

L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil (Tunisie centre orientale) : dynamiques hydro-morphosédimentaires, paléoenvironnements et évolution des paysages pendant l'Holocène

Abdelkarim Boujelben

▶ **To cite this version:**

Abdelkarim Boujelben. L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil (Tunisie centre orientale) : dynamiques hydro-morphosédimentaires, paléoenvironnements et évolution des paysages pendant l'Holocène. Géographie. Université de Tunis I; Université de Caen Normandie, 2015. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-02904866⟩

HAL Id: tel-02904866

https://hal.science/tel-02904866v1

Submitted on 22 Jul 2020

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.



HAL Authorization

Université de Tunis I
Faculté des Sciences Humaines et Sociales

Ecole Doctorale : Structures, Systèmes, Modèles et Pratiques en Lettres et Sciences Humaines et Sociales

Université de Caen, Normandie
UFR Géographie

Ecole doctorale : Homme, sociétés, risques, territoire

L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil : dynamiques hydro-morphosédimentaires, paléoenvironnements et évolution des paysages pendant l'Holocène

Thèse en vue de l'obtention du Doctorat en géographie

Option : Géomorphologie

Présentée et soutenue publiquement par
Abdelkarim Boujelben
Le 12 décembre 2015

Membres du jury :

Ameur Oueslati	Professeur à l'Université de Tunis I, Tunisie	Président
Laurent Lespez	Professeur à l'Université de Paris Est Créteil, France	Rapporteur
Amor Mokhtar Gammar	Professeur à l'Université de Manouba, Tunisie	Rapporteur
Vincent Lebreton	Maître de Conférences du Muséum national d'Histoire naturelle	Examinateur
Olivier Maquaire	Professeur à l'Université de Caen Normandie, France	Directeur
Mohamed Raouf Karray	Professeur à l'Université de Tunis I, Tunisie	Directeur

Cartographie Géomorphologique des Milieux, des Environnements et des Dynamiques (CGMED, LAB-ST-04, Tunisie)

Géographie Physique et Environnement (GEOPHEN, UMR 6554, CNRS, Caen, France)

REMERCIEMENTS

Cette recherche est le fruit d'une collaboration fructueuse entre les deux laboratoires CGMED (SERST, LAB-ST-04, Tunis, Tunisie) et GEOPHEN (UMR 6554, CNRS, Caen, France) et avec divers organismes, laboratoires et centres de recherche qui ont participé à ce travail par des contributions scientifiques, techniques et financières.

J'exprime tout d'abord ma profonde gratitude à **Jean TRAUTMANN**, géomorphologue retraité de l'ULP (Strasbourg). Sur ses conseils et avec son aide, j'ai pu prendre contact avec Olivier MAQUAIRE. Celui-ci s'est montré intéressé par mon sujet de thèse et a accepté la codirection de la recherche, pour laquelle une convention de cotutelle a été établie entre l'Université de Tunis I et l'Université de Caen, Normandie.

Je remercie très chaleureusement mes directeurs de thèse : **Mohamed Raouf KARRAY** pour son efficacité dans le travail, la disponibilité, la patience, les discussions qui m'ont permis de dissiper mes incertitudes et l'apport moral aux moments difficiles de l'étude ; **Olivier MAQUAIRE** pour l'écoute qu'il m'a toujours accordé pendant mes séjours scientifiques à Caen, pour les nombreux contacts avec les chercheurs, les laboratoires et les centres de recherches spécialisés afin de me faire bénéficier des formations adaptées à ma problématique et d'effectuer les analyses nécessaires à l'achèvement de la thèse. Je les remercie pour leur confiance tout en me laissant une large liberté dans l'orientation de ma recherche. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

Engagé dans l'action CMCU : « Aménagement d'une zone humide littorale périurbaine, Chott el Merdassia, littoral nord de Sfax, Tunisie méridionale » (code 04S/034), j'ai bénéficié d'une bourse de cotutelle pour une période de 4 mois (Caen, mai-juillet, novembre 2006). Je remercie vivement les coordinateurs de l'action : **Abdelkarim DAOUD** (FLSH, Université de Sfax) et **Christiane WEBER** (Laboratoire Image et Ville, UMR 7011).

En mars 2005 et par l'intermédiaire **d'Ahmed BOUJARRA** (FLSH, Université de Sousse) j'ai rencontré Ridha BOU SOFFARA et Simone MULAZZANI, coordinateurs du projet tuniso-italien pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla. Qu'il trouve ici l'expression de ma vive reconnaissance. Initié en 2002, le projet associe l'INP (Tunis, Tunisie), l'IsIAO (Rome, Italie) et le Dipartimento di Archeologia (Bologne, Italie). Je remercie **Ridha BOU SOFFARA** (INP) qui m'a accueilli comme membre à part entière pour la partie tunisienne de l'équipe de recherche, intervenant sur les aspects géomorphologiques et paléoenvironnementaux de la région de Hirgla. Un énorme remerciement est particulièrement dû à **Simone MULAZZANI** (Université Paris Ouest, Nanterre La Défense) pour les jours inoubliables sur le site préhistorique SHM-1, les nombreux échanges, les longues discussions, les méthodes et les résultats d'investigations et de recherches archéologiques sur les sebkhas Halq al Minjil et al Kalbiyya et leurs environs immédiats. Chaque débat avec lui fut l'occasion de retenir des idées constructives et de développer des hypothèses qui vont suivre.

De nombreux chercheurs ont participé à ce projet, qu'ils en soient tous ici cordialement remerciés. Je remercie en particulier **Marcello MANNINO** (Institute of Archaeology de l'UCL, Royaume-Uni) pour l'identification de la malacofaune marine et lagunaire ; **Carlo DEL GRANDE** et **Enrico DINELLI** (CIRSA, Italie) pour le financement et l'analyse géochimique des sondages carottés C1, C2 et C3 ; **Lotfi BELHOUCHET** (INP) d'avoir déterminé et dessiné les pièces lithiques récolées sur les sites préhistoriques et

Nabiha AOUADi (INP) pour les données archéozoologiques du site préhistorique SHM-1. Les multiples rencontres nous ont permis de développer nos travaux personnels et d'engager des recherches communes.

Un merci tout spécial à **Vincent LEBRETON** (MNHN, Paris) qui m'a énormément aidé en me faisant la datation ^{14}C AMS de quatre échantillons de la carotte C3 et bénéficier des résultats d'analyse palynologique des sédiments de l'ombilic de la sebkha littorale Halq al Minjil. Merci pour ses relectures et la pertinence de ses critiques. Ses collaborations m'ont été toujours très agréables. Je n'oublie jamais les ammonites des roches bathoniennes de Duc-sur-Mer et la double discordance cadomienne et hercynienne de la marge orientale du massif armoricain à May-sur-Orne.

Au laboratoire GEOPHEN, j'ai pu côtoyer des chercheurs, des moniteurs et des ingénieurs d'étude. J'ai pu acquérir auprès de **Yann LE DREZON**, **Robert DAVIDSON**, **Laurent LESPEZ** et **Patrick LE GOUEE**, les rudiments de la fabrication et l'analyse micromorphologique des lames minces, de l'analyse granulométrique laser LS200 et de l'emploi des moyens d'investigation *in situ* (GPS différentiel, vibropercuteur, pénétromètre dynamique). Je les remercie pour m'avoir fait profiter de leurs expériences et connaissances, pour les discussions enrichissantes et les orientations bibliographiques. Un grand merci s'adresse aux professeurs **Daniel DELAHAYE**, **Aziz BALLOUCH** et **Jean-Philippe MALET** et aux doctorants pour les débats fructueux de mes résultats préliminaires d'analyses qui ont permis de pousser les premiers constats et de conforter certaines hypothèses. Je remercie la secrétaire-gestionnaire **Blandine PAREY** pour sa gentillesse et ses services précieux et pour avoir relu et corrigé très soigneusement le manuscrit. Au département de Géologie de l'Université de Caen, je remercie également **Olivier DUGUE** de m'avoir initié à l'examen pétrographique des lames minces et à l'identification de leur contenu minéral et organique aux microscopes électronique à balayage et optique polarisant.

Mon intérêt pour un travail pluridisciplinaire n'a pu être entretenu que par de nombreuses aides et participations. J'exprime ma profonde gratitude et toutes mes estimes à :

♦ **Nicole POUPINET**, à ce moment chercheuse au Laboratoire de morphodynamique continentale et côtière (UMR 6143, CNRS), pour m'avoir accueilli au laboratoire de granulométrie et d'analyses physiques des eaux du centre de Géomorphologie de Caen et avoir mis à ma disposition l'outillage nécessaire aux traitements des échantillons gypseux.

♦ **Martine TRAUTMANN**, Technicienne CNRS du laboratoire ASFS (UMS 830, ULP/CNRS), pour l'accueil chaleureux à Rothbach, la formation poussée en granulométrie laser (Coulter LS230), la rigueur de l'analyse granulométrique des échantillons, les discussions intéressantes et les conseils bénéfiques.

♦ **Hakim ABICHOU** (FSHS, Tunis) pour m'avoir prêté son matériel de sondage à la tarière à main pour effectuer les trous dans les sebkhas.

♦ **Mostapha BEL HAJ**, l'ex Directeur de l'ONM (Tunis), pour sa sympathie et avoir autorisé le Service de la Géologie, l'analyse minéralogique d'un grand nombre d'échantillons prélevés sur les carottes C1 et C2. Je ne saurais oublier Mondher GHARBI, le technicien du service.

♦ **Fathi AYECH** (FLSH, Sousse) pour l'identification des espèces végétales riveraines des sebkhas.

♦ **Jihen NACEF** (ISEAH, Mahdia, Tunisie) pour avoir déterminé la fourchette d'âge des tessons de la poterie romaine et islamique, récoltés sur terrain.

♦ **Nourddine TAAMALLAH** (ONM) pour m'avoir initié à l'identification des minéraux sur les diffractogrammes et pour la discussion des résultats d'analyses minéralogiques des sédiments de la sebkha Halq al Minjil.

♦ **Habib MAKINA**, **Lotfi LAHMAR**, **Sahbi FADHALAOUI**, doctorants et membres du laboratoire CGMED, et **Walid BOUJELBEN** pour leur aide inestimable à l'extraction parfois pénible des sédiments souvent compacts dans les sebkhas par la tarière à main et à la réalisation des deux profils topométriques en vue de corréler les tarières et les carottes. Je leur souhaite toute la réussite qu'ils méritent. Je ne saurais oublier de remercier les étudiants de département d'Archéologie de Kairouan pour m'avoir aidé à réaliser quelques sondages à la tarière à main.

♦ **Hajer BEN ABDELLAH**, la secrétaire-gestionnaire du laboratoire CGMED, pour sa disponibilité, sa gaieté quotidienne et ses services illimités.

♦ Au delà des collaborations officielles et formelles, à toutes les personnes, sans qui un tel travail n'aurait pu voir le jour.

Je ne serais conclure sans exprimer ma vive reconnaissance et ma gratitude la plus profonde à mes parents et ma belle-mère. Ils n'ont jamais cessé de m'encourager. Je leur souhaite la bonne santé pour leur amour et leur compréhension.

Enfin Dalel, quels que soient mes choix, elle m'a constamment soutenu et encouragé et a crée avec constance des conditions de travail sereines. Merci pour ta patience, tes encouragements, ta compréhension et ta volonté de prendre en charge de lourdes responsabilités. A toi aussi, mes souhaits de bonne prospérité scientifique.

A tous ceux qui m'ont aidé, je dédie ce modeste travail



Couher de soleil sur la sebkha-lagune Halq al Minjil

AVERTISSEMENTS

1- Deux couvertures topographiques, d'échelles différentes (1/50000ème et 1/25000ème) et réalisées à 65 ans d'intervalle (1923-1988), recouvrent le terrain d'étude. Elles montrent de nombreuses différences de toponymes, dont la plupart ont une base latine ou arabe. Dans le manuscrit, on a choisi d'employer la toponymie fournie par les nouvelles cartes de 1988 à l'échelle 1/25000, jugées mises à jour et plus récentes.

2- On entend par l'Holocène *senso lato*, la période qui couvre les dix derniers millénaires. Nous adoptons une subdivision chronologique à caractère simplificateur. Elle distingue quatre sous périodes : (1) l'Holocène e supérieur préhistorique (3500 ans BP-vers le XIIe siècle av. J.-C. de l'introduction de la civilisation punique en Tunisie) et (4) l'Holocène supérieur historique (Ballais, 1991 ; Bourgou, 1993 ; Oueslati, 1993).

3- Plus de la moitié (56,7%) de la superficie du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil ne dépasse pas 30 m d'altitude. Les termes crête et ligne de crête, d'autant plus valables pour les régions élevées, seront utilisés pour désigner la ligne de partage des eaux et celle des sommets d'interfluve et précisément les Dhras et les crêtes collinaires. Le terme piémont sera employé pour indiquer les bandes localisées au pied des collines.

ABREVIATIONS ET SIGNIFICATION DES SIGLES UTILISES DANS LE TEXTE

1- Eléments géochimiques majeurs

- Al_2O_3 : Hydroxyde d'alumine
- CaO : Oxyde de calcium
- Fe_2O_3 : Oxyde de fer (III)
- K_2O : Oxyde de potassium
- MgO : Oxyde de magnésium
- MnO : Oxyde de manganèse
- Na_2O : Oxyde de sodium
- P_2O_5 : Pentoxyde de phosphore
- SiO_2 : Dioxyde de silicium
- TiO_2 : Dioxyde de titane
- LOI : Loss On Ignition (en anglais) : la perte au feu

2- Eléments géochimiques mineurs

- Ba : Baryum
- Cr : Chrome
- Cu : Cuivre
- Ni : Nickel
- Pb : Plomb
- Rb : Rubidium
- Sr : Strontium

- Zn : Zinc
- Zr : Zirconium
- V : Vanadium
- Cl : Chlore

3- Faciès des remplissages sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya

- FEA : Faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire
- FCA : Faciès proximal colluvio-alluvial
- FCV : Faciès de colmatage vaseux
- FPL : Faciès fluvio-palu-lacustre
- FFL : Faciès fluvio-lacustre
- FGF : Faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins

4- Faciès des remplissages sédimentaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil

- FE : Faciès « évaporatique »
- FF : Faciès fluviatile
- FL : Faciès lagunaire
- FSC : Faciès sulfato-carbonaté
- FMF : Faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables
- FMM : Faciès mixte aux influences marines notables
- FEO : Faciès éolien

5- Schémas, Comités, Offices, Directions, Agences, Facultés, Instituts, Laboratoires, Universités

- APAL : **A**gence de **P**rotection et d'**A**ménagement du **L**ittoral
- ASFS : Laboratoire d'**A**nalyse des **S**ols et des **F**ormations **S**uperficielles (UMS 830 ULP/CNRS, Strasbourg, France)
- ASTM : **A**merican **S**ociety for **T**esting and **M**aterial (**S**ociété **A**méricaine pour les **E**ssais et les **M**atériaux, Etats-Unis)
- BIRH : **B**ureau de l'**I**nventaire et des **R**echerches **H**ydrauliques, Tunis, Tunisie
- CGMED : Laboratoire de **C**artographie **G**éomorphologique des **M**ilieux, des **E**nvironnements et des **D**ynamiques (SERST, LAB-ST-04, Tunis, Tunisie)
- CGS : **C**entre de **G**éochimie de la **S**urface (UMR 7517, CNRS/ULP, Strasbourg, France)
- CIRSA : **C**entro **I**nterdipartimentale di **R**icerca per le **S**cienze Ambientali (Université de Bologne, Italie)
- CMCU : **C**omité **M**ixte de **C**oopération **U**niversitaire
- CRDA : **C**ommissariats **R**égionaux de **D**éveloppement **A**gricole
- DEGTH : **D**irection des **E**tudes et des **G**rands **T**ravaux **H**ydrauliques (Tunis)
- DRH : **D**irection des **R**essourses **H**ydrauliques (Tunis)
- DORIS : **D**onnées d'**O**bservations pour la **R**econnaissance et l'**I**dentification de la faune et de la flore **S**ubaquatiques
- EOST : **É**cole et **O**bservatoire des **S**ciences de la **T**erre (Université de Strasbourg, CNRS, France)
- FLSH : **F**aculté des **L**ettres et des **S**ciences **H**umaines (Tunisie)
- FSHS : **F**aculté des **S**ciences **H**umaines et **S**ociales (Tunis, Tunisie)
- GEOPHEN : Laboratoire de **Géo**graphie **Ph**ysique et **En**vironnement (UMR 6554, CNRS, Caen, France)
- GEPPA : **G**roupe d'**E**tude pour les **P**roblèmes de **P**édologie **A**ppliquée
- HGS : Laboratoire d'**H**ydrologie et de **G**éochimie de **S**trasbourg (UMR 7517, CNRS/ULP, Strasbourg, France)
- ICDD: **I**nternational **C**entre for **D**iffraction **D**ata

- INP : **I**nstitut **N**ational du **P**atrimoine (Tunis, Tunisie)
- ISEAH : **I**nstitut **S**upérieur des **E**tudes **A**ppliquées aux **H**umanités (Mahdia, Tunisie)
- IsIAO : **I**nstituto **I**taliano per l'**A**frica e l'**O**riente (Rome, Italie)
- LGP : **L**aboratoire de **G**éographie **P**hysique (UMR 8591, CNRS, Meudon, France)
- LRAE : **L**aboratoire de **R**adio-**A**nalyses et **E**nvironnement (l'**E**cole **N**ationale des **I**ngénieurs à **S**fax, ENIS, Tunisie)
- MNHN : **M**uséum **N**ational d'**H**istoire **N**aturelle (UMR 7194, CNRS, Paris, France)
- OTC : **O**ffice de **T**opographie et de **C**artographie (Tunis, Tunisie)
- SDAGE : **S**chéma **D**irecteur d'**A**ménagement et de **G**estion des **E**aux
- SEA : **S**ecrétariat d'**E**tat de l'**A**griculture
- SIRUS : **S**ociété d'**I**ngénierie **R**urale **U**rbaine et **S**anitaire (Tunis ; Tunisie)
- UCL: **U**niversity **C**ollege **L**ondon
- ULP: **U**niversité **L**ouis **P**asteur

6- Sites archéologiques préhistoriques

- SHM-1 : Site Halq al Minjil n°1
- SHM-15 : Site Halq al Minjil n°15

7- Résultats radiocarbones (^{14}C) calibrés

- cal BC : date calendaire exprimée en nombre d'années historiques BC (Before Christ ou avant J.-C.).
- cal AD : date correspondant aux années historiques AD (Anno Domini ou après J.-C.).
- cal BP : date faisant référence aux années avant 1950 qui correspond au 0 BP (Before present ou avant présent ; Stuiver M., Reimer P. J. et Reimer R., 2015).

