

CHAPITRE V

LES PHYTOLITHES : TRACEURS GEOSYSTEMIQUES DES INTERACTIONS SOL-PLANTE-CLIMAT

« Nous savons couvrir de roses
les tristes murs des cités
et si l'hiver est morose
nous en faisons un été »

extrait d'un poème berbère : traduction du poète souiri Brahim Boufous

Les relations qu'entretiennent les éléments biotiques avec les éléments abiotiques correspondent à des cycles caractérisés par des flux de matière et d'énergie comme la photosynthèse par exemple. Les phytolithes forment le produit des cycles de la silice et du calcium. Et, s'ils symbolisent un des liens entre éléments biotiques et abiotiques ils constituent aussi un outil capable d'évaluer l'aridité édaphique et climatique et de retracer l'histoire des impacts climatiques et anthropiques sur les géosystèmes.

Le choix d'utiliser la méthode pollinique dans un premier temps puis la méthode phytolithique dans un second temps a été orienté dans l'objectif de déterminer l'archéologie du géosystème dunaire ou ses paléoenvironnements.

L'assemblage phytolithique moderne permet de quantifier l'aridité édaphique et climatique par le calcul d'indices.

Il convient, dans un premier temps de définir les phytolithes et d'indiquer les méthodes de recherche et les zones correspondantes. Enfin, dans un deuxième temps, l'analyse phytolithique de la région d'Essaouira est développée.

1) Définition, méthodes et zones de recherche

Les phytolithes sont des particules minérales qui précipitent dans les cellules des tissus végétaux vivants et entre celles-ci ; ils se présentent sous la forme de cristaux d'oxalate de calcium ou de silice amorphe [opale-A ($\text{SiO}_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$)]. 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*), (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 (WILDING et DREES, 1971 et 1974 ; BARTOLI, 1981 et 1983 ; ALEXANDRE, 1996, ALEXANDRE et al., 1997b).

Mais la prise de conscience de l'intérêt paléobotanique et plus globalement de l'intérêt paléoenvironnemental des phytolithes en tant que marqueurs ainsi que leur utilisation sont plus récentes. Elle ont permis d'ouvrir des axes de recherche novateurs (TWISS, 1969 et 1992 ; ROVNER, 1971 ; PALMER, 1976 ; PIPERNO, 1988 ; FREDLUND et TIESZEN, 1994, 1997a et 1997b ; PIPERNO et BECKER, 1996 ; ALEXANDRE et al., 1997a et 1999 ; SANGSTER et HODSON, 1998).

Les phytolithes sont utilisés dans diverses disciplines et la variété de leur intérêt démontre la richesse scientifique qu'ils représentent.

Ils forment des marqueurs paléobotaniques qui une fois extraits des échantillons pédologiques et sédimentaires, identifiés, comptés, et analysés par assemblages, permettent de rechercher les formations végétales du passé et de les comparer aux formations actuelles. Leur intérêt paléoclimatique est évident et il se conjugue avec celui de l'histoire des impacts anthropiques. Ils représentent également des marqueurs des incendies et paléoincendies détectés par microspectroscopie infrarouge et Raman. Outre le rôle de tels phénomènes qui peuvent être anthropiques et naturels, ce type d'analyse contribue ainsi à la recherche de nouvelles méthodologies et au développement de la taphonomie et de la taxonomie des morphotypes. Les phytolithes forment des traceurs des relations sol-plantes-climat par l'analyse du cycle biogéochimique du silicium dans le but de quantifier le rôle de la végétation dans la pédogénèse, les processus de météorisation et d'érosion biochimique. Enfin, ils permettent d'approfondir la connaissance de structures archéologiques préhistoriques, protohistoriques et historiques, de comportements culturels et cultureux du passé, à travers l'alimentation des populations anciennes et leurs pratiques culturelles.

L'analyse phytolithique requiert le prélèvement d'échantillons issus de sols actuels pour les assemblages actuels, et de paléosols, coupes stratigraphiques, carottages ou sondages pour les assemblages fossiles.

Les assemblages actuels doivent être calibrés sur le spectre végétal représentatif des formations végétales en place et comparés aux assemblages fossiles.

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier le type de couvert végétal actuel (densité et aridité climatique et édaphique). Parmi les monocotylédones, l'analyse porte plus particulièrement sur la famille des *Poaceae* hautes et basses dont la délimitation a été fixée à 80 cm de hauteur par la nomenclature de Yangambi (C.S.A., 1956, in ALEXANDRE et al., 1997a). Les travaux de TWISS (1992) ont permis de distinguer les morphotypes de phytolithes produits par les cinq sous-familles de *Poaceae* (*Festucoideae*, *Chloridoideae*, *Panicoideae*, *Arundinoideae* et *Bambusoideae*) et de jeter les bases d'une classification (tableau n° XVIII) en identifiant trois des cinq sous-familles.

Tabl. XVIII : Classification et répartition des morphotypes de phytolithes produits par les *Poaceae*, d'après TWISS (1992).

Morphotypes	Sous-familles de <i>Poaceae</i>	Répartition
Circulaire, rectangulaire et oblong	<i>Festucoideae</i>	Zones froides tempérées ou domaines d'altitude
En selle	<i>Chloridoideae</i>	Zones chaudes et sèches (<i>Poaceae</i> basses < 80 cm)
En haltère et en croix	<i>Panicoideae</i>	Zones chaudes et humides (<i>Poaceae</i> hautes > 80 cm)
Allongé lisse, allongé sinueux, en éventail et en pointe	Produits par les cinq sous-familles de <i>Poaceae</i>	Domaines très variés

Les *Festucoideae* sont des *Poaceae* à cycle photosynthétique en C3 ; les *Chloridoideae* à cycle photosynthétique en C4 et les *Panicoideae* à cycle photosynthétique en C4 pour la majorité

d'entre elles. Les *Arundinoideae* sont en C3 pour la plupart et les *Bambusoideae* en C3 (WATSON et al., 1985).

Les autres monocotylédones qui produisent des phytolithes répertoriés sont les *Palmae* (morphotype circulaire crénelé), les *Cyperaceae* (morphotype en cône) et les *Marantaceae* (morphotype à côtés irrégulièrement anguleux et plissés, PIPERNO, 1988, in ALEXANDRE, 1996).

L'étude de l'assemblage phytolithique actuel ou de référence est aussi fondée sur le couvert arboré. Le morphotype des dicotylédones ligneuses a été identifié à partir des feuilles et des tiges mais aussi à partir du parenchyme du bois (morphotype circulaire rugueux, GEIS, 1973, in ALEXANDRE, 1996).

