

Chronologie (^{14}C et Th/U) des épisodes humides
majeurs du Quaternaire récent au Sahara :
sites choisis du programme PALHYDAF

*Radiocarbon and Th/U chronologies
of humid episodes of Late Quaternary from Sahara:
Selected sites of PALHYDAF Programme*

K. ZOUARI, É. GIBERT ET C. CAUSSE

RÉSUMÉ – Les reconstitutions paléoclimatiques depuis le dernier interglaciaire obtenues dans le cadre du programme PALHYDAF, en Afrique boréale, reposent sur l'analyse pluridisciplinaire de séquences sédimentaires continues prélevées dans des sites choisis en fonction de critères d'exploitation et de validation optimales des données attendues. L'établissement d'un cadre chronologique validé est considéré comme la clé de ce type de reconstitution. Les principaux résultats du programme PALHYDAF présentés ici concernent les deux phases humides majeures centrées autour de 90-100 and 130-140 ka et qui pourraient correspondre aux optima climatiques définis par la climatos-tratigraphie océanique. Un des nouveaux résultats est la mise en évidence en Tunisie, d'une période humide, sans doute d'intensité fluctuante, autour de *ca.* 20-40 ka.

Mots clés : paléoclimatologie, paléohydrologie, radiochronologie, Quaternaire supérieur, PALHYDAF.

*

ABSTRACT – Paleoclimatic reconstructions from the Last Interglacial period inferred from PALHYDAF results in Boreal Africa, lie on pluridisciplinary studies of continuous lacustrine sequences cored on selected sites, in order to acquire the most valuable and reliable data. This implies the establishment of reliable chronological frameworks. Major results of the PALHYDAF program presented in this paper document the two main humid phases centered at

ca. 90-100 and 130-140 ka which could be related to climatic optima defined by the oceanic climatostratigraphy. A new result is the evidence of one humid period probably marked by several dry/wet spells at around 20-40 ka, in southern Tunisia.

Keywords: paleoclimatology, paleohydrology, radiochronology, Late Quaternary, PALHYDAF.

*

Abridged English Version

INTRODUCTION

As proposed in 1984 by Fontes and Gasse, PALHYDAF program (PALaeo-HYDrology in AFRICA) aims to reconstruct climatic variation in Africa (north of the Equator) since the Last Interglacial, from pluridisciplinary studies of sedimentary sequences along two meridian transects (Fig. 1 ; Fontes and Gasse, 1986, 1991).

The selection of sampled sites lies on basic constraints : endoreic basins, with low hydraulic gradient, located on permeable substratum, free of tectonic or volcanic activities, and in carbonated catchment areas. Environmental reconstructions in terms of global climate need a well-certified chronological framework, after discussion of possible causes of age distortion (Fontes and Gasse, 1992). We present here a review of chronological data from some PALHYDAF sites, with addition of new dates in order to complete first conclusions.

SELECTED SITES

On the east transect, the south Tunisia offers two sites representative of hydrological budget during the Late Quaternary. They correspond respectively to Wadi el Akarit and Chotts El Fejej and Jerid (Fig. 2) which present various lacustrine deposits as clay, carbonate, gypsum, and peatbog sediments, interbedded in fluvial or eolian detrital-rich sequences. Tunisian Chott deposits are particularly rich in shell accumulations. Faunal and microfloral assemblages including molluscs, ostracods and diatoms, allow reconstructions of salt balances which fluctuated from fresh water to sea water salinity (Gasse *et al.*, 1987).

From northern Niger, quaternary deposits of Adrar Bous Site located near the Air Heights correspond to shell-free clayish sands and diatomites, sometimes calcareous. Chronological data were obtained on impure carbonates or organic matter and conduct to the interpretation of hydrodynamic parameters of the shallow aquifer (Dubar, 1988).

In northern Algeria, the sebkha Mellala, fed by groundwaters registers without delay rainfall variations on the Atlasian ranges. Sediments consist in the alternation of gypsum and shell-rich carbonated sequences in which stoichiometric calcite characterises high water levels (Gibert *et al.*, 1990).

Quaternary lacustrine relicts were also found in southern Algeria, at Kadda (Erg Chech) and Azzel Matti (Tanezrouft) sites. If shell-rich sediments of Azzel Matti define a reliable Th/U chronology, Kadda carbonates constituted by several crystallisation phases gave questionable ages.

CHRONOLOGICAL DATA

A. Basic requirements for dating validation

The validation of ^{14}C ages on both inorganic carbonates and organic matter requires : (i) equilibration of TDIC (Total Dissolved Inorganic Carbon) with atmospheric CO_2 , (ii) authigeny of dated materials and (iii) absence of post-sedimentary recrystallisation. If the age consistency with stratigraphy and the agreement between ages obtained on various materials from one specific level are considered as positive criteria, they cannot demonstrate the validity of the chronology. Comparison with an other independent chronometer remains necessary (Talbot and Kelts, 1986; Causse *et al.*, 1988; Zouari, 1988; Fontes *et al.*, 1993, 1995).

The original cause of Th/U disequilibrium is high solubility of uranium and insolubility of thorium in natural waters. Thus the validity of Th/U dating mainly depends on preservation of initial U content (or early diagenetic U content for organic carbonates), and generally on closed system conditions, as for radiocarbon dating, with special attention for impure carbonates (Causse, 1992 and Causse *et al.*, 1993). A frequency histogram of Th/U ages will be more representative than isolated results as the best validation corresponds to age consistency for several samples from one geological feature.

B – Discussion of chronological results

1) *Late Glacial and Holocene phases*. – Distortion between apparent and real radiocarbon ages on modern material such as Gastropods and aquatic plants are clearly illustrated in Wadi el Akarit (see Table, after Zouari, 1988). The establishment of a correction model results in agreement between ^{14}C and Th/U ages for fossil material. In other cases, direct consistency between these two dating methods were obtained notably on deposits from northern Algeria and Niger. These results evidenced that return to humid conditions occurred in two steps, at about 14 ka BP and 9.5 ka BP as observed in northern Algeria. In southern Tunisia only the second step was recorded.

2) *Late Pleistocene*. – Numerous ^{14}C ages previously comprised between 20 and 40 ka BP (Page, 1972; Richards and Vita-Finzi, 1982; Ben Oueddou

et al., 1986; Zouari, 1988) gave older Th/U ages (Causse *et al.*, 1989 and new data here reported). However, eight shell samples from Sidi Ali Bou Lafi Site, near Tozeur (Tunisia) provide almost similar ^{14}C and Th/U ages (Figs. 4 and 5) for the 20-40 ka period. Without any assumption on the extension of water bodies developed at that time, conditions wetter than today have provoked groundwater rises (Fontes and Gasse, 1991) and, at least in southern Tunisia, the establishment of *quasi* permanent lakes or ponds.

