



HAL
open science

Les phytolithes comme marqueurs paléoenvironnementaux dans l'Atlas atlantique (Maroc)

Yves Claude Simone, Jean-Dominique Meunier, Anne Alexandre, Jean-Louis
Ballais

► To cite this version:

Yves Claude Simone, Jean-Dominique Meunier, Anne Alexandre, Jean-Louis Ballais. Les phytolithes comme marqueurs paléoenvironnementaux dans l'Atlas atlantique (Maroc). *Etudes de Géographie Physique*, 1999, La montagne méditerranéenne, XXVIII, pp.67-74. hal-01569012

HAL Id: hal-01569012

<https://amu.hal.science/hal-01569012>

Submitted on 26 Jul 2017

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

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

Les phytolithes comme marqueurs paléoenvironnementaux dans l'Atlas atlantique (Maroc)

Claude SIMONE*, Jean-Dominique MEUNIER**,
Anne ALEXANDRE** et Jean-Louis BALLAIS*

L'orogénèse atlasique est contemporaine de la surrection des chaînes alpines, et appartient, géologiquement, au système alpin. Orientée est-nord-est / ouest-sud-ouest, la chaîne du Haut-Atlas est, géographiquement, subdivisée en trois régions montagneuses : le Haut Atlas oriental, central et occidental. Ce dernier est lui-même divisé en deux parties : l'Atlas de Marrakech, à l'est, et l'Atlas atlantique à l'ouest.

Le terme d'Atlas atlantique (A. WEISROCK, 1980) fait parfaitement référence à la situation duale de cette région, à la fois montagneuse et côtière. L'espace étudié (région d'Essaouira) est inscrit dans la partie nord occidentale de l'Atlas atlantique et jouxte l'océan (Fig. 1). Il appartient à la zone synclinale de Mogador (E. ROCH, 1930), nom portugais d'Essaouira.

Les influences méditerranéennes y sont diverses. Sur le plan structural, l'influence mésogéenne est représentée par l'orientation d'axes anticlinaux suivant la direction Ouest-Est (L'Gouz, Ouaskal, Tazenakht, Ouamsitten, A. WEISROCK, 1980).

Sur le plan climatique, l'été est marqué par une aridité prononcée, tant sur le littoral et les plateaux intérieurs que sur les secteurs de basse montagne. À Essaouira, la moyenne pluviométrique annuelle est de 279 mm. De 1971 à 1980, la moyenne des précipitations portant sur les mois d'été (Juin, Juillet, Août, Septembre) est de 6,7 mm. C'est l'un des caractères d'un climat nettement méditerranéen, même si les influences océaniques sont notables. La température moyenne annuelle s'élève à 17,2 °C et l'amplitude thermique annuelle moyenne est seulement de 5,5 °C.

Tous les indices d'aridité calculés selon

de MARTONNE, EMBERGER ou THORNTHWAITE, donnent le même classement pour Essaouira (domaine semi-aride à hiver chaud).

La méthode de recherche qui suit utilise les phytolithes comme traceurs botaniques et paléobotaniques. Ce sont des particules qui précipitent à l'intérieur et entre les cellules des tissus végétaux vivants ; ils se présentent sous la forme de cristaux d'oxalate de calcium ou de silice amorphe [opale-A ($\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$)]. Notre intérêt portera uniquement sur le second groupe.

Dès le début du siècle, les botanistes décrivant l'anatomie des tissus végétaux, identifient les phytolithes, notamment ceux produits par les *Poaceae* (*Gramineae*), (H. PRAT, 1932).

Aussi, les premières études intégrant pleinement le rôle de la végétation dans le cycle biogéochimique du silicium, et la production de phytolithes comme indicateurs du même cycle, apparaissent à la fin des années 50 (LOVERING, 1959 ; RIQUELIER, 1960). Ces recherches ont continué jusqu'à aujourd'hui (L.P. WILDING et L.R. DREES, 1971 et 1974 ; BARTOLI, 1981, 1983, A. ALEXANDRE *et al.*, 1997a).

Mais la prise de conscience de l'intérêt paléocologique des phytolithes en tant que marqueurs et leur utilisation est plus récente. Elle a permis d'ouvrir des axes de recherche novateurs (P.C. TWISS, 1969, 1992 ; J. ROVNER, 1971 ; P.G. PALMER, 1976 ; D.R. PIPERNO, 1988 ; G.G. FREDLUND et L.L. TIESZEN, 1994, 1997 ; D.R. PIPERNO et P. BECKER, 1996 ; A. ALEXANDRE *et al.*, 1997b, 1999).