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET DE L'ETUDE

CADRE METHODOLOGIQUE : APPROCHE ET OUTILS D'ANALYSES

PREMIERE PARTIE : L'ENCLAVE SEMI-ENDOREIQUE D'AL KALBIYYA : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET EVOLUTION HOLOCENE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN

CHAPITRE I : LES REMPLISSAGES HOLOCENES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

CHAPITRE II : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DURANT L'HOLOCENE : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

CHAPITRE III : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS D'AL KALBIYYA

DEUXIEME PARTIE : LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN : COMPLEXITE D'UN SYSTEME A L'INTERFACE TERRE/MER

CHAPITRE IV : REMPLISSAGES DU FOND ET DEPOTS DES RIVES DE HALQ AL MINJIL : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

CHAPITRE V : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

CHAPITRE VI : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS DE LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL

TROISIEME PARTIE : LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES, FONCTIONNEMENT ET DYNAMIQUES MORPHOSEDIMENTAIRES

CHAPITRE VII : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES ET CONTEXTE PREHOLOCENE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

CHAPITRE VIII : AMPLEUR ET VARIETE DES DEPOTS HOLOCENES DANS LE SYSTEME FLUVIAL : PRESENTATION DES COUPES SIGNIFICATIVES

CHAPITRE IX : LES MODELES HOLOCENES DU SYSTEME FLUVIAL : ETUDE DE SYNTHESE ET INTERPRETATION D'ENSEMBLE

QUATRIEME PARTIE : LES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL ET LEUR SYSTEME FLUVIAL IMMEDIAT : MORPHOGENESE, SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES ET DYNAMIQUES PAYSAGERES

CHAPITRE X : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS 25120±120 BP ET DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR

CHAPITRE XI : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

PENDANT L'HOLOCENE MOYEN (7000-3500 BP)

CHAPITRE XII : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL A L'HOLOCENE SUPERIEUR (DEPUIS 3500 BP)

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

TABLES ET ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET DE L'ETUDE

I- CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

II- PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE ET ETAT SCIENTIFIQUE DE LA QUESTION

III- LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

IV- LES PARTIES DE LA THESE

I- CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

Les oueds Nebhana, Merguelil et Zéroud prennent naissance sur l'Atlas et parcourent, sur des centaines de kilomètres, les Hautes et les Basses Steppes en direction du Sahel à l'est. Ils se déversent dans des plaines, des sebkhas continentale et littorale. Ils drainent des systèmes fluviaux connectés, composant un grand bassin hydrographique drainant l'ensemble de la Tunisie centrale. La sebkha al Kalbiyya est son principal réceptacle hydrique et sédimentaire (Fig.1.1 et 1.2). Ce bassin a été reconnu pour la première fois par Rouire A.-M.-F. (1889) qui l'a identifié à l'ancien bassin du *Triton*.

Du strict point de vue hydrographique, **la thèse se focalise sur la partie aval du bassin de la Tunisie centrale, de la sebkha continentale al Kalbiyya à la sebkha côtière Halq al Minjil.** Ces sebkhas, hydrologiquement liées, forment avec leur système fluvial immédiat **un hydrosystème local et entier**. Celui-ci est postérieurement désigné sous le nom complet de **l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil**. Il se situe dans la partie nord du Sahel septentrional de la Tunisie centre-orientale. Il s'étend sur une superficie de 853,28 km². Il constitue un espace de contact et d'articulation entre les différentes régions naturelles de la Tunisie centrale (Fig. 1.3). Il limite les Basses Steppes à l'ouest et les piémonts et les plaines méridionales de la terminaison sud-orientale de la Dorsale tunisienne au nord et au nord-ouest. La dépression d'al Kalbiyya et son émissaire al Manfas as-Sod empruntent une gouttière de liaison entre la Tunisie intérieure et la Tunisie littorale (Karray, 1990b). Le coude permettant l'acheminement des eaux des oueds al Mjinin et Sidi Abd al Gwi dans la sebkha littorale Halq al Minjil, présente la lisière nord du Sahel et un lieu de jonction entre les bassins sud-est de la Dorsale et les bassins littoraux. Le seuil topographique Dhra laghmas-ash-Shraif, qui limite le bassin d'al Kalbiyya à l'est, sépare le Sahel de Sousse des Basses Steppes.

Du sud-ouest au nord-est, l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, montre un certain **ordonnancement de trois sous-systèmes**. Ils correspondent à trois unités ou bassins hydrographiques. Ils sont connectés mais différenciés par leur taille, leur morphologie, leur disposition morphostructurale et leur régime hydrologique (Barrot, 1972 ; Tagorti, 1990 ; Boujarra et Gammar, 1993 ; Karray, 1990b, 1993 ; Boujelben, 2002).

(a) Le premier à l'amont et à l'ouest est **le bassin immédiat de la sebkha continentale al Kalbiyya** (Fig. 1.4). Il couvre 463,2 km². Il est formé d'une enclave semi endoréique entourée de petits sous-bassins de quelques km² de superficie. La sebkha proprement dite occupe le fond de l'enclave. **Elle est exclusivement sous l'influence des apports et des dynamiques continentaux. Elle reçoit les apports locaux des petits drains tributaires et les apports allogènes des oueds Nebhana, Marguelil et Zéroud**. Au nord-est de l'enclave, les trop-pleins liquides et solides d'al Kalbiyya transitent épisodiquement par l'oued al Manfas as-Sod, vers la sebkha littorale Halq al Minjil puis la mer.

(b) Le deuxième au centre, s'apparente à un bassin intermédiaire, en position de lien entre le bassin d'al Kalbiyya à l'amont et celui de Halq al Minjil à l'aval. Il est **le bassin versant de l'oued al Manfas as-Sod qui forme l'essentiel du système fluvial de l'hydrosystème**. La superficie est de l'ordre de 176,87 km². Le cours principal de l'oued al Manfas as-Sod a deux fonctions majeures : (1) il est le collecteur des eaux locales des oueds qui descendent des hauteurs de Qal'a al Kbira et (2) l'évacuateur des trop-pleins de la sebkha al Kalbiyya à l'occasion des événements hydro-pluviométriques exceptionnels.

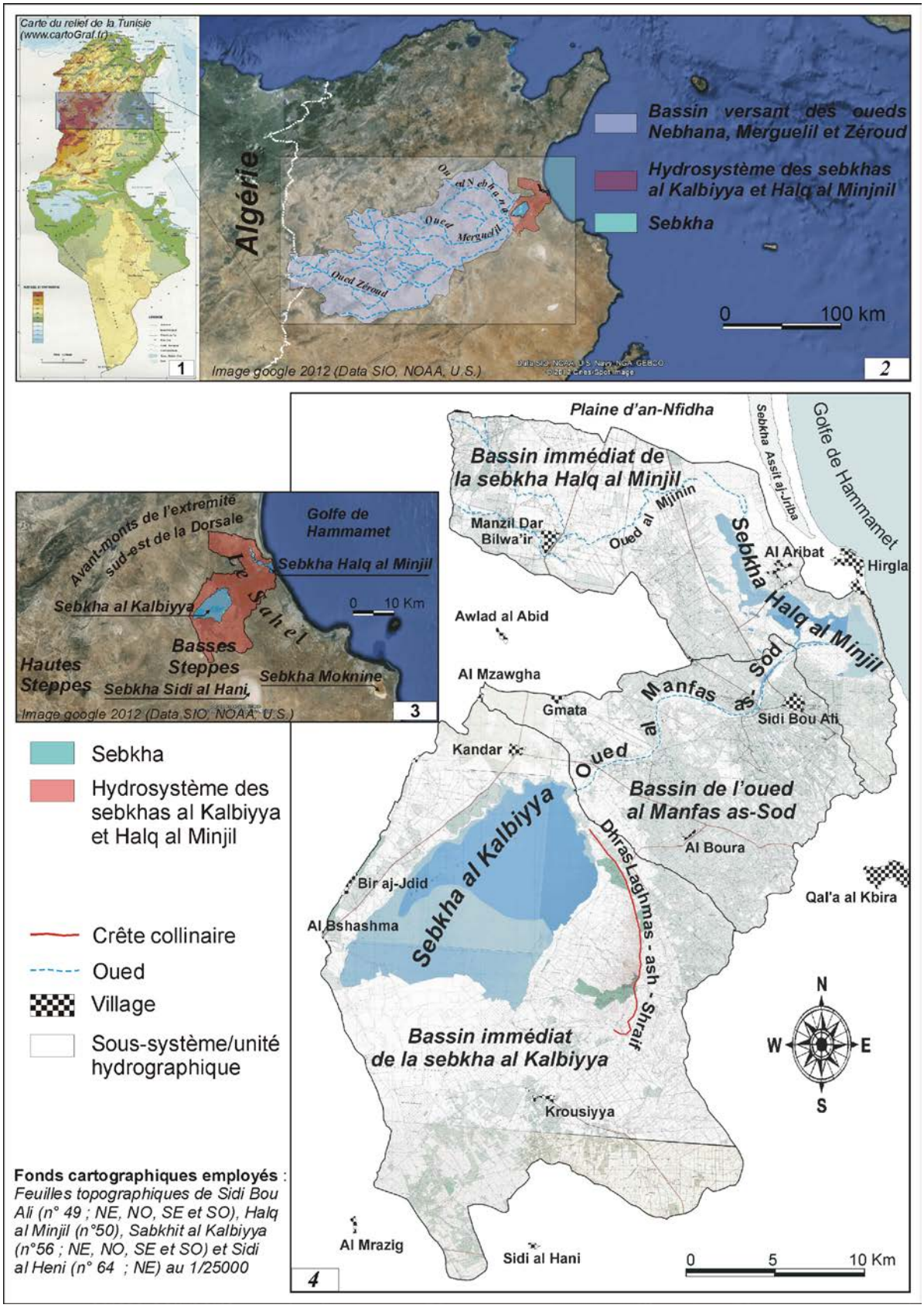


Fig. 1 : Croquis de localisation, contexte régional et organisation de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

(c) Le troisième à l'aval et sur les marges septentrionale et orientale de l'hydrosystème. Il correspond au **bassin immédiat de la sebkha côtière Halq al Minjil**. Il s'étend sur environ 213,2 km² de superficie. La sebkha est le réceptacle des apports terrigènes en provenance des versants sud-est de la Dorsale, des Basses et des Hautes Steppes et de la sebkha al Kalbiyya par les biais des oueds al Mjinin et al Manfas as-Sod. **Elle représente le niveau de base local de l'ensemble de la Tunisie centrale**. En parcourant la dépression qu'occupe Halq al Minjil, l'œil le moins exercé découvre à première vue la juxtaposition de deux milieux différents : un milieu septentrional de sebkha passant à un milieu méridional de lagune en communication avec la mer et qui, de ce fait, en subit l'influence.

II- PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE ET ETAT SCIENTIFIQUE DE LA QUESTION

En raison de sa position géographique, l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil est un milieu d'échanges et de croisements, archivant en partie l'histoire de la Tunisie centrale. **L'examen des paysages actuels pose d'importants problèmes concernant la morphogenèse et les environnements holocènes. Cet hydrosystème est encore à l'écart des études géomorphologiques et paléoenvironnementales à haute résolution sur l'Holocène.**

Les sebkhas, zones humides, sont d'importantes archives naturelles des dynamiques locales et régionales. Elles fournissent des séquences litho-chronostratigraphiques de haute résolution. Ces dernières aident, à travers les différents marqueurs (sédimentologiques, malacalogiques, palynologiques…), à comprendre le fonctionnement global des systèmes hydrologiques. Elles offrent un intéressant potentiel d'éclairages aux questions des changements bioclimatiques, de l'anthropisation et des paléoenvironnements (Fontes et Perthuisot, 1971 ; Oueslati, 1984 ; Karray, 1990a ; Abichou, 2002 ; Pomel et *al.*, 2004 ; Lakhdar et *al.*, 2006 ; Farhat et Ben Mammou, 2010…).

Les sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, paraissent être un élément principal du paysage des marges nord du Sahel septentrional tunisien. **Al Kalbiyya est la deuxième plus importante zone humide de la Tunisie**, après le lac Ichkeul, et a été classée réserve naturelle décembre 1993 (Romdhane, 1997). **Depuis 1987, Halq al Minjil est déclarée espace naturel d'importance et puis classée zone sensible littorale à protéger** (APAL, 1999b, 2002). Bien qu'accusées d'écosystèmes fragiles et de potentialités limitées, **ces deux zones humides présentent un grand intérêt écologique, économique et social.** Elles ont également suscité beaucoup d'intérêt dans le cadre général du développement durable visant la gestion rationnelle et une meilleure préservation des ressources naturelles (Bahri, 1982 ; SIRUS, 1997 ; APAL, 1999a-b, 2000, 2002, 2003a-d).

A travers des investigations simples sur certains sites des alentours d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, on aperçoit vite **l'hétérogénéité et l'originalité des sédiments** (fluviatile, éolien, fossilifère lacustre et lagunaire,), **la variété des modelés** (cône deltaïque, cône d'épandage, bourrelets, lunettes, nebkas,) et **l'existence de plusieurs sites archéologiques**. Ces héritages incitent de prime abord à réfléchir aux **problèmes concernant l'instabilité morphogénique, le changement des paysages et les successions paléoenvironnementales, en rapport avec les différents facteurs de contrôle**.

Les recherches géomorphologiques et paléoenvironnementales entreprises dans les deux systèmes hydrologiques, continental et littoral, **sont peu nombreuses**. Elles sont **souvent de valeur locale et se trouvent généralement fragmentaires** dans des travaux réservés à l'étude de la morphodynamique actuelle et/ou des modelés et des dépôts de

bordures surtout du Pléistocène supérieur et de l'Holocène inférieur (Poncet, 1970 ; Barrot, 1972a, 1972b ; Coque, 1979 ; Karray, 1990a, 1990b, 1993 ; Kamoun, 2000 ; Boujelben, 2002 ; Karray, 2006 ; Boujarra *et al.*, 2006). Certains résultats sont parfois difficilement comparables. L'holocène moyen et supérieur est resté peu développé (Oueslati, 1995a ; Mrabet et Boujarra, 1999 ; Boujelben, 2002 ; Boujarra *et al.*, 2006). Seul le cordon tyrrhénien barrant Halq al Minjil vers la mer a bénéficié de nombreuses études (Barrot, 1972b ; Paskoff et Sanlaville, 1976, 1980, 1983 ; Mahmoudi, 1986 ; Jédoui *et al.*, 1987 ; Tagorti, 1990 ; Oueslati, 1993, 1994…).

