

Impact climatique et anthropique sur la végétation au Nord-Est de la Tunisie au cours des 2 derniers millénaires

Impacts of Climate Change and Anthropogenic Activities on Vegetation in Northeastern Tunisia over the Last 2 Millennia

Emna Gaceur^{1,2*}, Stéphanie Desprat², Imene Rouis¹, Néjib Kallel¹

¹ Laboratoire GEOGLOB, Faculté des Sciences de Sfax, gaceuramna@yahoo.com

² EPHE UMR 5805 EPOC Université de Bordeaux, CNRS, EPHE Allée Geoffroy St Hilaire.

RÉSUMÉ. Dans le cadre du développement d'étude à haute résolution des changements passés de la végétation, les données palynologiques ont permis de reconstituer l'évolution de la végétation dans les sédiments holocènes prélevés autour de la lagune de Sidi Ali el Mekki (N-E de la Tunisie). Nos résultats montrent qu'au cours des deux derniers millénaires, les changements de végétation de la Tunisie septentrionale traduisent une relation complexe faisant intervenir à la fois les forçages naturels et l'action anthropique. L'étude des sédiments lagunaires a mis en évidence les maquis à olivier et pistachier qui constituaient la végétation dominante alentour à la lagune de Sidi Ali el Mekki lors du premier millénaire de notre ère, ont nettement régressé au profit des steppes à graminées et armoises au cours des derniers 1000 ans, dénotant un impact anthropique croissant dans la zone d'étude.

ABSTRACT. As part of the development of high-resolution studies on past vegetation changes, palynological data allowed the reconstruction of vegetation evolution in Holocene sediments collected around the Sidi Ali el Mekki lagoon (N-E Tunisia). Our results show that over the last two millennia, vegetation changes in northern Tunisia reflect a complex relationship involving both natural forcings and human activity. The study of lagoon sediments highlighted that the maquis with olive and pistachio trees, which constituted the dominant vegetation around the Sidi Ali el Mekki lagoon during the first millennium of our era, have significantly declined in favor of grass and sagebrush steppes over the last 1000 years, indicating an increasing anthropogenic impact in the study area.

MOTS-CLÉS. Végétation, changement climatique, impact anthropique, N-E de la Tunisie, 2 derniers millénaires.

KEYWORDS. Vegetation, climate change, anthropogenic impact, Northeastern Tunisia, last 2 millennia.

1. Introduction

L'étude des changements de la végétation permet d'obtenir des informations essentielles sur les changements climatiques et leur impact sur l'environnement. Dans ce cadre, la palynologie (étude des grains de pollen) représente un outil majeur car elle permet de reconstituer l'histoire des environnements continentaux, et en particulier les changements de végétation et du climat, au cours du temps [FAE 89, TRA 07]. L'absence de données polliniques à haute résolution en Afrique du nord et dans les écosystèmes subhumides de ces régions limite notre compréhension des mécanismes responsables des variations climatiques rapides de notre région ainsi que de l'évolution des écosystèmes méditerranéens au cours de l'Holocène [PEY 11, ROB 11, SAD 11]. En Tunisie, les analyses polliniques couvrant la période holocène supérieur sont peu nombreuses et concernent la Tunisie méridionale [JAO 16] et les sédiments marins du Golfe de Gabès [BRU 92]. Les enregistrements concernant les étages bioclimatiques humide et subhumide au nord du pays [BEN 82, STA 07] sont ponctuelles et dispersées sur le plan chronologique et géographique, avec le plus souvent une faible résolution temporelle pour saisir les rythmes et permettre des corrélations avec d'autres enregistrements à haute résolution.

Au cours de ce travail, des nouvelles données polliniques ont été obtenues sur les sédiments holocènes de la Tunisie Septentrionale. Nous nous focaliserons en particulier à étudier la réponse de la végétation aux changements climatiques et sociaux (changement de civilisations) depuis 2000 ans à partir de l'étude palynologique de sections sédimentaires prélevées dans la lagune de Sidi Ali el Mekki. Pour cela nous avons réalisé l'étude des grains de pollen dans les carottes GEM5 et GEMP1 prélevées dans cette lagune afin de bien comprendre l'évolution de la végétation dans la Tunisie Septentrionale au cours des deux derniers millénaires.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Echantillonnage:

Les carottes lagunaires **GEM5** et **GEMP1** ont été prélevées au niveau de la lagune de Sidi Ali el Mekki (Figure 1). La carotte GEM5 ($N37^{\circ}09.390' E010^{\circ}14.198'$) a une longueur de 1 m et la carotte GEMP1 ($N37^{\circ}09.402' E010^{\circ}14.306'$) de 76cm. Des échantillons de 2 cm^3 de sédiment ont été prélevés le long de chacune des carottes lagunaires tous les 2 cm. Au total, 50 échantillons ont été analysés pour la carotte GEM5 et 38 échantillons pour la carotte GEMP1.



Figure 1. Localisation des deux carottes lagunaires GEM5 et GEMP1 (google earth).

2.2. Chronologie

Pour mieux comprendre et préciser l'évolution paléoenvironnementale de la lagune de Sidi Ali el Mekki mais aussi suivre l'évolution de son remplissage sédimentaire, il était nécessaire de déterminer la chronologie des carottes étudiées prélevées dans cette étude. L'établissement du modèle d'âge est basée sur plusieurs méthodes selon deux échelles de temps différentes : (i) une échelle de temps courte en utilisant les profils d'activité du ^{210}Pb et du ^{137}Cs , et (ii) une échelle plus longue en utilisant des datations radiocarbone (^{14}C).

- **Carotte GEMP1 :** Des analyses radiochronologiques du Pb et Cs ont été réalisées au laboratoire Géoscience à Montpellier sur la carotte GEMP1 jusqu'à la profondeur de 21 cm.
- **Carotte GEM5 :** En absence de datation pour la carotte GEM5, le modèle d'âge de cette carotte va être déterminé par corrélation lithologique et pollinique avec la carotte GEMP1 et une autre carotte voisine GEM3 [KOH 22]. La partie sommitale de la carotte GEM5 (de 45 à 0 cm) présente les mêmes faciès que la GEMP1 de 76 à 12 cm. Ainsi les premiers centimètres de GEM5 seront corrélés avec les 21 premiers centimètres de la carotte GEMP1 qui sont bien datée par Pb/CS. Pour la partie restante, une corrélation sera faite en comparant les niveaux sableux de la carotte GEM5 et ceux de la carotte voisine GEM3 (bien datée par ^{14}C) (Figure 2).

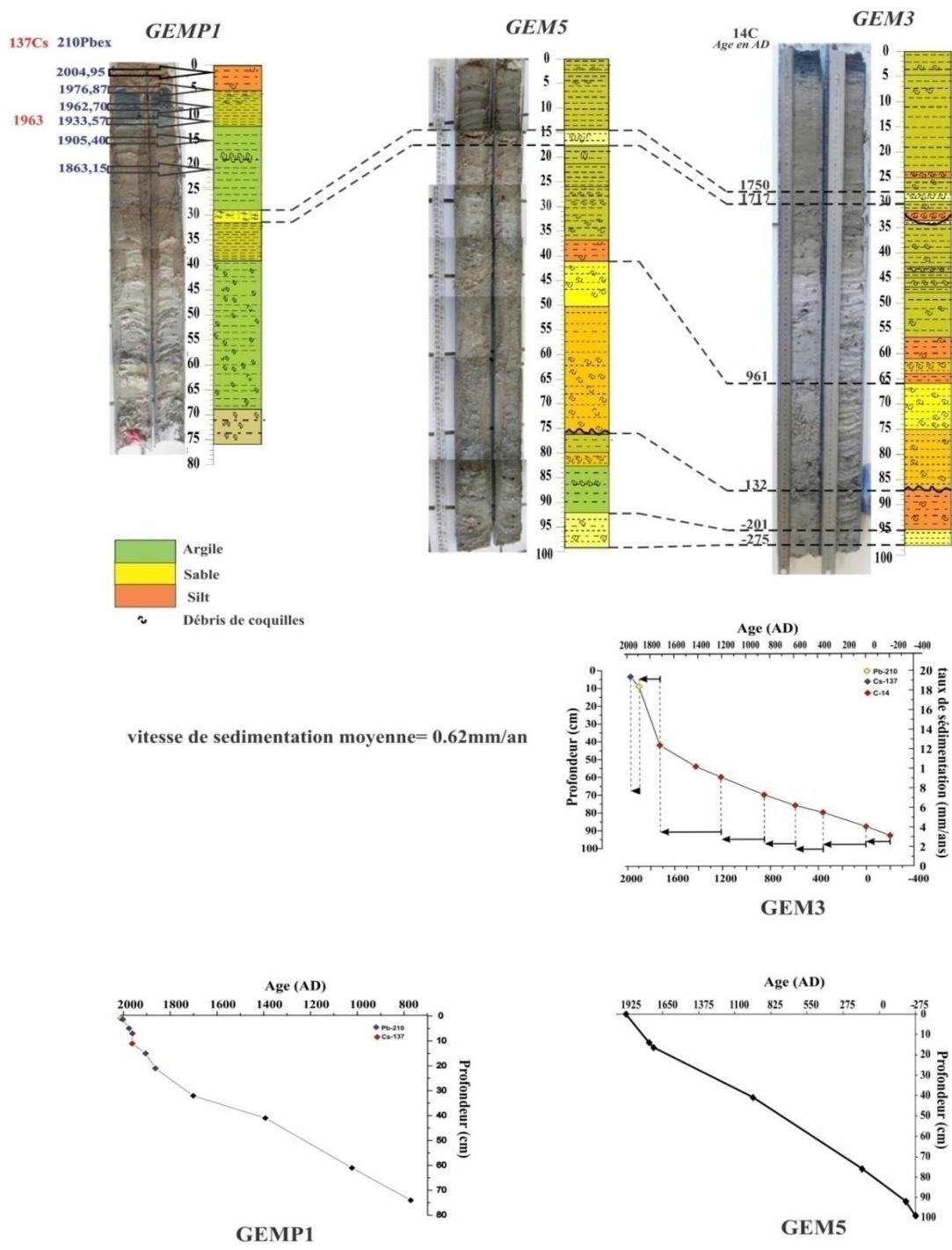


Figure 2. Localisation des deux Présentation des modèles d'âge pour les deux carottes lagunaires. Celui de la carotte GEMP1 a été établi à partir de 6mesures de ^{210}Pb . Le modèle d'âge de GEM5 adopté est basé sur la corrélation des niveaux lithologiques avec GEMP1au sommet de la carotte et sur la corrélation des niveaux sableux avec ceux de la carotte GEM3 qui est située à proximité et qui comporte 8 datations radiocarbone [KOH 22].

