 2006). Il s'agit maintenant de savoir si les formations travertineuses en différents lieux sont contemporaines, et, dans ce cas, si leur formation résulte bien d'un contexte climatique global. D'autre part, il est intéressant de vérifier si les variations climatiques déduites de l'analyse des carottes marines sont bien mémorisées dans ces sédiments et se produisent de façon similaire à l'échelle régionale du Nord-Ouest de l'Afrique.

Une étude paléomagnétique préliminaire (Pozzi in Rousseau et al, 2006) a mis en évidence une aimantation rémanente stable portée par un mélange

de magnétite et d'hématite. On se propose maintenant de rechercher sur les échantillons les variations de la paléointensité du champ magnétique terrestre et de la comparer aux courbes de référence déjà établies pour ces périodes.

Une autre approche possible consiste à comparer les teneurs des isotopes de l'uranium dans les différentes entités travertineuses identifiées sur le terrain. En effet, des mesures de concentration et du rapport d'activité des isotopes des familles de l'U/Th ont été réalisées sur des travertins datant de 15.000 à 5.000 ans (ces deux âges sont marqués par une intense aridité au Maroc oriental) de la formation de Cowl River Spring (Canada) et deux générations distinctes de travertins ont été ainsi caractérisées (Geurts et Ghaleb, 2007). Il est donc

possible de déterminer sur les échantillons marocains l'origine de l'eau à partir de laquelle ils se sont formés : origine hydrothermale profonde, nappes phréatiques, ruissellement ou mélange de ces différentes eaux. Toutefois, sur certains sites cette approche se révèle délicate à appliquer. Ainsi, le site d'Irdi pourrait présenter des difficultés pour définir avec certitude le trajet fossile les eaux de résurgence qui seraient à l'origine de la formation des édifices travertineux.

3.2. Echantillonnage de travertins du Maroc

Pour réaliser les objectifs présentés auparavant, plusieurs formations travertineuses ont été échantillonnées à différentes latitudes, entre 32°N et 37° N, à l'Est du méridien de Fès (Fig.4). Il s'agit des formations suivantes:

- 1- Travertins d'Irdi et de Lalla Mimouna (province d'Errachidia ; Fig.4, Fig.5)
- 2 - Travertins du massif de Debdou (région

d'Oujda ; Fig.4)

3 -Tufs travertineux de Fès (Fig.4 ; Fig.6 ; ceux-ci n'appartiennent pas au même ensemble géographique mais les résultats radiochronologiques sont identiques, c'est la raison pour laquelle nous les citons)

4- Tufs travertineux de la région d'Ouarzazate (Fig. 4).

Ces formations travertineuses sont de type laminaire c'est-à-dire qu'elles sont déposées en nappes au cours du temps. Elles présentent des caractères communs notamment leur épaisseur importante, de plusieurs mètres à Lalla Mimouna à Fès et à Irdi. Un autre trait remarquable correspond au faible taux de porosité et à la pureté de certains bancs. Une autre caractéristique de ces formations est la présence de bancs de conglomérats basaux ou interstratifiés. Ceux-ci sont observés notamment à Irdi. L'abondance de ces poudingues peut être considérée comme une preuve de l'existence, par le passé, de périodes de forts ruissellements.