From two Th/U isochron methods (Hillaire-Marcel and Causse, 1989; Ludwig and Titterton, 1994) two distinct humid phases at 90-100 and 130-150 ka are recorded from tunisian chott area (Figs. 4 and 5). Despite of lower correlation, identical Th/U calculations have lighted one or two humid pulses in northern Sahara, between 80 and 100 ka (Causse *et al.*, 1988; Gibert, 1989). Lacustrine sediments of Adrar Bous could have also registered this 80-100 ka phase. As apparent ages are not in agreement with the stratigraphy, it has been assumed that the sediments represent the end member of the mixing of concretions due to an old humid event and a more recent crystallization phase (Fig. 3; Fontes and Gasse, 1991). The 130-140 ka period has only been recognised in southern Tunisia. Although the Th/U measurements were performed by alpha mass spectrometry producing ages with large error bars, both the high correlation indices and well-defined slope of isochrons could indicate strictly clued ages, related to a relatively short humid phase. These data are well correlated with those previously obtained in Wadi Shati area (Gaven *et al.*, 1981).

3) Middle Pleistocene – The three alpha spectrometric ages around 200 ka obtained in southern Tunisia have to be considered with caution because they are close to the practical limit of the method. Nevertheless, a sample of *Ostrea stentina* close to secular equilibrium according to alpha spectrometry, gave an age equal to 206 ± 12 ka by TIMS (analyse performed at GEOTOP, Montréal, in collaboration with B. Ghaleb). This sample is probably an equivalent of the 35 ka ^{14}C -dated sample of Richards and Vita-Finzi (1982).

Variations of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios indicative of different initial conditions as well as geological settings preclude the calculation of an isochron and limit the significance of these data. Although a Middle Pleistocene age has already been cited in Egypt (Szabo *et al.*, 1989), the existence of this humid episode has to be assessed.

CONCLUSION

PALHYDAF results have evidenced that a chronology validation firstly requires a geochemical control of radiometric data of each specific method. Causes of age distortion in continental sediments are various, such as hard water effect, groundwater supplies, and post-sedimentary recrystallisation

and/or contamination. Each geological sample has thus to be considered as a complex geochemical system.

Major results of the PALHYDAF program concern the timing of climatic events such as the return to humid conditions at 14 ka BP during the Late Glacial period and dry/wet oscillations in good agreement with the European climatostratigraphy during the Holocene, on the northern and southern margins of the Sahara. The two major humid phases centred around 90-100 and 130-140 ka, could be related to climatic optima defined by the marine climatostratigraphy. A new result is the evidence of one humid period probably marked by several dry/wet spells at around 20-40 ka, producing at least in southern Tunisia *quasi* permanent water bodies.

*

Version française

INTRODUCTION

Proposé dès 1984 par J.-Ch. Fontes et F. Gasse, le programme PALHYDAF (PALéoHYDrologie en AFrique) avait pour objectif la reconstitution des variations climatiques en Afrique boréale, depuis le dernier interglaciaire, à partir d'études pluridisciplinaires du contenu sédimentaire de sites répartis au long de deux transects méridiens (Fig. 1). Ces sites ont été choisis en fonction de critères d'exploitation et de validation optimales des résultats analytiques attendus (Fontes et Gasse, 1986 et 1991).

Les sites d'étude relèvent de bassins sédimentaires fermés, susceptibles de conserver les séquences sédimentaires les plus complètes. Ils sont caractérisés par un faible gradient hydraulique de façon à limiter les apports détritiques grossiers. Ils reposent sur un substratum perméable, bien drainé, où le développement des biomarqueurs ne peut être entravé par les effets de sursature. Ils se situent dans des bassins versants riches en carbonates dont la présence en solution favorise la précipitation de carbonates (chimiques et biogènes) authigènes, matériaux particulièrement propices aux analyses géochimiques (isotopes stables du carbone et de l'oxygène) et chronologiques (^{14}C et Th/U). Enfin la proximité de fractures profondes ou d'appareils volcaniques a été évitée de façon à s'affranchir d'apports de CO_2 d'origine profonde qui altérerait la traduction des mesures d'activité radiocarbone en données chronologiques justes.

La finalité de ce type de reconstitution est l'interprétation des variations observées en terme de paramètres du climat global, de façon à tester les modèles climatiques et paléoclimatiques, ce qui ne prend un sens que dans un cadre chronologique soigneusement validé (Fontes et Gasse, 1992). En raison des distorsions toujours possibles entre une mesure de radiocarbone, ou celle d'un

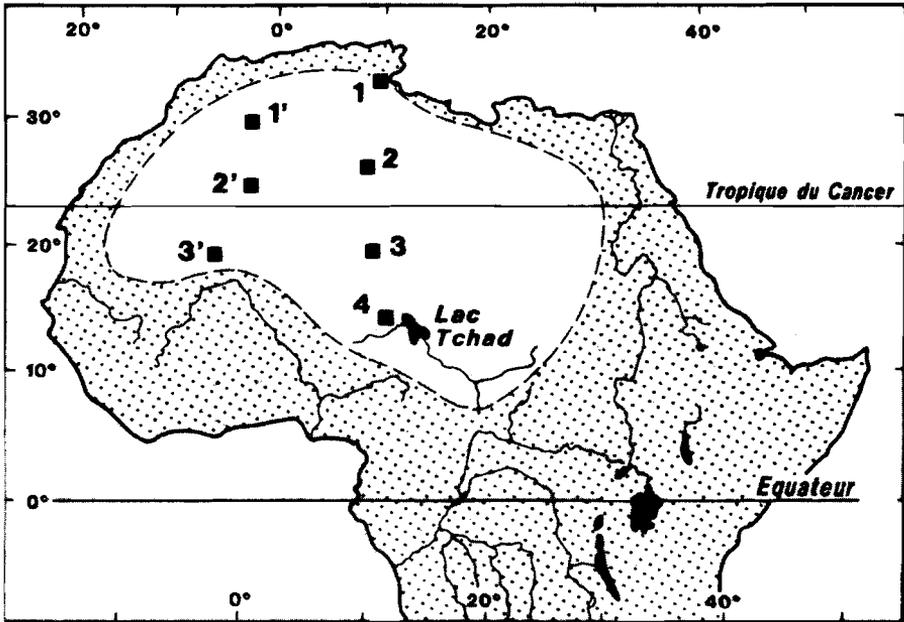


FIGURE 1.