Le modèle d'âge obtenu est par la suite dérivé, par extrapolation linéaire, de l'échelle de repères (âge, profondeur) entre GEMP1, GEM3 (âge) et GEM5 (profondeur) (Figure 2).

2.3. Analyses polliniques

La préparation des lames polliniques suit la procédure décrite par de [DE V 96] puis modifiée au laboratoire EPOC UMR-CNRS 5805, Université de Bordeaux (<http://www.ephepaleoclimat.com/ephe/.htm>).

L'analyse pollinique consiste donc à la détermination et le comptage des grains de pollen en se basant sur leurs caractères morphologiques et en s'aidant d'atlas polliniques de référence et de lames de référence.

Le résultat de l'analyse pollinique de chaque échantillon est représenté par un spectre pollinique qui traduit les proportions des différents morphotypes identifiés. Un diagramme pollinique représentant les pourcentages des morphotypes déterminés dans chaque échantillon est alors tracé à l'aide des logiciels Psimpoll et Corel Draw. Les pourcentages polliniques des échantillons fossiles ont été analysés à l'aide de techniques multivariées. Avant toute analyse, les données ont été filtrées avec les critères suivants : présence du taxon minimum de 3% et ceci dans au moins deux échantillons. La filtration des données a été effectuée dans l'environnement R v. 3.1.1 [COR 13] en utilisant la fonction "filter.p()" du package R "paleoMAS" [COR 11]. Pour les données polliniques des différentes carottes, la fonction « chclust () » du package R « Rioja » [JUG 09] a été utilisé afin de réaliser une classification hiérarchique contrainte par l'ordre des échantillons dans la séquence. La classification est ainsi faite à partir de l'algorithme CONISS ("Constrained Cluster Analysis by Sum of Squares") [GRI 87]. Le dendrogramme obtenu est alors dessiné de pair avec le diagramme pollinique en fonction de la profondeur ou de l'âge afin de définir les zones polliniques.

Le diagramme pollinique est dit détaillé lorsque tous les taxons sont considérés. Pour simplifier le diagramme, seules les espèces à forte signification écologique sont conservées et les taxons de préférence écologique similaire peuvent être regroupés dans des groupes écologiques. On parle alors de diagramme sélectif ou synthétique [SUC 84, COM 87]. Pour faciliter l'interprétation, des zones polliniques sont délimitées en considérant les ensembles écologiques. Chaque groupe écologique dépend des conditions climatiques particulièrement la température et les précipitations ainsi nous distinguons 4 groupes: 1: Forêt méditerranéenne qui comprend d'une part les arbres tempérés et d'autre part les arbres typique de la région méditerranéenne, 2: les plantes de climat semi-aride, 3: Le 3ème groupe est composé de plantes herbacées ubiquistes et 4: le 4ème groupe est constitué des Ericaceae.

3. Résultats

3. 1. Modèle d'âge:

D'après les modèles d'âge ainsi établis (Figure 2) nos carottes sédimentaires couvrent les deux derniers millénaires pour GEM5, et le dernier millénaire pour GEMP1.

3. 2. Analyses polliniques

L'analyse pollinique des échantillons de la carotte GEM5 ont permis de déterminer 70 taxons polliniques (19 familles, 33 genres et 18 espèces). Pour la deuxième carotte GEMP1, on a dénombré 54 taxons (11 familles, 27 genres et 16 espèces). Seuls les principaux taxons polliniques seront représentés sous forme de diagramme pollinique synthétique (Figure 3). Pour la carotte GEM5, 9 zones polliniques ont été délimitées par inspection visuelle et classification hiérarchique contrainte et 5 zones pour la carotte GEMP1 (Figure 3).

Les enregistrements polliniques de la lagune de Sidi Ali el Mekki (Annexes A1 et A2) montrent la dominance de quelques espèces qui sont également enregistrées dans les spectres polliniques des échantillons de surface tels que : Amaranthaceae (Chenopodiaceae), les arbres méditerranéens surtout l'olivier (*Olea*) et le pistachier (*Pistacia*), l'armoise (*Artemisia*), les graminées (Poaceae). Les valeurs de *Pinus* restent relativement basses dans les deux carottes, à l'exception de la partie sommitale de GEMP1 et quelques taxons décidus comme *deciduous Quercus* ou *Alnus*, sont présents dans les sédiments analysés. De plus, les pourcentages de Ruppiaceae qui sont des plantes aquatiques notables tout au long des carottes étudiées. Les taxons semi-désertiques sont peu représentés dans les deux diagrammes.

3. 3. Comparaison entre les deux carottes

Les analyses polliniques et granulométriques ont permis de corréler les deux carottes lagunaires (GEM5 et GEMP1) et mettent en évidence 11 zones polliniques communes à différentes profondeurs (Figure 3). Malgré quelques différences pouvant être liées à l'hétérogénéité de l'enregistrement de la pluie pollinique et à la résolution chronologique, les deux séquences lagunaires présentent des signaux polliniques cohérents indiquant des changements à long terme et centennaux de la végétation en Tunisie septentrionale au cours des deux derniers millénaires.

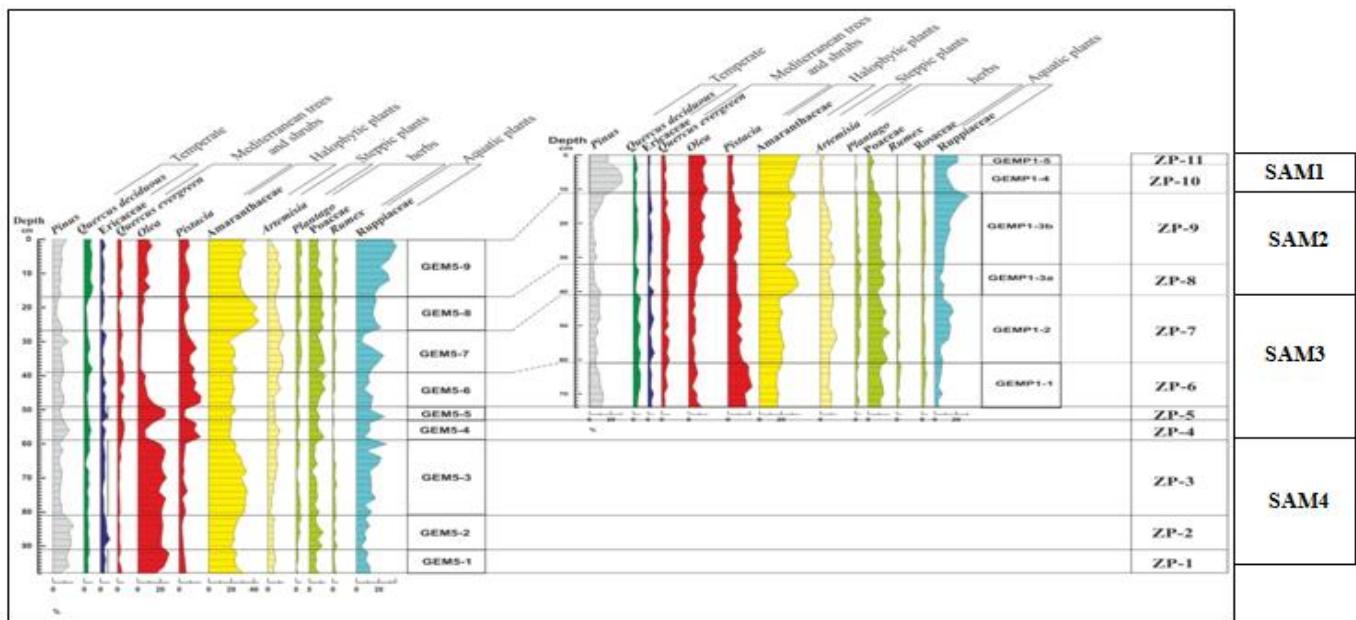


Figure 3. Comparaison entre les deux carottes lagunaires GEM5 et GEMP1 : A gauche-les analyses polliniques de la carotte GEM5 ; A droite-les analyses polliniques de la carotte GEMP1. ZP : Les zones polliniques communes de deux carottes ; SAM : les intervalles de temps de Sidi Ali el Mekki.

Les successions des associations végétales dans les deux séquences (Figure 3) peuvent être résumées comme suit :

SAM-4: 2225-1400 ans cal BP (-275 à 550 AD/BC) : Un premier intervalle, qui regroupe les trois premières zones polliniques ZP-1, 2 et 3, correspond à la période du temps entre 2225 à 1400 ans B.P. (-275 à 550 AD). La base de cet épisode (ZP-1) montre un paysage méditerranéen avec une bonne représentation des arbres méditerranéens surtout *Olea* par contre au milieu (ZP-2), une faible réduction de la forêt thermophile associée au développement du pin et des herbacées ubiquistes. Vers la fin de cet épisode (ZP3), une expansion des forêts méditerranéennes est observée. Depuis la base vers le sommet de cette période, la couverture végétale semble changer traduite par une abondance des taxons méditerranéens.

SAM-3 : 1400-1000 BP (550 à 950 AD): Cette période coïncide aux zones polliniques 4, 5 et 6. La base de cet épisode (entre 1400 et 1273 ans BP ; ZP4) est marquée par une chute des valeurs d'*Olea* en association avec l'augmentation de *Pistacia*, d'*Artemisia* et des herbacées ubiquistes plus particulièrement le *Poaceae*. Ceci devrait refléter un changement brutal dans la couverture végétale. Entre 1273-927 ans BP (ZP-5+6), les arbres méditerranéens sont dominants tandis que les herbacées sont peu abondants. Cet intervalle du temps montre un paysage méditerranéen avec une bonne représentation d'olivier à sa base (ZP-5) tandis que vers sa fin, il est dominé par le pistachier avec une tendance à la réduction (ZP-6).