Dans un deuxième temps, la connaissance du type de couvert végétal contemporain des échantillons fossiles s'acquiert par la réalisation d'assemblages fossiles. Le même objectif est visé et la même démarche suivie.

La comparaison des assemblages actuels et fossiles indique l'évolution du manteau végétal entre les âges relatifs aux échantillons respectifs. La discussion est 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) des formations végétales ? Ou encore, peut-on percevoir une coïncidence des deux processus ? Aucune étude de ce type n'a été réalisée sur un milieu dunaire stricto sensu.

L'intérêt suscité par ce géosystème nous amène à nous interroger sur son histoire et notamment sur l'origine de sa formation. Connaître la transition géosystémique produite, à supposer qu'il y en ait une nous semble essentiel pour une meilleure compréhension des relations homme / milieu. Pour quelle(s) raison(s) et à quelle date a débuté le développement des dunes ? Quel type de couvert végétal dominait avant la formation du massif ? Répondre à ces questions nécessite une recherche paléoenvironnementale du site.

Dans un premier temps, la palynologie avait été envisagée mais elle n'a donné aucune issue comme il a été précisé en introduction. 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 indéterminables.

Notre choix s'est alors porté sur un autre traceur paléobotanique : les phytolithes qui se conservent mieux que les pollens en milieu oxydant puisqu'ils sont inorganiques. C'est une caractéristique de leur intérêt archéologique et paléoenvironnemental. Si les pollens se conservent très bien dans les dépressions des zones humides, les phytolithes ont l'avantage d'étendre le champ d'investigation aux zones semi-arides, arides voire sahariennes. A notre connaissance, c'est la première étude de ce type au Maroc et peu d'entre elles ont porté sur une région semi-aride ou aride. Dans le cadre d'une recherche paléoenvironnementale, ALEXANDRE et al. (1997a) ont analysé les phytolithes de la zone soudanienne du Sénégal (lac Guiers) ; MADELLA (1998) ceux de Kilise Tepe, dans la province de Mut en Turquie méridionale et VRYDAGHS et al. (1998a et 1998b) ont porté leur attention sur les sites archéologiques de Lahun en Jordanie et du temple d'Ed-Dur à Umm al-Qaiwain, un des émirats de la Fédération des Emirats Arabes Unis, à travers des recherches sur la morphologie des phytolithes de *Palmae*.

De plus, concernant la fiabilité à refléter la formation phytogéographique locale, les phytolithes semblent montrer une meilleure traçabilité que les pollens en fonction d'agents de transport comme le vent et les incendies par exemple, pour deux raisons : d'une part, les pollens formés

dans la canopée, sont directement livrés aux courants aériens ascendants posant ainsi les problèmes de distribution spatiale et d'identité phytogéographique ; d'autre part, la litière contenant les phytolithes est directement accumulée au sol et protégée par la formation végétale qui l'alimente. Sa fossilisation dans le sol permet d'enregistrer la formation végétale qui y est implantée de manière beaucoup moins aléatoire que les pollens. La traçabilité est donc mieux définie avec les phytolithes qu'avec les pollens. Au delà du choix méthodologique, il convient donc de préciser qu'il s'agit d'une orientation obligée vers les phytolithes en raison de l'oxydation des pollens fossilisés dans le substratum du géosystème dunaire.

2) L'analyse phytolithique de la région d'Essaouira

Après échantillonnage sur le terrain, il s'agit d'extraire les phytolithes en laboratoire, de réaliser leur assemblage par identification, comptage et analyse de la végétation qu'ils représentent. Une discussion en est issue.

A) L'extraction des phytolithes

Cinq échantillons sédimentaires échelonnés le long d'une carotte prélevée dans le substratum (creux interdunaire DEP, N31°31', W9°45'), présenté au chapitre précédent, ont été traités pour la partie fossile. Il s'agit de Dep55, Dep45, Dep35, Dep 25 et Dep5.

De la même façon quatre échantillons de sols actuels (HD, WA, DA, AZ) décrits dans le tableau XIX plus bas (en 2B) ont été collectés et analysés après traitement.

HD, WA, DA, et AZ représentent des échantillons de surface dont la litière est décomposée (horizons A₀ et A₁). DA a été collecté dans plusieurs bassins intradunaires proches de la ville (partie occidentale du géosystème) et les autres échantillons appartiennent à chacun des ensembles phytogéographiques homogènes périphériques au premier. Afin de collecter les échantillons sans être sélectif, la méthode d'échantillonnage préconise une vingtaine de prélèvements au moins. Il a donc été nécessaire d'échantillonner plusieurs fois sur des espaces diversifiés et distants de plusieurs décamètres à l'intérieur de chaque ensemble phytogéographique. Les aires d'échantillonnage représentent la surface d'un terrain de rugby c'est à dire qu'elles forment un rectangle d'environ 100 m sur 60 m et le prélèvement est aléatoire au sein de chacune d'elles. Leur localisation est indiquée par la figure ci-dessous.

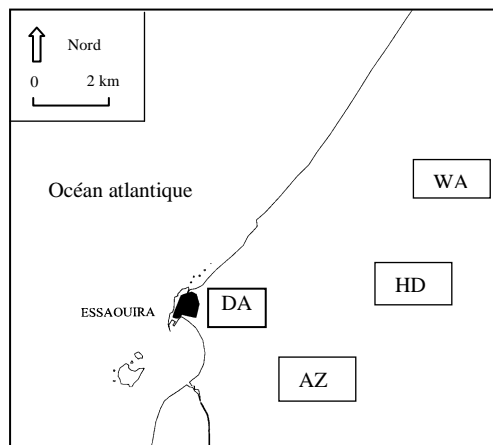


Fig. 32 : Localisation des aires d'échantillonnage pour l'extraction des phytolithes.

D'une manière générale, des problèmes d'apports allochtones se produisent et peuvent perturber et/ou fausser les résultats. Ils ont été discutés par TWISS (1983), CLARK (1988), FREDLUND et 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. L'échelle de dispersion s'étend sur trois distances : locale, extra-locale et régionale (PIPERNO, 1988).

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

L'action des herbivores est considérée ici comme 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 et dans l'horizon humique.

Le transport éolien est le vecteur le mieux connu. D'après TWISS (1983), les dépôts de phytolithes éoliens dans les Grandes Plaines états-unienness sont compris entre 0,5 et 2 g/m² par an. Dans le cas présent, les vents dominants et efficaces sont maritimes. Ils sont issus de l'anticyclone des Açores et orientés NNE / SSW. 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, on peut considérer les sources potentielles éoliennes, extérieures au site d'échantillonnage comme négligeables.