* CAGÉP-URA 903 du CNRS, Institut de Géographie, Université de Provence, 29, avenue R. Schuman, 13 621 AIX-EN-PROVENCE Cédex 01 / everest@aixup.univ-aix.fr - ballais@aixup.univ-aix.fr - ** CEREGE, CNRS-Université Aix-Marseille III, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13 545 AIX-EN-PROVENCE Cédex 04 / Meunier@cerege.fr - Alexandre@cerege.fr.

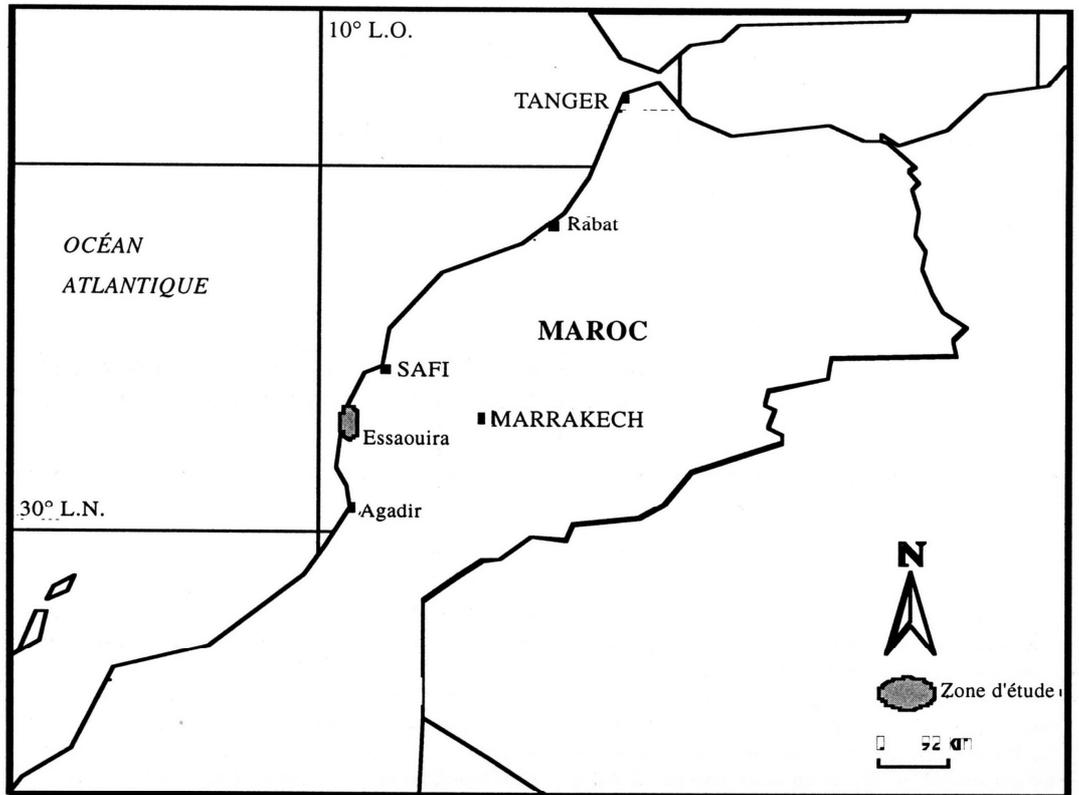


Figure 1 - Localisation de la zone étudiée.

I - PROBLÉMATIQUE

Le massif dunaire d'Essaouira ceinture la ville sur sa bordure est. L'agglomération est limitée à l'ouest par la côte atlantique. Les dunes sont boisées et leur étendue est d'environ 2 km sur 6.

La géomorphologie du milieu a fait l'objet de diverses recherches concernant les dynamiques morphosédimentaires régionales (A. WEISROCK, 1980 ; A. CHAHBOUN, 1988 ; W. GENTILE, 1997).

L'intérêt suscité par ce massif nous amène à nous interroger sur son histoire et notamment sur l'origine de sa formation. Pourquoi et à quelle date a débuté le développement des dunes ? Quel type de couvert végétal dominait avant la formation du massif dunaire ? Répondre à ces questions nécessite une reconstitution paléoenvironnementale du site.

Dans un premier temps, la palynologie a été envisagée, mais elle n'a donné aucun résultat. Il s'est avéré que les pollens fossilisés montrent une dégradation avancée, due à l'oxydation du milieu. C'est la conséquence de plusieurs phases arides suffisamment longues pour les détruire partiellement et les rendre indé-

terminables.