Le système fluvial immédiat des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil représente plus de 86% de la superficie de l'hydrosystème. **Les recherches** sur ses dynamiques géomorphologiques et son évolution paléoenvironnementale **sont très peu poussées** (Karray, 1993). Seul le bassin de l'oued al Manfas as-Sod a suscité, depuis peu de temps, la part essentielle d'observations et d'investigations géomorphologiques (Boujelben, 2002 ; Boujarra *et al.*, 2005, Boujarra *et al.*, 2006). Malgré le faible potentiel morphogénique du bassin, les travaux ont relaté l'accentuation de la dynamique actuelle et l'importance de l'érosion et des remblaiements historiques. Ces derniers ont éveillé beaucoup d'interrogations quant à l'ambigüité de la morphogenèse historique et des facteurs responsables. **La recherche sur la signification morphodynamique et paléoenvironnementale des sédiments ainsi que l'étude des variations paléoclimatiques et du rythme de l'érosion sont encore peu avancées**.

De fait, **les remplissages sédimentaires** des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, jadis d'anciens lacs et lagunes holocènes (Karray, 1990a ; Oueslati, 1995a ; Boujelben, 2002), **n'ont pas fait l'objet d'inventaires systématiques. Ils sont restés à l'écart des études morphosédimentaires et paléoenvironnementales détaillées**. Ils offrent la possibilité de réalisation des analyses multiparamètres (sédimentologique, micromorphologique, palynologique, malacologique,). Ils permettent la compréhension des fonctionnements et des changements hydromorphologiques des systèmes hydrologiques et la connaissance de l'évolution des dynamiques et des milieux. Ils incitent à l'appréciation de la mutation des environnements sédimentaires et du rôle des différents facteurs du contrôle (bioclimatique, climato-eustatique, tectonique, anthropique,), locaux et/ou régionaux, qui agissent à différentes échelles. **Le système fluvial des deux sebkhas est également peu abordé pour une meilleure appréhension des échanges et des dynamiques au sein de l'hydrosystème**. L'examen des archives disponibles dans les fonds de vallées et les plaines permet de caractériser l'évolution de la morphogenèse et des paysages.

L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil mérite ainsi indubitablement notre intérêt pour lancer une étude géomorphologique et paléoenvironnementale. **Le choix de la taille du terrain d'étude (853,32 km² de superficie) est guidé par deux impératifs**. (1) **La volonté de travailler sur l'ensemble de l'hydrosystème afin d'apprécier les rapports** amont-aval des versants aux thalwegs, puis aux sebkhas et de **comprendre le fonctionnement global de l'hydrosystème** sur le long terme holocène. (2) **La grande étendue me donne plus de marge de manœuvre pour des comparaisons et des corrélations des données** recueillies sur les différents espaces de l'hydrosystème. Les comparaisons permettent de réfléchir aux spécificités de chaque espace et aux particularités des archives sédimentaires et des modelés et d'en déterminer les causes (contrôles locaux, régionaux, bioclimatiques, eustatiques, néotectoniques). Ainsi, les effets de l'instabilité morphogénique et environnementale ne se traduisent pas de manière semblable et parallèle dans les différents compartiments de l'hydrosystème. Les corrélations aident à définir des parallélismes chronologiques d'événements malgré les disparités orohydrographiques, structurales et morphologiques au sein de l'hydrosystème.

III- LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

La thèse se place dans la thématique de recherche du laboratoire CGMED (LAB-ST04, Tunisie) portant sur la reconstitution des « Milieux et Environnements Pléistocènes et Holocènes à Actuels (MEPHA) de la Tunisie centrale et orientale ». Elle suit les axes de recherche du laboratoire GEOPHEN (LETG, UMR 6554, CNRS, France) sur le « Fonctionnement des hydrosystèmes en Normandie, en monde méditerranéen et tropical ». Elle veut se dédier et contribuer à **la connaissance de l'évolution des dynamiques morphologiques, hydrosédimentaires, des milieux et des environnements holocènes du domaine sahélien et présahélien en Tunisie centre-orientale**. Elle concourt au **discernement de l'histoire hydro-morphosédimentaire d'anciens lacs et lagunes**, **évoluant aujourd'hui en milieux de sebkhas et classés réserve naturelle et espace naturel d'importance**.

Cinq groupes d'objectifs ont été assignés à la thèse :

(**1**) rétablir le contexte géomorphologique et topo-structural du fonctionnement préholocène de l'hydrosystème et comprendre la genèse des dépressions al Kalbiyya et Halq al Minjil.

(**2**) étudier la stratigraphie séquentielle haute résolution et l'évolution spatio-temporelle des archives sédimentaires des enclaves endo et/ou semi-endoréiques de l'hydrosystème. On cherche à définir les faciès et les milieux sédimentaires, les mécanismes de la morphodynamique et d'évolution post-déposionnelle des sédiments, ainsi que leur signification environnementale.

(**3**) établir les logs litho-chronostratigraphiques des remplissages sédimentaires des sebkhas Halq al Minjil et al Kalbiyya. Le but est de définir les phases majeures de sédimentation et les systèmes de fonctionnement hydrologique qui se sont succédés dans les dépressions, puis de chercher leurs corrélables régionaux. On évalue les potentialités de l'archivage sédimentaire des différents stades holocènes de l'évolution de l'hydrosystème.

(**4**) définir et caractériser les formes et les formations hydriques et éoliennes de bordures des sebkhas, dans les plaines et les fonds de vallées et étudier leurs significations hydro-morphodynamiques. On essaie de comprendre l'ampleur des remblaiements dans les plaines et les fonds des oueds particulièrement ceux tributaires des sebkhas. On pose le problème de l'origine des héritages géomorphologiques et notamment des terrasses historiques pour expliquer le fonctionnement morphogénique du système fluvial.

(**5**) reconstituer les pléopaysages et les paléoenvironnements et l'évolution de la morphogenèse au cours du temps en relation avec les variations bioclimatiques et hydro-eustatiques et les forçages anthropiques et néotectoniques. Dans la mesure du possible, on examine les rythmes de l'érosion et de l'accumulation. On compare les résultats obtenus aux données disponibles sur d'autres régions de la Tunisie. Une carte géomorphologique de synthèse et des tableaux chronostratigraphiques des remplissages sédimentaires, des héritages géomorphologiques et du fonctionnement holocène de l'hydrosystème sont établis.

IV- LES PARTIES DE LA THESE

La thèse porte sur trois fenêtres géographiques, déjà connectées, ayant chacune une morphologie, une histoire et un schéma spécifique de fonctionnement hydromorphologique. **On étudie séparément les enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, réceptacles des charges sédimentaires, et puis leur système fluvial environnant pourvoyeur de la matière** dans les sebkhas et sur leurs bordures. Ce choix s'explique par la variété des

archives sédimentaires disponibles, tant d'origine différente, et leur positionnement dans des contextes locaux particuliers : continental (al Kalbiyya), littoral (Halq al Minjil) et intermédiaire (le système fluvial).

Suivant le cadre géographique et thématique de l'étude, le mémoire de thèse est structuré autour de quatre parties principales :

(**1**) **La première partie consiste à étudier les remplissages sédimentaires et définir les systèmes holocènes du fonctionnement hydrologique et éolien** d'al Kalbiyya. Le cadre topo-strucural du fonctionnement de l'enclave continentale est présenté. Une description lithosquentielle haute résolution et une caractéristaion sédimentologique des dépôts sont effectuées. Elles ont permis d'établir une typologie des faciès et d'analyser les mécanismes morphodynamiques et d'évolution post-dépositionnelle des sédiments. Les modelés hydroéoliens de bordures de la sebkha sont étudiés. La corrélation spatio-temporelle des faciès et l'établissement du log litho-chronostratigraphique de synthèse des archives sédimentaires ont permis de définir les différents stades holocènes de sédimentation et de fonctionnement hydrologique et éolien.

(**2**) **La deuxième partie s'intéresse à l'étude des archives sédimentaires, l'évolution et le fonctionnement hydrologique et éolien du complexe littoral Halq al Minjil**. Le plan adopté passe par une étude de la physiographie et de la genèse de la dépression littorale. La caractérisation multiparamètres des sédiments, l'organisation spatio-temporelle des faciès, le morphodynamisme et les environnements sédimentaires font l'objet d'une présentation plus approfondie. Les résultats sont ensuite discutés en termes d'interprétation de la provenance, de l'évolution et de l'âge des sédiments et de la définition des systèmes et stades holocènes de fonctionnement hydrologique et éolien de Halq al Minjil.

(**3**) **La troisième partie se focalise sur les héritages géomorphologiques et le fonctionnement du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil**. Dans un premier temps, elle expose le cadre topo-structural et les héritages géomorphologiques pléistocènes pour appréhender le contexte pré-holocène du fonctionnement du système fluvial. Puis, elle présente les coupes significatives, décrit et caractérise les dépôts des plaines et des fonds de vallées et définit leur mode de transport et d'accumulation. Enfin elle entreprend une étude de synthèse et une interprétation d'ensemble des modelés holocènes : extension et répartition géographiques, caractéristiques sédimentologiques et signification morphodynamique.

(**4**) **La quatrième partie étudie la morphogenèse, les successions paléoenvironnementales et l'évolution des paysages dans l'hydrosystème depuis 10000 ans environ**. Une étude de synthèse vise une démarche chronologique et spatiale pour reconstituer les différentes étapes de l'évolution de l'érosion, des paysages et des environnements. Pour chaque phase, on explique les dynamiques des vallées et des plaines et l'évolution des dépôts corrélatifs dans les sebkhas. On définit les événements d'érosion, d'aggradation et de progradation sédimentaires et de pédogenèse. On décrit également le fonctionnement hydrologique et/ou hydroéolien des sebkhas actuelles, dans leurs rapports avec les différents facteurs de contrôle bioclimatique, eustatique, anthropique et néotectonique, locaux et/ou régionaux.

CADRE METHODOLOGIQUE : APPROCHE ET OUTILS D'ANALYSES

I- L'INVENTAIRE ET L'ANALYSE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES ET DES MODELES

II- L'ELABORATION DES SYNTHESES SPATIO-TEMPORELLES : LA CARTOGRAPHIE GEOMORPHOLOGIQUE

III- LE CALAGE CHRONOLOGIQUE DES SEDIMENTS, DES MODELES, DES SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES ET DES PHASES MORPHOGENIQUES

IV- LA RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DES PAYSAGES, DES ENVIRONNEMENTS ET DES RAPPORTS SOCIETES HUMAINES/MILIEUX

L'intérêt de la thèse est de promouvoir une recherche naturaliste et pluridisciplinaire. Le but est une meilleure compréhension de l'enregistrement sédimentaire des dynamiques holocènes. La thèse s'est forcée d'appliquer des méthodes et des moyens d'étude issus de la géomorphologie dynamique et climatique. Ils seront ensuite associés aux données de la sédimentologie, la micromorphologie, la minéralogie, la géochimie, la palynologie, la géoarchéologie, l'archéozoologie et la malacologie dans une optique d'emboîtement des échelles d'observation spatio-temporelle.

La sebkha littorale a été choisie pour une étude pluridisciplinaire plus approfondie en raison (1) de sa position à l'aval de l'hydrosystème et à l'interface terre/mer, (2) de ses fortes aptitudes à l'archivage de l'histoire holocène de l'hydrosystème et (3) des opportunités techniques et financières apportées par le projet tuniso-italien pour l'étude de la préhistoire de Hirgla. Des analyses minéralogique, géochimique et micromorphologique et des datations au ^{14}C AMS, se trouvent ainsi concentrées sur cet espace.

On présente les moyens de recherche, en insistant notamment sur les aspects techniques et pratiques, sur l'utilité et les limites de chaque outil et/ou approche employée. De tels moyens et techniques d'étude seront présentés en fonction des objectifs de la recherche.

I- L'INVENTAIRE ET L'ANALYSE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES ET DES MODELES

I-1- Le travail de terrain

I-1-1- L'investigation géomorphologique du système fluvial et des bordures de sebkhas

L'investigation géomorphologique consiste à la description précise des paysages actuels ainsi qu'à l'identification et la caractérisation des héritages géomorphologiques. Elle s'attache surtout aux modelés et dépôts pouvant attester d'une grande signification morphogénique. La démarche est développée suivant les protocoles classiques d'observation géomorphologique, séquentielle et sédimentologique (Coque, 1998 ; Saaidi, 1988 ; Colombié, 2002). Elle s'est appuyée d'abord sur des travaux de préparation de terrain, conduits à partir de la photo-interprétation des clichés aériens et de l'examen des fonds cartographiques. Puis, partant des principes des discontinuités sédimentaires, une étude sur les coupes de la nature, de la stratigraphie séquentielle, de l'évolution longitudinale, des contacts et des figures sédimentaires des dépôts, contenant ou non des artéfacts ou des vestiges archéologiques et des restes paléontologiques, a été menée. L'examen de l'agencement et de l'extension spatiale des modelés, a permis la correction et la validation des cartons géomorphologiques pré-dessinés. Les coupes les plus significatives ont fait l'objet de levés, de prises photographiques et d'échantillonnages de sédiments et d'éléments datables, s'ils existent. Les sites d'observation ont été positionnés au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) à l'aide du logiciel *Arc Gis 9.2* et de deux GPS de positionnement *Garmin 48* et différentiel *GeoXM*. Le but est de corréler et de restituer la répartition et l'évolution spatiales des dépôts semblables et synchrones.

I-1-2- Les moyens et les méthodes d'auscultation dans les sebkhas

L'inventaire systématique des remplissages sédimentaires des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil est permis par la réalisation de **44 sondages à la tarière à main**, d'une profondeur de 1,5 m à 4,6 m. Ils ont été implantés après une prospection de surface et l'examen des fonds photo et cartographiques. Le choix des sites d'implantation a été guidé par la configuration morphologique du bassin, par l'organisation spatiale des modelés, par le

changement apparent et remarquable des sédiments de surface, par les contraintes techniques imposées, par le caractère compacté des sédiments (les limons surtout), par l'étendue des zones impraticables et par les exigences de certains propriétaires de parcelles qui contestent l'accès à leurs champs sur les bordures de la sebkha. En dehors des « zones inaccessibles », on a cherché à optimiser le choix des sites de sondages afin d'obtenir la meilleure représentation spatiale d'échantillonnage.

Une description litho-séquentielle haute résolution des dépôts a été menée sur place. Les tarières les plus représentatives et les niveaux sédimentaires qui posent des problèmes ont fait l'objet d'échantillonnages pour des analyses de laboratoire et des datations radiocarbones. L'objectif est de caractériser le matériel et d'apprécier sa provenance, les dynamiques et les environnements sédimentaires dans un cadre chronologique précis. Les sondages ont été positionnés par *GPS* et intégrés dans le SIG.

Dans l'enclave paralique de Halq al Minjil, l'inventaire des archives sédimentaires s'est appuyé sur une campagne de **trois sondages carottés**. Les sondages ont été effectués en septembre 2005 par une société privée et financés par le projet tuniso-italien pour l'étude de la préhistoire de Hirgla. Le carottier utilisé était de marque Technidrill, double type T6 et de diamètre 116 mm. Cette technique a permis d'obtenir, sur une profondeur de 5,47 à 10,30 m, les colonnes sédimentaires les plus complètes et la stratigraphie la plus complexe. Les carottes sont soumises à une prise de vue haute résolution (centimétrique à millimétrique) pour établir la stratigraphie séquentielle des archives sédimentaires. Ceci est fondé sur la distinction des textures, des couleurs, du contenu malacofaunique et/ou floristique. Ensuite, deux types de prélèvements ont été effectués : en vrac pour les analyses sédimentologiques (granulométrie, géochimie, minéralogie, calcimétrie, morphoscopie) et en bloc pour la confection des lames minces et l'analyse micromorphologique.

Afin de reconstituer la paléogéographie, la bathymétrie des paléolagunes et les niveaux marins relatifs succédés à Hirgla durant l'Holocène, 25 sondages à la tarière à main et les trois sondages carottés ont été corrélés avec **sept profils topométriques**. Les levés ont été réalisés au moyen d'un niveau laser *Leica Na 3003,* du laboratoire CGMED (*LAB-ST-04, Tunis*). Ils ont été rattachés au réseau de géodésie et nivellement de l'Office de Topographie et de Cartographie de Tunis (OTC), disponible dans la région de Hirgla. Le nivellement d'itinéraires par cheminement est la technique employée pour la détermination des altitudes. Les données ont été intégrées sous un tableur Excel pour la sortie automatique des profils et à la réalisation des calculs nécessaires aux interprétations.