SAM-2 :1000-250 BP (550 à 950 AD): Cet intervalle rassemble les trois zones ZP-7, 8 et 9. Au cours de la zone pollinique ZP-7 (927-550 ans BP), on note un changement de végétation brusque associé à une ouverture graduelle de la forêt méditerranéenne (chute des arbres méditerranéens associé

à une diminution d'*Olea* qui était quasi absente de 800-550 ans BP). D'un autre côté, une légère expansion des prairies sèches associée à l'accroissement de Poaceae et d'*Artemisia*, avec présence d'Amaranthaceae et un développement des plantes aquatiques ont été observée. Au milieu de cet intervalle (coïncide avec ZP-8) couvrant la période de 550 à 250 ans BP, une expansion minimale des éléments sclérophylles a été enregistrée avec notamment les valeurs maximales d'Amaranthaceae (44%). De nouveau, un accroissement des forêts méditerranéennes est observé au sommet de cette période ZP-9 associé à la diminution des Herbacées ubiquistes. En outre, une augmentation des taux des plantes aquatiques Ruppiaceae est également observée et une présence de plans d'eau.

Depuis la base vers le sommet, cet intervalle met en évidence plusieurs changements de la végétation. En somme, cette phase enregistre une mosaïque d'environnements qui traduirait d'un côté l'augmentation des arbres méditerranéens et d'un autre côté, l'important pic d'*Artemisia*.

SAM-1 : de 1963 AD jusqu'aujourd'hui: Cet intervalle correspond seulement au sommet de la carotte GEMP1 (ZP-10+11) qui couvre la période de 1963 à 2012 AD. Elle enregistre un développement important d'*Olea* et de Amaranthaceae accompagné par la chute des plantes semi-désertique et la régression des Herbacées. Au cours de cette période, on remarque une expansion du pin (moy=33%).

4. Discussion

4.1. *Changements de la végétation en Tunisie septentrionale pendant les deux derniers millénaires :*

Les deux séquences polliniques lagunaires montrent la présence continue d'un paysage méditerranéen caractérisé par des maquis à *Olea* et *Pistacia*. La formation *Oleo-lentiscum* constitue la végétation naturelle de la zone d'étude qui est soumise à un climat semi-aride à sub-humide [GAM 08]. Nos données polliniques montrent que jusqu'à ca. 1000 ans cal BP, ces maquis sont généralement dominés par *Olea* (ZP-1+2+3 et ZP-5) excepté durant deux intervalles où *Pistacia* devient l'élément majeur, de 1900 à 1400 ans cal BP (ZP-4) et de 1150 à environ 1000 ans cal BP (ZP-6). Etant donné qu'*Olea* est un arbre historiquement cultivé dans la région, une part du signal pourrait aussi provenir de cultures.

Les maquis à olivier et pistachier ont nettement régressé au cours du dernier millénaire au profit d'un paysage plus ouvert marqué par l'expansion des herbacées. Les steppes à graminées et armoises présentent une expansion majeure entre ca. 1000 et 250 ans cal BP (ZP-7 et 8). L'expansion des graminées peut indiquer le développement de steppes graminées mais aussi des zones cultivées, aujourd'hui très étendues, dans la plaine deltaïque, comme nous l'avons montré à partir de l'analyse d'échantillons de surface dans la zone d'étude [GAC 17]. Le pollen d'*Artemisia*, plante communément associée aux milieux semi-arides, qui est retrouvé dans les sédiments de la lagune peut provenir de la végétation herbacée locale mais aussi des steppes à armoise plus méridionales dont la contribution ne peut être exclue au regard de sa bonne capacité de dispersion [BOT 90].

La forte représentation d'Amaranthaceae dans nos séquences polliniques est probablement en lien avec la végétation azonale dominée par les plantes halophytes fortement répandues dans la zone d'étude. En effet, les Amaranthaceae succulentes telles que *Salicornia arabica* et *Halocnemum strobilaceum* dominent sur les sols les plus salins de la plaine deltaïque, en bordure de lagune et dans la zone côtière [GOU 65]. Le pollen d'Amaranthaceae est communément sur-représenté dans les séquences lagunaires (GEM5 et GEMP-1), comme nous avons pu l'observer dans les échantillons de surface [GAC 17], ainsi que dans les lacs salés et estuaires [BOT 90, FLE 05, DJA 08]. Néanmoins, le morphotype Amaranthaceae inclut de nombreuses espèces présentant un caractère xérophyte, se développant dans les steppes arides et semi-arides. Il ne peut donc être exclu que les Amaranthaceae xérophytes contribuent même marginalement au signal. Deux épisodes d'expansion des Amaranthaceae particulièrement importante sont enregistrés de 1900 à 1400 ans cal BP (ZP-3) et de

550 à 250 ans cal BP (ZP- 8), reflétant vraisemblablement une extension des zones sous influence marine. Les espèces xérophytées ne sont probablement pas à l'origine de ces pics d'Amaranthaceae dans nos enregistrements polliniques sachant qu'aucun développement concordant de plantes caractéristiques de la végétation semi-aride ou aride n'est enregistré (Figure 4).

Par ailleurs, les enregistrements polliniques de la lagune Ghar El Melh montrent que parmi les plantes aquatiques les Ruppiacées sont les plus représentées, surtout au sommet des séquences. 'SHI 02' montrent que le *Ruppia cirrhosa* et *Cladophora* sont bien développées actuellement dans la zone d'étude.

Au cours des derniers siècles, nos enregistrements montrent une légère reprise d'*Olea* et une régression des steppes (ZP-10+11). Il est aussi à noter qu'une expansion du pin est aussi enregistré plus récemment (ZP-10).

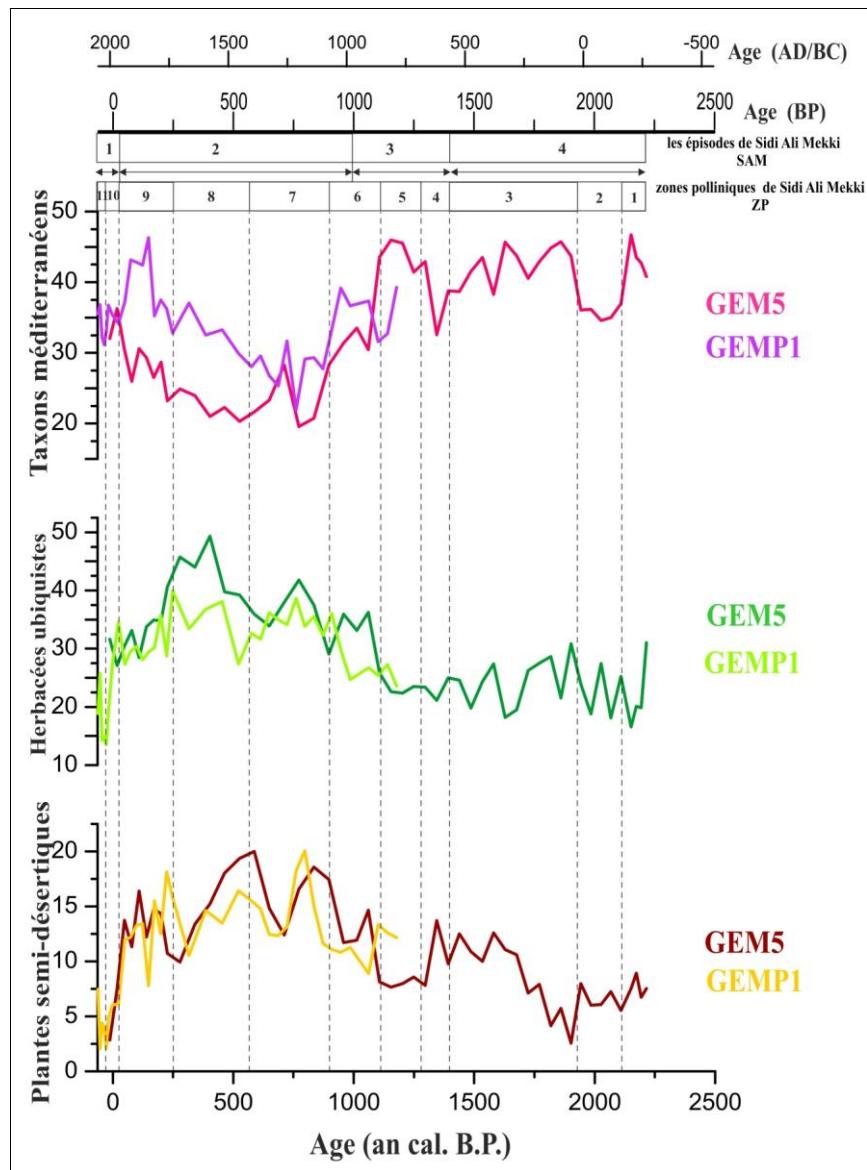


Figure 4. Comparaison des principaux assemblages polliniques enregistrés dans les 2 carottes GEM5 et GEMP1 au cours de derniers 2000 ans.

4.2. Les facteurs responsables des changements de la végétation dans le nord-est de la Tunisie :

- Influence climatique ou anthropique ?

L'analyse pollinique des carottes de la lagune Sidi Ali el Mekki a mis en évidence quatre différents épisodes marqués par des changements de végétation relativement importants. Déterminer la ou les causes des changements de végétation au cours de l'Holocène supérieur dans la région méditerranéenne est en général un défi auquel se heurte toute étude palynologique. En effet, les variations climatiques et les activités anthropiques peuvent influencer de façon séparée ou combinée la végétation pour générer les changements observés.

L'Holocène supérieur est caractérisé par une alternance de période chaudes et froides communément enregistré en Europe : la période chaude romaine (RWP-Roman Warm Period ; 1950-1550 ans cal BP), la période froide de l'âge sombre (DACP-Dark Ages Cold Period ; 1550-1150 ans cal BP), l'anomalie climatique médiévale (MCA-Medieval Climate Anomaly ; 1150-750 ans cal BP), le petit âge glaciaire (LIA-Little Ice Age ; 650-100 ans cal BP) et l'Ere industrielle ou réchauffement récent (CWP- Current Warm Period) [JON 98, REA 00, TIN 03, FRI 05, BUN 11, GRA 13] mais aussi à l'échelle globale [NEU 19]). Il est tout de même à noter qu'il n'y a pas de consensus sur la chronologie précise de ces événements car notamment des études ont montré qu'ils présentent une variabilité régionale importante dans leur nature, intensité et timing [NEU 19, PAG 13]. Des changements hydrologiques sont aussi associés à ces épisodes dans la région méditerranéenne et en particulier en Tunisie (e.g. Vallée de la Medjerda [FAU 04]; Sebkhet Mhabeul [MAR 08]) qui ont eu un impact sur la végétation notamment en Tunisie méridionale (Sebkhet Boujmel [JAO 16]).