Localisation des sites du programme PALHYDAF, le long de deux transects méridiens, et dans une zone d'endoréisme dont les contours actuels sont indiqués par une ligne discontinue (d'après Fontes et Gasse, 1991).

Location map of PALHYDAF sites, along two meridian transects, and in endoreic area delineated by a dotted line (from Fontes and Gasse, 1991).

rapport d'activité $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, et la donnée chronologique correcte attendue, il n'est pas tenu compte de données isolées ou de simples catalogues de données non analysées en fonction d'un contexte géochimique défini (cf. Fontes et Gasse, 1989, pour une critique de collections non synthétiques de données disparates). Nous présentons donc ici un bilan des données chronologiques produites dans le cadre du programme PALHYDAF auxquelles nous associons quelques données nouvelles aux fins de comparaison et de validation.

PRÉSENTATION DES SITES ÉTUDIÉS

A. Transect Est (17-34,5°N; 8-11°E)

1) Secteur 1 : Sud Tunisie

Localisation des sites et données sédimentologiques

Les deux sites choisis pour cette étude, la basse vallée de l'oued el Akarit et la région des chotts (Fig. 2), sont représentatifs des conditions de bilan hydrologique dans le sud tunisien au cours du Quaternaire supérieur.

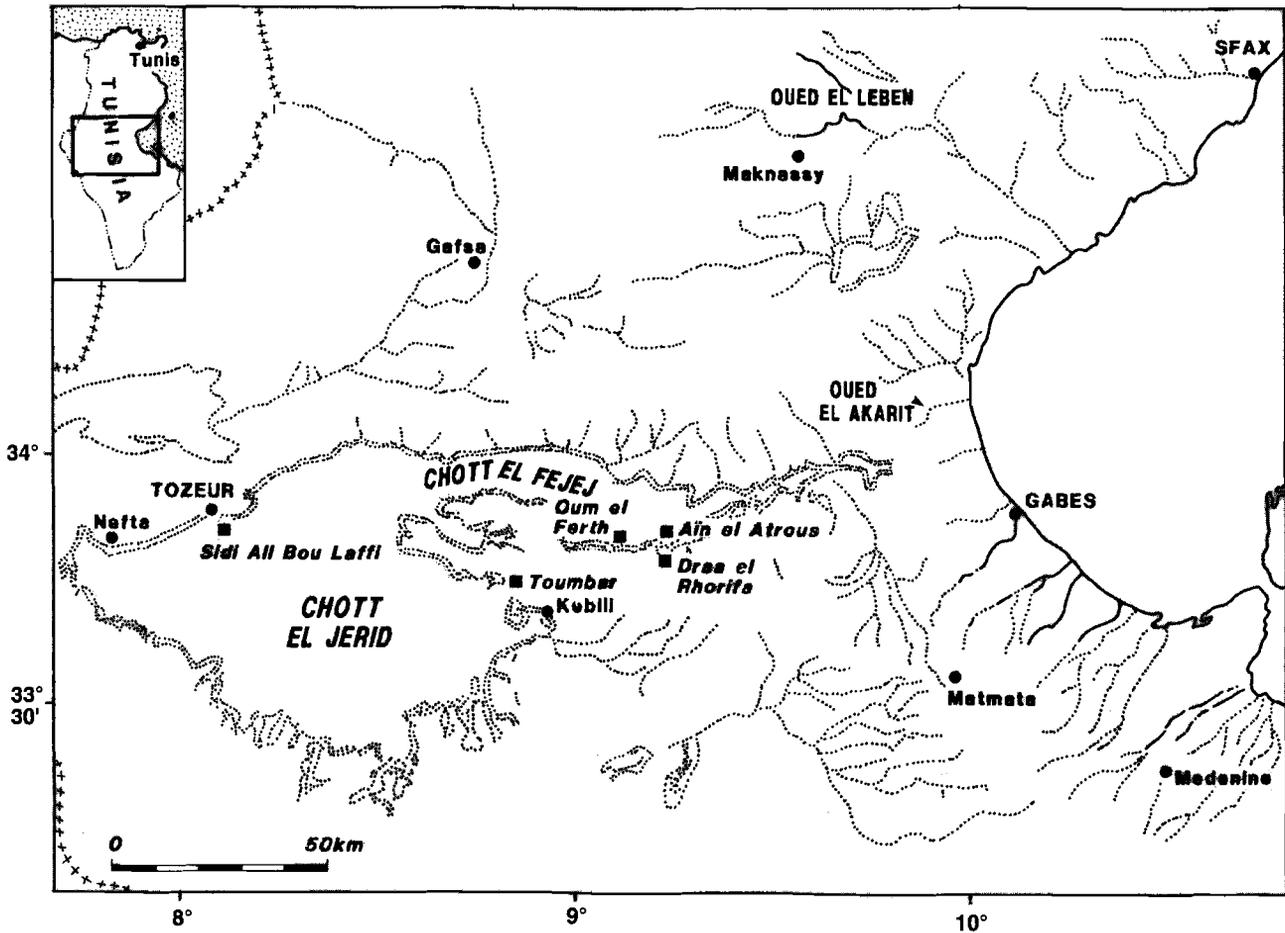
Sur le site de l'oued el Akarit, le Quaternaire affleure en discontinuité sur treize mètres d'épaisseur environ. Les dépôts, riches et diversifiés, renferment également des industries préhistoriques variées : acheuléen, moustérien et industrie à lamelles (Gobert *et al.*, 1952 ; Coque, 1962 ; Ben Oueddou *et al.*, 1986). Les échantillons ont été collectés à partir des coupes affleurant sur plus de dix mètres d'épaisseur sur les berges de l'oued et deux carottages continus ont été réalisés à l'amont (23,7 m) et à l'aval (20 m) de son cours permanent. Ces sondages montrent des dépôts fins reflétant plusieurs épisodes lacustres ou palustres (silts argileux, carbonates, tourbes, gypse) séparés par des phases d'apport détritique (dépôts fluviaux ou éoliens).