Notre choix s'est alors porté sur un autre traqueur paléobotanique : les phytolithes qui se conservent mieux que les pollens en milieu oxydant.

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier avec une précision suffisante le type de couvert végétal actuel. Parmi les monocotylédones, l'analyse porte plus particulièrement sur la famille des *Poaceae* hautes et basses. L'étude de l'assemblage phytolithique moderne ou de référence est aussi fondée sur le couvert arboré.

Dans un deuxième temps, la connaissance du type de couvert végétal disparu qui dominait avant le développement des dunes, dans l'hypothèse d'une évolution est impérative. Le même objectif est visé et la même démarche suivie. L'analyse de l'assemblage fossile est à réaliser et doit aboutir à une comparaison avec l'assemblage moderne. La discussion sera centrée sur les questions suivantes :

Y a-t-il eu rupture(s) de faciès végétal marquant une intervention anthropique forte, ou transition(s) progressive(s) indiquant une fluctuation climatique à

l'origine de changement(s) de la flore ? Ou encore, peut-on percevoir une coïncidence des deux processus ?

À ce jour, aucune étude de ce type n'a été réalisée sur un milieu dunaire.

II - MÉTHODE ET MATÉRIELS

L'analyse phytolithique requiert le prélèvement d'échantillons de sols actuels pour l'assemblage moderne, et de paléosols (coupes stratigraphiques ou sondages) pour l'assemblage fossile.

Quatre échantillons de sols actuels (HD, WA, DA, AZ), décrits dans le tableau I, ont été prélevés et analysés après traitement.

L'horizon humique des sols (cinq premiers cm) a été prélevé au sein du géosystème dunaire, et sur chacun des ensembles phytogéographiques homogènes, périphériques au premier. Pour ne pas être sélectif, il a été nécessaire d'échantillonner plusieurs fois et sur des espaces diversifiés à l'intérieur de chaque ensemble phytogéographique.

D'une manière générale, des problèmes d'apports allochtones se produisent et peuvent perturber ou fausser les résultats. Ils ont été discutés par P.C. TWISS (1983), G.G. FREDLUND et L.L. TIESZEN (1994), mais doivent être reconsidérés dans chaque cas d'étude. Quatre facteurs potentiels de dispersion des phytolithes sont susceptibles d'intervenir : (1) les incendies de forêts, (2) les herbivores, (3) le transport éolien, (4) les transits alluvial et colluvial.

En général, l'échelle de dispersion s'étend sur trois distances : locale, extra-locale et régionale (D.R. PIPERNO, 1988). La définition de régional ne

correspond pas à celle utilisée en climatologie, mais embrasse un espace plus large (intercontinental par exemple).

Le premier facteur n'est pas intégré à notre étude car la périodicité des incendies et la quantité de phytolithes transportés ne sont pas connues.

Nous considérons l'action des herbivores insignifiante. En effet, le pâturage exercé n'est pas transhumant et il reste local. Les *Gramineae* sont dans tous les cas dispersées dans la litière. Le transport éolien est le vecteur le mieux connu. D'après P.C. TWISS (1983), les dépôts de phytolithes éoliens dans les grandes plaines nord-américaines sont compris entre 0,5 et 2 g/m² par an. Dans notre cas, les vents dominants et efficaces sont maritimes. Ils sont issus de l'anticyclone des Açores et orientés NNE / SSO. Aucun vent continental n'atteint Essaouira en raison des barrières montagneuses. Les influences sahariennes y sont nulles, contrairement au reste de l'Atlas atlantique (Agadir et vallée du Souss notamment, avec le chergui). Par conséquent, nous pouvons considérer les sources potentielles éoliennes, extérieures au site d'échantillonnage comme négligeables.

Les apports alluviaux sont inexistantes et des apports colluviaux peuvent se produire sur le site AZ uniquement, mais dans tous les cas ils restent internes à l'espace phytogéographique échantillonné.

Tableau I - Description des milieux échantillonnés et indices phytolithiques d'après M. BAL (1993).