I-2- La caractérisation et les analyses sédimentologiques des sédiments

L'identification des faciès, de la morphodynamique, des processus morphogéniques et pédogéniques, des dynamiques des environnements et du fonctionnement de l'hydrosystème, est fondée principalement sur l'étude des sédiments. Ces derniers intègrent l'ensemble des fluctuations des conditions physiques, chimiques et biologiques du milieu. L'étude est basée sur six types d'analyses sédimentologiques.

I-2-1- La granulométrie des sédiments : la nécessité des prétraitements chimiques spécifiques

La granulométrie permet de retracer les conditions dynamiques du milieu au moment de la sédimentation et de définir les différents paramètres descripteurs du fonctionnement de l'hydrosystème. **341 échantillons ont fait l'objet de l'analyse granulométrique laser** au laboratoire GEOPHEN (UMR 6554, CNRS, Caen) et au laboratoire ASFS (UMS 830 ULP/CNRS, Strasbourg), qui utilisent deux modèles de granulomètre laser LS200 et LS230, de la gamme Coulter BECKMANN. A la recherche des résultats comparatifs, on a retenu le

protocole de préparation des échantillons employé au deuxième laboratoire (Annexe 1). Au laboratoire CGMED, **l'analyse granulométrique par voie sèche** a porté sur la fraction supérieure à 60 µm de **15 échantillons fluviatiles**, au moyen d'une série de tamis de type *AFNOR*. Les classes texturales utilisées dans le mémoire sont celles de la classification granulométrique de l'Association Internationale des sols (Malet et Remaître, 2003).

Les sédiments et principalement ceux des remplissages du fond des sebkhas se caractérisent par **la prédominance de la fraction fine à fortes teneurs en agents de cimentation et de liaison des agrégats** (matière organique, carbonate de calcium, sels). **Des prétraitements chimiques** particuliers **ont été envisagés** pour assurer la défloculation maximum du sédiment et obtenir une suspension stable, suffisamment dispersée (Annexe 1). Il s'agit de la destruction de la matière organique et l'élimination des ions floculants (Ca^{2+}). Cependant, **le gypse et les sels en général**, minéraux cardinaux dans les sebkhas et leurs bordures, **posent des problèmes**. Ils ont des propriétés physicochimiques très particulières : solubilité non négligeable, facilité de déshydratation et de réhydratation, densité plus faible que celle d'autres minéraux, poids spécifique inférieur à celui des particules supérieures à 2 µm (Boyé et Nesson, 1970 ; Vieillefon, 1979 ; Chahi *et al.*, 1993). Ces propriétés limitent la dispersion et entraînent la floculation des argiles. Elles faussent l'analyse granulométrique en surestimant surtout les proportions relatives des limons.

Une première méthode classique d'élimination du gypse, couramment utilisée, a **été rapidement abandonnée**. Elle consiste à dissoudre les sulfates par l'utilisation de l'électrolyte NaCl (Annexe 2 ; Chahi *et al.*, 1993). Facile et moins coûteuse, elle n'élimine pas définitivement le gypse. Ce dernier est en partie dissout à la dispersion et se recristallise au séchage (Boyé et Nesson, 1970). **Une deuxième méthode a été appliquée**, mais n'a pas été systématiquement utilisée. On n'y a eu recours que lorsque la teneur en gypse dépasse les 10% (Annexe 2 ; Vieillefon, 1979). Elle vise l'élimination du gypse à l'attaque de chlorure de baryum et de triethanolamine (Mathieu et Pieltain, 1998). Le résultat est plus convaincant que celui de la première méthode dont le gypse encore présent a provoqué des « anomalies granulométriques » indiquées par la surestimation de la fraction limoneuse liée à la défloculation insuffisante des colloïdales (Fig. 2).

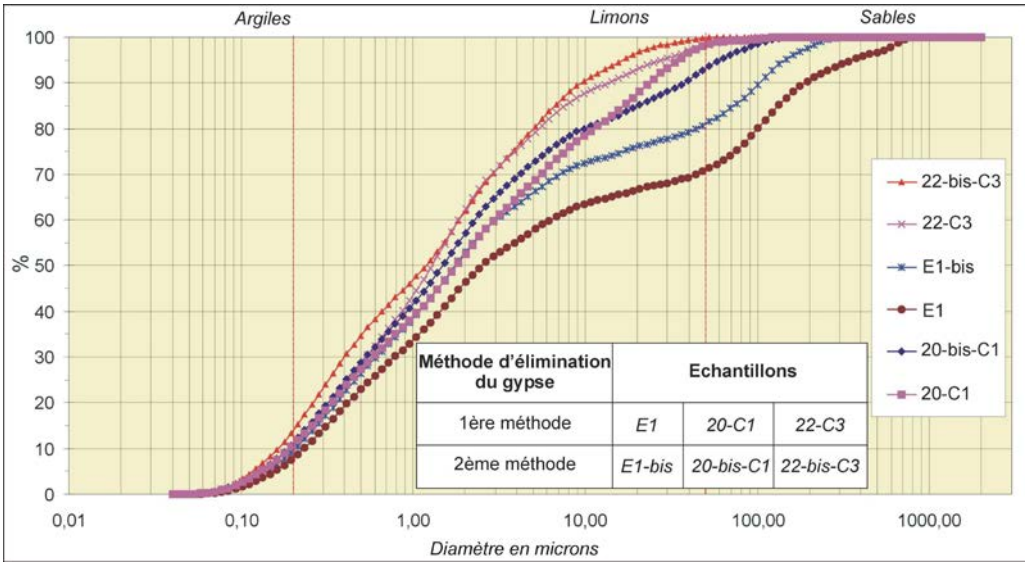


Fig. 2 : Comparaison des distributions granulométriques des échantillons gypseux après l'élimination du gypse selon deux méthodes différentes de prétraitement chimique

Les résultats sont dépouillés, traités et présentés graphiquement sous une macro Excel de traitement des données brutes issues du granulomètre Laser Coulter (EOST, Strasbourg). **Les indices granulométriques** (médiane de Folk et Ward, classement de Trask, grain moyen de Folk et Ward,) et **les courbes de fréquences cumulées** ont montré leur intérêt pour caractériser la compétence, la capacité et la dynamique des différents agents fluviaux et éoliens. **La corrélation sur des graphiques bilogarithmiques des indices du classement (So) et du premier percentile (C) en fonction de la médiane (M)** a permis d'apprécier les modes d'accumulation (Losson et Corbonnois, 2006 ; Rosique *et al.*, 2000 ; Lespez *et al.*, 2005) et de transport des sédiments (Image CM ou celui de Passega ; *in* Bravard, 1983) et de caractériser les milieux de sédimentation.

I-2-2- La calcimétrie, la morphoscopie et les couleurs des sédiments

La détermination des teneurs des sédiments en carbonates de calcium permet d'apprécier l'origine, les conditions de dissolution, de transfert et de précipitation du calcaire Le dosage du carbonate de calcium est effectué systématiquement sur tous les échantillons, avec le calcimètre Bernard. On a opté pour les appréciations proposées par le GEPPA (Baize, 2000) pour la classification des sédiments selon leur teneur en $CaCO_3$. **Les couleurs des échantillons ont été déterminées avec le code *Munsell***.

L'examen des formes et des aspects de surfaces des grains de sables aide à reconnaître la provenance et les agents du transport et d'accumulation du sédiment. Il a été réalisé à la loupe binoculaire. Un traitement préalable de décarbonatation a été exécuté pour dissoudre les ciments, disperser les particules et laver les salissures. La typologie des formes et des aspects de quartz est inspirée de l'ouvrage de Cailleux et Tricart (1959). Des particularités morphoscopiques ont caractérisé les quartz du fond et des modelés de bordures des sebkhas. L'aspect picoté, écorché et oxydé des grains de sable a été fréquemment observé. Il a permis d'identifier des classes de quartz malpropres, teintés et picotés, bons indicateurs du potentiel physico-chimique du milieu.

I-2-3- La géochimie et la minéralogie : déterminer les provenances des sédiments et les milieux de dépôts

En l'absence de bio-marqueurs et de changements drastiques des sédiments, l'analyse granulométrique des dépôts du fond et de bordures de Halq al Minjil n'a pas toujours suffi pour déterminer l'origine du matériel, les milieux de dépôts et leurs significations paléoenvironnementales. **L'analyse des associations minéralogiques et géochimiques a conduit à des constatations majeures**, décisives, pour l'origine des sédiments (marine, continentale, organique, détritique, diagénétique) et pour le fonctionnement hydrologique de l'enclave littorale au gré des changements des dynamiques morphosédimentaires, du climat et du rapport terre/mer.

Le coût de cette analyse est élevé. Il a donc fallu limiter le nombre par des déterminations sur des échantillons représentatifs. **43 échantillons ont été prélevés sur la carotte C3**, la plus complète pour l'étude des remplissages de l'ombilic de Halq al Minjil et sur quelques niveaux alluviaux et hydroéoliens. Ils ont fait l'objet d'une analyse minéralogique qualitative et géochimique élémentaire, au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (UMR 7517, CNRS/ULP). Les minéraux du sédiment total et argileux ont été caractérisés à l'aide d'un *diffractomètre RayonX Brüker* (modèle D 5000), en mode theta/2theta, sur les poudres et les agrégats orientés au cours des différents essais normal (N), éthylène-glycol(G), hydrazine (H) et au four (CH). Les éléments géochimiques majeurs et mineurs ont été identifiés grâce à un spectromètre d'émission optique à plasma induit (*ICP-AES*), type *JY 124*. L'erreur relative sur la mesure est de 2%.

D'autres **analyses minéralogiques du sédiment total ont été entreprises sur 26 échantillons des carottes C1 (12) et C2 (14)**. Elles ont été réalisées au Service Géologique de l'ONM de Tunis, par le *diffractomètre Panalytical X'Pert Pro*, en mode θ/2θ. Elles ont permis de bien caractériser les faciès sédimentaires des marges de la sebkha littorale et de les relier avec leurs corrélables sur la carotte C3. L'identification des minéraux les plus fréquents sur les diffractogrammes obtenus a été effectuée en se basant sur le fichier ASTM international et sur l'ouvrage de l'ICDD (1981).

En avril 2007 et dans le cadre du projet tuniso-italien pour l'étude de la préhistoire de Hirgla, Enrico DINELLI a pu réaliser, au CIRSA (Italie), **l'analyse géochimique de 83 échantillons prélevés sur les trois carottes C1, C2 et C3**. Ceci a permis d'aborder une étude comparative de la distribution spatio-verticale des éléments géochimiques dans les remplissages sédimentaires de Halq al Minjil. La détermination géochimique est obtenue par la spectrométrie de fluorescence de rayon X (Philips picowatt 1480). Les résultats sont fournis sous forme tabulaire dans un fichier Excel brut, présentant les teneurs du sédiment en éléments géochimiques majeurs et mineurs et quelques rapports molaires (K/Al, Ti/Al, V/Al, Mg/Al, Zr/Al, Fe/Al, Ca/Al). Des tableaux récapitulatifs, des schémas synthétiques et des profils comparatifs ont été réalisés afin d'étudier l'évolution spatio-temporelle des concentrations géochimiques et de bien déterminer les provenances de la matière, les milieux sédimentaires et les signaux environnementaux des dynamiques géochimiques. Des allures cycliques de certains éléments signalent l'évidence d'importantes variations paléoenvironnementales (K/Al, Ti/Al, Mg/Al, Ca/Al).

I-2-4- La micromorphologie : pour une approche multiscalaire des processus morphosédimentaires

L'analyse micromorphologique permet de bien feuilleter les registres sédimentaires, d'identifier les microfaciès et de mieux appréhender ses caractères sédimentologiques, paléontologiques et stratigraphiques. C'est aussi une aide à l'interprétation des paléoenvironnements dans la mesure où elle permet de détecter l'organisation microscopique des sédiments, les conditions et les mécanismes de mise en place et d'évolution post-sédimentaire. L'objectif majeur est la restitution des dynamiques de formation des bourrelets hydroéoliens et celles de comblement du fond de la sebkha Littorale Halq al Minjil.

Dix-neuf lames minces de grande taille (5x3 cm et 10x3 cm) ont été confectionnées dans les locaux du laboratoire GEOPHEN, selon la méthode de Guilloré (1985). Les échantillons non perturbés ont été prélevés en blocs orientés sur des niveaux, augurés de grande signification paléoenvironnementale, des carottes C1, C2 et C3. Le caractère argilo-limoneux des échantillons a posé des problèmes lors de la fabrication des lames minces. Ils tiennent à la nature gonflante de certains minéraux argileux imbibés d'eau, à la forte compacité et microporosité des limons et à la desquamation importante des argiles lors de leur déshydratation, qui modifient considérablement leurs morphologies et structures. Il en résulte la difficulté ou la mauvaise imprégnation des échantillons et lors du polissage mécanique sous machine des blocs orientés, un léger dépoli, une altération des argiles et une cicatrisation des lames par arrachement de particules et isolement des quartz ont été constatés.

Pour y remédier, mais sans avoir résolu définitivement les problèmes, l'échantillon a été asséché pendant plusieurs jours dans une étuve ventilée à 25 ° C. Ensuite, il a été imprégné très lentement (en moyenne 48 h) par capillarité sous vide avec des doses très limitées de résine synthétique, jusqu'à la saturation de l'échantillon. La rugosité de la surface de la lame mince a été réduite sous machine jusqu'à 30 µm d'épaisseur. Puis, on a

procédé à la méthode de rectification manuelle sur un papier abrasif avec l'utilisation de carbure de silicium, pour réduire l'épaisseur à 25-20 µm. La vérification de la bonne épaisseur est effectuée sous microscope polarisant (MPol) par transmission des quartz blancs et gris.

L'examen des lames minces est basé sur l'emploi d'une chaîne de microscopie : de la loupe binoculaire au microscope polarisant, complétée occasionnellement au département de Géologie de l'Université de Caen par le microscope électronique à balayage (MEB). Cette chaîne a engagé le principe de la gradation des échelles d'observation : depuis le niveau mésoscopique à l'œil nu puis à la loupe binoculaire (du centimètre au millimètre), pour établir des corrélations avec le terrain et individualiser les grands ensembles sur la lame, jusqu'au niveau microscopique du millimètre au micron.

Faute de moyens et en raison de pannes techniques, seulement **cinq lames minces ont été analysées**. Les résultats sont préliminaires et **l'interrogation micromorphologique des lames n'est qu'à son début**. Les microfaciès et la signature sédimentaire des processus de mise en place et d'évolution post-dépôt sont renseignés par les référentiels et atlas établis en micromorphologie des sols (Bullock *et al*, 1985, Fedoroff et Courty, 1992) et en pétrographie par l'étude des minéraux (Hébert, 1998 ; Mackenzie et Adams, 1999). Des images ont été prises en lumière polarisée analysée (LPA) et en lumière polarisé non analysée (LPNA), pour visualiser la nature et l'arrangement des constituants. L'interprétation des aspects microscopiques et des entités reconnues en lames minces s'est appuyée sur une littérature portant sur des cas concrets et d'expérimentation (Bullock *et al*, 1985 ; Hachicha *et al.*, 1987 ; Abichou, 2002 ; Pomel *et al.*, 2004…).

II- L'ELABORATION DES SYNTHESES SPATIO-TEMPORELLES : LA CARTOGRAPHIE GEOMORPHOLOGIQUE

II-1- La photo-restitution automatique des clichés aériens

Les choix des sites d'investigation géomorphologique et d'implantation des sondages et la cartographie des formations superficielles et des modelés sont appuyés en partie sur **l'interprétation des séries de clichés aériens orthorectifiés de 1963 et 1988 au 1/25000**. La photo interprétation manuelle a été provisoirement réalisée. Bien que nécessaire, elle reste une opération très chronophage mais permet la réalisation d'un produit cartographique chronique. Une application numérique, pour la restitution automatique de l'hydrosystème par une vision stéréoscopique sur des photos aériennes orthorectifiées, était utile pour une plus grande précision du produit cartographique et principalement celle d'une carte géomorphologique automatisée et à jour. L'orthorectification des clichés aériens, par le Logiciel *ERDAS Imagine 8.6*, a été la première tâche effectuée. Ensuite, la photo restitution automatique a été permise par l'examen stéréoscopique en trois dimensions des clichés sous le module *Stereo Analyst 1.3* du même logiciel. Il permet la visualisation haute résolution des cibles et l'enregistrement instantané de l'information. L'examen des photos et le levé proprement dit ont toujours intéressé le centre des clichés aériens.