Les apports alluviaux sont inexistantes vu l'endoréisme marqué qui caractérise notamment le massif dunaire 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 (SIMONE et al., 1999)..

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

- a) Tamisage 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 ;
- b) décarbonatation à l'acide chlorhydrique (1N) ;
- c) dissolution de la matière organique au peroxyde d'hydrogène (30 %) dans un bain de sable à 100° C ;
- d) défloculation à l'hexamétaphosphate de sodium (5 %) sur secoueur ;
- e) tamisage humide à 50 µm ;
- f) extraction de la fraction argileuse par cycles de sédimentation et
- g) extraction des phytolithes par densimétrie dans une liqueur dense de bromure de zinc et d'acide chlorhydrique de densité 2,35.

Après séchage, les phytolithes ont été pesés et montés deux fois sur lame, au baume du Canada (montage définitif) et au glycérol (observation) afin d'être examinés plus précisément sous tous les angles (mobilité conférée par le film de glycérol dans lequel ils baignent).

Les assemblages actuels permettent de jeter les bases d'une recherche paléoenvironnementale dans la localité d'Essaouira en les comparant à la végétation actuelle (calibration de la méthode).

B) Les assemblages actuels

Avant de réaliser les assemblages actuels et afin de les comparer systématiquement à la végétation en place il est nécessaire d'aller plus loin dans la description de celle-ci. Les tableaux XIX et XX ci-dessous indiquent respectivement les formations végétales associées aux échantillons de sols prélevés et les principaux genres de monocotylédones (*Poaceae* et *Palmae*) et dicotylédones appartenant à la végétation actuelle.

Tableau XIX : Description des ensembles phytogéographiques échantillonnés, d'après Simone *et al.* (1999) modifié.

Echantillons	Types de sols	Formations végétales	* Recouvrement en %		
			strate arbor.	strate arbust.	strate herb.
HD N31°32', W9°42'	Régosols sablo-limoneux brun foncé	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i>	< 5	55	40
WA N31°33', W9°41'	calcsols caillouteux brun noir	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Tetraclinis articulata</i> et <i>Argania spinosa</i>	35	45	20
DA N31°31', W9°45'	arénosols brun clair à brun foncé	Formation arborée claire à <i>Acacia cyanophylla</i>, <i>Eucalyptus gomphocephala</i> et <i>Tamarix canariensis</i>	10	50	20
AZ N31°30', W9°44'	Régosols sablo-limoneux brun clair	formation arborée claire à <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Salsola longifolia</i> et <i>Periploca laevigata</i>	10	60	30
Moyenne			15	55	30

* (d'après M. BAL, 1993)

Tableau XX : genres dominants de la végétation actuelle.

Monocotylédones				Dicotylédones
<i>Poaceae</i>			<i>Palmae</i>	
Sous-famille <i>Festucoideae</i>	Sous-famille <i>Chloridoideae</i>	Sous-famille <i>Panicoideae</i>	Sous-famille <i>Arundinoideae</i>	<i>Chamaerops</i> <i>Tamarix</i> , <i>Lycium</i> , <i>Salsola</i> , <i>Retama</i> , <i>Argania</i> , <i>Pistacia</i> , <i>Phillyrea</i> , <i>Helianthemum</i> .
<i>Ammophila</i> (C3) <i>Avena</i> (C3)	<i>Aeluropus</i> (C4)	<i>Hyparrhenia</i> (C4) <i>Cenchrus</i> (C4)	<i>Lygeum</i> (C3) <i>Oryzopsis</i> (C3)	

Toutes les *Poaceae* recensées ici occupent les aires échantillonnées, cependant *Ammophila* affectionne particulièrement les sables dunaires, *Aeluropus* les terrains salés alors que *lygeum* est très répandu sur les sols limoneux ou argileux.

Après extraction et montage sous lames, les phytolithes ont été déterminés selon la classification taxonomique de TWISS (1992) mentionnée dans le tableau XVIII et comptés sous microscope optique Olympus SZH-ILLK (X 600). Les comptages sont représentés dans le tableau XXI ci-dessous. 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 (fig. 34 et 35). Le rôle taxonomique des phytolithes est essentiel pour les recherches paléoenvironnementales et, notamment, ceux formés par les *Poaceae*. Trois des cinq sous-familles (*Festucoideae*, *Chloridoideae* et *Panicoideae*) sont adaptées à un environnement particulier (Tabl. XVIII).

Tabl. XXI : Détermination et comptage détaillé des morphotypes de phytolithes actuels.

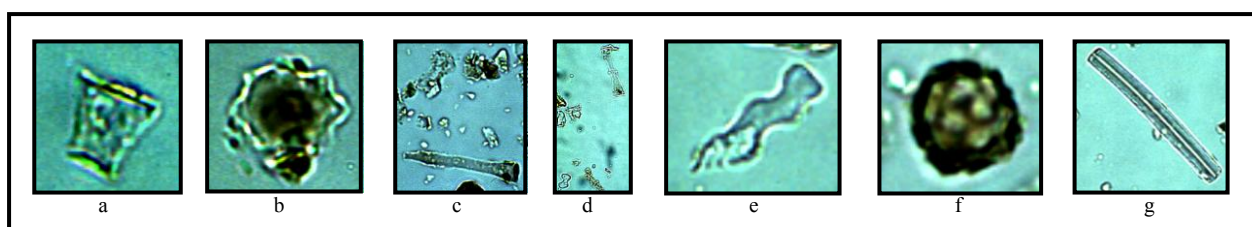
Morphotypes	Echantillons de surface			
	HD	WA	DA	AZ
Phytolithes de <i>Poaceae</i> formes courtes				
Rectangulaire	38	7	20	5
Circulaire	0	2	13	2
Oblong	10	5	0	0
En selle	85	28	71	50
En haltère	6	4	5	6
<u>Total formes courtes</u>	<u>139</u>	<u>46</u>	<u>109</u>	<u>63</u>
Phytolithes de <i>Poaceae</i> formes longues				
Allongé lisse	63	34	45	32
Allongé sinueux	13	38	25	47
En éventail	5	8	0	0
En pointe	10	8	0	0
<u>Total formes longues</u>	<u>91</u>	<u>88</u>	<u>70</u>	<u>79</u>
<u>Total <i>Poaceae</i></u>	<u>230</u>	<u>134</u>	<u>179</u>	<u>142</u>
Dicotylédones ligneuses				
<i>Palmae</i>				
Circulaire rugueux	116	65	63	70
Circulaire crénelé	0	69	67	70
<u>Total hors <i>Poaceae</i></u>	<u>116</u>	<u>134</u>	<u>130</u>	<u>140</u>
Non classés	84	48	24	13
Total compté	430	316	333	295

Pour les *Panicoideae*, seul le morphotype en haltère est apparu ; le morphotype en croix n'a été identifié dans aucun échantillon.