Les chotts du sud tunisien (Djerid et Fedjej), situés dans une vaste structure synclinale bordée par plusieurs reliefs, correspondent à la zone de décharge des grandes nappes sahariennes. Il s'agit aujourd'hui d'une des parties les plus arides de la Tunisie (pluviosité moyenne annuelle de l'ordre de 130 mm ; température moyenne mensuelle allant de 25 à 40 °C et évaporation de l'ordre de 2 500 mm/an), caractérisée par des témoins lacustres très importants, dont l'altitude peut atteindre 45 m (Fig. 2). Ces dépôts jalonnent des paléorivages témoignant de l'ennoyage graduel du bassin. Ils sont carbonatés, sablo-argileux ou sablo-gypseux, plus ou moins cristallisés et oxydés, parfois riches en galets et graviers émoussés, et contiennent souvent des lumachelles. La macrofaune est essentiellement constituée de Lamellibranches (*Cerastoderma glaucum* nombreux, à valves souvent entières et parfois en connexion, et *Ostrea stentina*, généralement non en place, repris dans des dépôts plus récents sous forme de valves épaisses et plus ou moins roulées) et Gastéropodes (*Hydrobia*, *Melanoides tuberculata*, *Melanopsis praemorsa*, *Potamides conicus*, *Cerithium rupestre*) indiquant des fluctuations importantes de la salinité du milieu. La microfaune et la microflore confirment ces variations. Depuis des eaux douces à oligosalines, dans lesquelles ont pu se développer les diatomées *Melanosira granulata*, *Fragilaria brevistriata*, ou l'ostracode *Candona sp.*, l'évaporation a conduit à des eaux dont la salinité était proche de celle de l'eau de mer, et où ont pu se développer des foraminifères tel *Ammonia tepida*, des diatomées telle *Synedra tabulata*, des ostracodes tel *Cyprideis torosa* (Gasse *et al.*, 1987).

2) Secteur 3 : Nord Niger

Localisation des sites et données sédimentologiques

En bordure nord-est du massif de l'Aïr, les reliefs à morphologie annulaire de l'Adrar Bous présentent des dépôts quaternaires, pauvres en macrofossiles, dans des dépressions fermées. L'abondance des vestiges archéologiques a justifié plusieurs études dont le cadre chronologique restait à préciser (Williams *et al.*, 1987 ; Roset, 1983 et 1987).



Les carottages (5 à 7,5 m de profondeur) réalisés dans ce secteur montrent une sédimentation plus ou moins fine, dépourvue de macrofossiles. On relève la présence de sables argileux, de diatomites parfois calcaires et riches en biomarqueurs divers (diatomées, ostracodes, charophytes) et de calcaires dont la fraction inférieure à 80 micromètres représentée par des rhomboèdres automorphes de calcite serait authigène (Dubar, 1988).

Les données chronométriques ont été obtenues sur carbonates impurs (U/Th) et sur carbonates ou matière organique (^{14}C) à partir des séquences 85/S1 et 86/S5 (Fig. 3). Ces résultats ont permis de proposer une interprétation des paramètres hydrodynamiques de la nappe dans une région qui reçoit actuellement moins de 50 mm/an de précipitations annuelles, et où le niveau piézométrique est inférieur à la profondeur maximale atteinte par les carottages.

B. Transect Ouest (25-32 °N ; 5 °W-2 °E)

Secteurs 1' et 2' : Algérie (Sahara nord-occidental)

Localisation des sites et données sédimentologiques

Dans le nord de l'Algérie, la sebkha Mellala est une dépression fermée, d'origine éolienne, essentiellement alimentée par la remontée de la nappe phréatique, elle-même en continuité hydraulique avec les aquifères sous-jacents, à la faveur de failles verticales. Cette situation particulière fait de ce bassin un enregistreur fidèle des fluctuations des précipitations dans les zones de recharge des nappes, *i.e.* les zones du M'zab et de l'Atlas.

Les échantillons collectés par sondages et sur des buttes témoins correspondent à des successions de zones gypsifères et de niveaux plus carbonatés, généralement associés à des développements coquilliers (*Cyprideis torosa*, *Potamides conicus* et *Cerastoderma glaucum*). Des analyses au microscope électronique à balayage ont révélé la présence de carbonates authigènes dans la fraction inférieure à 80 micromètres. Ces carbonates évoluant de l'aragonite à la calcite fortement magnésienne et à la calcite stoechiométrique ont mis en évidence des cycles complexes de mise en eau-assèchement (Gibert *et al.*, 1990).

Dans le sud de l'Algérie, les sites de Kadda et de l'Azzel Matti, situés respectivement dans l'Erg Chech et sur le Tanezrouft, correspondent à des accumulations de dépôts lacustres quaternaires dans des zones aujourd'hui hyper arides. Ces formations sont composées d'alternances marno-calcaires

◀ FIGURE 2.

Localisation des sites du secteur 1 (sud tunisien) :
Oued el Akarit et région des chotts.

Location of southern tunisian sites, sector 1:
Wadi el Akarit and Chott Region.

et sableuses. Le site de l'Azzel Matti présente des niveaux coquilliers relativement abondants sur lesquels ont été effectuées les mesures chronométriques. À l'inverse les sédiments de Kadda, dépourvus de macrofossiles mais plus riches en matière organique, présentent plusieurs phases de cristallisation carbonatée superposées, ce qui a rendu l'interprétation de la chronologie difficile.

DONNÉES CHRONOLOGIQUES

A. Principes de validation des données radiométriques

1) *Datation radiocarbone*

La validité des âges ^{14}C obtenus tant sur la matière organique que sur les carbonates inorganiques ou biogènes, collectés dans les sédiments lacustres ou palustres, repose essentiellement sur trois conditions : (i) équilibre du CITD (Carbone Inorganique Total Dissous) et du réservoir atmosphérique, (ii) authigénie du matériau daté, et (iii) absence de cristallisation post-sédimentaire. Généralement, la preuve du respect de ces conditions ne peut être directement établie. En effet, un déséquilibre actuel entre le CITD et le réservoir atmosphérique conduit à un vieillissement aléatoire des âges (Zouari, 1988; Fontes *et al.*, 1995) ; des recristallisations aragonite-aragonite, indécélables, ne peuvent être écartées en milieu riche en magnésium (Causse *et al.*, 1988) ; enfin, la part allochtone d'un matériau reste bien souvent soit difficilement observable soit difficilement quantifiable (Talbot et Kelts, 1986 ; Fontes *et al.*, 1993). La concordance des âges obtenus sur matière organique et inorganique d'un même échantillon ainsi que la cohérence avec la position stratigraphique restent des critères positifs mais non des preuves de validité d'une chronologie. En fait, une comparaison directe avec un chronomètre indépendant est nécessaire.

2) *Datation par le déséquilibre Th/U*

En raison de la solubilité de l'uranium et de l'insolubilité du thorium dans les eaux naturelles, cause originelle du déséquilibre Th/U, la validité des âges obtenus par la mesure de ce déséquilibre repose essentiellement sur la constance du stock initial d'uranium, ou de la quantité fixée dès les premiers stades de la diagenèse (cas des carbonates organiques).