Les informations extraites ont été organisées en couches thématiques et vectorisées. L'intégration et la superposition des informations sous le logiciel SIG *Arc Gis 9.2*, ont permis la création d'une **base de données géoréférenciées** et l'élaboration des **cartons thématiques** simplifiés datant 1963 et/ou 1988. Cette opération a été suivie par des travaux de vérification sur terrain et de confrontation aux images Google 2009 géoréférenciées pour obtenir une cartographie à jour et la plus précise du paysage. En effet, la forte emprise des cours d'eau et le rythme parfois accéléré des modifications du paysage naturel dans quelques sections des vallées (Boujelben, 2002 ; Boujarra *et al.*, 2006), le justifient. De

même, lors de la photo-restitution, il était parfois difficile de faire la différence entre des terrasses naturelles et culturales, d'où un contrôle terrain obligatoire.

II-2- L'emploi de la télédétection et de l'imagerie satellitaire

Deux images SPOT XS (1996) et panchromatique (2000), géoréférenciées sous *ERDAS 8.6* et corrigées radiométriquement et géométriquement sous *ENVI 4.0, ont été choisies. Elles* couvrent presque la totalité de l'hydrosystème à une résolution spatiale satisfaisante de 20 m.

L'imagerie satellitaire est utilisée pour l'extraction de deux types d'information.

(1) **L'impact morphogénique des faits néotectoniques** constitue un facteur de poids agissant sur la réponse morphosédimentaire des sebkhas et des bassins tributaires (Castany, 1948, 1952a ; Karray, 1993, 2006). A l'échelle de l'hydrosystème, leurs identification et argumentation sur le terrain restent difficiles en raison de la faible étendue ou de l'absence, à l'échelle temporelle de fonctionnement des événements, des formations et des roches cohérentes porteuses de ces faits. **L'analyse directionnelle des images satellites** couplée à l'examen morphométrique des cartes topographiques et géologiques aux 1/25000ème et 1/50000ème, a eu pour but **la détection des linéaments** reflétant l'effet d'une tectonique active sur la morphostructuration de l'hydrosystème (morphologie des sebkhas, oued prédirigé, anomalie de drainage).

(2) A leur première édition, les nouvelles cartes géologiques de Sidi Bou Ali (Rebhi *et al.*, 2003) et d'al Kalbiyya (Ghanmi *et al.*, 2004), contiennent des confusions conceptuelles et des imprécisions de stratigraphie et de cartographie quaternaires. Les formations à rares concrétions carbonatées (QP3) d'âge pléistocène supérieur auraient été exagérément généralisées. Sur la carte d'al Kalbiyya, des cônes de déjection, des plaines alluviales et des sols à plantes halophiles ont été attribués aux dépôts de sebkha du sous étage actuel SeQa. D'ailleurs, un sous étage plus récent (SeQ) désigne les sols de sebkhas et de garâas. **Une révision de la cartographie des formations superficielles** était indispensable. Elle a nécessité l'utilisation de l'imagerie satellitaire et des photos aériennes, puis l'observation de terrain.

Afin d'extraire les linéaments tectoniques probables, un filtrage a été appliqué sur l'image SPOT 1996. Il consiste en un rehaussement géométrique de l'image pour la mise en relief ou le gommage des éléments pertinents en fonction de la problématique. Afin d'obtenir une meilleure visualisation de l'image, on a procédé sous *ENVI 4.0* au rehaussement du contraste par deux étalements *Gaussien* et *Dynamique linéaire de 2%*, appliqués à tous les canaux de l'image. Après test de quelques filtres de convolution prédéfinis (*High pass*, *Low pass/linéaire 2%*, *Median*), le filtre spatial directionnel *Sobel-B* (3*3) s'est avéré le plus approprié aux ensembles topographiques et structuraux de taille hectométrique à kilométrique (Schowengerdt, 1983). Il a permis de mieux visualiser les linéaments, sans faire abstraction des faits linéaires n'ayant pas le caractère structural tels que les pistes, les cadastres, les routes, les lignes d'oliviers…

L'image obtenue est exportée sous *Arc Gis 9.2*, pour l'extraction et la vectorisation des linéaments. Les alignements structuraux probables sont distingués par l'utilisation de l'hydrographie, des ruptures de pentes et des directions décrites dans les travaux des géologues et géomorphologues (EW, N20° à N30°, N150° à N160°), comme indices pour l'identification du réseau des alignements morphostructuraux (Lamti, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1990 ; Kamoun et Karray, 2001 ; Boujelben, 2002). Cette application a facilité la distinction des linéaments probables et a fourni **un canevas linéamentaire** en absence des arguments de terrain pour leur validation et interprétation.

Pour établir une **carte des formations superficielles**, une classification supervisée sous *Envi 4.0*, a été effectuée sur les deux images SPOT de 1996 et 2000. La typologie des classes d'informations est prédéfinie sur la base d'une appréciation visuelle et la connaissance a priori des entités géographiques sur le terrain. Elle répertorie les différentes formations superficielles et autres composantes du paysage (milieux humides, espaces bâtis ou reboisés). Une étape préliminaire a nécessité l'extraction des sites d'entraînement, pour obtenir des échantillons des classes à différencier et procéder par la suite à la classification. Pour un repérage garanti de l'équivalent spatial d'un échantillon, les deux images ont été superposées l'une sur l'autre et des liens géographiques ont été créés entre les deux. L'étape suivante de la classification dirigée, au sens strict, a eu pour but de partitionner l'image en classes hétérogènes. L'algorithme utilisé est celui de la classification dite par maximum de vraisemblance (Bonn et Rochon, 1992). Après quelques essais et le contrôle d'attribution des pixels aux classes, la vérification des résultats par des matrices de confusion a donné un taux de précision admissible, de l'ordre de 93% sur les classes regroupées. L'image classifiée en zone homogène de formations superficielles a été ensuite vérifiée et validée par des observations sur le terrain

II-3- Le Système d'Information Géographique et la finalisation cartographique

La mise en place d'une base de données à référence spatiale a montré l'apport significatif de l'intégration et de la superposition dans un SIG des documents variés et multidates pour une analyse multicritère de l'information sur l'hydrosystème. L'interrogation et le croisement infini des données ont permis de procéder à des calculs et de générer, sous les différentes fonctions du logiciel *Arc Gis 9.2*, de nouvelles couches d'informations spécifiques, vectorielles, raster ou « grid ». **Un Modèle Numérique d'Elévation** (MNE) avec une résolution spatiale de 10 m a été également créé. Le but est triple : (1) décrire le relief (altimétrie, classes d'altitudes moyennes, valeurs des pentes) ; (2) déterminer les côtes absolues des sondages et des coupes par rapport au niveau zéro de la mer et préciser la position des niveaux repérés sur les logs chrono-lithostratigraphiques ; (3) concourir à la reconstitution de la bathymétrie des paléosystèmes lacustres et lagunaires. Dans les sebkhas et leurs bordures, là où les variabilités altimétriques sont minimes, il est difficile de mettre en relief certains détails orographiques. Une équidistance de 10 m ne résout pas le problème.

L'objectif majeur de l'utilisation d'un SIG est la présentation des données de façon alphanumérique et cartographique sous forme de **tableaux et cartes thématiques**, à différentes échelles. Les couches d'information créées et associées aux résultats de la télédétection et de la photo-restitution ont permis de générer un **document de synthèse de la géomorphologie de l'hydrosystème à une échelle de 1/50000**. Les processus de finalisation cartographique et de mise en forme des produits finaux ont été garantis grâce au logiciel de dessin *COREL DRAW X6*, dans un format standard d'impression A4 et A3. Des cartons à grande échelle ont été nécessaires, pour assurer la clarté des détails, approfondir l'analyse de la dynamique des paysages et en comprendre les mécanismes. La légende géomorphologique a été conçue conformément aux principes de conception de la légende des cartes géomorphologiques de la France au 1/50000 (CNRS, 1966, 1970) et aux conventions établies dans le glossaire de Géomorphologie de F. Joly (1997).

III- LE CALAGE CHRONOLOGIQUE DES SEDIMENTS, DES MODELES, DES SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES ET DES PHASES MORPHOGENIQUES

La chronologie précise des différentes phases de sédimentation, du fonctionnement hydromorphologique et des dynamiques morphogéniques et environnementales, ferait de

l'hydrosystème un haut lieu pour une bonne documentation de l'Holocène du Sahel septentrional tunisien et de la Tunisie centre-orientale. Néanmoins, **les séquences lithostratigraphiques n'ont pas livré suffisamment ou en continue une matière qui pourrait être datée à un coût plus réduit** (charbon, os, *Helix* ou mollusques). Les moyens financiers disponibles sont très limités. Ils ont été déterminants au niveau du choix de la nature et du nombre des échantillons à dater et de la méthode de datation à employer. Le recours aux moyens archéologiques, en fonction de la disponibilité et de l'état de conservation des éléments pour datation, n'a pas aussi systématiquement répondu à nos espérances. **L'objectif d'en fournir un cadre chronologique absolu et complet reste à accomplir**. Toutefois, le calage chronostratigraphique des remplissages de fond des sebkhas et des niveaux alluviaux et hydroéoliens a été assuré par quelques datations au carbone ^{14}C et par la détermination de l'âge relatif des éléments archéologiques.

III-1- Les datations au carbone 14 (^{14}C)

Treize datations par la méthode du radiocarbone ont été obtenues. La priorité a été donnée à la datation des niveaux clefs lacustres et lagunaires et les dépôts alluviaux où les éléments archéologiques ne permettaient pas le calage. Ces datations sont issues de plusieurs types d'échantillons qui sont en réalité discutables et apportent des résultats d'inégale précision.

Huit datations radiométriques ont été effectuées au laboratoire RAE de l'ENIS, **sur les *Cerastoderma glaucum* lacustres et lagunaires et les *Helix* continentaux**, le support le plus disponible pour des datations moins coûteuses. L'incertitude de la valeur chronologique de ces datations tient à deux éléments. D'abord à la méconnaissance de l'évolution de l'âge réservoir dans les eaux de systèmes aussi particuliers de lagunes et de lacs au cours de l'Holocène et qui diffère de celui des mers ouvertes (Stuiver et Reimer, 1993, 2010 ; Ducassou, 2003). Puis aux particularités des *Helix*. Ces derniers peuvent ingérer, surtout dans les milieux calcaires, des vieux carbonates provoquant le vieillissement des dates réelles de leur mort. Conséquemment, une anomalie d'âge ^{14}C pourrait varier de quelques siècles à 3000 ans (Goodfriend, 1987 ; Rahmani, 2004). L'utilisation des *Helix* n'est donc pas bien adaptée pour une chronologie holocène très précise.

Cinq datations radiocarbones en spectrométrie de masse par accélérateur (^{14}C AMS) ont été effectuées aux Laboratoires de Mesure du Carbone 14 (Saclay, France) et Beta Analytic Radiocarbon Dating (Miami, USA) **sur la matière organique totale de cinq niveaux de la carotte C3**. La fiabilité résultante de l'utilisation de la matière organique et de la méthode AMS est apparue meilleure. Mais nous devons nous interroger sur l'origine de l'échantillon et sur la représentativité des datations. La matière organique pourrait être d'origine locale dans la sebkha en datant l'âge du sédiment, ou détritique apporté par les oueds donnant un mélange de matières d'âges différents et plus vieux. Toutefois, les âges seraient les plus anciens possibles des sédiments (Communication de Simone Mulazzani après avoir discuté les résultats avec Jean-François Saliège[1]). De leur côté, Goepp *et al.* (2006) n'entendent aucune correspondance systématique entre l'âge ^{14}C d'un sédiment et celui de la matière organique située au même niveau. D'après les auteurs, l'âge moyen du compartiment organique du sol, et contrairement aux sédiments, n'augmente pas puisqu'il résulte avec le temps d'un équilibre entre les flux entrants et sortants (apports annuels de matière organique fraîche et remplacement d'une fraction minéralisée par une fraction

[1] Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN) ; Institut de recherche pour le développement (IRD) ; INSU - CNRS : UMR 7159 ; Université Pierre et Marie Curie (UPMC) ; Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Jean-François Saliège nous a quitté le 1er juin 2012. Que Dieu lui accorde sa miséricorde.

récente). Les datations ne datent pas le dépôt, mais mesurent le temps moyen de résidence des matières organiques des sols.

Compte tenu de la valeur chronologique imprécise des échantillons datés, et dans l'état actuel des moyens financiers et techniques mis à notre disposition, nous avons retenu les datations qui présentent : (1) une juste cohérence avec le schéma d'ensemble de l'évolution de l'hydrosystème, (2) une forte convergence chronostratigraphique avec la position morphologique des modelés dans le paysage, et (3) une bonne concordance avec l'âge des mêmes niveaux corrélables sur les échelles chronostratigraphiques régionales. Cette concordance laisse penser que l'enregistrement sédimentaire des événements dans l'hydrosystème correspondrait à un signal régional. Cependant, **six datations ont été écartées**. Nous présenterons, dans le texte et pour chacune, des éléments de justification.

Sept datations restent insuffisantes pour caler les différentes phases d'évolution de l'hydrosystème et pour pallier l'incertitude ou l'absence de jalons chronostratigraphiques dans les séquences sédimentaires étudiées. En outre, un grand problème réside dans le calage des entités et niveaux les plus anciens de l'hydrosystème d'âge holocène inférieur. Les âges définis remontent à l'Holocène moyen et supérieur. Pour faire face, le cadre chronologique établi a été complété par des datations archéologiques et radiocarbones effectuées par des études antérieures (Karray, 1993) ou dans le cadre du projet tuniso-italien pour l'étude de la préhistoire de Hirgla. Ici une série de datations par ^{14}C AMS a été réalisée sur des fragments de *Cerastoderma glaucum* et d'œuf d'autruche et sur un bioapatite animal prélevés sur sept niveaux d'occupations épipaléolithiques du site SHM-1 (Mulazzani *et al.*, 2007, 2008 ; Mulazzani, 2010).

Finalement, les âges ^{14}C BP, corrigés du fractionnement biologique, ont été calibrés en employant le logiciel *Calib Rev 6.0.1*. On a utilisé une valeur de correction du δR 58±85 pour les *Cerastoderma glaucum* lagunaires et lacustres et la nouvelle base de données de calibrage *INTCAL 09.^{14}C* (Stuiver et Reimer, 2010) pour l'étalonnage des *Helix* et la matière organique. Les dates calibrées ont été exprimées en années BP (cal BP) et calendaires (av. J.-C. ou BC ; ap. J.-C. ou AD), au niveau de confiance 98,4% (2 sigma). Lorsque c'était possible, les datations non calibrées d'anciens travaux ont été corrigées pour obtenir des résultats comparables, à des fins de corrélations chronostratigraphiques.

III-2- Les éléments archéologiques

Les éléments archéologiques pour datation consistent en vestiges d'occupation humaine et en mobiliers archéologiques composés d'outils, de pièces lithiques et de céramiques atériens néo et épipaléolithiques, romains et islamiques. Ils proposent une chronologie à résolution séculaire à millénaire, permettant la détermination de l'âge relatif du dépôt s'ils ont bien conservé leurs positions d'origine. Aussi, dans une démarche plus large, ils aident à corréler les données environnementales et les phases d'évolution morphogénique avec celles de l'occupation humaine dans l'hydrosystème.

L'hydrosystème est riche en sites préhistoriques et historiques (Poncet, 1961 ; Desanges, 1963 ; Despois, 1980 ; Mrabet, 1995 ; Ben Baaziz, 1999 ; Decramer et Hilton, 2002 ; Mulazzani *et al.*, 2007, 2010). Néanmoins, les objets recueillis ou identifiés sur place ont montré une inégale répartition à la surface et dans les archives sédimentaires. **Les dépôts les plus anciens ont livré de rares pièces lithiques et peu de tessons de poterie datables**. Exception faite par le site préhistorique SHM-1 situé sur les bordures centre-ouest de Halq al Minjil et qui a fait l'objet d'une fouille dans le cadre du projet tuniso-italien pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla (Mulazzani *et al.*, 2007, 2008, 2010).