Echant.	Types de sols	Formations végétales	Recouvrement en % *			Iph en %	dicot./ Poaceae
			strate arbor.	strate arbust.	strate herb.		
HD	régosols limono-sableux brun foncé	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i>	< 5	55	40	93	0,8
WA	calcisols caillouteux brun noir	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Tetraclinis articulata</i> et <i>Argania spinosa</i>	35	45	20	87	0,6
DA (géosystème dunaire)	arénosols brun clair à brun foncé	formation arborée à <i>Acacia cyanophylla</i> , <i>Eucalyptus Gomphocephala</i> et <i>Tamarix Canariensis</i>	10	50	20	93	0,8
AZ	régosols limono-sableux brun clair	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Salsola longifolia</i> et <i>Periploca laevigata</i>	10	60	30	89	0,7
Moyenne			15	55	30	90,5	0,7

Le traitement des échantillons a été réalisé suivant le protocole d'extraction de E.F. KELLY (1990). Il comprend les opérations suivantes :

- Tamassage à sec à 200 µm, la partie tamisée étant séchée à 110 °C durant 48 h, 10 g d'échantillon par site ont été retenus ;
- décarbonatation à l'acide chlorhydrique (1N) ;
- dissolution de la matière organique au peroxyde d'hydrogène (30 %) dans un bain de sable à 100 °C ;

d) défloculation à l'hexamétoposphate de sodium (5 %) sur secoueur ;

e) tamassage humide à 50 µm ;

f) extraction de la fraction argileuse par cycles de sédimentation ;

g) extraction des phytolithes par densimétrie dans une liqueur dense de bromure de zinc et d'acide chlorhydrique de densité 2,35.