Les critères de clôture du système géochimique sont donc proches de ceux qui ont été évoqués ci-dessus, les phénomènes de recristallisation et diagenèse post-sédimentaire étant tout à fait rédhibitoires (Causse *et al.*, 1993). À cet égard, un histogramme de fréquence des âges apparents est plus représentatif de la chronologie qu'un tableau de résultats individuels, le meilleur critère de validité restant la convergence des âges obtenus pour un ensemble d'échantillons relevant d'une même formation géologique.

Dans les sédiments lacustres, la présence fréquente de carbonates impurs, à composante détritique mécaniquement indissociable, impose l'utilisation de méthodes isochrones pour le calcul du temps de résidence de l'uranium dans la seule phase authigène (*cf.* Causse, 1992, pour une revue de ces méthodes).

B. Discussion des résultats : essai de reconstitution des phases humides

1) Phases tardiglaciaire et holocène

Les cas de distorsion importante entre âge apparent ^{14}C et âge vrai sont parfaitement illustrés par les échantillons vivants de gastéropodes (*Melania*, *Melanopsis* et *Hydrobia*) et de plantes aquatiques (*Potamogeton*) de l'oued el Akarit (mission 1987), qui tous ont livré des âges apparents égaux ou supérieurs à 10 000 ans BP (tableau ci-dessous).

Teneurs isotopiques de coquilles et végétaux vivants de l'oued el Akarit
Isotopic contents of living shells and plants from wadi el Akarit

Matériel	^{13}C (‰)	^{14}C (%)	Âges apparents
<i>Melanoïdes</i>	- 5,66	25,0 ± 1,5	11 100 ± 500
<i>Hydrobia</i>	- 4,66	29,0 ± 1,6	9 950 ± 440
<i>Melanopsis</i>	- 3,78	19,3 ± 0,9	13 230 ± 380
<i>Potamogeton</i>	- 15,00	15,5 ± 0,7	15 000 ± 390
CITD de la nappe	- 8,56 à - 12,17	9,5 ± 0,4	18 500 ± 500

Ceci a permis d'établir un modèle de correction des âges apparents, prenant en compte l'apport du carbone ancien dissous dans les nappes profondes (Fontes *et al.*, 1983 et Zouari, 1988). Après correction, les âges ^{14}C et Th/U se sont avérés concordants et en position stratigraphique.

Toutefois, la concordance directe entre les deux types de chronologie a été obtenue sur les sites algériens de la sebkha Mellala (Gibert *et al.*, 1990; Fontes *et al.*, 1992) ou encore sur la partie supérieure des sondages de l'Adrar Bous au Niger (Dubar, 1988; Fontes et Gasse, 1991).

Pour la partie nord du transect ouest, le retour des conditions humides au Tardiglaciaire serait intervenu il y a 14 000 ans environ, pour une brève période de 2 000 ans. Une deuxième phase humide apparaît dès 9 500 ans BP et culmine vers 8 400 ans BP. En Tunisie, seule cette deuxième phase a été mise en évidence vers 11 000 ans. Cette période humide s'achèverait vers 3 000 ans BP (Zouari, 1995).

2) Pléistocène supérieur

Problème de l'existence de pulsations humides vers 20-40 ka

Parmi les nombreux âges ^{14}C compris entre 20 et 40 ka BP (Page, 1972 ; Richards et Vita-Finzi, 1982 ; Ben Oueddou *et al.*, 1986 ; Zouari, 1988), un grand nombre a livré des âges U/Th beaucoup plus anciens (Causse *et al.*, 1989 et nouveaux résultats ci inclus). Par exemple, des âges isochrones $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$ proches de 33 et 38 ka ont été obtenus sur échantillons totaux de sédiments argilo-carbonatés provenant des sondages 85/S1 et 86/S5 de l'Adrar Bous (Dubar, 1988), tandis que ces mêmes niveaux livraient des âges ^{14}C apparents plus récents (Fig. 3), et en discordance stratigraphique.

Cependant, huit échantillons provenant du site de Sidi Ali Bou Lafi, près du village de Tozeur (Fig. 2) livrent des âges individuels ou des âges isochrones U/Th (Figs 4 et 5) proches des âges ^{14}C obtenus sur deux d'entre eux : 27,8 ($\pm 0,88$) et 33,8 ($\pm 0,11$) ka BP. Ces résultats suggèrent fortement que des spécimens de *Melania tuberculata* et *Melanopsis praemorsa* ont pu se développer vers 20 à 40 ka (Chkir *et al.*, 1995). Sans que l'on puisse juger de l'importance et de l'extension des lacs (ou des mares) dans lesquels ont vécu ces organismes, il semble que la remontée des eaux souterraines liée à cette pulsation humide (Fontes et Gasse, 1991) ait conduit à l'établissement de plans d'eau quasi permanents, au moins dans le sud tunisien.

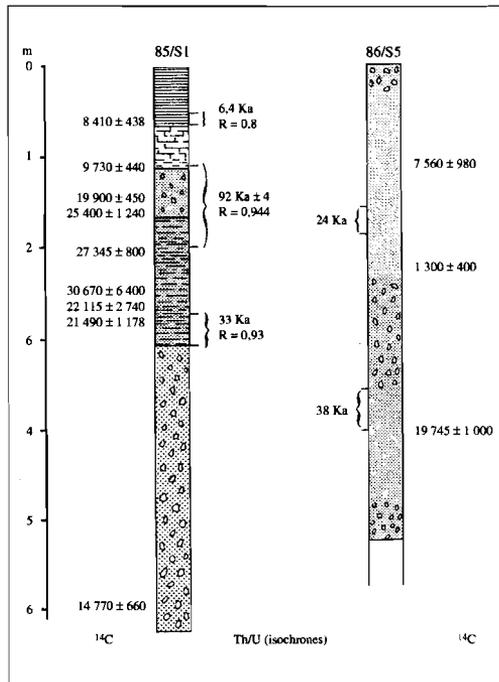


FIGURE 3.

Données chronologiques ^{14}C et Th/U et séquences stratigraphiques de deux sondages de l'Adrar Bous (Nord-Niger).

Description, ^{14}C and Th/U chronologies of two cores from Adrar Bous sector (Northern Niger).