A nos jours, **aucune des nombreuses coupes offertes par les berges des oueds et les carrières, n'a encore permis de découvrir les traces d'une occupation préhistorique**. Plusieurs sites néo et épipaléolithiques de surface ont été particulièrement reconnus aux sommets des interfluves encroûtés et aux environs des systèmes paléolagunaires et paléolacustres. Cela pourrait être le résultat de l'interaction entre les conditions paléoenvironnementales, la morphogenèse et l'action humaine, qui a fait orienter le choix de l'emplacement des sites d'occupation. Ou encore des épisodes d'érosion physique ou anthropique, réaffirmés par la dense et ancienne présence humaine, qui auraient pu démanteler ou décrasser les sites de plein air les plus anciens dans les vallées et emporter les sédiments contenant des éléments archéologiques.

La céramique datable la plus abondante est livrée par les accumulations alluviales historiques. Il s'agit exclusivement des tessons de poterie romaine. Par contre, **une seule céramique islamique** associée à une séquence alluviale de fond de vallée **a été prise en compte**. Il a été alors indispensable de recourir à des corrélations avec les travaux portant sur d'autres régions environnantes, où les vestiges lithiques et le mobilier céramique auraient pu combler les lacunes chronologiques de l'Holocène inférieur à la période islamique (Hamza, 1988 ; Mrabet et Boujarra, 1999 ; Brahim, 2001, 2005 ; Zerai, 2006 ; Boujarra *et al.*, 2006 ; Ben Jmaa, 2008 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013).

III-3- Notations chrono-lithostratigraphiques des dépôts et des modelés dans le texte

Les notations chrono-lithostratigraphiques des séquences et des niveaux sédimentaires et des modelés facilitent la comparaison et la corrélation chronologique des différents héritages géomorphologiques. Elles aident à l'élaboration des coupes et des échelles chronostratigraphiques de synthèse et à la reconstitution des différentes phases d'évolution et du fonctionnement de l'hydrosystème. Dans le texte, chaque coupe est définie par une abréviation en lettres majuscule et minuscule, composée des premières lettres de son nom. Leurs niveaux et séquences lithostratigraphiques sont indiqués par des chiffres arabes, suivis de lettres minuscules pour indiquer leur ordre du plus ancien au plus récent.

Les modelés sont indiqués par la lettre majuscule Q (Quaternaire) suivie de lettres majuscules P (Pléistocène) ou H (Holocène) et les chiffres arabes 1, 2 et 3. Ces chiffres en ordre croissant définissent les grandes divisions chronostratigraphiques pléistocènes et holocènes : inférieur, moyen et supérieur. Les lettres minuscules et les chiffres arabes en exposant et en ordre croissant précisent l'ordre stratigraphique des formes, du plus ancien au plus récent. A titre d'exemple une première génération de dépôts à nodules calcaires d'âge pléistocène inférieur est notée QP1.

Les sondages carottés sont désignés par une lettre majuscule C (ex : C1). Les sondages à la tarière à main sont présentés par une lettre majuscule T (ex : T27). Les séquences lithostratigraphiques de chaque carotte ou tarière sont indiquées par une lettre majuscule S et des chiffres arabes par ordre stratigraphique (ex : S20). Chaque séquence est attribuée au sondage carotté (ou tarière) sur lequel elle a été reconnue (ex : S17-C3 ; S20-T49). Les différents stades de fonctionnement hydromorphologique et éolien des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil ont été désignés pour chacune d'entre elles par les lettres SK et SH, suivis des chiffres romains en indice et en ordre décroissant du plus ancien au plus récent (SH_{XII}, SK_{V},).

IV- LA RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DE LA MORPHOGENESE, DES PAYSAGES, DES PALEOENVIRONNEMENTS ET DES RAPPORTS SOCIETES HUMAINES/MILIEUX

Les archives sédimentaires peuvent exprimer une importante activité morphodynamique. Elles s'organisent selon la trame paléoclimatique et la recrudescence des occupations humaines. Elles enregistrent l'instabilité, les ruptures morphogéniques et paléoenvironnementales et les signaux des forçages naturels et anthropiques. Le décryptage de ces enregistrements s'est appuyé sur la confrontation des méthodes et marqueurs variés. Il conjugue les techniques classiques de la géomorphologie pour reconstituer les dynamiques mais également les données palynologique, archéozoologique, malacologique, géoarchéologique et historique.

IV-1- L'archivage sédimentaire de l'évolution de la morphogenèse et des paysages

Le changement spatio-temporel des caractéristiques des archives sédimentaires dans l'hydrosystème est en rapport avec la modification des paramètres environnementaux locaux et/ou régionaux. Une telle modification conditionne les processus de préparation, de transport, d'accumulation et d'évolution post-dépôt de sédiment.

Durant une période, chaque entité spatiale de l'hydrosystème s'est comportée différemment face aux changements des dynamiques et l'évolution des milieux, traduisant ainsi une réponse morphogénique locale et/ou régionale. **On différencie les caractéristiques sédimentologiques des dépôts de fonds des dépressions, des vallées et des plaines**. Le but est de **reconstituer, pour chaque compartiment de l'hydrosystème, les différentes phases holocènes de la morphogenèse** et de son évolution dans ses rapports avec les sociétés humaines, l'eustatisme, le climat et la néotectonique.

L'étude des modelés et de leurs agencements morphologiques dans le paysage (emboîtement, étagement, superposition) permet de reconstituer au moins deux étapes déterminantes dans l'évolution morphogénique : (1) érosion et remblaiement (instabilité de durée imprécise) et (2) incision (rupture parfois majeure dans les modalités et processus de sédimentation annonçant parfois des « crises érosives »). L'apparition des phases de pédogenèse était une variante synonyme de stabilité.

Des corrélations spatiales amont/aval (Kalbiyya/Halq al Minjil, Oued/dépression) **et latérales** (affluent/cours principal, plaine alluviale/ombilic) **ont été établies**. Elles permettent de reconstituer l'évolution du fonctionnement de l'hydrosystème et les différentes phases d'évolution et de production des paysages holocènes.

IV-2- Les données archéologiques et les témoignages historiques : l'anthropisation des milieux

L'enquête est à la fois archéologique et historique sur l'évolution des paysages et des environnements. L'objectif est de **dresser un cadre paléogéographique et environnemental des peuplements ayant occupé l'hydrosystème et** d'**apprécier l'influence anthropique qualitative sur la morphogenèse** dans les perspectives d'interaction sociétés/milieu pendant l'Holocène.

Dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, les travaux archéologiques réalisés ont dépassé rarement les stades de prospection et d'inventaire. Les données disponibles sur le contexte culturel de chaque époque, sur l'exploitation des ressources, sur les genres de vie et les transformations de l'économie, sont limitées. Entre 2002 et 2006, une partie importante de l'hydrosystème a été prospectée par l'équipe des recherches archéologiques fouillant le site préhistorique SHM-1. Cette équipe a mené des

investigations autour de Halq al Minjil et al Kalbiyya, dans le littoral de Hirgla, sur les rives de l'oued el Manfas as-Sod, et partiellement dans le système fluvial lors de nos travaux de terrain. Une analyse distributionnelle des sites préhistoriques et du matériel dispersé ou concentré d'outils et d'éclats de silex ou calcaires a été menée. Elle a recomposé une fréquentation intense surtout des zones humides de l'hydrosystème de l'Atérien au Néolithique (Mulazzani, 2010). La distribution des sites apparaît liée à la configuration de l'hydrosystème et donne des indications directes sur le changement de la morphologie surtout littorale et lagunaire (variation verticale du niveau marin relatif, modification du trait de côte).

Seule **la fouille intensive du site épipaléolithique SHM-1** (2002-2007), localisé sur les bordures centre-ouest de Halq el Minjil, **a donné des indications plus précises**. Les résultats obtenus ont permis d'apprécier le mode de vie socio-économique des groupes ayant occupé la sebkha, la fonction des sites, le type des fréquentations et la dynamique d'occupation. La collaboration avec l'équipe du projet précité et en particulier avec S. Mulazzani, a permis de progresser dans la connaissance des mises en valeur des paysages et de la perception de l'environnement par les populations préhistoriques installées à Halq al Minjil entre le VIIe et le VIe millénaire cal. B.C.

Pour étudier l'évolution des paysages antiques et médiévaux, on a exploité les sources écrites et les fonds photographiques et cartographiques disponibles (cartes archéologiques, Atlas de Centuriations). Les textes et les récits cités par les historiens et les études historiques sur le Byzacium (Hopkins, 1960 ; Poncet, 1961 ; Desanges, 1963 ; Ferron, 1963 ; Saumagne, 1962a, 1962b, 1963 ; Despois, 1980 ; Mrabet, 1995 ; Mansouri, 1997 ; Bonte et *al.*, 1991 ; Mrabet et Boujarra, 1999…), ont fourni des indications sur les évolutions culturelles, économiques et politiques des sociétés. Ils ont permis d'étudier l'évolution de l'occupation des sols et de l'exploitation des milieux dans des contextes différents de prospérité ou de décadence, de stabilité ou de guerres et de révoltes. Mais il reste encore beaucoup de zones d'ombres sur ce sujet, surtout à cause de l'absence de fouilles archéologiques intensives. **L'étude de la distribution, de la densité et des fonctions des sites historiques a permis d'évaluer l'évolution de l'emprise des hommes sur les milieux depuis l'antiquité**. Les cadastrations romaines fournissent un témoignage crucial pour la recomposition des paysages antiques et la reconstitution de l'histoire de colonisation et des mises en valeur agricoles de l'hydrosystème.

IV-3- Bio-marqueurs malacologiques et archéozoologiques sur l'évolution des paléoenvironnements

Dans le cadre du projet tuniso-italien pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla, **des recherches archéomalacologiques et archéozoologiques ont été entreprises sur les gisements de la fouille SHM-1.** De grandes quantités de mollusques et de restes d'animaux, en majorité aujourd'hui disparus (gazelles, Hippopotamus amphibius…), ont été mises à jour sur le site. Elles offrent un apport important pour répondre aux interrogations spécifiques de la recherche sur l'évolution des environnements.

Les premiers résultats d'inventaire et de typologie des mollusques marins (Mannino et Mazzanti, 2013) et du matériel osseux des restes d'animaux du site SHM-1 (Aouadi *et al.*, 2013) ont fourni des bio-indications sur l'écologie des espèces (exigence en eau, bathymétrie, biotope terrestre,…). Ils ont permis d'apprécier aussi certains aspects de l'anthropisation des paysages. Les faunes (bovidés, carnivores, coquillages) ont été fortement présentes dans les régimes alimentaires des groupes ayant occupés le site. Ils aident à estimer les formes et l'intensité d'exploitation des ressources et à saisir le mode de vie et l'économie.

Néanmoins, l'analyse des restes d'animaux est encore préliminaire. Les résultats ont une signification locale et permettent d'approcher les paléoenvironnements installés entre 7880±35 BP et 6625±30 BP (Mulazzani, 2010). L'état de conservation fragmentaire des os n'a pas permis de déterminer avec précision l'espèce d'appartenance. Sur 3464 restes faunistiques mis à jour, seulement 15,9 % ont fait l'objet de la détermination de la portion anatomique et en partie de l'espèce d'appartenance. La question de la domestication reste à préciser pour certaines espèces (Aouadi 2004 ; Aouadi *et al.*, 2013). Les coquillages non modifiés ou à l'état naturel, contenus dans le dépôt archéologique du site SHM-1, n'ont pas permis la quantification exacte de la contribution des mollusques dans le régime alimentaire des occupants du site. Les *Cerastoderma glaucum* du même site ont révélé des altérations, ou dans certains cas des perforations. L'étude taphonomique des processus naturels et/ou anthropiques de l'altération n'est pas encore achevée.

IV-4- Etudier l'évolution du couvert végétal holocène afin de reconstituer les environnements passés : apport de la palynologie

Les analyses palynologiques donnent d'abord une image locale de la végétation actuelle et passée, mais elles offrent aussi un signal plus global, notamment de l'hydrosystème et de l'ensemble du bassin de la Tunisie centrale. Elles permettent de compléter les reconstitutions moins prometteuses de la malacologie et de l'archéozoologie. Elles aident à retracer les cycles climatiques holocènes et à reconstituer la réponse de la paléovégétation aux forçages climatiques et anthropiques.

L'auscultation palynologique a été essentiellement focalisée sur la carotte C3, la plus profonde (10,3 m), réalisée dans l'ombilic de Halq al Minjil, *a priori* la plus favorable à la conservation du pollen (Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013). Un échantillonnage systématique à un pas de 5 cm a été effectué. Mais, **les analyses achevées n'ont porté que sur 46 échantillons**. Les résultats obtenus ont été représentés sur deux diagrammes polliniques de synthèse et des taxons les plus significatifs des séquences sédimentaires de la carotte. Ils montrent la superposition des zones polliniques distinctes et expliquent la succession climatique qu'a connue la région de Hirgla durant l'Holocène moyen et supérieur. En fait, les 635 cm de la base de la carotte n'ont pas enregistré une pluie pollinique : le dépôt s'étant montré stérile en pollens. Seulement trois échantillons discontinus ont permis d'effectuer des comptages suffisants pour établir des spectres polliniques, avec des richesses sporo-polliniques très faibles. Ces résultats très ponctuels ont rendu alors difficile la reconstitution précise des paléoenvironnements installés du Pléistocène terminal à la première moitié de l'Holocène moyen. En outre, la partie sommitale de la carotte, remonte essentiellement au Flandrien supérieur du début de l'Holocène supérieur et du Subactuel à l'Actuel. Malheureusement, celle-ci ne fournit pas beaucoup de données sur l'évolution de la végétation durant l'Antiquité.

Des échantillons de surface ont été également collectés autour de la sebkha littorale. L'objectif est de caractériser la pluie pollinique actuelle, comparer les différentes formations végétales définies avec les données palynologiques holocènes et détecter d'éventuels biais taphonomiques (Lebreton et Jaouadi, 2013). A ces données viennent s'ajouter celles issues d'**analyses palynologiques des échantillons prélevés sur les niveaux stratigraphiques et une sépulture humaine du site SHM-1** (Lebreton 2009b ; Jaouadi, 2009 ; Jaouadi *et al.*, 2010 ; Jaouadi et Lebreton, 2013). L'objectif était la reconstitution de l'environnement de l'Homme épipaléolithique et des relations qu'il a tissé avec son milieu. Les spectres polliniques obtenus étaient moins prometteurs en raison de l'intensité des processus taphonomiques. Mais, **ils ont permis l'acquisition des données paléoécologiques et paléobotaniques confortant les données archéozoologiques sur**

l'environnement du VIIe au VIe millénaire cal. B.C. L'impact des activités humaines sur les écosystèmes holocènes locaux (déforestation, incendies, pratiques culturales) est encore peu connu. La détermination des microcharbons contenus dans les lames polliniques reste nécessaire.

PREMIERE PARTIE :

L'ENCLAVE SEMI-ENDOREIQUE D'AL KALBIYYA : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET EVOLUTION HOLOCENE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN

CHAPITRE I : LES REMPLISSAGES HOLOCENES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

CHAPITRE II : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DURANT L'HOLOCENE : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

CHAPITRE III : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS D'AL KALBIYYA

INTRODUCTION

L'enclave semi-endoréique de la sebkha al Kalbiyya est le réceptacle principal d'un grand bassin versant drainant l'ensemble de la Tunisie centrale (Fig. 3 ; Depois, 1955 ; Poncet, 1970 ; Barrot, 1972a ; Karray, 1993 ;). Un tel contexte, additionné aux changements des dynamiques, des environnements et des facteurs morphogéniques, annonce l'histoire complexe d'al Kalbiyya qui s'affronte à la monotonie de sa surface et à l'homogénéité apparente des sédiments et de leurs enseignements. L'origine, la nature variée et la complexité de la répartition spatio-temporelle des archives sédimentaires, font de la sebkha un site propice à l'étude de la problématique holocène, accessible par l'étude des sédiments. Les évolutions morphosédimentaires, archivées dans l'enclave, sont à même d'avoir pu enregistrer les mécanismes morphogéniques et pédogéniques, les systèmes du fonctionnement hydrologique, les tendances d'évolution et les fluctuations climatiques holocènes dans la région. Sur les bordures de la sebkha, les constructions hydroéoliennes holocènes, paraissant bien limitées dans l'espace, rendent compte de la place des vents dans la morphogenèse du système semi-endoréique.

Dans cette première partie de la thèse, nous visons d'abord une étude lithoséquentielle haute résolution des remplissages sédimentaires et une caractérisation fine des faciès. L'objectif est de décrypter les mécanismes morphodynamiques et de définir les environnements sédimentaires et quelques aspects de l'évolution post-dépositionnelle des sédiments. Nous abordons ensuite les problèmes de discontinuités spatio-temporelles des archives et établissons des corrélations latérales des faciès pour approcher les phases holocènes du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya. Enfin, on définit et on caractérise les modelés hydroéoliens de bordures de la sebkha, leurs significations environnementales et morphogéniques. L'édifice hydroéolien est étudié en raison de son origine, fortement liée au fonctionnement de la sebkha elle-même.