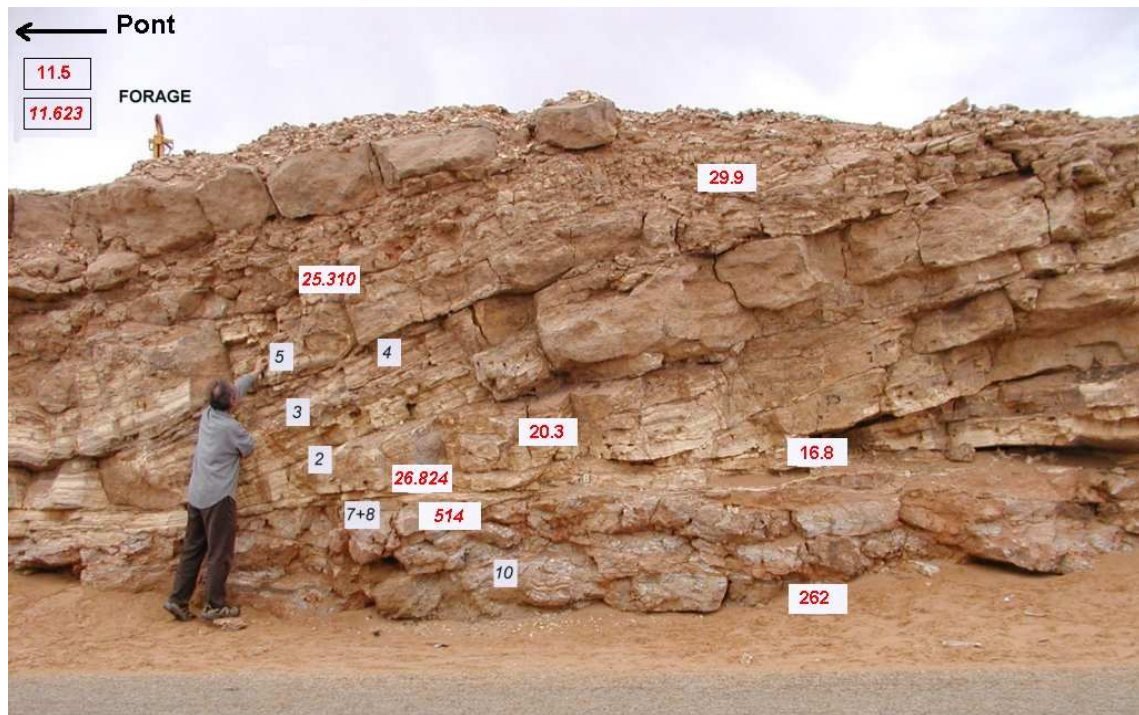


Photo 1. Localisation des échantillons sur la coupe d'Irdi.