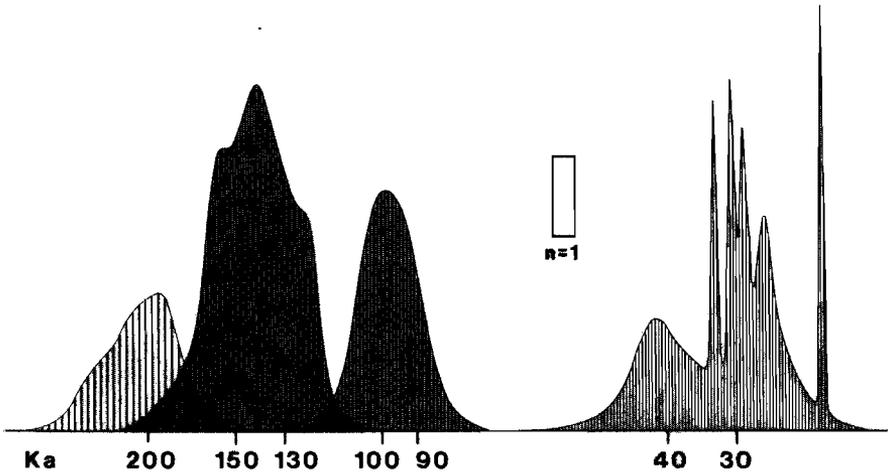


FIGURE 4.

Histogramme de fréquence des âges apparents U/Th (corrégés de l'éventuelle contribution en thorium détritique) des échantillons provenant des chotts tunisiens. Chaque âge est représenté par la distribution gaussienne de la valeur de son rapport d'activité $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ($\pm 3\sigma$). On remarque la grande précision des analyses par spectrométrie de masse obtenues pour quelques échantillons de la phase pléistocène la plus récente.

Frequency histograms of Th/U apparent ages (corrected for detrital thorium) from tunisian chott deposits. Each single age is represented by gaussian distribution of its $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ activity ratio ($\pm 3\sigma$). High precision of TMS analyses is obvious for some youngest Late Pleistocene samples.

Les phases humides majeures autour de 90-100 ka et 130-140 ka

Pour les chotts sud-tunisiens, la distribution des âges, corrigés de l'éventuelle contribution en thorium détritique, observée sur l'histogramme de fréquence (Fig. 4), montre l'existence de deux phases humides distinctes, apparemment centrées autour de 90-100 ka et 130-140 ka. Pour chacun de ces épisodes le calcul des corrélations isochrones (*e.g.* Hillaire-Marcel et Causse, 1989) a livré des âges de 97 et 137 ka, avec des coefficients de corrélation respectivement égaux à 0,999 et 0,997. Une confirmation de ces résultats a été obtenue par l'application des équations proposées par Ludwig et Titterington (1994 ; *cf* Zouari *et al.* 1996).

Pour le Sahara nord-occidental, sur le site de l'Azzel Matti, les mêmes calculs ont livré un âge isochrone égal à 92 ka, avec une corrélation toutefois inférieure (Causse *et al.*, 1988). Sur le site de Kadda, deux sédiments carbonatés suggèrent une (ou deux?) phase de mise en eau de la région entre 80 et 100 ka.

Cette phase humide serait également représentée au Nord Niger, où un âge isochrone obtenu sur des carbonates impurs (92 ± 4 ka, $R = 0,944$) en serait le témoin. Il est également possible que cet âge ne représente qu'une moyenne entre une phase plus ancienne et une reprise de cristallisation plus récente, ce qui a par ailleurs été évoqué pour rendre compte des âges isochrones à 38, 33 et 24 ka obtenus pour d'autres niveaux des sondages 85/S1 et 86/S5 (Fontes et Gasse, 1991). Ceci est en outre la seule explication possible de la discordance observée entre la stratigraphie et la chronologie ^{14}C (Fig. 3).

La phase antérieure, centrée autour de 130-140 ka, ne serait présente que dans les chotts du sud tunisien. Les mesures du déséquilibre $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ayant été obtenues par spectrométrie alpha, leur précision laisse une large incertitude de détermination de l'âge recherché. Cependant, le calcul de l'âge isochrone livre un coefficient de corrélation élevé ($R = 0,997$) et une pente étroitement déterminée : $0,77 \pm 0,03$, ce qui relèverait d'une faible dispersion des âges vrais de ces échantillons, et par suite de la faible durée de la phase humide correspondante.

À l'est des régions relevant du programme PALHYDAF, le sud libyen avait déjà révélé l'existence de grands lacs développés autour de 90 et 130 ka (Gaven *et al.*, 1981).

3) *Pléistocène moyen*

En ce qui concerne les âges proches de 200 ka, obtenus sur quatre échantillons seulement prélevés dans des buttes-témoins des chotts sud-tunisiens, il importe de remarquer que les erreurs statistiques de comptage sont ici très élevées, traduisant l'approche des limites de la spectrométrie alpha pour cet âge.

Toutefois, un échantillon d'*Ostrea stentina* récemment analysé par spectrométrie de masse à thermo-ionisation a livré un âge égal à 206 ± 12 ka (analyse réalisée au GEOTOP, Montréal, en collaboration avec B. Ghaleb). Par spectrométrie alpha, cet échantillon n'avait livré que des rapports d'activité proches de l'équilibre, avec une contribution non négligeable en thorium détritique, d'où le maintien de l'hypothèse de R. Coque (1962) de remaniement de dépôts crétacés (Causse *et al.*, 1991). Il s'agit vraisemblablement d'échantillons équivalents à ceux qui ont livré des âges ^{14}C de 25 et 35 ka BP (Richards et Vita-Finzi, 1982). En fait, les données radiométriques, même parfaitement fiables au plan analytique, sur un tel type d'échantillons ne peuvent être considérées que comme des indications chronométriques à préciser par les mesures de comptage d'ions.

Par ailleurs, il paraît difficile de considérer que les quatre données relatives à un âge pléistocène moyen relèvent d'un même ensemble. L'un des échantillons est manifestement non en place dans la formation sédimentaire.

D'autre part, une donnée géochimique indicatrice du milieu de formation, à savoir le rapport d'activité $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, présente des valeurs très variables : 1,71 ($\pm 0,05$), 1,96 ($\pm 0,04$), 2,33 ($\pm 0,05$) et 1,24 ($\pm 0,02$).

En résumé, si un âge pléistocène moyen a été déjà mentionné en Afrique septentrionale (Szabo *et al.*, 1989), et si nos propres données semblent indiquer des conditions humides autour de 200 ka, il reste à confirmer l'existence et l'importance d'une phase humide au pléistocène moyen.