Pour de nombreux auteurs, les perturbations d'origine anthropique sont, néanmoins, le mode dominant expliquant les transformations du paysage méditerranéen depuis l'Holocène moyen [ROB 11]. Beaucoup d'études concordent ainsi pour révéler que les déclins forestiers au cours de deux derniers millénaires sont entraînés plus par l'effet anthropique que par le climat [CAR 10, MAG 11, MAR 16, DI R 18]. La couverture végétale dans la zone d'étude est aujourd'hui largement anthropisée avec une grande extension des surfaces cultivées installées dans la région de la vallée de l'Oued Medjerda [FAU 04, SAM 11]. Le maraîchage, la culture de céréales (*Cerealia*) et l'arboriculture (olivier (*Olea*), agrumes (*Citrus*)) occupent aujourd'hui une zone prépondérante, ne laissant qu'un espace très réduit à la végétation naturelle. Par ailleurs, la région connaît une forte activité pastorale présente dans la plaine et sur les reliefs au nord de la vallée. En outre, d'importants secteurs des forêts, situés sur les djebels au nord de la plaine deltaïque, ont été également déboisés et soumis à une intense pression anthropique sous de multiples aspects dont le surpâturage, les incendies ou les défrichements [SAM 11]. Cette anthropisation du milieu en Tunisie septentrionale est le résultat d'une histoire riche, marquée par une succession de périodes culturelles allant de l'époque romaine à la période industrielle récente. Néanmoins, l'histoire de la végétation dans le NE de la Tunisie et l'impact des différentes sociétés restent à déterminer.

Pour étudier l'impact humain sur la végétation de la région de Sidi Ali el Mekki, nous allons utiliser différents indicateurs polliniques. 'BOT 90' ont identifié des indicateurs anthropiques primaires et secondaires dans la pluie pollinique actuelle de la Méditerranée orientale (S-W de la Turquie). Ils ont aussi été analysés dans d'autres régions comme en Italie [MER 13]. Ces marqueurs anthropiques primaires sont les taxons issus de plantes cultivées, incluant *Olea*, *Pistacia*, *Vitis*, *Pinus*... Néanmoins, il reste difficile d'inclure *Olea* dans ce groupe de marqueurs dans notre travail car c'est un taxon typique de la végétation naturelle de notre zone d'étude. Les marqueurs anthropiques secondaires sont des taxons associés à la perturbation du milieu par l'homme. Ce sont essentiellement des taxons herbacés, les plus communs étant *Cichorioideae* (*Taraxacum*-type), *Brassicaceae*, *Mercurialis*-type et *Rumex* mais ils incluent aussi *Plantago lanceolata* (non retrouvés dans nos échantillons), *Plantago major*, *Apiaceae*, *Centaurea*, *Ranunculus* et *Aster* [BOT 90 et MER 13]. *Poaceae* et *Artemisia* sont souvent associés aux marqueurs anthropiques secondaires même si leur association nécessite d'être discutée en fonction des zones. De plus, il a été montré qu'à l'Holocène supérieur, le rapport AP/NAP (ratio des valeurs de pollen d'arbres et arbustes (AP) et les valeurs de pollen d'herbacées (NAP)) a beaucoup diminué, indiquant une ouverture ou une réduction de la densité du couvert forestier, probablement à cause de l'impact de l'homme [BOT 90].

Nous allons maintenant discuter des facteurs climatiques et anthropiques ayant pu influencer les changements de végétation observés en Tunisie septentrionale au cours des derniers 2000 ans.

- **Le premier millénaire de notre ère (SAM 4 et 3) :**

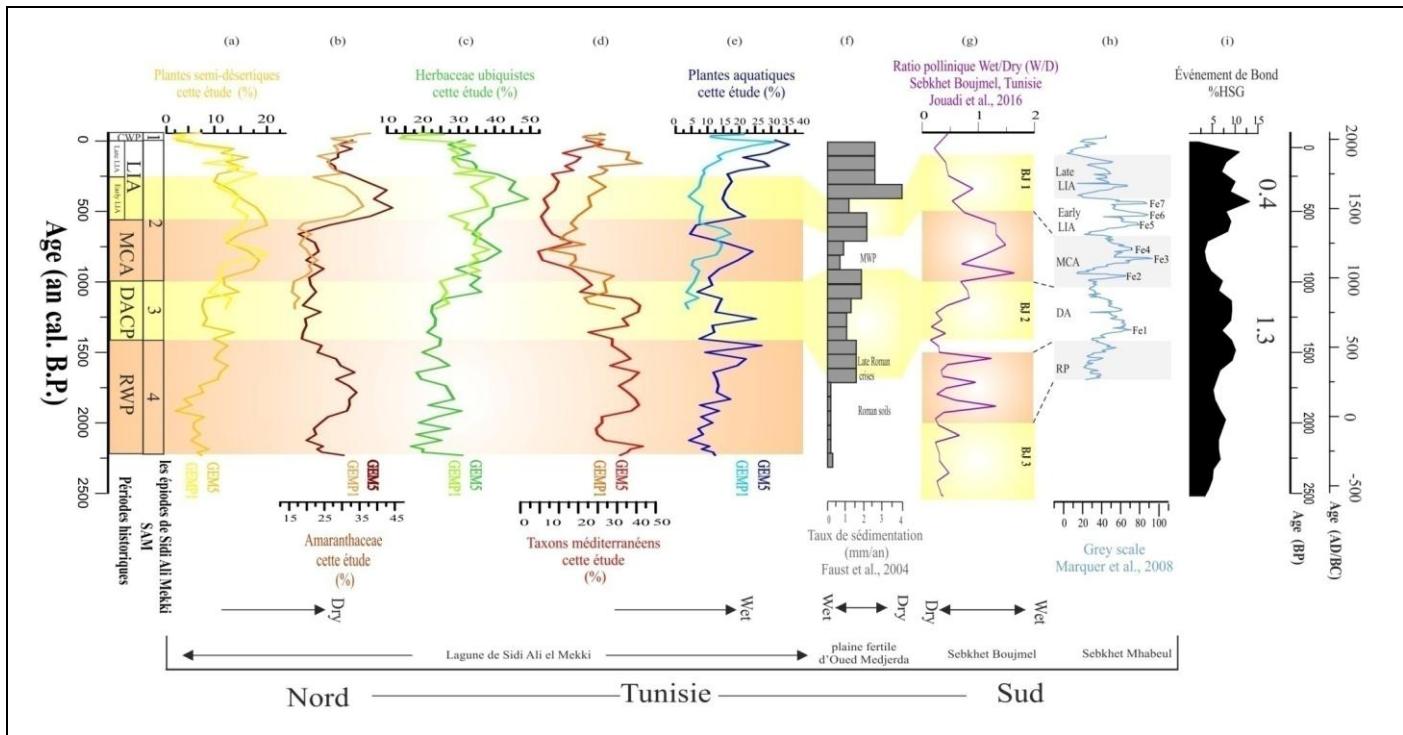


Figure 5. Comparaison des assemblages polliniques de deux carottes lagunaires GEM5 et GEMP1 avec les enregistrements polliniques en Tunisie. a) pourcentages des plantes semi-désertiques b) pourcentages d'Amaranthaceae c) pourcentages des herbacées ubiquistes d) pourcentages des taxons méditerranéens e) pourcentages des plantes aquatiques de nos enregistrements f) taux de sédimentation de plaine de l'Oued Medjerda [FAU 04], g) rapport pollinique W/D de Sebkhet Boujmel [JAO 16], h) variations d'intensité de niveaux de gris de Sebkhet Mhabeul [MAR 08], i) pourcentages d'« Hematite Stained Grains » (HSG) indiquant les événements froids de Bond [BON 01]. Les bandes en rose indiquent les périodes humides et les bandes jaunes, les périodes sèches.

Les enregistrements polliniques de la lagune Sidi Ali el Mekki suggèrent que les maquis à olivier et pistachier (Figure 4 et 5d) représentent une formation ayant une part importante dans le paysage de la zone d'étude au cours du premier millénaire de notre ère. Ils constituent aujourd'hui la formation végétale qui devrait prédominer en dehors de tout impact anthropique. Les faibles pourcentages d'indicateurs anthropiques secondaires pendant cet intervalle témoignent d'une pression anthropique sur les écosystèmes encore mesurée. Néanmoins, les grains de pollen d'*Olea* récoltés dans les sédiments de lagune pourraient aussi en partie provenir des plantations d'olivier qui se sont particulièrement développées dans la région du Cap Bon et dans les environs de Tunis depuis la période punique et en particulier pendant la période romaine [CAM 74]. En effet, 'HAN 08' supposent que les Phéniciens ont introduit les cultivars d'olivier en Tunisie, oliviers qui ont été plus tard cultivés par les Romains. A Carthage, les données polliniques du chenal punique indiquent que l'oléiculture commence au 6^{ème} siècle BC (2550 ans cal BP) [VAN 01]. A l'époque Romaine, l'oléiculture s'est intensifiée en raison de son rôle primordial dans l'économie tunisienne [CAM 53, VAN 83, MAT 88]. Avec la chute de Carthage, en 146 avant J.C., la Tunisie est devenue plus que jamais une terre à olivier, à vigne...etc. [PON 62, STU 90]. De plus, les zones principales d'habitation étaient les plaines fertiles de la Medjerda (Bagrada) et ses environs [PON 62] qui favorisent l'activité agricole. En outre, 'FAU 04' indiquent que durant la période romaine, il est essentiel d'inclure l'impact humain lors de l'analyse des processus paléo-géomorphologiques. Ils montrent que la culture des oliviers s'est nettement étendue [FAU 04], en particulier aux environs des affluents sud de la Medjerda [DE V 00]. Ainsi,

‘JAO 18’ montrent que l’enregistrement d’*Olea* dans les données polliniques de Sebkhet Boujmel pourrait être un indicateur fiable de l’introduction de l’oléiculture au cours de l’Holocène supérieur.