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

Le morphotype circulaire crénelé issu de la famille des *Palmae* est indicateur de milieux chauds.

Quelques exemples de morphotypes de phytolithes extraits des sols de la région d'Essaouira sont illustrés ci-dessous par la figure 33. Un nouveau morphotype en « entonnoir » (Fig. 33c et d) est apparu à l'observation des lames avec une relative abondance. Non encore répertorié, il a été compté parmi les non classés. Aussi la présence notable de spicules d'éponges, en grande partie, bien conservés (fig. 33g) a été relevée et confirme la forte influence océanique.



a : morphotype en selle ; b : morphotype circulaire crénelé ; c : morphotype(s) en haltère, en haut à gauche et en « entonnoir » en bas ;
d : morphotype(s) en haltère, en bas à gauche et en « (double) entonnoir », en haut à droite ; e : morphotype allongé sinueux ;
f : morphotype circulaire rugueux ; g : spicule d'éponge ;

Fig. n° 33 : Morphotypes de particules de silice biogène les plus représentées dans les sols actuels.
Phytolithes sauf g, grossissement 600. Clichés : Y. C. Simone, novembre 1998.

Les photographies c et e montrent des phytolithes brisés. Lorsqu'il est conservé, le morphotype en « entonnoir » est symétrique (fig. 33d en haut à droite), c'est à dire que les deux extrémités sont plus larges que la partie médiane et portent chacune une ponctuation sombre.

Fig. 34 : Les assemblages de phytolithes pour la période actuelle, d'après Simone *et al.*, 1999, modifié.

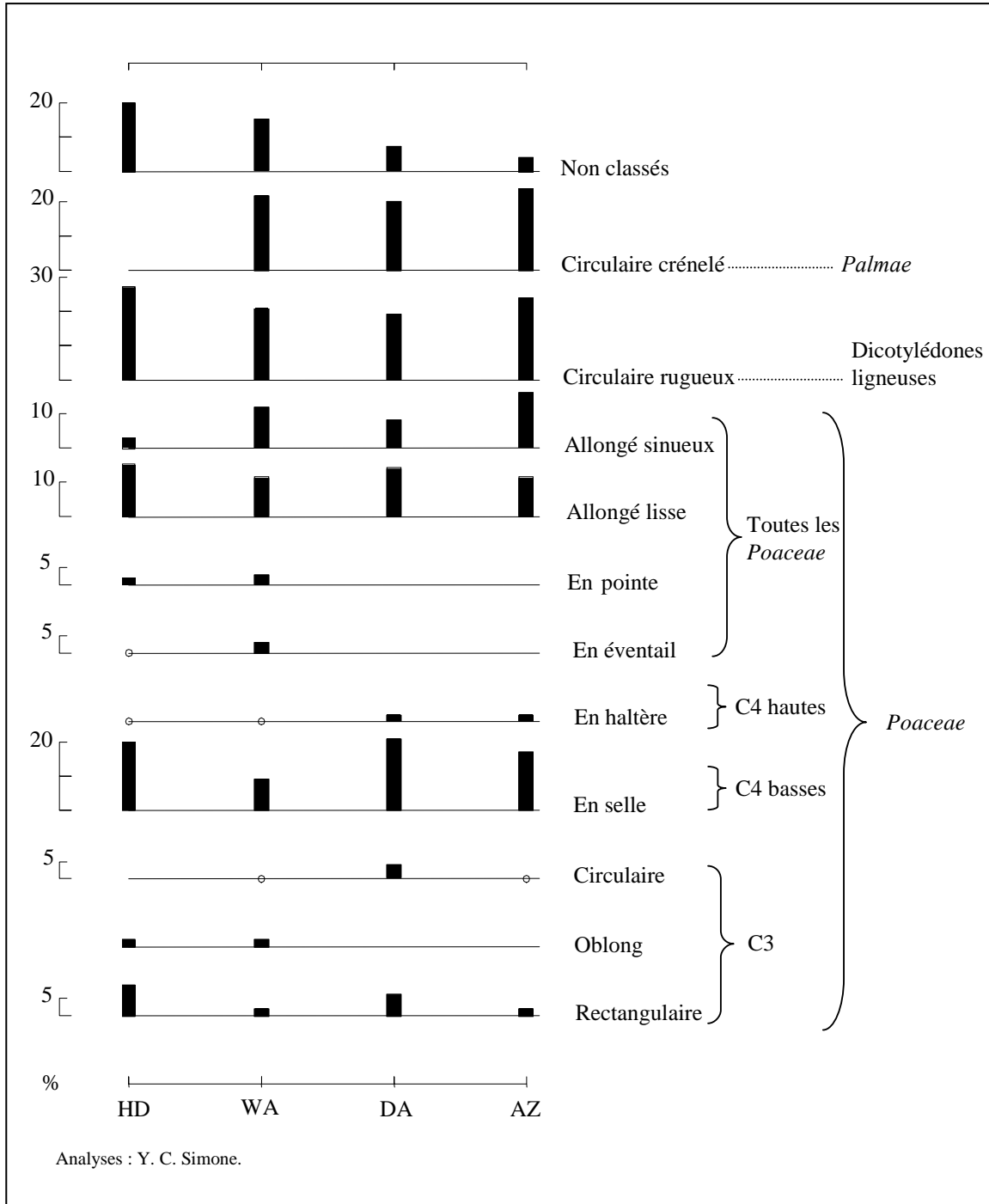
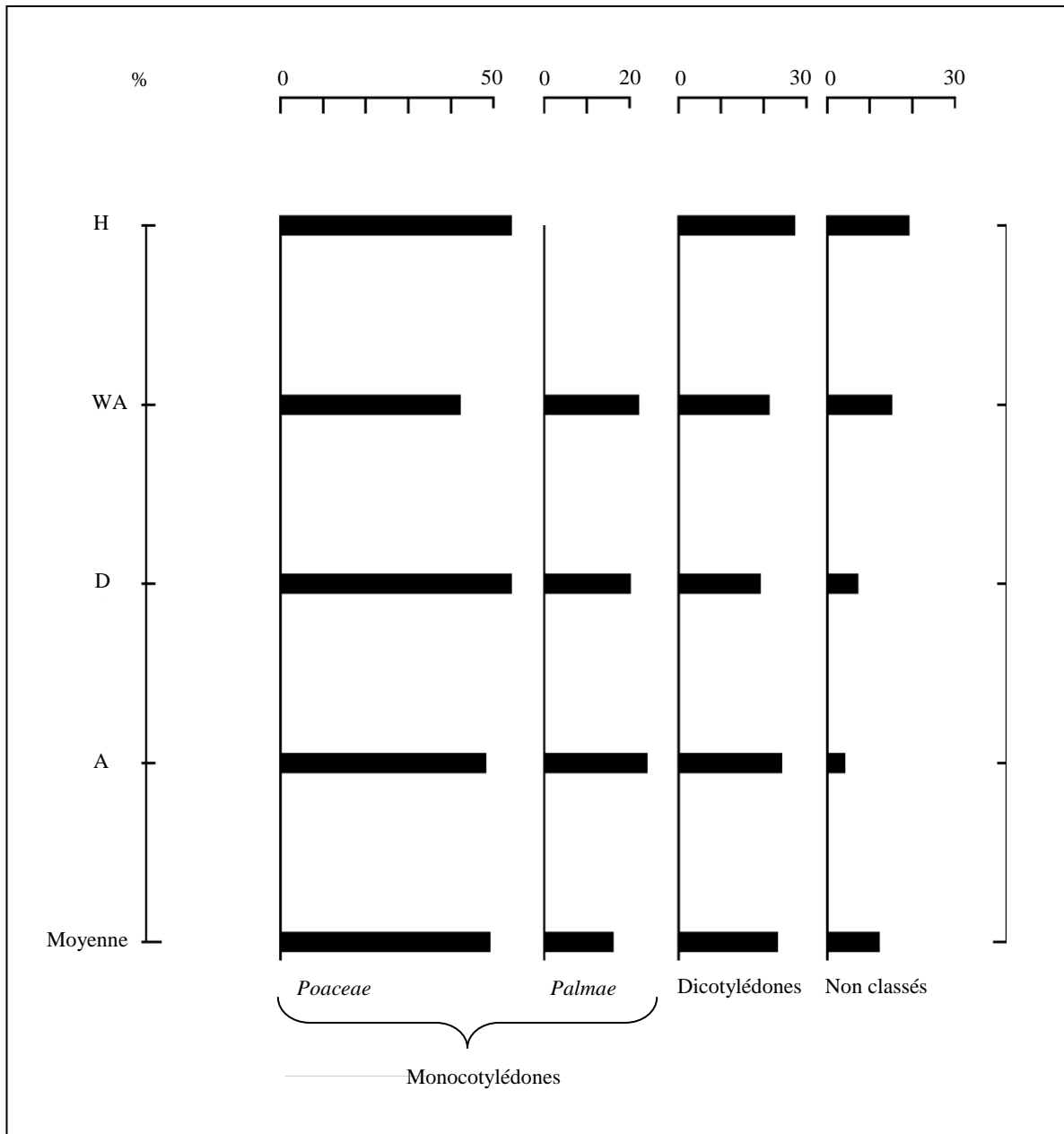