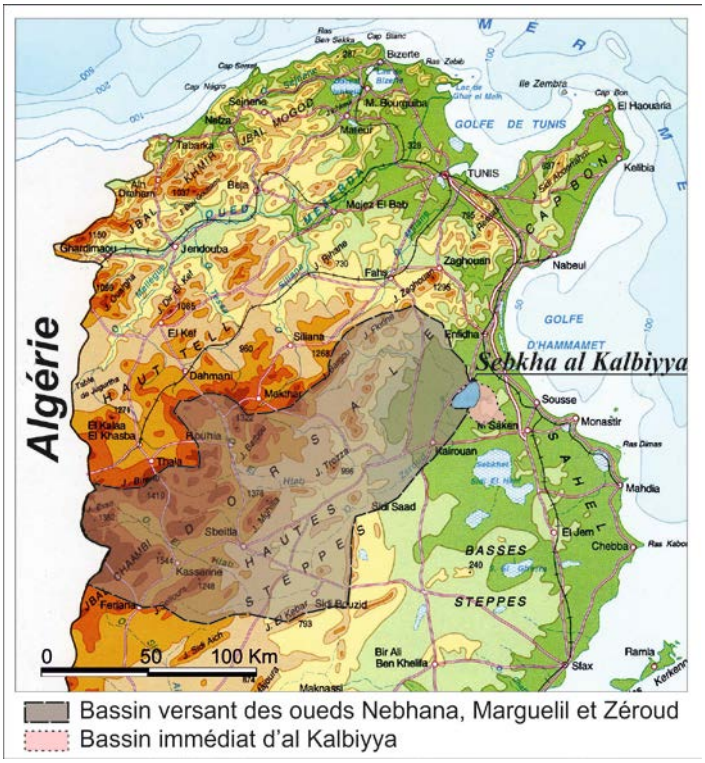


Fig. 3: La sebkha al Kalbiyya dans son contexte régional
(Fond employé : la carte du relief de la Tunisie, ONM, 1999)

CHAPITRE I :
LES REMPLISSAGES HOLOCENES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

La caractérisation des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya est issue de l'examen lithoséquentiel et de l'analyse granulométrique laser de treize sondages à la tarière à main. Elle souligne la forte hétérogénéité des sédiments, ainsi que la présence de plusieurs niveaux à *Cerastoderma glucum* qui ont fait l'originalité de la sédimentation holocène. Au sein des sondages, les dépôts sont ordonnés en séquences lithostratigraphiques centimétriques à pluricentimétriques, mettant en évidence des discontinuités spatio-temporelles des processus, des dynamiques et des environnements sédimentaires. Les résultats d'analyses ont permis de définir des successions de séquences homogènes aux plans sédimentologiques et morphodynamiques et d'établir une typologie des dépôts holocènes. Six grandes catégories de faciès sont distinguées dont chacune explique une phase de fonctionnement hydro-et morphosédimentaire.

Dans ce chapitre, on présente d'abord le cadre topo-structural du fonctionnement d'al Kalbiyya. Ceci aide à expliquer la nature, la provenance et la répartition des sédiments dans la sebkha. Ensuite, on propose une typologie des faciès. Puis, on caractérise les remplissages sédimentaires et on aborde pour chaque faciès quelques pistes de réflexion sur ses significations morphodynamique et hydro-pédologique.

I- LE CADRE TOPO-STRUCTURAL D'AL KALBIYYA

La cuvette d'al Kalbiyya, directement ouverte sur les plaines kairouanaises, occupe la position aval d'un grand bassin hydrographique drainant l'ensemble de la Tunisie centrale, depuis les frontières tuniso-algériennes. Son histoire géologique dérive de celle de la Tunisie centre-orientale (Castany, 1948, 1952a, 1952b ; Burollet, 1956 ; Kamoun, 1981b ; Lamti, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990 ; Bédir, 1995).

I-1- Physiographie du système semi-endoréique

La sebkha al Kalbiyya occupe le bas fond de la partie centrale et septentrionale d'une vaste dépression semi-endoréique orientée sud-ouest/nord-est, dans le centre ouest de l'hydrosystème. Elle présente la forme d'un parallélogramme. Ses rives sont quasi-rectilignes et orientées est-ouest et sud-ouest/nord-est. Sa surface s'incline doucement vers le nord, de 19 à 12 m et s'étend sur environ 102,79 km^2 (Feuilles topographiques Sabkhit al Kalbiyya NE, NO, SE et SO au 1/25000, 1991-1992).

La dépression d'al Kalbiyya est directement ouverte sur les plaines kairouanaises. Elle est entourée par des alignements bas, bien marqués à l'est à 164 m d'altitude (Fig. 4). Elle s'interpose entre Dhra as-Satour à l'ouest, Dhras Choukouf-Khsham al Kalb au sud-est, le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar au nord et Dhras laghmas-ash-Shraif, At-Twila-Shanshou et Krousiyya-Sidi al Hani à l'est et au sud-est. Ses bordures orientales et méridionales sont dominées par les plaines d'al Hanya et de Hanshir al Magroun, dont les altitudes oscillent entre 17 et 44 m.

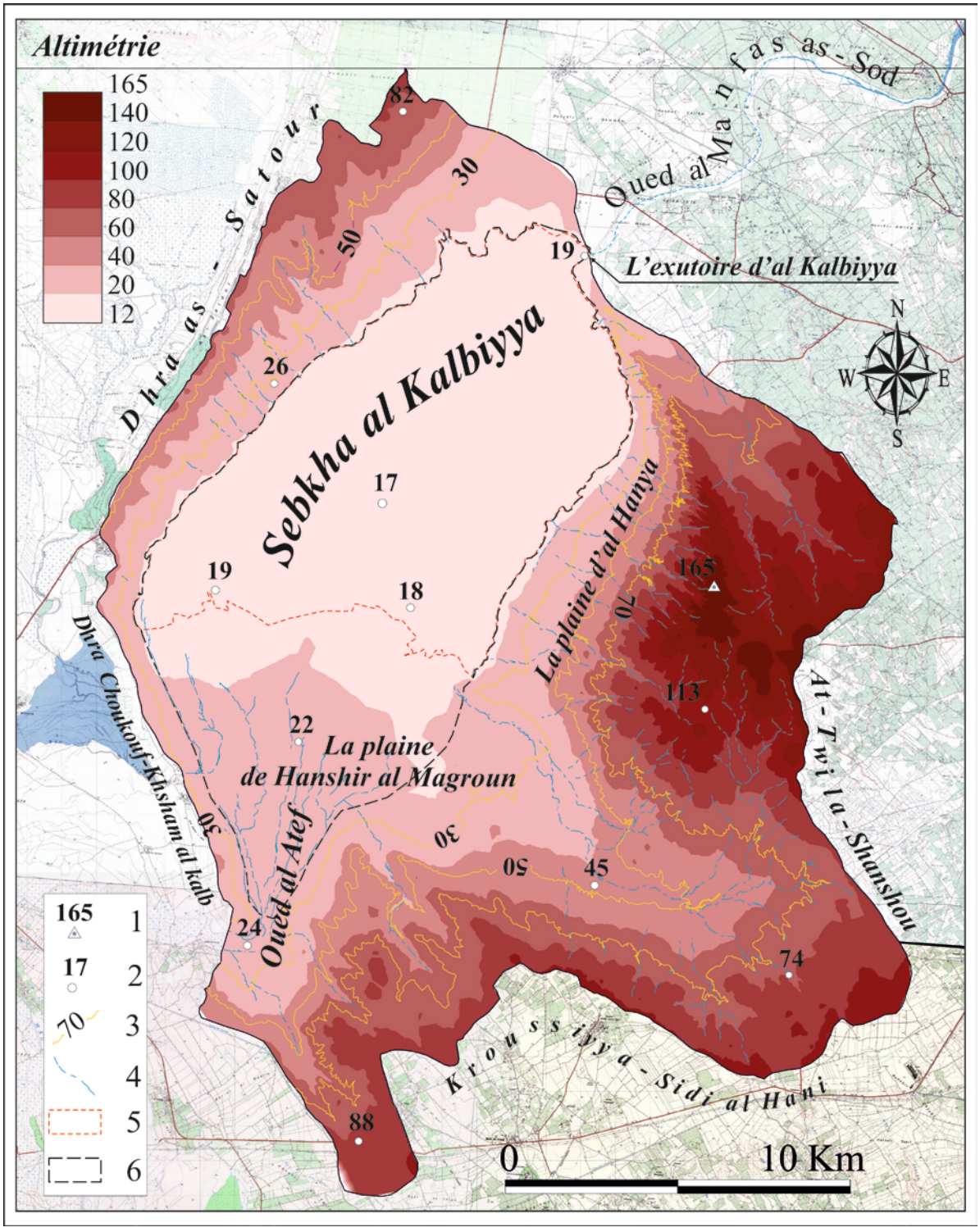


Fig. 4 : Contexte orohydrographique de la Sebkha al Kalbiyya
Source *: Cartes topographiques sebkha al Kalbiyya (n°56, NE, NO, SE, SO, 1991-1992) et Sidi al Hani (n°64, NE, 1995) au 1/25000*

Légende *:* 1 : Point culminant ; 2 : point coté ; 3 : Courbe de niveau ; 4 : Oued ; 5 : Sebkha ; 6 : L'enclave semi-endoréique

Au nord-est, l'oued al Manfas as-Sod y présente le déversoir et assure l'évacuation des trop-pleins d'al Kalbiyya vers la mer par l'intermédiaire de la sebkha littorale Halq al Minjil. Le seuil de l'exutoire cote 19 m (levé GPS différentiel *GeoXM*, 27/10/2009). Quand la dépression est remplie jusqu'au seuil, le plan d'eau mesure 151,12 km^2 de

superficie et son volume est d'environ 347 à 499 millions de m^3. Quand elle déborde, la surface et le volume augmentent encore plus. La sebkha se déverse alors mais exceptionnellement dans la mer.

I-2- Genèse et morphostructure d'al Kalbiyya : un contexte géologique prédisposant à l'installation d'un domaine déprimé

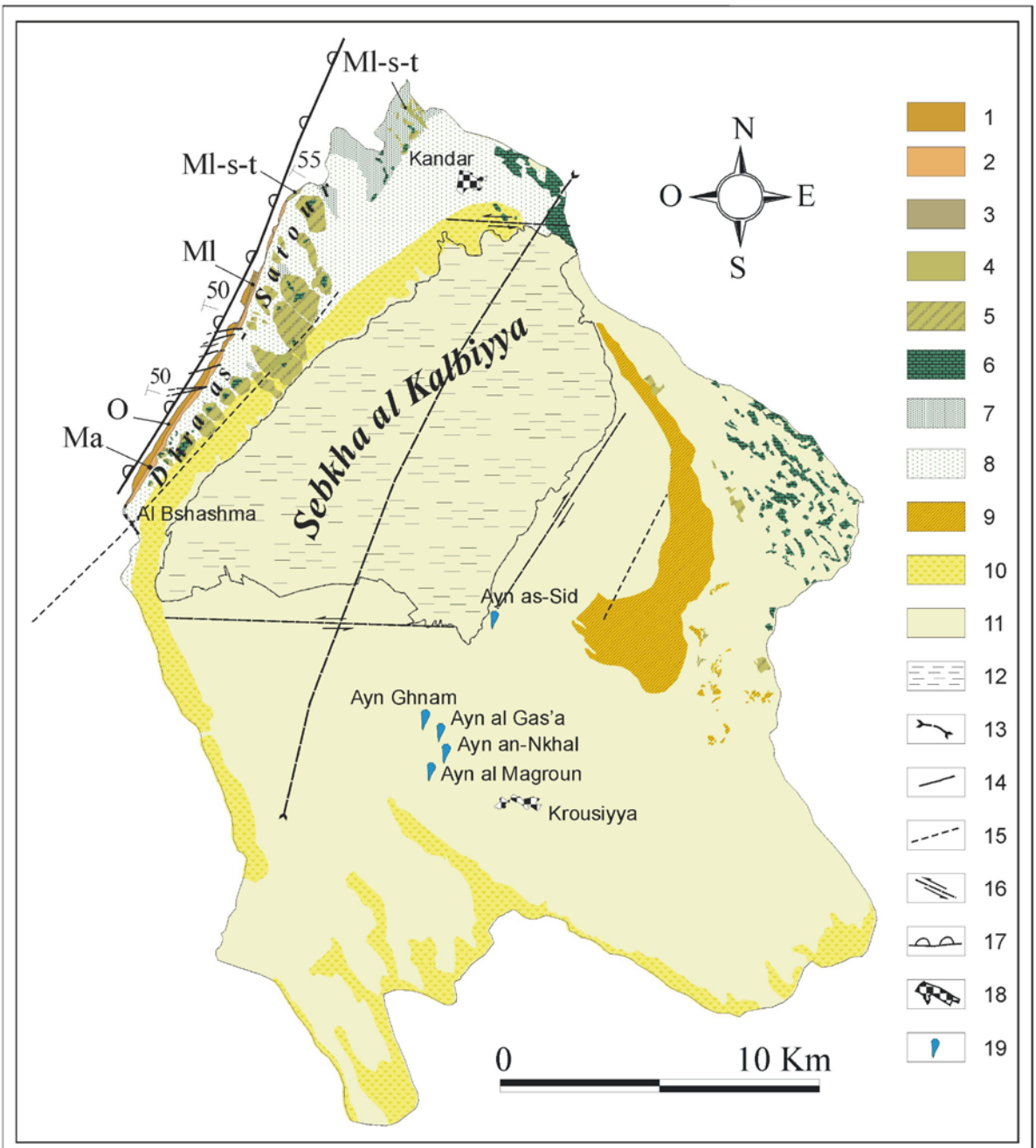
Au Miocène inférieur, la zone d'al Kalbiyya a été exhaussée. Elle a été transgressée en discordance angulaire visible, le long de Dhra as-Satour, par la dalle calcaire gréseuse de la formation Aïn Grab d'âge langhien (Burollet, 1956). Au paroxysme plio-quaternaire, la structuration du sahel en larges dômes et synclinaux et la création des aires déprimées préaccueillant les cuvettes actuelles, ont été ébauchées (Castany, 1952a, 1952b ; Burollet, 1956 ; Kamoun, 1981b ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990). La structure de Dhra as-Satour a subi un important plissement. Sur son flanc oriental, s'est installée la sebkha à la faveur d'une distension visible dans les dépôts marins littoraux d'âge tyrrhénien (Martinez et Paskoff, 1984 ; Lamti, 1988 ; Tagorti, 1990). Cette distension, qui a effondré la partie occidentale du pli de Dhra as-Satour, a mobilisé sur le flanc oriental un réseau de failles en décrochements conjugués EW et N20° à N30°, découpant ainsi la sebkha en bassin rectangulaire (Amari et Bédir, 1989). Ainsi, **le jeu croisé des systèmes de failles et l'ouverture distensive tyrrhénienne ont favorisé des mouvements de subsidence locale, lente et continue** (Castany, 1948 ; Burollet, 1956 ; Lamti, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990 ; Bédir, 1995).

La dépression d'al Kalbiyya est d'origine tectonique (Fig. 5). Elle correspond à une cuvette synclinale subsidente, faisant partie d'une large gouttière mio-plio-quartenaire allongée de Kairouan jusqu'au golfe de Hammamet. Assise sur une forte anomalie gravimétrique négative, elle est délimitée à l'ouest par l'accident chevauchant à vergence orientale de Dhra as-Satour (Castany, 1948, 1952a ; Karray, 1990b, 1993). A l'est, des failles normales longent le pied des Dhras laghmas-ash-Shraif (Haller, 1983, *in* Karray, 1993). Elles expliquent, dans leur prolongement vers le sud, le suintement des Ayns (Sources) an-Nkhal et al Magroun. Au nord et au sud, des failles décrochantes est-ouest dextres (Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990) suivent la limite de la sebkha et sont jalonnées au sud par les sources d'Ayn Saïd (Karray, 1993). Les rives de la sebkha sont quasi-rectilignes, en particulier celles des bordures orientale et méridionale où pourtant la dynamique d'épandage alluvial de l'oued al Atef devait occasionner un tracé digité. Ce système de failles correspond à des accidents à rejeu tardif (Karray, 1990b) et concrétise à la surface la limite de la sebkha. Néanmoins, la forte épaisseur de la couverture sédimentaire quaternaire, aurait estompée l'importance des rejets de failles.