Même s’il reste difficile de séparer la part naturelle de la part anthropique dans l’enregistrement d’*Olea*, la large prédominance de ce dernier parmi les arbres et arbustes méditerranéens entre 2200 à 1400 ans cal BP (SAM-4/ZP-1+2+3) dans notre séquence pollinique suggère des conditions sub-humides (Figure 5). Considérant les incertitudes chronologiques, cet intervalle pourrait correspondre à la Période Chaude Romaine classiquement détectée entre 2150 et 1550 ans cal BP (Roman Warm Period ; RWP ; [REA 00]). Au cours de cette époque, les données polliniques (Figure 5g) et minéralogiques enregistrées dans Sebkhet Boujmel, au sud de la Tunisie, mettent en évidence des conditions légèrement humides [JAO 16]. D’autres enregistrements tunisiens montrent des conditions plus humides marquées [FAU 04, MAR 08, STE 93]. Les données polliniques du lac d’Ichkeul reflètent une re-expansion de la forêt de chêne liège en particulier entre 1900 et 1500 ans cal BP [STE 93]. ‘FAU 33’ observent une stabilité géomorphologique jusqu’à 1700 ans cal BP enregistrée par une couverture végétale plus importante et des taux d’érosion et de dépôt plus faibles dans la plaine inondable de la Medjerda (Figure 5f). D’autres études montrent également un climat légèrement plus humide pendant la période romaine dans les marges désertiques méditerranéennes telles que la Libye [GIL 96, HUN 02]. Des conditions climatiques humides sont aussi documentées durant la période romaine dans d’autres zones en Méditerranée centrale par les données polliniques comme en mer tyrrhénienne [MAR 16, DI R 18] et dans des séquences sédimentaires de l’Adriatique, d’Italie et de la Sicile [SAD 01, DI R 09, COM 12].

Entre 1400 et 1000 ans cal BP (SAM-3/ZP-4+5+6), les données de Sidi Ali el Mekki indiquent la chute abrupte de pourcentages d’*Olea* (Figure 5c) associée à l’augmentation des pourcentages de *Pistacia* et de Poaceae à 1400 ans cal BP, remplacés de nouveau par *Olea* vers 1270 ans cal BP pour une courte période de 200 ans environ et un retour à la dominance de *Pistacia* dans les maquis méditerranéens de la zone. Une expansion du pistachier et des graminées est aussi observée dans la zone du lac Ichkeul à 1400 ans cal BP mais dans ce cas au détriment du chêne vert [STE 93]. Les auteurs proposent que ce changement de végétation pourrait résulter de l’augmentation de la pression anthropique associée à une utilisation du feu pour créer des pâturages mais aussi de conditions plus arides [STE 93]. Des études antérieures montrent que les oscillations entre les deux taxons méditerranéens *Olea* et *Pistacia* pourraient être liées à des changements de conditions climatiques en Tunisie centrale [BRU 92, LEB 15]. L’olivier se développerait au détriment du pistachier quand l’humidité augmente [BRU 92]. Selon ‘STE 92’, le taxon pollinique *Pistacia* pourrait correspondre à l’espèce *P. atlantica* qui se développe sous des conditions plus arides. Les changements de végétation que nous avons enregistrés au cours de cette période pourraient donc refléter l’installation de conditions climatiques plus arides avec la chute des valeurs d’*Olea*. Cette aridité est aussi documentée par les enregistrements polliniques du golfe de Gabès [BRU 92] et de Sebkhet Boujmel [JAO 16] (Figure 5g). En outre, ‘MAR 08’, montrent que les conditions arides ont continué jusqu’à 950 AD (1000 ans cal BP) dans la région de Sebkhet Mhabeul (Figure 5h). Les données recueillies dans la vallée de la Medjerda montrent une instabilité géomorphologique indiquée par des taux de sédimentation accrus, synonyme d’aridité [FAU 04, FLE 13]; (Figure 5f). Cet intervalle coïncide avec la période froide de l’âge sombre « Dark Ages Cold Period » qui est connu pour l’avancée des glaciers en Europe [LAM 85, HOL 05]. Cet épisode coïncide également avec l’événement de refroidissement de Bond en Atlantique Nord vers 1.3ka BP [BON 01] (Figure 5i).

- **Le deuxième millénaire de notre ère: intensification de la pression anthropique (SAM 2 et 1)**

Les enregistrements de la lagune Sidi Ali el Mekki montrent que de la période médiévale à la période industrielle, le paysage est marqué par une forte ouverture du paysage avec une réduction drastique des maquis méditerranéens. Vers 1000 ans BP, qui correspond chronologiquement au début de l’Anomalie Climatique Médiévale (MCA), nos données polliniques lagunaires montrent que le rapport AP/NAP diminue drastiquement (SAM-2/ZP-7+8+9), reflétant une ouverture graduelle de la

forêt méditerranéenne (Figure 5f). Cette ouverture se produit notamment en lien avec une forte expansion du taxon *Artemisia* (Figure 5d). La forte représentation de ce taxon se poursuit pendant le Petit Âge glaciaire (LIA : 650-100 ans cal BP) même si les steppes graminées se développent sensiblement au détriment de l'armoise entre 500 et 250 ans cal BP (ZP 8). Le Petit Âge glaciaire [WIL 08] serait contemporain du plus récent événement de refroidissement de Bond en Atlantique Nord vers 0.4 ka BP [BON 01] (Figure 5i).

Les steppes à armoise sont typiquement associées aux bioclimats semi-arides et arides se retrouvant de la basse vallée de la Medjerda jusqu'au centre de la Tunisie [BRU 85]. Mais une interprétation de l'expansion de l'armoise en réponse à des conditions arides pendant le MCA et en moindre mesure pendant le LIA apparaît en contradiction avec les enregistrements paléoclimatiques tunisiens. En Tunisie méridionale, l'augmentation du ratio W/D (Figure 5g) ainsi que la chute des herbacées à Sebkhet Boujmel (Sud de la Tunisie) révèlent l'installation des conditions plus humides pendant MCA [JAO 16]. Cet intervalle correspond également à un retour vers une phase de stabilité hydrologique à Sebkhet Mhabeul [MAR 08] et géomorphologique dans la vallée de la Medjerda [FAU 04]. Pendant le LIA, une évolution vers un climat plus aride est enregistrée en Tunisie centrale avec l'expansion des steppes arbustives [ZER 09]. Les données de Sebkhet Boujmel montrent, entre 450 et 95 cal ans BP, une chute du ratio W/D (Figure 5g) et une progression des taxons désertiques [JAO 16]. En outre, cette aridité est à l'origine d'une phase d'instabilité géomorphologique dans la vallée de la Medjerda [FAU 04, FLE 13] (Figure 5f) et hydrologique à Sebkhet Mhabeul [MAR 08] (Figure 5h). Cette succession de conditions climatiques humides et sèches, qui s'est produite lors de la transition MCA/LIA dans la lagune de Sidi Ali el Mekki, est également évidente dans d'autres enregistrements polliniques en mer Tyrrhénienne [MAR 16, DI R 18] et au lac Siles au sud de l'Espagne [CAR 10]. Cependant, d'autres enregistrements révèlent une succession inversée de conditions climatiques, avec un climat aride pendant le MCA et des conditions plus humides pendant le LIA tels que les données polliniques de Lago di Venere sur l'île de Pantelleria [CAL 13] et de Lago di Pergusa en Sicile [SAD 15a], données multi-proxy du lac Zoñar à sud de l'Espagne [MARt 08] et dans des carottes marines de la mer d'Alboran [NIE 13].

Les deux périodes « MCA et LIA » révèlent des anomalies climatiques dans l'hémisphère nord qui peuvent être induites par l'irradiance solaire [MAN 09, GRA 11, SWI 11]. De plus, l'étude des archives sédimentaires lagunaires par 'DEZ 11a et SAB 12' mettent en évidence les tendances d'augmentation en intensité et en fréquence des tempêtes au cours du Petit Âge Glaciaire alors que la période médiévale semble être plus calme. Cependant, l'augmentation de l'activité des tempêtes dans la région de la Méditerranée durant les périodes froides, est associée à une diminution des températures aux hautes latitudes nord. Cette situation est probablement liée à une augmentation du gradient thermique qui, par interaction barocline, favorise des cycles d'évolution des tempêtes dans toute l'Europe et la Méditerranée occidentale [DEZ 11a, SAB 12].

Le rôle des activités anthropiques doit être considéré. *Artemisia* est l'un des taxons proposés par 'BOT 90' comme étant un indicateur anthropique. Une importante augmentation d'*Artemisia* a été enregistrée également et à la même époque par les données polliniques du Golfe de Gabès [BRU 85], de Sebkhet Mhabeul [MAR 08] et de Sebkhet Boujmel [JAO 16]. Néanmoins, il faut noter que le pic d'*Artemisia* enregistré dans nos données polliniques n'est pas contemporain à celui observé à Sebkhet Boujmel [JAO 16, 18]. Ce développement d'*Artemisia* dans le sud-est de la Tunisie serait essentiellement causé par les activités anthropiques étant donné que de fortes valeurs d'*Artemisia* sont enregistrées indépendamment des oscillations climatiques centennales [JAO 16, 18]. En effet, l'empire Byzantin a connu une forte croissance agricole et démographique et a atteint son apogée entre 1000-1200 AD (950 – 750 ans cal. BP). Au cours de cet intervalle de temps, l'état byzantin était relativement riche par rapport aux siècles précédents [MOR 91]. La fin de cette époque médiévale vers le 13^{ème} siècle (700 ans cal. BP) coïncide bien avec la chute de Constantinople et le déclin final du contrôle politique byzantin en Anatolie occidentale [XOP 16]. C'est à cette période qu'on remarque un retour vers le pastoralisme et la migration des tribus nomades de Banu Hilal du sud de l'Égypte vers l'Afrique

du Nord au cours du 11^{ème} siècle (950-850 ans cal. BP) [ALL 03]. En outre, ‘FAU 04’ montrent qu’au cours l’épisode humide associé à l’Anomalie Climatique Médiévale, la végétation a été perturbée par une déforestation sévère et une agriculture accrue. De plus, ‘AZU 20’ dans les données de la lagune de Mar Menor (Sud Est de Espagne), montrent qu’au 11^{ème} et 12^{ème} siècle AD, la diminution de la végétation arborée et l’augmentation d’armoise traduisent probablement une déforestation, ainsi qu’une dégradation des milieux ouverts qui peut être sous l’effet d’une pression du pastoralisme accrue [GEN 06, GAM 14]. La diminution du rapport AP/NAP enregistrée dans nos carottes lagunaires soutient un déboisement soutenu dans notre zone d’étude. D’après ‘BOT 90’, la déforestation pourrait aussi favoriser le développement d’*Artemisia*. A l’expansion d’armoise vers 1000 ans cal BP, s’ajoute celle de diverses plantes herbacées connues pour être favorisées dans les milieux perturbés par les activités anthropiques tels que *Mercurialis*, *Rumex*, *Cichorioideae* et *Plantago* (cf. Figure 6a indicateurs anthropiques). De plus, le développement conjoint des Poaceae peut aussi résulter du déboisement pour étendre les zones allouées aux activités pastorales (Figure 6b). Les graminées sont par ailleurs couramment incluses dans les marqueurs anthropiques [BOT 90]. Par conséquent, l’augmentation surprenante d’armoise intervenant dans nos enregistrements au cours de l’Anomalie Climatique Médiévale et du Petit Age Glaciaire, est probablement en relation avec une activité pastorale intense.