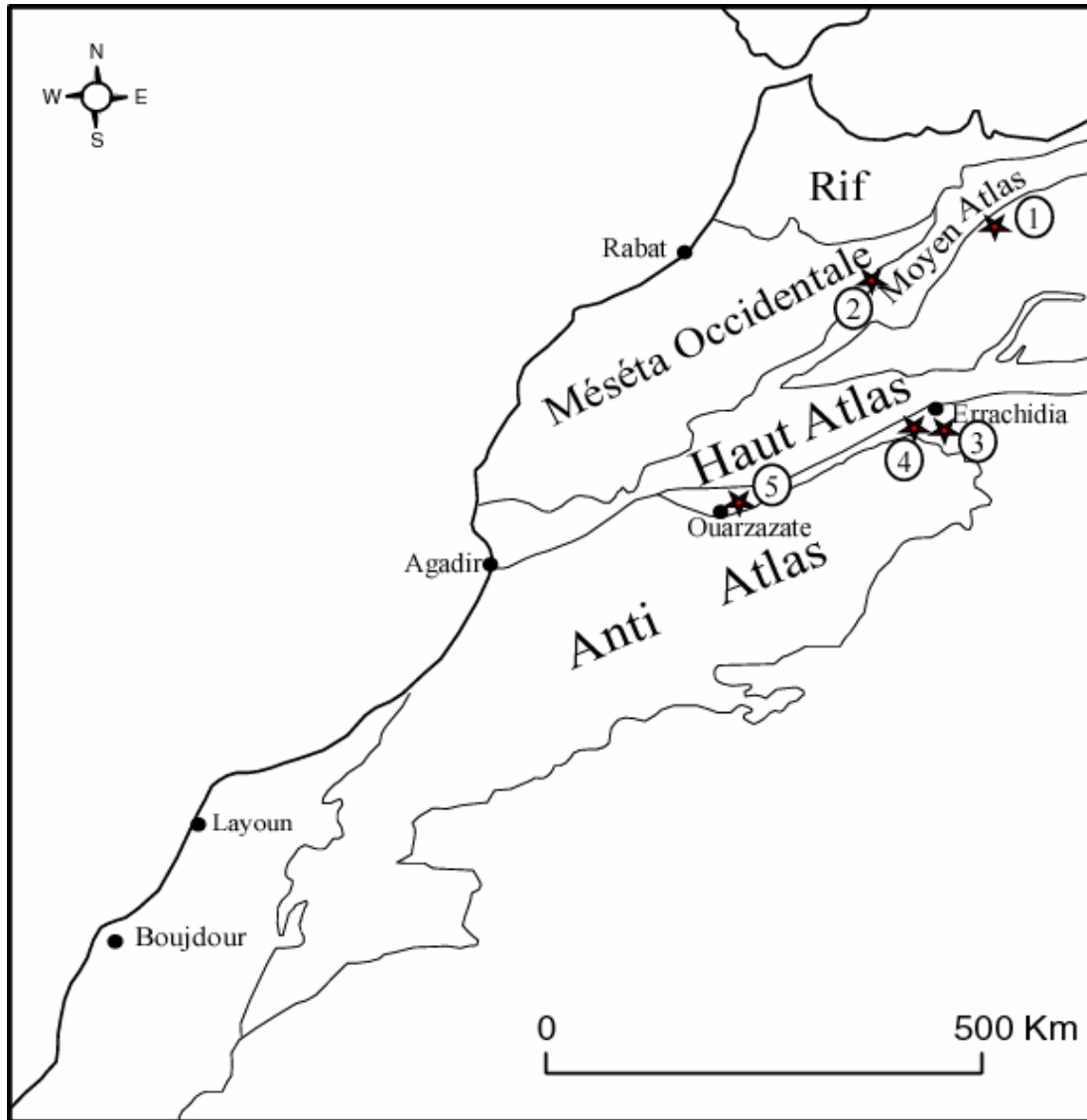


Fig. 4. Localisation des formations travertineuses étudiées. 1 = Debdou, 2 = Fes ; 3 = Irdi ; 4 = Lalla Mimouna ; 5 = Skoura.