Fig. 5 : Distribution taxonomique des phytolithes dans les sols actuels,
d'après Simone *et al.*, 1999.



C) Discussion

La proportion moyenne de phytolithes contenus dans la partie superficielle des sols est de 0,96 ‰ du poids total à sec de la fraction < 200 µm. 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.

Les assemblages actuels ou de référence (fig. 34) indiquent 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, cf. fig. 34) constituent les marqueurs très fiables dans la mesure où ils sont produits par les *Festucoideae*, les *Chloridoideae* et les *Panicoideae*, trois sous-familles identifiées et adaptées chacune à un milieu défini. C'est donc leurs proportions qui nous permettent de préciser les caractéristiques climatiques d'un géosystème concernant les températures et l'humidité.

La calibration des assemblages actuels sur la végétation en place se fait en recherchant les correspondances entre l'aspect physionomique, la composition floristique des aires phytogéographiques actuelles et les assemblages.

Pour cela, trois index phytolithiques ont été définis dans le but de caractériser et d'interpréter les assemblages portant sur les *Poaceae* des prairies des Grandes Plaines états-uniennes (TWISS, 1992) et sur les régions d'Afrique de l'Ouest (DIESTER-HAAS et al., 1973 et ALEXANDRE et al., 1997a). Ces index sont appliqués pour quantifier les rapports entre végétation locale et production phytolithique selon les conditions climatiques et/ou édaphiques qui dominent dans la localité d'Essaouira. Ils sont illustrés par la figure 36, notés dans le tableau XXII et indiquent les tendances du type de formation végétale et de sa densité (oscillation steppe-forêt), de l'aridité édaphique (oscillation humide-aride) et du caractère thermique du climat (oscillation chaud-froid).

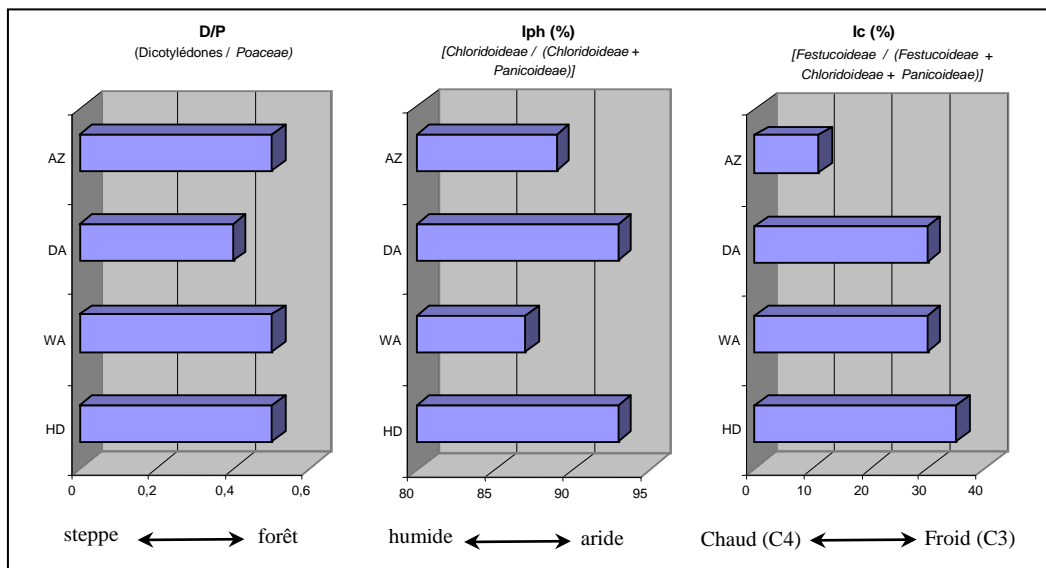


Fig. 36 : Les phytolithes, traceurs biogéographiques de la période actuelle à partir des trois index calculés.