Bien que les steppes à armoises et à graminées aient dominé le paysage jusqu’à la fin du 19^{ème} siècle, nos enregistrements montrent une réduction sensible de leur expansion en faveur de l’olivier et du pistachier depuis 1700 ans AD (fin de la SAM-2, ZP-9, Figure 3). Un développement des plantes aquatiques Ruppiaceae est aussi enregistré. Ces changements de végétation pourraient refléter des conditions légèrement plus humides sur la deuxième partie du LIA ou un relâchement de la pression anthropique sur les écosystèmes. ‘MAR 08’ indiquent qu’après 1645 ca. CE (305 ans BP), un état climatique intermédiaire marque une tendance progressive vers des conditions hydrologiques plus stables, i.e. une diminution des inondations. Cependant, ‘FAU 04’ montrent des taux de sédimentation supérieurs à la moyenne (2,5 mm / an) qui sont liées aux activités agricoles au cours de cette période. Le développement de l’olivier au cours des derniers siècles est aussi enregistré au Lac Ichkeul, associé à une reprise des cultures en Tunisie depuis la colonisation française, notamment dans la plaine de Mateur [STA 07]. Une augmentation des pourcentages polliniques d’*Olea* en lien avec une expansion indiscutable de la culture d’olivier au cours des derniers siècles en Sicile et dans le sud de l’Italie est enregistrée dans les séquences Lago di Pergusa et du golfe de Gaète [DI R 18].

Au cours du dernier siècle, pendant la période chaude moderne nommée « Current Warm Period », l’enregistrement pollinique de Sidi Ali el Mekki (GEMP1) met en évidence un développement général de la forêt (60% AP dans le sommet de la carotte, SAM-1/ZP-10+11). Cette augmentation est documentée également par les données polliniques en Tunisie Septentrionale [BIR 01, RAM 01, PEG 01]. Cette augmentation des valeurs d’AP reflète la poursuite de l’expansion de l’olivier ainsi que le développement du pin (ZP-10) (Figure 5e), probablement en lien avec une forte activité humaine. Au milieu du 20^{ème} siècle, au nord-est de la Tunisie comme près d’Aousja, de vastes plantations d’oliviers ont été développées [SAM 11]. ‘KA 81’ montre qu’au cours du siècle dernier, le paysage connaît des mutations importantes en raison de programmes de reboisement et d’intensification de l’agriculture (agriculture sèche et irriguée, arboriculture, maraîchage, fourrage). En effet, l’action de reboisement a connu une évolution remarquable entre 1904 et 1920 [EL H 85]. Au début du siècle dernier et après l’indépendance tunisienne, le pin pignon (*Pinus pinea*) a été largement planté sur le littoral de Raf-Raf au Djebel Nadhour et jusqu’au Cap Ettarf [OUE 06], restreignant les zones à oléo-lentisque et à chêne kermès. Les plantations de Djebel Nadhour et de Djebel Eddmina au début du 20^{ème} siècle avaient pour but de fixer le sable provenant des rives septentrionales de Raf Raf [OUE 06]. De plus, depuis les années soixante-dix, la forêt est soumise à une intense pression anthropique associée à l’augmentation de l’urbanisme et des activités agricoles telles que le développement du maraîchage [SAM 11]. D’autres données polliniques, comme celles du golfe de Gaète (Mer Tyrrhénienne), montrent aussi une dominance de *Pinus* au sommet de l’enregistrement reflétant la mise en place de vastes plantations de forêts de pins dans le sud de l’Italie. Ceci confirme une forte pression anthropique sur les écosystèmes naturels [MAR 16, DI R 18].

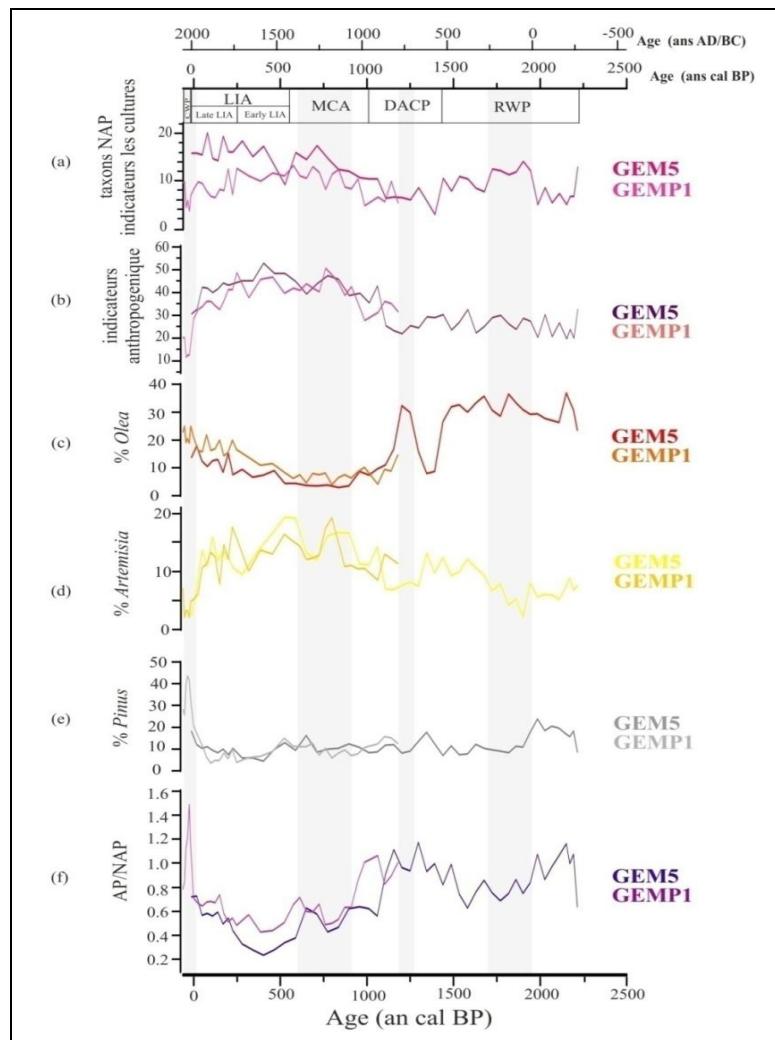


Figure 6. Comparaison des pourcentages de taxons cultivés: a) taxons indiquant les cultures et pâturage (*Cichoroideae*, *Aster*-type, *Brassicaceae*, *Mercurialis*, *Rumex*, *Cerealia*, *Plantago*, *Apiaceae*, *Ranunculus*, *Centaurea*), b) taxons indicateurs anthropogéniques (taxons NAP indiquant les cultures et pâturages + *Poaceae*+*Artemisia*), c) pourcentages d'*Olea*, d) pourcentages d'*Artemisia*, e) pourcentages de *Pinus* et f) rapport de pollens arborés (AP) et non arborés (NAP) des carottes GEM5 et GEMP1. Les bandes en gris représentent les périodes connues par les activités humaines agriculture et/ou pastorale.

5. Conclusions

Ce travail a permis de produire de nouvelles données polliniques à partir d'échantillons prélevés de deux carottes de sédiments holocènes prélevées dans cette lagune de Sidi Ali el Mekki. Nous disposons ainsi de nouveaux enregistrements qui nous ont permis de reconstruire les évolutions passées de la végétation et du climat à l'échelle locale probablement en lien avec les changements climatiques et activités anthropiques qui ont affectés la zone d'étude au cours des derniers millénaires.

Les enregistrements de la lagune de Sidi Ali el Mekki révèlent des changements paléoenvironnementaux rapides. Nos reconstitutions montrent qu'au cours des deux derniers millénaires, les changements de végétation sont le reflet de l'interaction continue entre variabilité climatique rapide et action anthropique croissant. Pendant le premier millénaire, nos données montrent que le climat et les activités humaines ont influencé le paysage du NE de la Tunisie. Des changements de végétation sont détectés en relation avec les épisodes climatiques Période Chaude Romaine et Période Froide de l'Age Sombre. Par contre, au cours du second millénaire de notre ère, la pression anthropique s'est intensifiée en Tunisie septentrionale, modifiant fortement le paysage. Il reste difficile de déterminer l'impact de l'Anomalie Climatique Médiévale et du Petit Age Glaciaire sur les conditions hydroclimatiques du NE de la Tunisie.

Remerciements : Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet franco-tunisien PHC-Utique (Partenariats Hubert Curien : n° 14G1002 — Campus France n°30587QH). Le programme CMCU (14G1002) et le Labex COTE (2017) ont apporté leur soutien financier. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes directeurs de recherche Monsieur **Néjib KALLEL**, Professeur à la Faculté des Sciences de Sfax et **Stéphanie DESPRAT**, HDR-Directrice de Recherche à l'Université de Bordeaux (**UMR 5802 EPOC**) pour leurs aides, soutien scientifique et moral et ses critiques fructueuses m'ont été d'un grand apport et m'ont poussé à aller au bout de mes idées. Un grand merci également à **Laurent DEZILEAU**, pour le carottage des deux carottes lagunaires ainsi que pour les datations Pb et Cs.