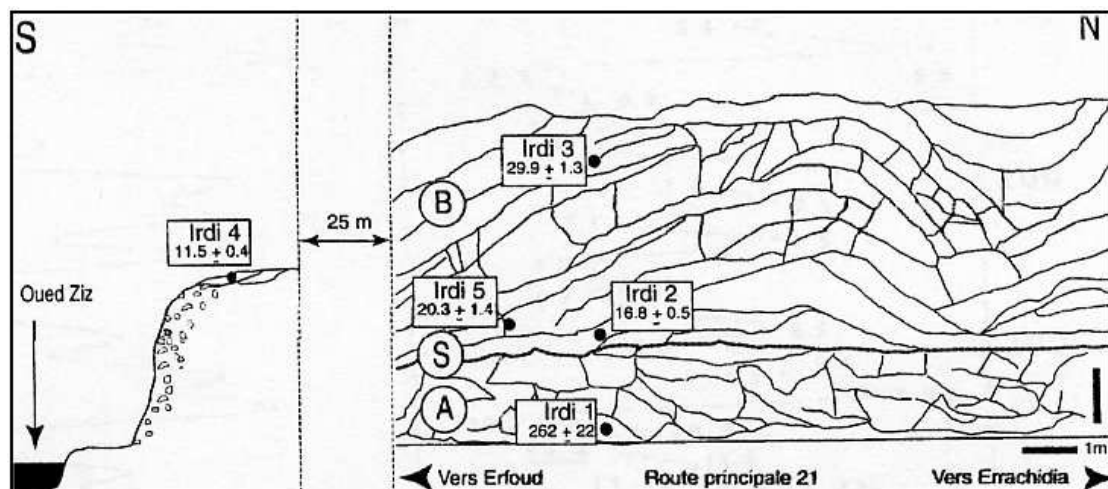
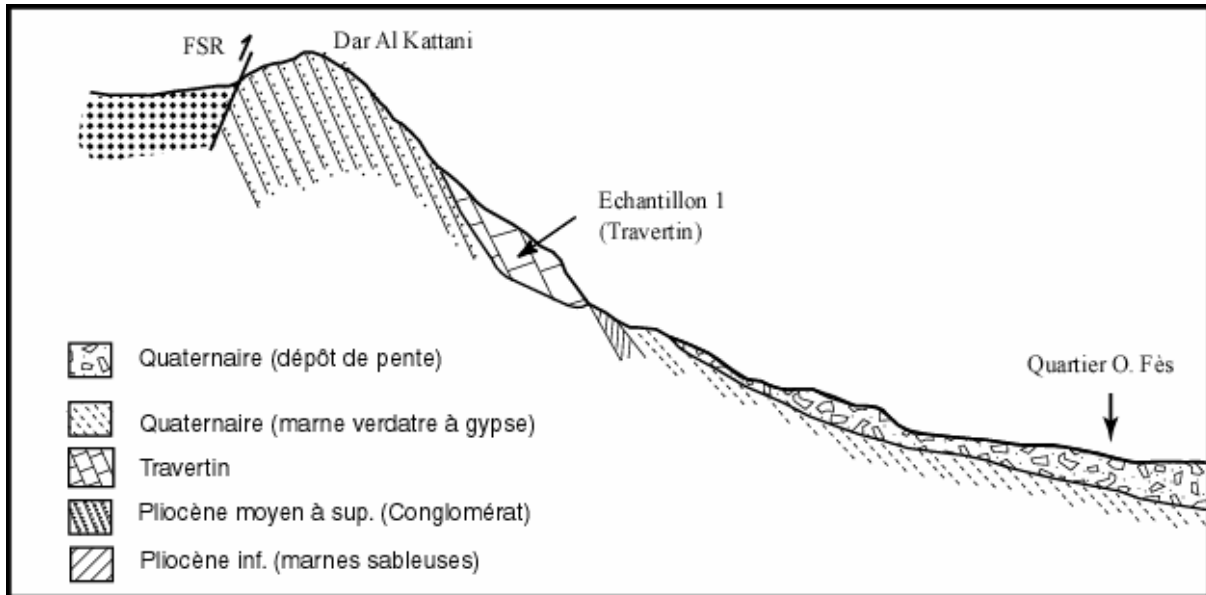
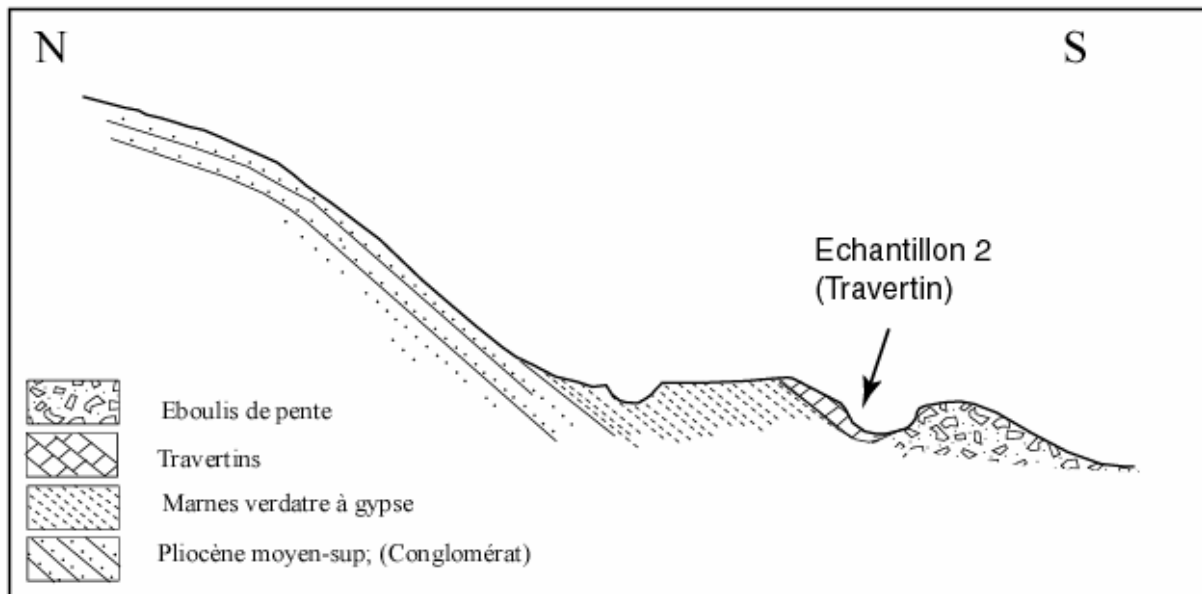


Fig. 5 1. Position des échantillons et datations à Irdi (cf. photo 1).



(a)



(b)

Fig. 6 a et 6b. Localisation des échantillons 1 et 2 dans les environs de Fès.