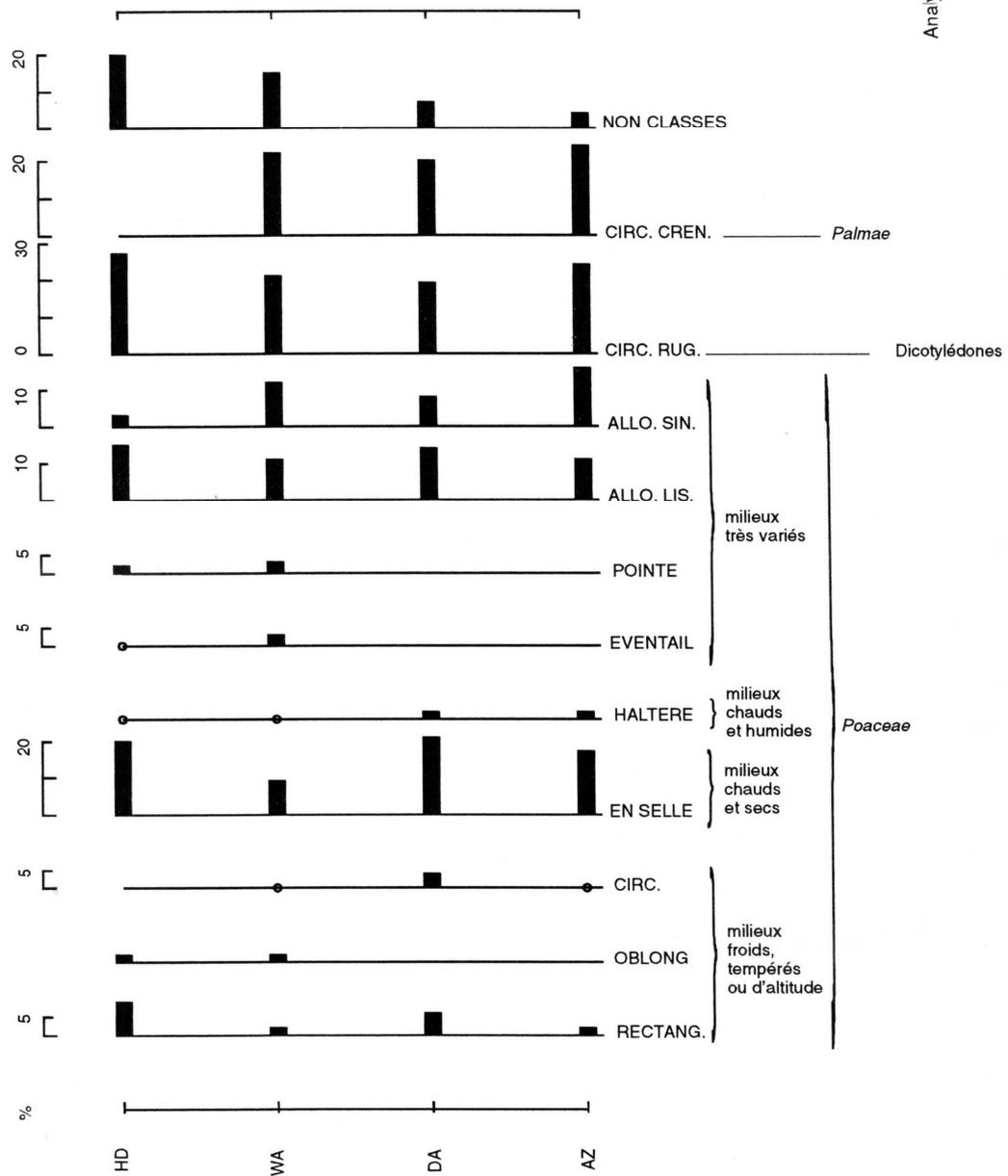


Figure 2 - Distribution des morphotypes de phytolithes dans les sols.

Après séchage, les phytolithes ont été pesés et montés deux fois sur lame, au glycérol (observation) et au baume du Canada (montage définitif).

Ils ont été déterminés selon la classification taxonomique de P.C. TWISS (1992), et comptés sous microscope optique (600 X). Les comptages de phytolithes par lame s'élèvent à 430 pour HD, 316 pour WA, 333 pour DA et 295 pour AZ. Les données ont été intégrées et traitées sous le logiciel Gpal3.

La famille des *Poaceae* produit les morphotypes compris entre le rectangulaire et l'allongé sinueux inclus. Le rôle taxonomique des phytolithes est essentiel pour les reconstitutions paléoenvironnementales et, notamment, ceux formés par les *Poaceae*. Chaque sous-famille est adaptée à un environnement particulier (Fig. 2).

Les trois premiers morphotypes (rectangulaires, circulaires et oblongs) sont issus de la sous-famille des

Festucoideae qui sont des *Poaceae* peuplant les zones froides, tempérées ou d'altitude.

Le morphotype en selle est produit par la sous-famille des *Chloridoideae* qui sont des *Poaceae* basses (< 80 cm) occupant les milieux chauds et secs.

Le morphotype en haltère correspond à la sous-famille des *Panicoideae*, *Poaceae* hautes (> 80 cm) colonisant les milieux chauds et humides. Celles-ci produisent aussi des formes en croix non recensées ici.

Les morphotypes restants (en éventail, en pointe, allongé lisse et sinueux) sont formés par toutes les sous-familles de *Poaceae*, peuplant des milieux très variés.

Le morphotype circulaire rugueux est produit par les dicotylédones et fournit des informations sur le taux de boisement et la densité du couvert arboré (A. ALEXANDRE *et al.*, 1997a).

La forme circulaire crénelée, issue de la famille des *Palmae*, est indicatrice de milieux chauds.

III - RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES ET DISCUSSION

La proportion moyenne de phytolithes contenus dans la partie superficielle des sols est de 0,96 ‰ du poids total de la fraction < 200 µm. A. ALEXANDRE *et al.* (1999) obtiennent une concentration comparable à Lagoa Campestre près de Salitre (Ouest du Minas Gerais), sur un sol situé au contact de la forêt semi-caducifoliée et du Cerrado sur le plateau central brésilien.

Le diagramme (Fig. 2) indique la distribution des morphotypes de phytolithes contenus dans les sols décrits plus haut.

Parmi les phytolithes de *Poaceae*, seuls les cinq premiers morphotypes (rectangulaire, oblong, circulaire, en selle et en haltère) (Fig. 2), constituent les marqueurs très fiables, dans la mesure où ils sont formés par trois sous-familles identifiées et adaptées, chacune, à un milieu défini. C'est donc leurs proportions qui nous permettent de préciser le caractère du milieu concernant les températures et l'humidité.

Les phytolithes non classés correspondent à des morphotypes non répertoriés.

La figure 2 nous montre, pour les *Poaceae*, la prédominance des morphotypes en selle (milieux chauds et secs). L. DIESTER-HAAS *et al.* (1973) ont défini un indice phytolithique (Iph), bon indicateur de l'aridité.