CONCLUSION

Les travaux réalisés dans le cadre du programme PALHYDAF ont mis en évidence que la validation de toute chronologie, fondement de toute reconstitution paléoclimatologique, passe par un contrôle géochimique systématique des données propres à chaque méthode radiométrique utilisée. Un matériau géologique ne peut pas être considéré comme une source de données numériques directement transformables en conclusions et encore moins en âge de formation mais comme un système géochimique dont il faut décrypter la cohérence. Les cas de distorsion entre âges ^{14}C et Th/U sont fréquents, notamment en cas d'alimentation des lacs par des eaux souterraines anciennes, ou en cas de reprise de cristallisation, même peu importante ou non apparente. En effet, la contamination d'un échantillon d'âge non fini par 1,5 pcm donne un âge apparent ^{14}C égal à 35 ka BP. Pour un âge compris dans un intervalle allant de 30 ka à 150 ka, une variation de 1,5 % du rapport d'activité $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, par départ ou apport d'uranium, produit une distorsion de l'âge apparent inférieure à la barre d'erreur due aux statistiques de comptage par spectrométrie alpha dans les conditions habituelles de mesure.

Les conclusions paléoclimatiques majeures concernent d'une part la reprise des précipitations au Tardiglaciaire et leur pérennité durant l'Holocène. Si l'absence de séquences sédimentaires complètes n'a pas permis d'en retrouver les premières étapes en Tunisie, elles sont enregistrées dès 14 ka en Algérie septentrionale. Pendant l'Holocène, les fluctuations rapides correspondant à la dernière déglaciation sont en bonne corrélation avec l'évolution climatique européenne.

D'autre part, au Pléistocène supérieur, les deux phases humides majeures recensées autour de 90-100 et 130-140 ka seraient corrélables avec les optima climatiques définis par la climatostratigraphie océanique. Cela avait été également observé au Wadi Shati dans le sud libyen.

Un résultat nouveau est la mise en évidence d'au moins une pulsation humide autour de 20-40 ka dans la partie occidentale des chotts tunisiens, plus importante qu'il n'avait été permis de le supposer (Fontes et Gasse, 1991) et impliquant l'existence de plans d'eau quasi permanents.

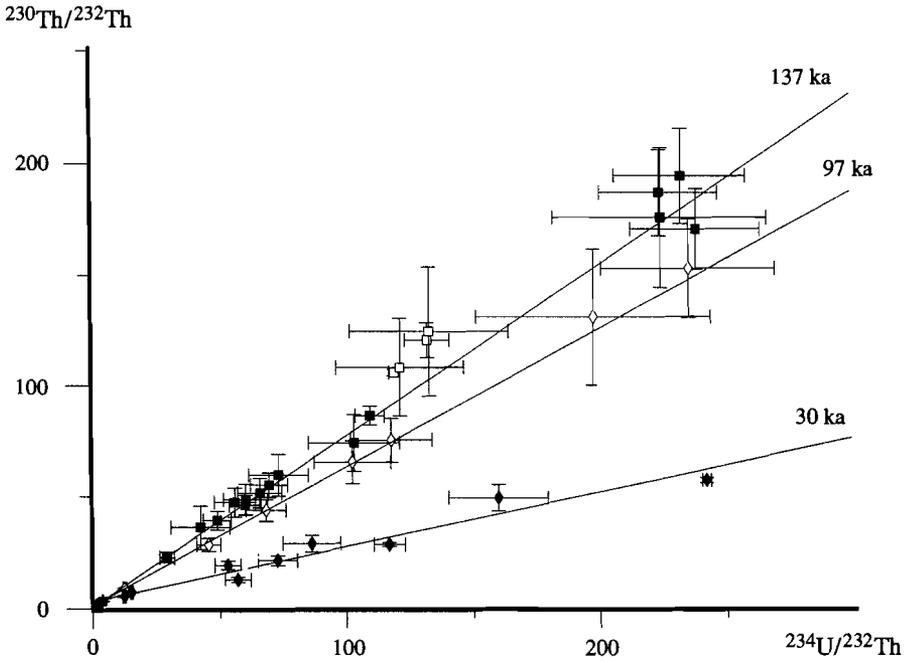


FIGURE 5.

Diagrammes isochrones correspondant aux histogrammes de fréquence de la figure 4. À l'exception de la classe d'âge proche de 200 ka, les groupes définis sont représentés par les corrélations linéaires pondérées des rapports d'activité ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) et ($^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$) affectés des erreurs statistiques de comptage ($\pm 1 \sigma$).

($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) vs. ($^{234}\text{U}/^{232}\text{Th}$) diagrams. Weighted correlations ($\pm 1 \sigma$) are represented for three age groups.

RÉFÉRENCES

- Ben Oueddou (H.), Camps (G.), Abderrazak (G.), Majhoub (K.), Zouari (K.), 1986. « Sur les dépôts du Pléistocène supérieur et de l'Holocène de la région des Chotts et de la plaine côtière du Golfe de Gabès (Tunisie) et leur place dans la stratigraphie du Quaternaire ». *C. R. Acad. Sc.*, 302 (Série II, n° 9) : pp. 659-664.
- Ben Oueddou (H.), 1991. *La partie méridionale des steppes tunisiennes : Etude géomorphologique*, Thèse de doctorat d'état. Université de Tunis I, 2 vol., 516 p.
- Causse (C.), Conrad (G.), Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), Gibert (E.), Kassir (A.), 1988. « Le dernier Humide pléistocène du Sahara nord-occidental daterait de 80-100 000 ans », *C. R. Acad. Sc.*, 306 (Série II) : 1459-1464.
- Causse (C.), Coque (R.), Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), Gibert (E.), Ben Oueddou (H.), Zouari (K.), 1989. « Two high levels of continental waters in the southern Tunisian chotts at about 90 and 150 ka ». *Geology*, 17 : 922-925.
- Causse (C.), Coque (R.), Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), Gibert (E.), Ben Oueddou (H.), Zouari (K.), 1991. « Two high levels of continental waters in the southern Tunisian chotts at about 90 and 150 ka ». *Geology*, in Forum section : A reply to Richards and Vita-Finzi comment, 19 : 95-96.
- Causse (C.), 1992. « Th/U isochron method on "dirty" but closed calcitic system : examples of calcareous concretions », *Geol. Survey of Finland*, Special Paper 15 : 33-39.
- Causse (C.), Goy (J. L.), Zazo (C.), Hillaire-Marcel (C.) 1993. « Potentiel chronologique (Th/U) de faunes Pléistocènes méditerranéennes : exemple des terrasses des régions de Murcie et Alicante (Sud-Est de l'Espagne) », *Geodinamica Acta*, 6 (2) : 121-134.
- Chkir (N.), Ben Oueddou (H.), Zouari (K.), Causse (C.), 1995. « Pleistocene humid episodes in southern Tunisia : the Tozeur Site », *XIV International Congress, INQUA 95*, Berlin, Allemagne, p. 48.
- Coque (R.), 1962. *La Tunisie présaharienne, étude géomorphologique*, Lib. A. Colin, Paris, 476 p.
- Dubar (C.), 1988. *Éléments de paléohydrologie de l'Afrique saharienne : les dépôts quaternaires d'origine aquatique du nord-est de l'Aïr (Niger, PALHYDAF Site 3)* ; Thèse Université Paris-Sud, 184 p.
- Fontes (J.-Ch.), Coque (R.), Dever (L.), Filly (A.), Mamou (A.), 1983. « Paléohydrologie isotopique de l'oued el Akarit (Sud Tunisie) au Pléistocène supérieur et à l'Holocène », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 43 : 41-61.
- Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), 1986. « PALHYDAF : état d'avancement, novembre 1985 », *INQUA-ASEQUA Symp. Int.*, Dakar, avril 1986, *Changements globaux*