Le premier d'entre eux défini par le rapport D/P est l'index de densité du couvert arboré (ALEXANDRE et al., 1997a). C'est le rapport Dicotylédones/*Poaceae* (nombre de phytolithes circulaires rugueux sur nombre total de phytolithes de *Poaceae*). Il a été utilisé pour évaluer la densité du couvert arboré dans les savanes et steppes d'Afrique de l'Ouest (ALEXANDRE et al., 1997a).

Sur des échantillons actuels de la forêt semi-caducifoliée congolaise les auteurs ont trouvé une valeur de 7. Ils ont aussi trouvé des valeurs inférieures à 1 caractérisant les savanes du Sénégal intérieur où la couverture herbacée est abondante.

A l'inverse des valeurs supérieures à 100 allant jusqu'à 159 ont été trouvées dans des sédiments fossiles du lac Sinnda au Congo en association avec des proportions élevées de pollens arboréens signifiant la présence d'une forêt ombrophile à l'Holocène supérieur.

Dans la moyenne vallée de l'Awash en Ethiopie, BARBONI et al. (1999) ont trouvé des valeurs inférieures à 1 indiquant couvert arboré peu abondant caractéristique d'une formation steppique.

Dans le cas d'Essaouira, les rapports D/P sont tous inférieurs à 1, la valeur minimale étant celle de DA, correspondant au massif dunaire. Ces résultats ne concordent pas très bien avec la physionomie de la végétation locale. En effet, l'aspect steppique de certains secteurs est dissimulé par des taux de recouvrement arboré et arbustif relativement élevés (70 % somme des moyennes, cf. tabl. XIX, BAL, 1993) et le rapport D/P perd sa signification par la présence considérable de gymnospermes car il n'exprime plus alors le couvert végétal réel. La valeur la plus haute de recouvrement de la strate arborée est 35 % pour WA ; cette valeur est due aux gymnospermes relativement abondants dans la région et non producteurs du morphotypes circulaire rugueux. En effet, *Juniperus phoenicea* et *Tetraclinis articulata* représentent deux des trois principales espèces arborées régionales. De plus, une part importante de jeunes semis naturels (reconquête végétale vigoureuse du genévrier, notamment) chez ces conifères marquent le stade arbustif tant dans les dunes qui bordent la ville que sur celles plus intérieures.

Cependant, le rapport D/P le plus bas (0,4) montre bien sa représentativité de la végétation locale pour DA dans la mesure où les Dicotylédones sont moins présentes au contact géosystème/espace urbain que sur la bordure orientale du géosystème (fig. 36 et tabl. XXII). En effet, la formation à acacias et eucalyptus (tabl. XIX) est une formation claire, de reboisement donc jeune et son implantation dans les dunes vives est fragilisée par la dynamique éolienne très active et soulignée au chapitre IV2A.

Les index de densité du couvert arboré D/P appliqués à Essaouira ne reflètent bien les observations de terrain que pour DA et en ce sens, ils s'accordent bien avec les résultats obtenus tant en Afrique occidentale qu'en Afrique orientale par les auteurs cités plus haut. Pour les autres échantillons le rapport D/P ne permet pas de quantifier d'une manière fiable le taux de recouvrement réel dans la mesure où les gymnospermes abondants ici ne sont pas pris en compte dans ce rapport.

Tabl. XXII : Valeurs des index phytolithiques calculés pour la période actuelle.

Echantillons	D/P	Iph (%)*	Ic (%)
HD	0,5	93,4	34,5
WA	0,5	87,5	30,4
DA	0,4	93,4	30,3
AZ	0,5	89,3	11,1
Moyenne	0,48	90,9	26,6

* d'après Simone et al. 1999.

Le deuxième index phytolithique est l'index d'aridité (Iph) défini par le rapport (*Chloridoideae* / *Chloridoideae* + *Panicoideae*), c'est à dire : (nombre de phytolithes en selle / nombre de phytolithes en selle + nombre de phytolithes en haltère et en croix). Il exprime donc le pourcentage de *Chloridoideae* parmi les *Poaceae* en C4.

Il a été utilisé pour la première fois par DIESTER-HASS et al. (1973) sur des carottes marines prélevées au Nord-Ouest de l'Afrique (23 ° 30' de latitude Nord, au Sud des Canaries) afin de retracer les fluctuations climatiques humide/aride.

Une valeur élevée d'Iph signifie une steppe graminéenne dominée par les *Chloridoideae* donc xérophytique et synonyme de l'adaptation à des conditions arides. A l'inverse, une faible valeur d'Iph signifie une prairie dominée par les *Panicoideae* traduisant des conditions climatiques et/ou édaphiques humides.

En Afrique de l'Ouest intertropicale, ALEXANDRE et al. (1997a) ont appliqué cet index et montré qu'une valeur limite de 30 % marque le seuil entre savane hygrophile de la zone humide soudannienne (herbes en C4 hautes) et savane xérophile de la zone aride sahelienne (herbes en C4 basses).

Dans la zone tempérée les recherches ont porté sur les Grandes Plaines états-uniennes (KURMANN, 1985 ; FREDLUND et TIESZEN, 1994 et 1997a). La limite discriminant ces prairies en deux classes, celles adaptées à des conditions humides et celles développées en milieu aride s'élève à 45 % (ALEXANDRE et al., 1997a).

A Essaouira, les valeurs d'Iph calculées pour HD, WA, DA et AZ sont respectivement 93,4 ; 87,5 ; 93,4 et 89,3 (tabl. XXII). Elles se rapprochent toutes de 100, la moyenne approchant 91. Les formes en haltère caractéristiques des *Panicoideae* (C4 hautes) sont très peu représentées à l'inverse des formes en selles produites par les *Chloridoideae* (C4 basses), (tabl. XXI et fig. 34). Or, la végétation locale (strate herbacée) comprend deux genres de *Panicoideae* (*Hyparrhenia* et *Cenchrus*) alors que les *Chloridoideae* ne sont représentées que par un seul genre (*Aeluropus*), (tabl. XX).