4. Premiers résultats

4.1. Paléomagnétisme : méthodologie et observations préliminaires

Le but des études paléomagnétiques menées dans ce travail était de caler chronologiquement les niveaux calcitiques travertineux à partir principalement d'inversions (par exemple l'inversion Brunhes-Matuyama, datée à 780 000

ans B.P.) ou des événements brefs du champ magnétique terrestre (directs dans la période inverse Matuyama ou inverses dans la période Brunhes). Les changements du champ terrestre étant totalement indépendants de tous les autres paramètres, la fossilisation des événements paléomagnétiques peut ainsi contribuer à identifier précisément les périodes de croissance des travertins. Dans les cas favorables, l'étude de la paléointensité relative du champ terrestre peut permettre de préciser les dates des inversions et des

événements trouvés (Guyodo et Valet, 1999).

Les minéraux magnétiques des travertins et des spéléothèmes sont en général des magnétites peu titanifères, des hématites ou un mélange des deux. Ces minéraux sont dispersés en grains très fins (de l'ordre de 0,01 micron pour beaucoup d'entre eux). Ils ne sont pas observables sur la roche totale et leur étude nécessite de fortes concentrations préalables (Perkin, 1981). Il est cependant important de déterminer les minéraux magnétiques d'une formation pour séparer les aimantations primaires d'éventuelles réaimantations parasites.

Les caractéristiques spécifiques des minéraux permettent de les différencier, notamment par leur températures de Curie, 580°C et 670°C respectivement pour la magnétite et pour l'hématite, et par leur champ coercitif (de façon simplifiée, le champ nécessaire pour faire basculer le moment magnétique d'un grain) qui est très élevé pour l'hématite et plutôt faible pour la magnétite. De plus, l'aimantation spécifique portée par l'hématite est environ mille fois plus faible que celle portée par la magnétite.

En conséquence les analyses magnétiques menées séparément soit par l'analyse des températures de Curie soit par celle des champs coercitifs, bien que très précises, ne permettent pas, dans ce cas, de prouver la présence ni, bien sûr, de déterminer les proportions d'hématite et de magnétite. Nous avons donc utilisé une méthode dite de Lowrie (1990). Il s'agit, dans un premier temps, d'appliquer trois champs magnétiques

d'intensités différentes successivement selon les trois axes de l'échantillon. Cela revient à isoler trois gammes de coercivité selon les trois axes de l'échantillon. Dans un second temps, on procède à une désaimantation thermique classique en suivant l'évolution de chaque axe. L'évolution de l'aimantation avec la température est représentée axe par axe. On obtient finalement les températures de Curie pour chacune des trois coercivités choisies, ce qui permet une identification sûre des minéraux porteurs de l'aimantation de l'échantillon, séparés par leur coercivité et par leur température de Curie.

Dans cette étude, l'aimantation du travertin est très faible et elle est portée presque exclusivement par un mélange de magnétite et d'hématite. L'hématite, bien que portant une aimantation globale plus faible que la magnétite, est cependant en quantité relativement notable car son aimantation spécifique est beaucoup plus faible que celle de la magnétite. Des mesures sont en cours sur d'autres échantillons orientés prélevés récemment pour confirmer ce résultat obtenu sur un seul échantillon.

4.2. Résultats radiochronologiques

Les âges obtenus par la méthode de décroissance de l'uranium par spectrométrie alpha sont présentés dans le tableau 1 et sur la figure 5 et la photo 1.

Echantillon		U (ppm)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th}$	Age (ka)
Irdi	Irdi 5	1,92	5,025±0,100	0,175±0,011	20,3±1,4
	Irdi 4	1,9	5,040±0,042	0,102±0,003	11,5±0,4
	Irdi 3	2,07	4,637±0,040	0,248±0,010	29,9±1,3
	Irdi 2	2,25	5,020±0,038	0,146±0,004	16,8±0,5
	Irdi 1	7,35	2,773±0,002	1,076±0,027	262+22/-19
Lalla Mimouna	LM1	0,06	1,435±0,058	1,083±0,045	406+ind./-99
	LM3	0,04	1,367±0,073	1,054±0,048	344+216/-72
Debdou	DBD 1	0,06	1,182±0,065	0,992±0,063	316+ind./-83
	DBD 4	0,11	1,058±0,046	0,243±0,019	30,1+2,8/-2,7
Fès	FES1	0,17	1,437±0,068	1,062±0,053	357+549/-84
	FES2	0,16	1,557±0,110	1,101±0,075	402+ind./-129