Bibliographie

- [ALL 03] Allaoua, A., 2003. Retour à la problématique du déclin économique du monde musulman médiéval: le cas du Maghreb. Hammadide (XI-XIIe siècles). *Maghreb Review* 28, 2–26.
- [AZU 20] Azuara, J., Lebreton, V., Dezileau, L., Pérez, A., Combourieu-nebou, N., 2020. Journal of Archaeological Science : Reports Middle and Late Holocene vegetation history of the Murcia region from a new high-resolution pollen sequence from the Mar Menor lagoon. *Journal of Archaeological Science: Reports* 31, 102353. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102353>
- [BEN 82] Ben Tiba, B., Reille, M., 1982. Recherches pollenanalytiques dans les montagnes de Kroumirie (Tunisie septentrionale): premiers résultats. *Ecologia mediterranea* 8, 75–86.
- [BIR 01] Birks, H.H., Peglar, S.M., Boomer, I., Flower, R.J., Ramdani, M., Appleby, P.G., Bjune, A.E., Patrick, S.T., Kraiem, M.M., Fathi, A.A., Abdelzaher, H.M.A., 2001. Palaeolimnological responses of nine North African lakes in the CASSARINA Project to recent environmental changes and human impact detected by plant macrofossil, pollen, and faunal analyses. *Aquatic Ecology* 35, 405–430. <https://doi.org/10.1023/A:1013265310922>
- [BON 01] Bond, Gerard, Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the holocene.
- [BOT 90] Bottema, S., Woldring, H., 1990. Anthropogenic indicators in the pollen record of the Eastern Mediterranean
- [BRU 85] Brun, A., 1985. La couverture steppique en Tunisie au Quaternaire supérieur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 301, 1085–1090.
- [BRU 92] Brun, A., 1992. Pollens dans les séries marines du Golfe de Gabes et du plateau des Kerkennah (Tunisie): signaux climatiques et anthropiques. *Quaternaire* 3, 31–39. <https://doi.org/10.3406/quate.1992.1970>
- [BUN 11] Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., 2011. 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science* 331, 578–582. <https://doi.org/10.1126/science.1197175>
- [CAL 13] Calò, C., Henne, P.D., Eugster, P., van Leeuwen, J., Gilli, A., Hamann, Y., La Mantia, T., Pasta, S., Vescovi, E., Tinner, W., 2013. 1200 years of decadal-scale variability of Mediterranean vegetation and climate at Pantelleria Island, Italy. *The Holocene* 23, 1477–1486. <https://doi.org/10.1177/0959683613493935>
- [CAM 53] Camps-Fabrer, H., 1953. olivier et l'huile dans l'Afrique romaine.
- [CAM 74] Camps-fabrer, H., 1974. L'olivier et son importance économique dans l'Afrique antique 28, 21–28.
- [CAR 10] Carrion, J., Fernandez, S., Jimenez-Moreno, G., Fauquette, S., Gil-Romera, G., Gonzalez-Sampériz, P., Finlayson, C., 2010. The historical origins of aridity and vegetation degradation in southeastern Spain. *Journal of Arid Environments* 74, 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.11.014>
- [COM 87] Combourieu-Nebout, N., 1987. Les premiers cycles glaciaire-interglaciaire en région méditerranéenne d'après l'analyse palynologique de la série Plio-Pleistocene de Crotone (Italie). Ph. D. dissert.] Montpellier Univ., France.
- [COM 12] Combourieu-Nebout, N., 2012. Precipitation and temperature variability during Heinrich event 4 and Dansgaard/Oeschger interstadial 8 events from Western Mediterranean high resolution pollen data. *Quaternary International* 279–280, 96. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.421>
- [COR 16] Core Team, 2016
- [COR 11] Correa-Metrio, A., Urrego, D.H., Cabrera, K.R., Bush, M.B., 2011. paleoMAS: Paleoecological Analysis, R package version 2.0-: Vienna, The R Project for Statistical Computing.

- [DE V 96] de Vernal, A., Henry, M., Bilodeau, G., 1996. Techniques de préparation et d'analyse en micropaléontologie: Les cahiers du GÉOTOP. Département des Sciences de la terre. Université du Québec à Montréal 3, 16–27
- [DE V 00] De Vos, M., 2000. Rus Africum: terra, acqua, olio nell'Africa settentrionale: scavo e ricognizione nei dintorni di Dougga (Alto Tell Tunisino). Università di Trento.
- [DEZ 11a] Dezileau, L., Sabatier, P., Blanchemanche, P., Joly, B., Swingedouw, D., Cassou, C., Castaings, J., Martinez, P., Von Grafenstein, U., 2011a. Intense storm activity during the Little Ice Age on the French Mediterranean coast. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 299, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.11.009>
- [DI R 09] Di Rita, F., Magri, D., 2009. Holocene drought, deforestation and evergreen vegetation development in the central Mediterranean: a 5500 year record from Lago Alimini Piccolo, Apulia, southeast Italy. *The Holocene* 2, 295–306.
- [DI R 18] Di Rita, F., Lirer, F., Bonomo, S., Cascella, A., Ferraro, L., Florindo, F., Domenica, D., Conrad, P., Margaritelli, G., Petrosino, P., Rettori, R., 2018. Late Holocene forest dynamics in the Gulf of Gaeta (central Mediterranean) in relation to NAO variability and human impact. *Quaternary Science Reviews* 179, 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.012>
- [DJA 08] Djamali, M., Beaulieu, J. De, Shah-hosseini, M., Andrieu-ponel, V., Ponel, P., Amini, A., Akhani, H., Leroy, S.A.G., Stevens, L., Lahijani, H., Brewer, S., 2008. Short Paper A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, NW Iran ☆ 69, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.03.004>
- [EL H 85] EL Hamrouni, A., 1985. Végétation forestière et pré forestières de la Tunisie: typologie et éléments pour la gestion; Bibl.
- [FAU 04] Faust, D., Zielhofer, C., Baena Escudero, R., Diaz Del Olmo, F., 2004. High-resolution fluvial record of late Holocene geomorphic change in northern Tunisia: Climatic or human impact? *Quaternary Science Reviews* 23, 1757–1775. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.02.007>
- [FLE 05] Fletcher, W., 2005. Holocene landscape history of southern Portugal. University of Cambridge.
- [FLE 13] Fletcher, W.J., Zielhofer, C., 2013. Fragility of Western Mediterranean landscapes during Holocene Rapid Climate Changes. *Catena* 103, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.001>
- [FRI 05] Frisia, S., Borsato, A., Spötl, C., Villa, I., Cucchi, F., 2005. Climate variability in the SE Alps of Italy over the past 17 000 years reconstructed from a stalagmite record. *Boreas* 34, 445–455. <https://doi.org/10.1080/03009480500231336>
- [GAC 17] Gaceur, E., Desprat, S., Rouis-Zargouni, I., Hanquiez, V., Lebreton, V., Combourieu Nebout, N., Kallel, N., 2017. Pollen distribution in surface sediments of the northern Lower Medjerda valley (northeastern Tunisia). *Review of Palaeobotany and Palynology* 247, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2017.07.009>
- [GAM 08] Gammar, A.M., 2008. Carte de la végétation de la Tunisie. Henia L., Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis 130–133.
- [GAM 14] Gamoun, M., Zammouri, J., 2014. The Effects of Drought on Plant Communities in the Desert Rangelands of Tunisia. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1620-9>
- [GEN 06] Genin, D., 2006. Entre désertification et développement: la Jeffara tunisienne. IRD Editions.
- [GIL 96] Gilbertson, D. D., Hunt, C. O., and Smithson, P. A., 1996. Quaternary geomorphology and palaeoecology, in: Farming the desert: the UNESCO Libyan Valleys Archaeological Survey, Volume one, Synthesis, edited by: Barker, G., UNESCO Publishing, Paris, 49–82.
- [GOU 65] Gounot, M., Guillerm, J.L., Schoenberger, A., 1965. Carte Phyto Écologique de la Tunisie Septentrionale. Feuille 1. CNRS/CEPE ed Gouvernement Tunisien, Secrétariat d'Etat au Plan et à l'Economie Nationale, Cap Bon – La Goulette – Sousse.
- [GRA 11] Graham, N.E., Ammann, C.M., Fleitmann, D., Cobb, K.M., Luterbacher, J., 2011. Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly.” *Climate Dynamics* 37, 1217–1245.
- [GRA 13] Grauel, A.L., Goudeau, M.L.S., de Lange, G.J., Bernasconi, S.M., 2013. Climate of the past 2500 years in the Gulf of Taranto, central Mediterranean Sea: A high-resolution climate reconstruction based on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of *Globigerinoides ruber* (white). *Holocene* 23, 1440–1446. <https://doi.org/10.1177/0959683613493937>
- [GRI 87] Grim, E.C., 1987. CONISS, a FORTRAN-77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences* 13, 13–35.