Si ce dernier est présent sur tous les terrains échantillonnés c'est sur les dunes (DA) qu'il enregistre le maximum de production avec plus de 21 % du total de phytolithes comptés (fig. 34).

Cette donnée s'accorde bien avec les conditions locales du terrain dans la mesure où *Aeluropus* affectionne les milieux salés. De plus les *Poaceae* hautes (> 80 cm) sont très rares dans toute la région confirmant la prédominance d'*Aeluropus* seul sur *Hyparrhenia* et *Cenchrus* réunis.

Les Iph élevés indiquent donc une aridité édaphique et/ou climatique conséquente traçant avec fidélité les conditions locales. En effet, DA (dunes) et HD enregistrent les Iph maxima avec 93,4 % chacun (tabl. XXII et fig. 36). DA est l'échantillon représentant les sols les moins évolués, les plus perméables et en fait, les plus xériques. Les bassins intradunaires dans lesquels il a été recueilli sont les plus proches d'Essaouira, situés sur la frange occidentale du géosystème (cf. fig. 32) correspondant aux sols les plus instables et les plus précaires. De même HD, s'il n'est pas situé sur des dunes actuelles, correspond à un régosol sableux d'apports éoliens lui conférant aussi une faible capacité de rétention favorisant sa xéricité.

A l'inverse et malgré une valeur élevée, WA détient le plus faible Iph avec 87,5 % (fig. 36 et tabl. XXII). Or, les taux de recouvrement notés dans le tabl. XIX indiquent une valeur maximale du couvert arboré pour WA avec 35 % permettant de maintenir plus d'humidité dans les sols et donc un tapis herbacé plus haut. Cette donnée peut mettre ainsi en évidence la potentialité d'Iph de tracer en plus de l'aridité climatique régionale (hautes valeurs d'ensemble, tabl. XXII), les

nuances de l'aridité édaphique actuelle au sein du géosystème (fig. 36) et plus largement de la région.

Les index de xéricité Iph appliqués à Essaouira montrent qu'ils concordent avec les données portant sur la végétation locale. Les C4 basses dominent par rapport aux C4 hautes malgré la présence respective d'un seul genre contre deux. Ces résultats concordent aussi avec ceux obtenus en Afrique de l'Ouest et dans les Grandes Plaines états-uniennes par ALEXANDRE et al. (1997a), KURMANN (1985) et FREDLUND et TIESZEN (1994 et 1997a). Iph est donc un index phytolithique pertinent pour quantifier l'aridité édaphique en Afrique tempérée.

Le troisième index phytolithique est l'index climatique (Ic) défini par TWISS (1987 et 1992) dans ses recherches portant sur les Grandes Plaines états-uniennes. C'est le rapport exprimé en pour-cent *Festucoideae* / (*Festucoideae* + *Chloridoideae* + *Panicoideae*), c'est à dire (nombre de phytolithes rectangulaires, circulaires et oblongs) / (total formes courtes), (tabl. XXI). Il permet de quantifier la proportion de *Poaceae* en C3 ; ainsi une valeur élevée se rapprochant de 100 indique la prépondérance de celles-ci par rapport aux *Poaceae* en C4. Elle souligne donc l'influence d'un climat froid tempéré ou d'altitude (TWISS, 1992), (tabl. XVIII).

Les assemblages de phytolithe actuels des Grandes Plaines états-uniennes réalisés le long de transects Est-Ouest et Nord-Sud (limites Nord et Sud des Etats-Unis) marquant des gradients accusés d'humidité et de température mettent en évidence des valeurs élevées d'Ic supérieures à 80 % au Nord alors que 2 200 km plus au Sud (à 30° de latitude N.) elles tombent à 33 % (FREDLUND et TIESZEN, 1994). Les assemblages qui suivent le transect Nord-Sud montrent clairement que le gradient climatique se lit à travers une forte proportion de phytolithes produits par les *Festucoideae* (genre dominant *Agropyron*) dans le Dakota du Nord, près de la frontière canadienne ; cette proportion diminue progressivement en allant vers le Sud jusque sur les bords du golfe du Mexique (Sud du Texas) pour être remplacée par une proportion élevée de phytolithes issus des *Panicoideae* (genres *Andropogon*, *Panicum* et *Sorghastrum*) en passant par une forte proportion de phytolithes produits par les *Chloridoideae* (genres *Bouteloua* et *Buchloë*) sur la partie centrale du transect. Les assemblages actuels sont ainsi parfaitement calibrés sur la végétation en place. La progression du gradient est mise en évidence par des transitions nuancées entre les trois sous-familles comme le montrent les noms de genre en caractères gras sur la figure 37, ci-dessous.

Nord (48 ° N)		
SITES D'ECHANTILLONNAGE	GENRES DOMINANTS (<i>POACEAE</i>)	Ic (%)
SA	<i>Agropyron-Stipa-Danthonia</i>	81,3
BM	<i>Agropyron-Andropogon</i>	75
DN	<i>Agropyron-Stipa-Andropogon</i>	66,7
OP	<i>Agropyron-Stipa-Andropogon</i>	61,7
CR	<i>Agropyron-Stipa-Andropogon</i>	52,9
BL	<i>Bouteloua-Agropyron</i>	40,6
CS	<i>Bouteloua-Buchloë</i>	20,2
LT	<i>Bouteloua-Buchloë</i>	25,2
FO	<i>Bouteloua-Andropogon</i>	30,3
HK	<i>Bouteloua-Andropogon</i>	29,4
WO	<i>Andropogon-Bouteloua</i>	34
KP	<i>Andropogon-Panicum-Sorghastrum</i>	41,2
RP	<i>Andropogon-Panicum-Sorghastrum</i>	63
DP	<i>Andropogon-Panicum-Sorghastrum</i>	57,8
AT	<i>Andropogon-Spartina</i>	33,5
Sud (30 ° N)		

Fig. 37 : Index climatiques fondés sur les phytolithes à travers les Grandes Plaines états-uniennes, d'après Fredlund et Tieszen (1994)

A Essaouira, les index climatiques dépassent à peine 30 % pour trois échantillons sur quatre alors qu'AZ obtient la valeur la plus basse avec 11,1 % (Tabl. XXII et fig. 36).