$Iph = \frac{\text{nombre de morphotypes en selle (Chloridoideae)}}{\text{nombre de morphotypes en selle (Chloridoideae)} + \text{nombre de morphotypes en haltère et en croix (Panicoideae)}}$

Les valeurs calculées sont portées en pourcents dans le tableau I. Elles se rapprochent toutes de 100, la moyenne dépassant 90, ce qui nous indique une aridité édaphique élevée. À une échelle plus globale, 30 % marque le seuil entre savane hygrophile (à hautes herbes) et savane xérophile (à basses herbes), en Afrique de l'Ouest intertropicale (A. ALEXANDRE *et al.*,

1997a) ; les mêmes auteurs ont défini une autre limite à 45 % discriminant les prairies adaptées à des conditions humides de celles développées en milieu aride, à moyenne latitude, dans les grandes plaines centrales des Etats-Unis étudiées par M.H. KURMANN, (1985) et G.G. FREDLUND et L.L. TIESZEN (1994). La même limite est utilisée sur des sondages océaniques effectués au Sud des Canaries, à 23 ° 30' de latitude Nord, et étudiés par L. DIESTER-HASS *et al.* (1973).

Dans notre secteur d'étude, l'Iph maximum atteint est 93 % pour HD et DA (Tab. I). Nous constatons, après calcul, que le milieu est très bien identifié dans la mesure où DA est l'échantillon des sols les moins évolués, les plus perméables, et, par conséquent les plus xériques.

Les formes en haltère sont peu représentées, en comparaison des formes en selle, et nous montrent que les étendues de *Poaceae* hautes n'existent pas.

Aussi la proportion relativement forte de formes circulaires crénelées (*Palmae*) avec 21,9 % de moyenne sur trois échantillons indique que le milieu testé est conditionné par des températures élevées et confirme les résultats précédents.

Le morphotype circulaire rugueux (dicotylédones) est bien représenté. Le rapport dicotylédones / *Poaceae* exprime le taux de boisement en zone intertropicale (A. ALEXANDRE *et al.*, 1997a). En calculant ce rapport (Tableau I), nous obtenons une valeur toujours inférieure à un. Ce qui, *a priori*, indique une domination des *Poaceae* par rapport aux feuillus. En observant de plus près le tableau, nous constatons que, dans ce rapport, celles-ci sont "surreprésentées" dans la mesure où la strate herbacée a un faible recouvrement par rapport aux strates arbustive et arborée. Ces valeurs s'expliquent par des peuplements de gymnospermes importants. En effet, parmi les trois principales espèces arborées régionales, deux sont des conifères