- en Afrique durant le Quaternaire, Passé, Présent, Futur*, Orstom, Bondy, pp. 149-152.
- Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), 1989. « On the ages of humid Holocene and Late Pleistocene phases in North Africa remarks on "Late Quaternary climatic reconstruction for the Maghreb (North Africa) by P. Rognon" », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 70: 393-398.
- Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), 1991. « PALHYDAF (Paleohydrology in Africa) program : objectives, methods, major results », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 84: 191-215.
- Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), 1992. « Climatic changes in northwest Africa during the Last Deglaciation (16-7 ka BP) », NATO ASI Series, 12 *The Last Deglaciation : Absolute and Radiocarbon Chronologies* (E. Bard and W.S. Broecker) Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 295-325.
- Fontes (J.-Ch.), Mélières (F.), Gibert (E.), Liu (Q.), Gasse (F.), 1993. « Stable isotope and radiocarbon balances of two tibetan lakes (Sumxi Co, Longmu Co) from 13,000 BP », *Quaternary Science Reviews*, 12: 875-887.
- Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), Gibert (E.), 1995. « Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (Wesrtern Tibet). Part 1 : Chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 120: 25-47.
- Gasse (F.), Fontes (J.-Ch.), Plaziat (J.-C.), Carbonel (P.), Kaczmarska (I.), de Deckker (P.), Soulie-Marsche (I.), Callot (Y.), Dupeuble (P.A.), 1987. « Biological remains, geochemistry and stable isotopes for the reconstruction of environmental and hydrological changes in the Holocene lakes from north Sahara », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 60: 1-46.
- Gaven, (C.), Hillaire-Marcel, (C.), Petit-Maire, (N.), 1981. « A Pleistocene lacustrine episode in southeastern Libya », *Nature*, 290: 131-135.
- Gibert (E.), 1989. *Géochimie et paléohydrologie des bassins lacustres du nord-ouest saharien (Programme PALHYDAF Secteur 2')*. Thèse Université Paris-Sud, 232 p.
- Gibert (E.), Arnold, (M.), Conrad (G.), De Deckker (P.), Fontes (J.-Ch.), Gasse (F.), Kassir (A.), 1990. « Retour des conditions humides au Tardiglaciaire au Sahara septentrional (Sebkha Mellala, Algérie) », *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, VI (n° 3: 497-504.
- Gobert (E. G.), 1962. « La préhistoire dans la zone littorale de la Tunisie », *Quaternaria*, 6: 271-307.
- Hillaire-Marcel (C.), Causse, (C.), 1989. « Chronologie Th/U des concrétions calcaires des varves du Lac Glaciaire de Deschaillons (Wisconsinien Inférieur) », *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, 26: 1041-1052.

- Ludwig (K.R.), Titterington (D.M.), 1994. « Calculations of $^{230}\text{Th}/\text{U}$ isochrons, ages and errors », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (n° 22) : 5031-5042.
- Page (W.D.), 1972. *The geological setting of the archeological site at Oued el Akarit and the paleoclimatic significance of gypsum soils, southern Tunisia* (thesis) : Boulder, University of Colorado, 111 p.
- Richards (G.W.), Vita-Finzi (C.), 1982. « Marine deposit 35.000-25.000 years old in the Chott Djerid, southern Tunisia », *Nature*, 295 : 54-55.
- Roset (J-P.), 1983. « Nouvelles données sur le problème de la néolithisation du Sahara méridional : Aïr et Ténéré au Niger », *Cah. Orstom*, 13 (2) : 119-142.
- Roset (J-P.), 1987. « Néolithisation, néolithique et post-néolithique au Niger nord-oriental », *Bull. A.F.E.Q.*, pp. 203-214.
- Szabo (B. J.), McHugh (W. P.), Schaber (G. G.), Haynes (C. V. Jr), Breed (C. S.), 1989. « Uranium Series dated authigenic carbonates and Acheulian sites in southern Egypt », *Science*, 243 : 1053-1056.
- Talbot (M. R.), Kelts (K.), 1986. « Primary and diagenetic carbonates in the anoxic sediments of lake Bosumtwi, Ghana », *Geology*, 14 : 912-916.
- Williams (M. A. J.), Abell (P. I.), Sparks (B.W.), 1987. « Quaternary landforms sediments, depositional environments and gastropode isotope ratios at Adrar Bous, Tenere desert of Niger, south-central Sahara ». In : *Desert Sediments : Ancient and Modern*, Frostick and Reid (eds), Geological Society, 295 : 54-55.
- Zouari (K.), 1988. *Géochimie et sédimentologie des dépôts continentaux d'origine aquatique du Quaternaire supérieur du sud tunisien : interprétations paléohydrologiques et paléoclimatiques*. Thèse de doctorat d'État, Université de Paris-Sud, 321 p.
- Zouari (K.), 1995. « Reprise des conditions humides dans le sud-tunisien depuis 11 000 ans BP », *Stable Isotope Technics for Water Resources management Symposium*, I.A.E.A., Vienne, mars 1995.
- Zouari (K.), Causse (C.) Chkir (N.), Ben Ouezdou (H.), Mamou (A.), 1996. « The humid episodes in the Southern Tunisian Chotts during the Upper Quaternary », A two-day International Meeting in Memory of John Napier Andrews, *Hydrogeochemistry : Noble Gases, Stable Isotopes and Radioelements*, April 2-3 1996, Univ. of Reading, Whiteknights, Reading, UK.