Tableau 1. Travertins du Maroc : résultats radiochronologiques

Si l'on considère la valeur des incertitudes, on peut admettre que les âges récents inférieurs à 30.000 ans sont bien représentés. Cette période correspond aux stades isotopiques marins (MIS) 2 et 3. Par contre, des surfaces de discordances ont été observées sur les travertins entre différentes phases de concrétionnement calcitique, notamment

à Irdi, ce qui justifierait l'absence de dépôt travertineux ou leur érosion pour des périodes comprises entre 260.000 et 30.000 ans. Sur le site d'Irdi la discordance est soulignée par le brusque passage des âges inférieurs à 30 000 ans à des âges de l'ordre de 260 000 ans - 500 000 ans ; celle-ci est attestée par des observations de terrain.

Les analyses minéralogiques préliminaires réalisées sur les échantillons de la carrière de Skoura ont montrées plusieurs phases de recristallisation bien que macroscopiquement la calcite semblait parfaitement cristallisée. Elle se présente de couleur brun-miel avec une faible porosité. Il est intéressant de noter que des travertins de cette zone ont été datés (Akdım, 1991) à des âges correspondant au stade 5 ; ce stade n'a pu être confirmé car il a été précisé que les dates n'étaient pas forcément justes dans la mesure où la clôture du système thermodynamique ne paraissait pas évidente.

Toutefois, la précision obtenue sur les âges obtenus sur le site de Skoura n'est pas suffisante pour permettre de distinguer la fin du stade isotopique 6 ou le début du stade isotopique 5.5. Des travertins datant du stade 5 ont été également observés à l'oued Noun, mais sous une forme très discontinue indiquant une forte érosion ultérieure (Weisrock et al. 2006).

Des périodes plus anciennes sont en revanche bien enregistrées entre 250.000 et 300.000 ans (MIS 7 à 9) et au-delà de 350.000 ans, notamment sur le site d'Irdi où l'inversion Brunhes-Matuyama semble identifiée (communication personnelle J-P Pozzi)

Seule l'utilisation de la spectrométrie de masse (TIMS ou ICP-MS) permettra de caractériser avec certitude les périodes de concrétionnement des travertins comprises entre 500.000 ans et 10.000 ans. Au-delà de 500.000 ans, la reconnaissance d'événements paléomagnétiques sera susceptible de fournir des informations sur les périodes de concrétionnements.

5. Discussion et conclusion

Pour justifier l'importance des phases humides dans la partie nord-ouest de l'Afrique, aux périodes considérées, on peut proposer plusieurs modèles, chacun d'eux nécessitant des configurations planétaires différentes.

a) Si l'on admet que les positions hivernale et estivale des anticyclones sont identiques à celles observées actuellement, on peut considérer que les circulations d'air qui partent de l'Océan Atlantique vers le Golfe de Guinée sont maintenues, et que, par le passé, seules l'intensité et l'extension géographique des paléomoussons ont varié. Ce concept, proposé par J.E. Kutzbach (1981), est appelé « hypothèse orbitale des moussons ». Cette proposition se réaliserait lors de périodes où la configuration planétaire correspond au périhélie et au cours de laquelle l'axe de rotation de la planète Terre par rapport au plan écliptique serait différent de sa position actuelle. L'Afrique du nord-ouest et l'océan avoisinant reçoivent alors le maximum d'énergie solaire en été et, par conséquent, l'évaporation et la pluviosité sont fortement

augmentées. Actuellement, les régions soumises aux moussons se situent aux alentours de 15°N alors qu'elles pouvaient se situer vers 25°N à ces périodes. Ainsi, une réponse orbitale humide s'établirait tous les 23.000 ans (cycle de la précession des équinoxes) et la dernière se serait produite il y a 10.000 ans. Il reste à savoir si l'influence des moussons a pu atteindre des zones plus septentrionales et plus continentales comme le Maroc oriental.

b) La seconde hypothèse serait liée aux modifications des trajets des masses d'air en réponse à la position latitudinale de l'enfoncement du courant océanique profond au cours des périodes glaciaires ou des passages glaciaires-interglaciaires. La circulation des masses d'air humides d'origine océanique serait déplacée en latitude, modifiant ainsi le régime des précipitations et la production de dépôts travertineux. Dans cette hypothèse, les périodes de formation des travertins seraient moins fréquentes au Maroc oriental et normalement en phase avec les périodes glaciaires européennes.