Dans l'ensemble, les valeurs sont basses indiquant un climat chaud où les *Festucoideae* sont proportionnellement peu présentes (fig. 34). En effet, *Ammophila* et *Avena* sont peu répandues sur le terrain ; la première a été introduite pour fixer les sables du cordon littoral et si elle a pu s'étendre sur les espaces intérieurs, son implantation est mineure car elle reste cantonnée sur le front de mer ; la seconde est plus présente sur les plateaux intérieurs mais son étendue reste limitée. Comme il a été développé en première partie (chap. I1Ab et I13) le climat d'Essaouira est caractérisé par des températures douces tout au long de l'année avec une moyenne annuelle de 17,2 ° C et une amplitude thermique annuelle de seulement 5,5 ° C (Tabl. IV). Il n'y a quasiment pas d'hiver puisque la moyenne des minima des mois d'hiver ne descend pas en dessous de 9,5 ° C (tabl. VI). Et l'indice bioclimatique d'Emberger classe Essaouira dans le domaine semi-aride à hiver chaud. Sous ce type de climat les *Festucoideae* trouvent très peu de conditions favorables à leur développement.

AZ dont la valeur d'Ic est la plus basse avec 11,1 % pourrait s'expliquer par l'effet d'un microclimat plus chaud que sur les autres aires échantillonnées. Mais en l'absence d'éléments plus précis cette hypothèse doit être avancée avec prudence dans la mesure où AZ n'est pas très éloigné des autres sites d'échantillonnage.

Les index climatiques appliqués à la localité d'Essaouira correspondent bien à la végétation actuelle et au climat local montrant qu'Ic est un bon indicateur. En effet, sur le terrain, les *Poaceae* en C4 dominent par rapport aux *Poaceae* en C3. De plus, ces résultats concordent avec ceux établis dans d'autres régions et continents (FREDLUND et TIESZEN, 1994 ; BARBONI et al., 1999). Ils mettent en évidence l'influence subtropicale actuelle qui marque le domaine méditerranéen méridional.

Dans le même sens, la proportion relativement forte de formes circulaires crénelées avec 21,9 % de moyenne sur trois échantillons (fig. 34) indique une forte représentation des *Palmae*. Sur le terrain seuls *Chamaerops humilis* et *Phoenix dactylifera* sont présents. Le premier est bien plus abondant que le second mais il reste relativement peu étendu. Cependant, leur présence confirme les résultats précédents (index d'aridité (Iph) élevés et index climatiques (Ic) bas) à savoir que le milieu étudié est conditionné par un climat chaud et aride. En effet, les *Palmae* peuplent naturellement la zone intertropicale pouvant s'étendre à des domaines subtropicaux, voire aux régions méditerranéennes par extension d'origine anthropique et ainsi s'adapter. En particulier *Chamaerops humilis* (le palmier nain) occupe des sols très secs rocaillieux ou sablonneux et n'étant pas un phréatophyte, son système racinaire s'adapte à la recherche d'humidité en profondeur. Une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a permis de définir trois axes factoriels et *Chamaerops humilis* apparaît en coordonnées positives sur le deuxième axe avec *Asphodelus microcarpus* (BAL, 1993). L'auteur attribue ces deux espèces à une dégradation du milieu. Ingrid et Peter SCHÖNFELDER (1989) définissent comme habitat pour le palmier nain et l'asphodèle la garrigue qui est l'état dégradé des forêts méditerranéennes.

D) Les assemblages fossiles

L'examen des lames fossiles a révélé une forte dissolution des phytolithes. Ces derniers ne sont pas identifiables ou trop peu d'entre eux le sont (10 à 15 %), ce qui ne pourrait valider les assemblages. En effet, comme il a été mentionné en IV3B, le substratum est périodiquement immergé par des eaux salines dont le pH élevé varie de 8,8 à 10,2 (cf. tabl XV). Or, ce degré de basicité rend l'opale facilement soluble ; ayant été mesuré en eau de surface et vu les taux de halite cristallisée dans le substratum (cf. fig. 22), il est fort probable que le pH soit encore plus élevé en profondeur. Le même phénomène est observé pour les spicules d'éponges alors qu'ils restent très bien conservés dans les sols actuels (fig. 33g).

Si la recherche des paléoenvironnements ne peut être réalisée dans le cadre de la thèse, les phytolithes gardent un avantage sur les pollens qui ne sont conservés ni en milieu oxydant ni en milieu basique ou ultra-basique. Ainsi il conviendra de rechercher d'autres sites d'échantillonnage pour effectuer les assemblages fossiles.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus pour la localité d'Essaouira montrent que les phytolithes sont des traceurs potentiels du paysage végétal et de l'aridité édaphique.

Les assemblages actuels sont bien calibrés sur la végétation en place. En effet, deux des trois index phytolithiques (Iph et Ic) reflètent étroitement le couvert végétal en tout point (aridité édaphique importante avec la prédominance des C4 basses et présence d'espèces adaptées à un climat chaud, influencé par une tendance tempérée permettant le développement des C3). Seul D/P ne reflète pas la couverture végétale actuelle excepté pour DA (faible densité du couvert arboré et arbustif alors que le couvert le plus bas inférieur à 60 % est relativement élevé, tabl. XIX). Cette donnée devra être prise en compte pour les assemblages fossiles.

Pour les trois index les valeurs entre les aires échantillonnées ne varient que très peu. Cela est surtout vrai pour D/P et Iph (fig. 36) et peut être imputé à la faible superficie du terrain pris en compte pour les assemblages actuels (100 km² environ). Cette faible variation des valeurs pour toute la localité d'Essaouira montre la forte cohérence interne des résultats obtenus mais aussi la difficulté à saisir et interpréter les variations nuancées des index sur de courtes distances ainsi qu'à rechercher une capacité de discrimination toujours plus fine de milieux très proches sur le plan phytogéographique comme sur le plan climatique. La cohérence externe se reflète dans la concordance des résultats obtenus à Essaouira avec ceux acquis dans des zones et régions très différentes par d'autres chercheurs cités plus haut.

Aussi il convient d'approfondir l'expression d'Iph (index phytolithique d'aridité édaphique et climatique). Dans quelle mesure celui-ci indique-t-il une aridité édaphique exclusivement anthropique, exclusivement climatique ou climato-anthropique ? Comment quantifier ce qui incombe aux activités humaines d'une part et au climat d'autre part ?

Telles qu'elles sont posées, ces questions ne peuvent pour le moment trouver de réponses si ce n'est que par une approche systémique. Il convient donc d'étudier la pression anthropique qui pèse sur l'équilibre du géosystème dunaire.