- [HAN 08] Hannachi, H., Breton, C., Msalle, M., Ben El HAdj, S., Mohamed, E.G., Berville, A., 2008. Differences between native and introduced olive cultivars as revealed by morphology of drupes, oil composition and SSR polymorphisms: A case study in Tunisia. *Scientia horticulturae* 116, 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.01.004>
- [HOL 05] Holzhauser, H., Magny, M., Zumbühl, H.J., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Holocene* 15, 789–801. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl853ra>
- [HUN 02] Hunt, C. O., Elrishi, H. A., and Hassan, A. T. 2002. Reconnaissance investigation of the palynology of Holocene wadi deposits in Cyrenaica, Libya, *Libyan Studies*, 33, 1–7, doi:10.1017/S0263718900005070.,
- [JAO 16] Jaouadi, S., Lebreton, V., Bout-Roumazeilles, V., Siani, G., Lakhdar, R., Boussoffara, R., Dezileau, L., Kallel, N., Mannai-Tayech, B., Combourieu-Nebout, N., 2016. Environmental changes, climate and anthropogenic impact in south-east Tunisia during the last 8 kyr. *Climate of the Past* 12, 1339–1359. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1339-2016>
- [JAO 18] Jaouadi, S., Lebreton, V., 2018. Pollen-Based Landscape Reconstruction and Land-Use History Since 6000 BC along the Margins of the Southern Tunisian Desert, Plants and People in the African Past: Progress in African Archaeobotany. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89839-1>
- [JON 98] Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P., Tett, S.F.B., 1998. The Holocene High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run. *The Holocene* 8, 455–471. <https://doi.org/10.1191/095968398667194956>
- [JUG 09] Juggins, S., 2009. Package “rioja”—analysis of quaternary science data. *The Comprehensive R Archive Network*.
- [KAS 81] Kassab, A., 1981. L’agriculture tunisienne sur la voie de l’intensification, in: *Annales de Géographie*. pp. 55–86.
- [KOH 22] Kohila et al., 2022 Balkis Samah Kohila1,2, Laurent Dezileau2, Soumaya Boussetta1, Tarek Melki1, and Nejib Kallel : Review article: Extreme marine events revealed by lagonal sedimentary records in Ghar El Melh during the last 2500 years in the northeast of Tunisia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(12):3645–3661. DOI: 10.5194/nhess-21-3645-2021
- [LAM 85] Lamb, H.F., 1985. Palynological evidence for postglacial change in the position of tree limit in Labrador. *Ecological Monographs* 55, 241–258.
- [LEB 15] Lebreton, V., Jaouadi, S., Mulazzani, S., Boujelben, A., Belhouchet, L., Gammar, A.M., Combourieu-Nebout, N., Saliège, J.F., Karray, M.R., Fouache, E., 2015. Early oleiculture or native wild Olea in eastern Maghreb: New pollen data from the sebkhalagoon Halk el Menjel (Hergla, Central Tunisia). *Environmental Archaeology* 20, 265–273. <https://doi.org/10.1179/1749631414Y.0000000046>
- [MAG 11] Magny, M., Vannière, B., Calo, C., Millet, L., Leroux, A., Peyron, O., Zanchetta, G., La Mantia, T., Tinner, W., 2011. Holocene hydrological changes in south-western Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lago Preola, a coastal lake in southern Sicily, Italy. *Quaternary Science Reviews* 30, 2459–2475. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.05.018>
- [MAN 09] Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326, 1256–1260.
- [MAR 16] Margaritelli, G., Vallefouco, M., Rita, F. Di, Capotondi, L., Bellucci, L.G., Insinga, D.D., Petrosino, P., Bonomo, S., Cacho, I., Cascella, A., Ferraro, L., Florindo, F., Lubritto, C., Lurcock, P.C., Magri, D., Pelosi, N., Rettori, R., Lirer, F., Costiero, M., Nazionale, C., Porta, C., Porto, I., Ambientale, B., Roma, U., Moro, P.A., 2016. Marine response to climate changes during the last five millennia in the central Mediterranean Sea. *Global and Planetary Change* 142, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.04.007>
- [MAR 08] Marquer, L., Pome, S., Abichou, A., Schulz, E., Kaniewski, D., Van Campo, E., 2008. Late Holocene high resolution palaeoclimatic reconstruction inferred from Sebkha Mhabeul, southeast Tunisia. *Quaternary Research* 70, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.06.002>
- [MAR 08] Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B.L., Mata, M.P., González-Sampériz, P., Bao, R., Moreno, A., Stefanova, V., 2008. Arid and humid phases in southern Spain during the last 4000 years: The Zoñar Lake record, Córdoba. *Holocene* 18, 907–921. <https://doi.org/10.1177/0959683608093533>
- [MAT 88] Mattingly, D.J., 1988. oil for export? A comparison of Libyan, Spanish and Tunisian olive production in the Roman empire. *J Rom Archaeol* 1, 33–56.

- [MER 13] Mercuri, A.M., Mazzanti, M.B., Florenzano, A., Montecchi, M.C., Rattighieri, E., 2013. Olea , Juglans and Castanea : The OJC group as pollen evidence of the development of human-induced environments in the Italian peninsula. *Quaternary International* 303, 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.01.005>
- [MOR 91] Morrisson, C., 1991. Monnaie et finances dans l'empire byzantin, Xe-XIVe siècle. P. Lethielleux.
- [NEU 19] Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J.J., Wang, J., Werner, J.P., 2019. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1401-2>
- [NIE 13] Nieto-Moreno, V., Martínez-Ruiz, F., Giralt, S., Gallego-Torres, D., García-Orellana, J., Masqué, P., Ortega-Huertas, M., 2013. Climate imprints during the “Medieval Climate Anomaly” and the “Little Ice Age” in marine records from the Alboran Sea basin. *Holocene* 23, 1227–1237. <https://doi.org/10.1177/0959683613484613>
- [OUE 06] Oueslati, A., Charfi, F. & Baccar, F., 2006. Presentation of the Tunisian site La basse vallée de Oued Majerda et la lagune de Ghar El Melh, Wadi Project 5th International Meeting, Tunis : 26 pages. 2006. Wadi Project Fifth International Meeting 26.
- [PAG 13] Pages 2k, C., 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nat. Geosci.* 6, 339–346. *Nature Geoscience* 6, 339–346.
- [PEG 01] Peglar, S.M., Birks, H.H., Birks, H.J.B., Appleby, P.G., Fathi, A.A., Flower, R.J., Kraiem, M.M., Patrick, S.T., Ramdani, M., 2001. Terrestrial pollen record of recent land-use changes around nine North African lakes in the CASSARINA project. *Aquatic Ecology* 35, 431–448. <https://doi.org/10.1023/A:1011988127627>
- [PEY 11] Peyron, O., Goring, S., Dormoy, I., Kotthoff, U., Pross, J., de Beaulieu, J.L., Drescher Schneider, R., Vanniére, B., Magny, M., 2011. Holocene seasonality changes in the central mediterranean region reconstructed from the pollen sequences of Lake Accesa (Italy) and Tenaghi Philippon (Greece). *Holocene* 21, 131–146. <https://doi.org/10.1177/0959683610384162>
- [PON 62] Poncet, J., 1962. La colonisation et l'agriculture européennes en Tunisie depuis 1881: étude de géographie historique et économique. Nationale.
- [RAM 01] Ramdani, M., Elkhiati, N., Flower, R.J., Birks, H.H., Kraiem, M.M., Fathi, A.A., Patrick, S.T., 2001. Open water zooplankton communities in North African wetland lakes: The CASSARINA project. *Aquatic Ecology* 35, 319–333. <https://doi.org/10.1023/A:1011926310469>
- [REA 00] Reale, O., Dirmeyer, P., 2000. Modeling the effects of vegetation on Mediterranean climate during the Roman Classical Period. Part I: Climate history and model sensitivity. *Global and Planetary Change* 25, 163–184. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00002-3)
- [ROB 11] Roberts, N., Brayshaw, D., Kuzucuoğlu, C., Perez, R., Sadori, L., 2011. The mid-Holocene climatic transition in the Mediterranean: Causes and consequences. *Holocene* 21, 3–13. <https://doi.org/10.1177/0959683610388058>
- [ROB 11] Roberts, N., Eastwood, W.J., Kuzucuoğlu, C., Fiorentino, G., Caracuta, V., 2011. Climatic, vegetation and cultural change in the eastern mediterranean during the midholocene environmental transition. *Holocene* 21, 147–162. <https://doi.org/10.1177/0959683610386819>
- [SAB 12] Sabatier, P., Dezileau, L., Colin, C., Briquet, L., Bouchette, F., Martinez, P., Siani, G., Raynal, O., Grafenstein, U. Von, 2012. 7000 years of paleostorm activity in the NW Mediterranean Sea in response to Holocene climate events. *Quaternary Research* 77, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.09.002>
- [SAD 01] Sadori, L., Narcisi, B., 2001. The Postglacial record of environmental history from Lago di Pergusa , Sicily. *The Holocene* 6, 655–670.
- [SAD 11] Sadori, L., Jahns, S., Peyron, O., 2011. Mid-Holocene vegetation history of the central Mediterranean. *Holocene* 21, 117–129. <https://doi.org/10.1177/0959683610377530>
- [SAD 15a] Sadori, L., Giardini, M., Gliozzi, E., Mazzini, I., Sulpizio, R., van Welden, A., Zanchetta, G., 2015a. Vegetation, climate and environmental history of the last 4500 years at lake Shkodra (Albania/Montenegro). *Holocene* 25, 435–444. <https://doi.org/10.1177/0959683614561891>
- [SAM 11] Samaali, H., 2011. Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par teledetection et systemes d'informations geographiques 377.
- [SHI 02] Shili, A., Trabelsi, E.B., Ben Maïz, N., 2002. Benthic macrophyte communities in the Ghar El Melh lagoon (North Tunisia). *Journal of Coastal Conservation* 8, 135–140. <https://doi.org/10.1007/BF02788950>
- [STA 07] Stambouli-Essassi, S., Roche, E., Bouzid, S., 2007. Evolution de la végétation et du climat dans le nord-ouest de la Tunisie au cours des deux derniers millénaires. *Geo-eco-trop* 31, 171–214.

- [STE 93] Stevenson, A.C., Phethean, S.J., Robinson, J.E., 1993. The palaeosalinity and vegetational history of Garaet el Ichkeul, northwest Tunisia. *The Holocene* 3, 201–210. <https://doi.org/10.1177/095968369300300302>
- [STU 90] Stuijts, I., 1990. Kinderoffers in de Tophet (Carthago); houtskoolonderzoek. *Paleo-aktueel* 58–61.
- [SUC 87] Suc, J.-P., 1984. Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature* 307, 429–432.
- [SWI 11] Swingedouw, D., Terray, L., Cassou, C., Volodire, A., Salas-Mélia, D., Servonnat, J., 2011. Natural forcing of climate during the last millennium: fingerprint of solar variability. *Climate Dynamics* 36, 1349–1364.
- [TIN 03] Tinner, W., Lotter F., A., Ammann, B., Conedera, M., Hubschmid, P., van Leeuwen, J.F.N., Wehrli, M., 2003. Climatic change and contemporaneous land-use phases north and south of the Alps 2300 BC to 800 AD. *Quaternary Science Reviews* 22, 1447–1460. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00083-0)
- [TRA 07] Traverse, A., 2007. *Paleopalynology*. second ed. Springer, Netherlands.
- [VAN 83] Van Zeist, W., Bottema, S., 1983. Palaeobotanical Studies of Carthage: A Comparison of Microscopic and Macroscopic Plant Remains. CEDAC Carthage Bulletin Carthage 18–22.
- [VAN 01] Van Zeist, W., Bottema, S., Van der Veen, M., 2001. Diet and Vegetation at Ancient Carthage: The Archaeobotanical Evidence. 104.
- [WIL 08] Wiles, G.C., Barclay, D.J., Calkin, P.E., Lowell, T. V., 2008. Century to millennial-scale temperature variations for the last two thousand years indicated from glacial geologic records of Southern Alaska. *Global and Planetary Change* 60, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.036>
- [XOP 16] Xoplaki, E., Fleitmann, D., Luterbacher, J., Wagner, S., Haldon, J.F., Zorita, E., Telelis, I., Toreti, A., Izdebski, A., 2016. The Medieval Climate Anomaly and Byzantium: A review of the evidence on climatic fluctuations, economic performance and societal change. *Quaternary Science Reviews* 136, 229–252. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.10.004>
- [ZER 09] Zerai, K., 2009. Chronostratigraphy of Holocene alluvial archives in the Wadi Sbeitla basin (central Tunisia). *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 15, 271–286.