Il est néanmoins important de souligner qu'on ne peut exclure l'influence de facteurs purement locaux (paramètres dits « stationnels »).

La présence de nombreux paléolacs, identifiés sur l'ensemble du territoire d'Afrique du Nord, illustre aussi ces propositions. Malheureusement la connaissance des enregistrements de ces phases humides est incomplète (Grove et Warren, 1968 ; Rognon, 1976). Les phases érosives éliminent parfois rapidement les témoignages des structures faiblement consolidées. Elles se traduisent soit par la karstification, soit par l'interstratification des dépôts lacustres avec des dépôts fluviaux (Weisrock, 1980 ; El Harradji, 1994 ; Boudad et al., 2003b).

La réalisation de forages sur des paléolacs encore conservés dans des dépressions et la possibilité d'effectuer des datations par RPE permettraient de valider ces hypothèses. La datation des travertins par plusieurs méthodes et la corrélation des résultats obtenus devraient contribuer à identifier les périodes d'intense concrétionnement et la fréquence des éventuels cycles de formation des travertins.

En conclusion, seule la poursuite des études radiochronologiques (celles-ci sont actuellement en cours sur trois nouveaux sites) permettra statistiquement de confirmer les propositions relatives à une étroite corrélation entre le contexte global et le développement des formations travertineuses.

Remerciements

Les auteurs remercient particulièrement le P.P.F. « Evolution et structure des peuplements » coordonné par Philippe Grandcolas (CNRS-MNHN), le Département de Préhistoire du Muséum

National d'Histoire Naturelle (BQR), ainsi que l'INSU qui ont financé une partie des missions de terrain réalisées sur le territoire marocain.

Bibliographie

AKDIM, B. 1991. *Genèse des carbonates terrestres dans la dépression de Ouarzazate (Maroc méridional)*. Thèse de l'Université d'Ottawa, 305 p.

BOUDAD, L., KABIRI, L., FARKH, S., FALGUERES, C., ROUSSEAU, L., BEAUCHAMP, J., NICOT, E. & CAIRANNE, G. 2003a. Datation par la méthode U/Th d'un travertin quaternaire du Sud-Est marocain : implications paléoclimatiques pendant le Pléistocène moyen et supérieur. *C. R. Geoscience*, 335, 469-478.

BOUDAD, L., KABIRI, L., WEISROCK, A., FONTUGNE, M., WENGLER, L., MAATAOUI, M., MAKAYSSI, A., & VERNET, J-L. 2003b. Sédimentation fluviale du Pléistocène supérieur et de l'Holocène dans la «Plaine» de Tazoughmit (Piémont sud-atlasique, Goulmima, Maroc). *Quaternaire*, 14 (3), 139-154.

BRAHIC, A., HOFFERT, M., SCHAAF, A. & TARDY, M. 1999. Sciences de la Terre et de l'Univers, éditions Vuibert, 634 p.

BROECKER, W. & DENTON, G. 1990. Les cycles glaciaires, in *Pour la science*, n°149, 28-38

EL HARRADJI, A. 1994. Structuration géologique et évolution géomorphologique du Massif de Debdou (Maroc Oriental). *Rev. Géogr. Maroc*, vol. XVI, N° 1 et 2, pp. 127-148.

FALGUERES, C. 2003. ESR dating and the human evolution: contribution to the chronology of the earliest humans in Europe. *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)*, 22, 1345-1351.

GEURTS, M.A. & GHALEB, B. 2007. Les travertins de Coal River Springs : évolution du relief et datations par déséquilibre Th/U. In : *Tufs et travertins en bordure du 60^{ème} parallèle, Ouest canadien*. *Acta Geographica Ottaviensia*, vol. 1, 40-52.

GORDON, A.L. 1986. Interocean exchange of thermocline water. *J. Geophysic Res.*, 91,5037-5046.

GROVE, A.T. & WARREN, A. 1968. Quaternary landforms and climate on the southside of the Sahara. *Géographical Journal*, 134, 194-208.

GUODO, Y & VALET, J-P., 1999, Global change in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 Kyr, *Nature*, 399, 249-252.