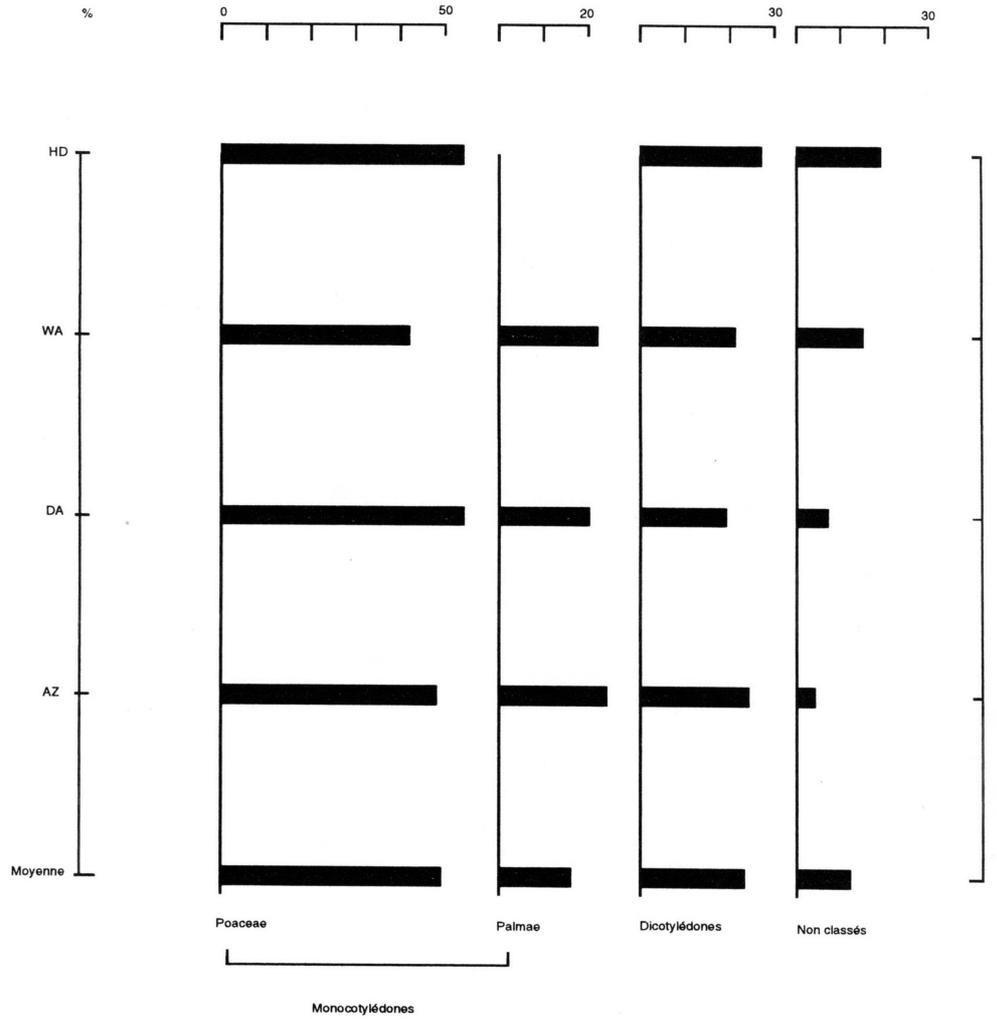


Figure 3 - Distribution taxonomique des phytolithes dans les sols.

res : *Juniperus phoenicea* et *Tetraclinis articulata*. Même s'ils forment des espaces forestiers peu étendus, ils ne sont pas pris en compte dans le rapport discuté. De plus, nous savons qu'une part importante de jeunes semis naturels (reconquête végétale vigoureuse du genévrier, notamment) chez ces conifères marque le stade arbustif. Elle n'est pas, non plus, prise en compte dans le rapport. C'est notamment le cas pour l'échantillon WA dont la strate arborée a un recouvrement maximal avec 35 % et qui enregistre, malgré cette valeur, le plus bas rapport dicot./*Poaceae* avec 0,6 (Tab. I). Nous observons dans le même tableau que cet ensemble phytogéographique est composé d'une formation arborée à *Juniperus phoenicea*, *Tetraclinis*

articulata et *Argania spinosa*. L'arganier est donc le seul élément forestier représenté dans le rapport dicot./*Poaceae*.

Appartenant à la famille des *Sapotaceae*, il est la troisième espèce ligneuse majeure. Sa part dans la constitution de la litière est faible dans la mesure où ses feuilles sont petites et où il ne les perd qu'en partie l'été, pour éviter une évapotranspiration trop élevée.

Cependant d'autres dicotylédones sont très répandues (*Pistacia lentiscus*, *Ceratonia siliqua*, *Phillyrea media* et *Tamarix canariensis* entre autres). La figure 3 montre qu'elles représentent 22,6 %, valeur faible par rapport aux *Poaceae* avec presque 50 %.

IV - CONCLUSION

Les résultats préliminaires obtenus pour la région d'Essaouira montrent que les phytolithes sont des traceurs potentiels du paysage végétal, notamment pour les monocotylédones.

Par le calcul de l'indice phytolithique (Iph), les morphotypes associés à des taxons correspondant aux sous-familles de *Poaceae* sont en accord avec un milieu chaud et aride. L'assemblage moderne reflète avec fidélité les données bioclimatiques du terrain étudié.

Les phytolithes de gymnospermes ne sont pas encore répertoriés, mais ils permettraient de fournir

plus d'informations sur le taux de boisement et la densité du couvert arboré, à partir du rapport dicotylédones / *Poaceae* complété. C'est une perspective de recherche à envisager. Ce quotient reste valable uniquement pour des formations végétales sans gymnospermes.

Il reste à montrer, maintenant, si l'aridité relevée est anthropique ou climatique. Pour cela, un assemblage fossile doit être réalisé et comparé à celui-ci.

Remerciements : Cette recherche a été effectuée dans le cadre de l'appel d'offres " Pourtour Méditerranéen ". Nous tenons à remercier chaleureusement Anne Alexandre pour son aide précieuse et la revue critique du manuscrit, ainsi qu' Annie Vincens et Guy Riollet pour leur contribution au débat scientifique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEXANDRE A., MEUNIER J.D., LEZINE A.M., VINCENS A. et SCHWARTZ D. - 1997a. Phytoliths : indicators of grassland dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 136, n° 1-4, p. 213-229.
- ALEXANDRE A., MEUNIER J.D., COLIN F. et KOUD J.M. - 1997b. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering problems. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, vol. 16, n° 3, p. 67-682.
- ALEXANDRE A., MEUNIER J.D., MARIOTTI A. et SOUBIÈS F. - 1999. Late Holocene paleoenvironmental record from a latosol at Salitre (Southern Central Brazil) : phytolith, and carbon isotope evidence. *Quaternary Research*, soumis.
- BAL M. - 1993. *Dynamique de la végétation et évolution des sols des dunes maritimes d'Essaouira*. Mémoire de 3^{ème} cycle, École Nationale Forestière d'Ingénieurs de Salé, 98 p.
- BARTOLI F. - 1981. *Le cycle biogéochimique du silicium sur roche acide. Application à deux écosystèmes forestiers tempérés (Vosges)*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Nancy I.
- BARTOLI F. - 1983. The biogeochemical cycle of silicon in two temperate forest ecosystems. *Environmental Biogeochemistry Ecological Bulletin* (Stockolm), n° 35, p. 469-476
- CHAHBOUN A. - 1988. *Les formations sableuses fluviales, littorales et éoliennes aux embouchures des oueds Tensift, Ksob et Sous (Atlas atlantique, Maroc)*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris VI, 187 p.
- DIESTER-HAAS L., SCHRADER H.J. et THIEDE J. - 1973. Sedimentological and paleoclimatological investigations of two pelagic ooze cores off Cape Barbas, North-West Africa. *Meteor. Forschung-Ergebnisse*, C (16), p. 19-66.

- FREDLUND G.G. et TIESZEN L.L. - 1994. Modern phytolith assemblages from the North American Great Plains. *Journal of Biogeography*, vol. 21, p. 321-335.
- FREDLUND G.G. et TIESZEN L.L. - 1997. Calibrating grass phytolith assemblages in climatic terms : Application to late Pleistocene assemblages from Kansas and Nebraska. *Palaeogeography, Palaeo-climatology, Palaeoecology*, vol. 136, p. 199-211.
- GENTILE W. - 1997. *Caractérisation et suivi d'un champs dunaire par analyses sédimentologiques et télédétection, Essaouira-Cap Sim (Maroc atlantique)* Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille I, 307 p.
- KELLY E.F. - 1990. Methods for extracting opal phytoliths from soil and plant material. *Internal report*, Department of Agronomy, Colorado State University, Fort Collins, U.S.A. 10 p.
- KURMANN M.H. - 1985. An opal phytolith and palynomorph study of extant and fossil soils in Kansas (U.S.A.). *Palaeogeography, Palaeo-climatology, Palaeoecology*, vol. 49, p. 217-235.
- LOVERING - 1959. Significance of accumulator plants in rock weathering. *Society of American bulletin*, vol. 70, p. 781-800.
- PALMER P.G. - 1976. Grass cuticles : a new paleoecological tool for East african lake sediments. *Canadian Journal of Botany*, vol. 54, n°15, p. 1725-1734.
- PIPERNO D.R. - 1988. Phytolith analysis. An archaeological and geological perspective. *Ed. Academic Press*, New York, 280 p.
- PIPERNO D.R. et BECKER P. - 1996. Vegetationnal history of a site in the central Amazon basin derived from phytolith and charcoal records from natural soils. *Quaternary Research*, vol. 45, p 202-209.
- PRAT H. - 1932. *L'épiderme des Graminées. Etude anatomique et systématique*. Annales de Sciences Naturelles de Botanique, 10^{ème} série, 325 p.
- RIQUIER - 1960. Les phytolithes de certains sols tropicaux et des podzols. *7th International Congress of soil Science*, Madison, Wisconsin, U.S.A., vol. 60, p. 425-431.
- ROCH É. - 1930. *Études géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental*. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n° 9, 542 p.
- ROVNER I. - 1971. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quaternary Research*, n° 1, p. 343-359
- TWISS P.C. - 1983. Dust deposition and opal phytoliths in the Great Plains. *Trans. Nebraska Acad. Sci.*, vol. 11, p. 73-82
- TWISS P.C. - 1992. Predicted world distribution of C3 and C4 grass phytoliths. In *Phytolith Systematics, Emerging Issues*, Plenum Press, (G. RAPP jr. et S.C. MULHOLLAND édit.), New York, p. 113-128
- WEISROCK A. - 1980. *Géomorphologie et paléo-environnements dans l'Atlas atlantique (Maroc)*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris I, 931 p.
- WILDING L.P. et DREES L.R. - 1971. Biogenic opal in Ohio soils. *Soil Sciences Society of America proceeding*, vol. 35, p. 1004-1010.
- WILDING L.P. et DREES L.R. - 1974. Contributions of forest opal and associated cristallines phases to fine silt clay fractions of soils. *Clay and Clay Minerals*, p. 295-306.