KUTZBACH, J. E. 1981. Monsoon Climate of the early Holocene: Climate Experiment with Earth's Orbital parameters For 9000 Years Ago, *Science*, 214, 59-61.

LISIECKI, L. E., & RAYMO, M. E. 2005. "A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records". *Paleoceanography*, 20: PA1003. DOI:10.1029/2004 PA001071, 1-17.

LOWRIE, W. 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties, *Geophysical Research letters*, 17 (2), 159-162.

MIKOLAJEWICZ, U. et MAIER-REIMER, E. 1990. Internal secular variability in an ocean general circulation model, *Climatology Dynamic*, 4, 145-156.

PERKINS, A.M. 1981. Observation under electron microscopy of magnetic minerals extracted from speleothems, *Earth and Planetary Science Letters*, 1, 139, 281-289.

ROGNON, P. 1976. Essai d'interprétation des variations climatiques au Sahara depuis 40 000 ans. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 18, 251-282.

ROUSSEAU, L., BEAUCHAMP, J., CHAIGNEAU, C., ANNARATONE, F., SUEUR, J.M. & CAIRANNE, G. 2004a. Mise en évidence d'une activité bactérienne dans des karsts fossiles et actuels du Pléistocène moyen à l'actuel. In : " *Microbialithes et communautés microbiennes dans les systèmes sédimentaires* ", Eds G. Camoin et P. Gautret, abstract book, publication ASF, Paris, 46, 123 p.

ROUSSEAU, L., BEAUCHAMP, J., MASSON, V., CHAIGNEAU, C., ANNARATONE, F., SUEUR, J.M. & GOSSE, M. 2004b. Données expérimentales sur le rôle des bactéries dans la carbonatogénèse en milieu souterrain. Utilisation des antibactériens. In : " *Microbialithes et communautés microbiennes dans les systèmes sédimentaires* ", Eds G. Camoin et P. Gautret, abstract book, publication ASF, Paris, 46, 123 p.

ROUSSEAU, L., BEAUCHAMP, J., FALGUERES, C., EMBLANCH, C., GENTY, D., BAHAIN, J-J. & BLAMART, D. 2005. Apport des marqueurs isotopiques et biogéochimiques dans la reconstitution du paléoenvironnement de la grotte

du Lazaret (Nice, Alpes-Maritimes) au cours du Pléistocène supérieur (stade isotopique 5), *Comptes Rendus Geosciences*, 337, 15, 1348-1354.

ROUSSEAU, L., BEAUCHAMP, J., BAHAIN, J.-J., BOUDAD, L., DESCHAMPS, P., FAGUERES, C., GHALEB, B., LARTIGOT, S. & POZZI, J.-P. 2006. Premiers résultats d'une étude pluridisciplinaire menée sur les travertins quaternaires au Maroc, *Quaternaire*, 17, (4), 343-350.

SANDERS, J.E. & FRIEDMAN, G.M. 1967. Origine and occurrence of limestones, *In*: G.G. Chilingar, H.J. Bissel and R.W. Fairbridge (Ed.), *Developments in sedimentology*, 9A. Carbonate Rocks. Elsevier, Amsterdam, 169-265.

SHACKLETON, N. J. & OPDYKE, N.D. 1976. Oxygen-isotope and paleomagnetic stratigraphy of

Pacific core V28-239 : Late Pliocene to latest Pleistocene; *In*: investigation of Late Quaternary Paleooceanography and Paleoclimatology, R. M. Cline and J. D. Hays, Editors; *Geological Society of America, Mem.* **145**, 449-464.

WEISROCK, A. 1980. Géomorphologie et Paléo-environnements de l'Atlas atlantique, Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 332, 487 p.

WEISROCK, A., WENGLER L., MATHIEU, J., OUAMMOU, A., FONTUGNE, M., MERCIER, N., REYSS, J.-L., VALLADAS H. & GUERY, P. 2006. Upper Pleistocene comparative OSL, U/Th and ¹⁴C datings of sedimentary sequences and correlative morphodynamical implications in the South-Western Anti-Atlas (Oued Noun, 29°N, Morocco). *Quaternaire*, 17, 45-59.

Article accepté et publié après avis du Pr. M. Aberkan, FS, Rabat et M. Mouhiddine, FLSH, Ben Msik, Casablanca (Comité de Lecture, RQM4).