Au nord et à l'ouest de la dépression, la présence des lanières exiguës et discontinues de croûte calcaire d'âge pléistocène inférieur à moyen (Karray, 1993 ; Boujarra et Gammar, 1993) et l'encaissement de l'oued al Manfas as-Sod dans la même croûte, illustrent l'idée d'une intervention des processus d'altération physicochimique et d'incision du plancher calcaire dans le façonnement de la cuvette.

II- TYPOLOGIE DES FACIES DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES

L'étude des archives sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya s'est appuyée sur la réalisation de treize sondages à la tarière à main (Fig. 6.1). Un examen lithoséquentiel haute résolution des remplissages a permis d'établir des logs lithostratigraphiques détaillés (Fig. 6.2). Cent cinquante-quatre échantillons ont fait l'objet d'analyses granulométrique laser, calcimétrique et morphoscopique et de la détermination des couleurs *Munsell* et du contenu malacofaunique.



(1) O : Argiles gypseuses, sables et grés carbonatés fossilifères de l'Oligocène (Formation Korbus) (2) Ma : Argiles jaunâtres, sables à dragées, sables grossiers et limons rougeâtres de l'Aquitanien (Formation Le Haouaria) ; (3) Ml : Calcaires gréseux bioclastiques à pectens, argiles du Langhien (Formation Aïn Grab) ; (4) Ml-s-t : Argiles, grés et alternances argilo-gréseuses du Langhien supérieur, Serravallien-Tortonien (Formations Mahmoud, Béglia et Saouf) ; (5) M-Pl : Sables et Argiles gypseuses mio-pliocènes ; (6) QP 1 : Croûte et encroûtement calcaires du Pléistocène inférieur à moyen ; (7) QP 2 : Sables et limons à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur ; (8) QP 3 : Sables et limons à nodules et concrétions calcaires du Pléistocène terminal ; (9) QP 4 ; Argiles, limons et argilo-silteux hydroéoliens d'âge pléistocène terminal ; (10) QP 5 : Argiles silteuses, limons et sables limoneux hydroéoliens mêlés aux dépôts à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène supérieur terminal ; (11) QH : Sables, limons et argiles holocènes à actuels ; (12) Sebkha ; (13) Synclinal ; (14) Faille vue ; (15) Faille supposée ; (16) Décrochement supposé ; (17) Chevauchement ; (18) Village ; (19) Source (Ayn)

Fig. 5 : Cadre géologique de l'enclave semi-endoréique d'al Kalbiyya

***Sources** : Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1993 ; Cartes géologiques al Kalbiyya et Sidi al Heni (n° 56 et 64 au 1/50000 ; Travaux de terrain ; Images satellitaires classifiées Spot 1996 et 2000*

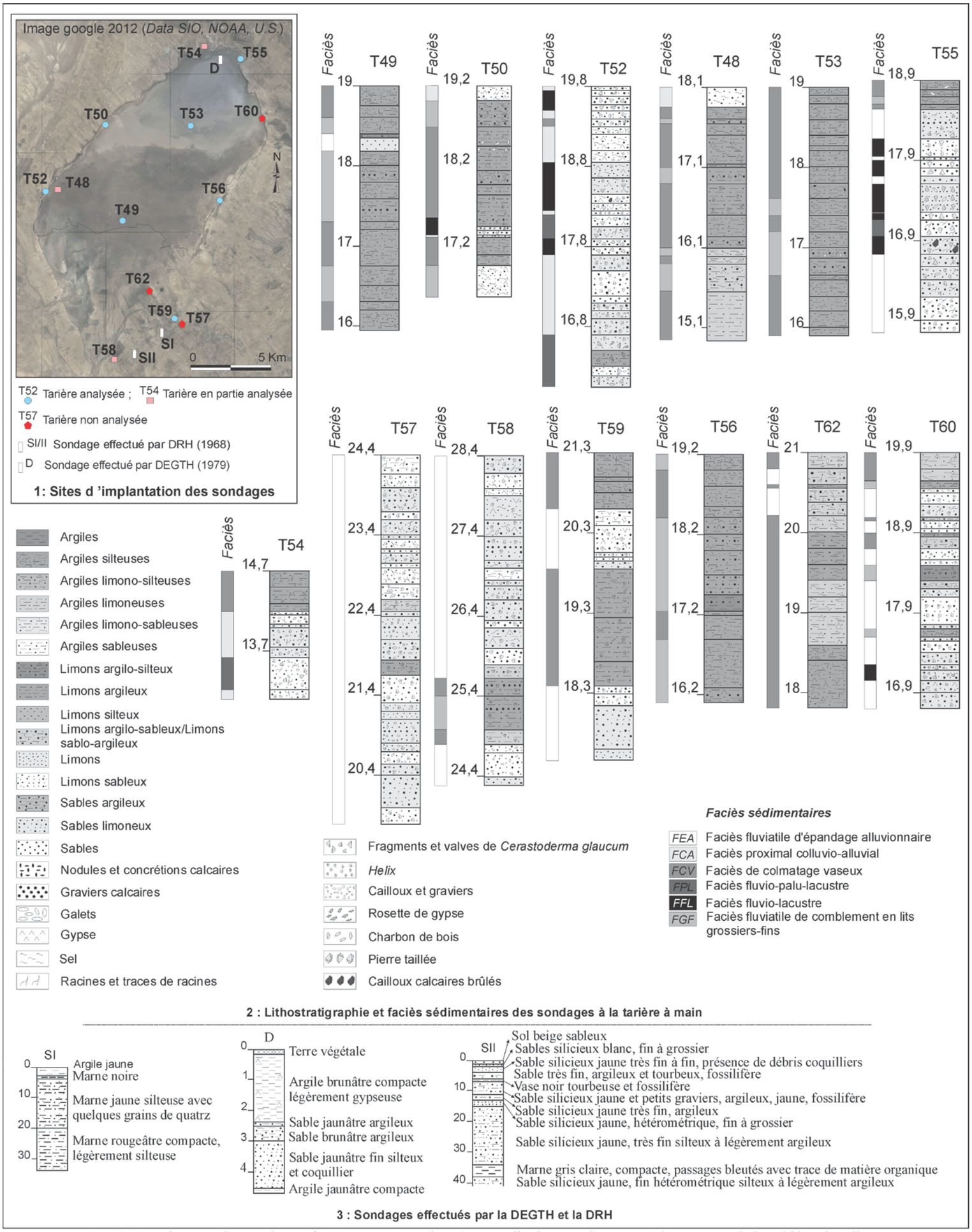


Fig. 6 : Localisation des sondages, faciès et stratigraphie séquentielle des remplissages sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya

Afin d'étendre la portée de cette étude, on a eu accès aux quelques forages et sondages réalisés par la Direction des Etudes et des Grands Travaux Hydrauliques (DEGTH, 1979) et la Direction des Ressources Hydrauliques (BIRH, 1968, inédit, donné par M. R. Karray). Trois sondages se localisent au nord et au sud-est d'al Kalbiyya. Ils montrent des niveaux marneux, tourbeux et fossilifères fournissant des indications d'un grand intérêt sur l'évolution de la sebkha. Néanmoins, la caractérisation séquentielle faible résolution des dépôts (métrique à décamétrique) gène toute tentative de comparaison ou de corrélation fine et fiable avec nos sondages (Fig. 6.3).

Les résultats d'analyses ont permis de définir des groupes de séquences qui partagent des caractères similaires et d'établir une typologie des faciès. Six faciès sont distingués sur la base du changement de la nature, du contenu et de la provenance des sédiments, des processus de la morphodynamique et des milieux de dépôt (Tab. 1).

Faciès sédimentaires	**Caractères spécifiques**	**Modes prépondérants de transport et d'accumulation**	**Milieu de sédimentation**
Faciès fluvio-lacustre (FFL)	Débris et valves de *Cerastoderma glaucum* de différente taille	Transport par la suspension graduée, la suspension de fond et par roulement ; Accumulation libre ou forcée	Les milieux lacustres infra à intertidaux
Faciès fluvio-palu-lacustre (FPL)	Petites coquilles de *Cerastoderma glaucum* ; Racines	Transport par la suspension uniforme et graduée avec un peu de roulement ; Accumulation par décantation et libre proche d'une décantation	Les milieux palustres des marges lacustres
Faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)	Texture généralement grossière ; Structure litée ; *Helix*	Transport par la suspension graduée ; Accumulation libre ou en vrac	Les environnements fluvio-deltaïques et d'épandage fluviatile (cône « deltaïque », cône et plaine d'épandage)
Faciès de colmatage vaseux (FCV)	Faciès hyperbolique d'argiles et d'argiles silteuses ; Structure laminaire	Transport par la suspension uniforme Décantation totale et accumulation en mode libre proche d'une décantation	L'ombilic ; Les bordures en hautes eaux
Faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)	Succession des binômes de sables et de limons lités sous des argiles stratifiées	Transport par la suspension graduée puis uniforme Accumulation libre et/ou forcée puis de décantation	Les milieux fluvio-deltaïques, inter et subtidaux de la sebkha ; Les plaines d'épandage
Faciès proximal colluvio-alluvial (FCA)	Matière grossière mêlée aux concrétions et graviers calcaires ; *Helix*	Transport par la suspension graduée avec un peu de roulement, par roulement Accumulation libre, libre puis forcée et/ou forcée	Les milieux supra et intertidaux de la sebkha Exceptionnellement dans le centre

Tab. 1: Typologie des faciès des remplissages sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya

II-1- Le faciès fluvio-lacustre (FFL)

Le faciès fluvio-lacustre se distingue par sa fraction quartzeuse et par son contenu malacofaunistique. Il montre une forte densité des débris et des valves de *Cerastoderma glaucum* de tailles variables, associés parfois à des débris d'*Helix*. Il caractérise les milieux lacustres infra à intertidaux. Il correspond à des phases d'importants apports hydrosédimentaires, de forte activité hydrodynamique et de la prolifération des malacofaunes.

II-2- Le faciès fluvio-palu-lacustre (FPL)

En comparaison du faciès précédent, le faciès fluvio-palu-lacustre est composé de sédiments fins (surtout du limon), lités et de couleur foncée, avec une présence réduite des nourrissons de *Cerastoderma glaucum*. Il montre une augmentation du nombre des racines. Il est caractéristique des milieux palustres et des marges lacustres qui se trouvent à l'abri des seiches fortes et des courants de marée importants (Breton *et al.*, 2005 ; Ghilardi *et al.*, 2009). Les dynamiques sont généralement peu actives.

II-3- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)

Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire décrit un matériel détritique grossier, composé de sables et de limons, de couleur souvent claire. Les sédiments sont mêlés à des concrétions calcaires, à des graviers et cailloux calcaires et gréseux et à des débris de coquilles d'*Helix*. Le faciès typiquement fluviatile, caractérise les zones de progradation alluviale des cônes d'épandage et les milieux fluvio-deltaïques aux débouchés des oueds dans la sebkha.

II-4- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)

Le faciès de colmatage vaseux définit une sédimentation fine d'argiles et d'argiles silteuses, structurées en lamines millimétriques à plurimillimétriques et d'une teinte claire et foncée. Il correspond à des dépôts confinés de vases de décantation, déposés dans un environnement particulièrement calme. Le faciès est typique du milieu ombilical et des marges supra et intertidales de la sebkha, en période de hautes eaux.

II-5- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)

Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins se distingue par sa structure. Il montre une succession rythmique et une organisation en doublet des lits de sables et d'argiles de couleur souvent foncée. Le faciès est caractéristique des zones inter à subtidales de la sebkha, des plaines d'épandage et des milieux fluvio-deltaïques.

II-6- Le faciès proximal colluvio-alluvial (FCA)

Le faciès proximal colluvio-alluvial est un mélange de sédiments alluviaux et d'apports latéraux. Il est composé de sables et de limons sableux, aux concrétions et graviers calcaires et déposés en dehors des zones d'épandage des oueds. Il correspond à un dépôt de front de crues dans la dépression, de ruissellement sur les versants ou de migrations latérales par les courants d'eau sur les bordures de la sebkha.

III- LES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES DES RIVES OCCIDENTALE, SEPTENTRIONALE ET ORIENTALE D'AL KALBIYYA : UNE FORTE HETEROGENEITE SPATIO-TEMPORELLE DES FACIES

Les remplissages des rives occidentale, septentrionale et orientale d'al Kalbiyya révèlent une forte hétérogénéité des sédiments et se caractérisent par **la multiplication et la**

forte puissance de séquences aux *Cerastoderma glaucum*. L'inventaire des archives sédimentaires s'est appuyé sur la réalisation de **sept sondages à la tarière à main** (*cf.*, Fig. 6).

Sur la rive ouest, deux sondages (**T50**, 527423/282138 et **T52**, 526802/281961), profonds de 3 m et 3,75 m, ont été effectués dans le domaine actuel du chott. Un troisième sondage **T48** (527423/282138) a été réalisé à 643 m à l'est du sondage T52, dans les marges internes de la sebkha. Le but est de suivre l'évolution latérale des faciès et celle de l'enregistrement sédimentaire des dynamiques. Deux sondages ont été implantés sur la rive nord. Le premier sondage **T54** (536742/290978), profond de 1,58 m, est effectué sur la limite septentrionale du champ d'inondation de la sebkha actuelle, à 165 m au nord d'un site d'occupation romaine. Le second sondage **T55** (538915/290150), profond de 3,15 m, est réalisé au nord-est dans l'exutoire d'al Kalbiyya et à l'amont du seuil de l'oued al Manfas. Ici, l'objectif initial est d'apprécier la nature des trop-pleins solides évacués vers l'oued al Manfas as-Sod. Le sondage est également effectué à l'aval d'une zone d'épandage, en ce jour non fonctionnelle, de l'oued Lahmar-al Ghuirga. **Deux sondages T56 et T60**, profonds de 3,1 et 3,2 m, ont permis d'explorer les sédiments de la rive orientale. Les sites prospectés correspondent actuellement à un domaine de chott.

Une analyse sédimentologique détaillée a porté sur la totalité des tarières T50, T52, T55 et T56 et sur une partie des tarières T54 et T48. La tarière T60 a fait l'objet d'une description lithoséquentielle. Les logs stratigraphiques sont complexes et montrent une succession de 10 à 28 séquences épaisses de 3 à 46 cm (*cf.*, Fig.6). Six types de faciès caractérisent les remplissages des rives d'al Kalbiyya.

III-1- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)

Le faciès de colmatage vaseux est surtout reconnu sur la rive ouest d'al Kalbiyya (60,5% des remplissages investigués). Il regroupe 37 séquences lithostratigraphiques. Elles sont essentiellement issues des parties inférieures et supérieures des tarières T48, T50, T54, T55, T56 et T60 et elles présentent des épaisseurs variant entre 5 et 40 cm.

III-1-1- Caractérisation sédimentologique du faciès

Des argiles et des argiles silteuses laminaires et de couleurs variées caractérisent le faciès de colmatage vaseux FCV (Fig. 7). Les sédiments sont fortement à modérément calcaires et non à modérément gypseux (1-10%). Le tri est moyen à assez bien. Le grain moyen est dans les argiles granulométriques. La médiane est très faible. La distribution granulométrique des sédiments est de forme hyperbolique (Fig. 8). A la loupe binoculaire, les quartz émoussés luisants prédominent (44-52%). Viennent ensuite les grains sub-émoussés luisants (24-36%), puis les émoussés mats (16-28%).

Des horizons (1-3 mm) et des taches d'oxyde de fer s'intercalent dans les dépôts. Des filaments et des lits fins discontinus de sel blanc caractérisent les séquences S20, S25, S26-T60, S12-T56, S9-S11, S13-T48 et S3, S9-T50. Des séquences, surtout de la tarière T48, montrent des horizons fins, des taches diffuses et des grains de couleur noire. Des fragments de coquilles d'*Helix* sont observés dans les séquences S16-17-T60 et S16-19-T55. Ces trois dernières séquences et la séquence S10-T50 renferment des grains de charbon de bois et des amas ferrugineux d'environ 2 mm de diamètre. Les séquences S7-T50 et S7-T48 sont riches en petites coquilles d'*Helix*. Des macro et des microcristaux de gypse sont visibles dans les séquences S2, S9-T50 et S10-T48. Des racines apparaissent dans plusieurs séquences des tarières T60. Des grains roulés, enrobés d'argiles et de limons marquent neuf séquences des tarières T50, T48, T56 et T54.

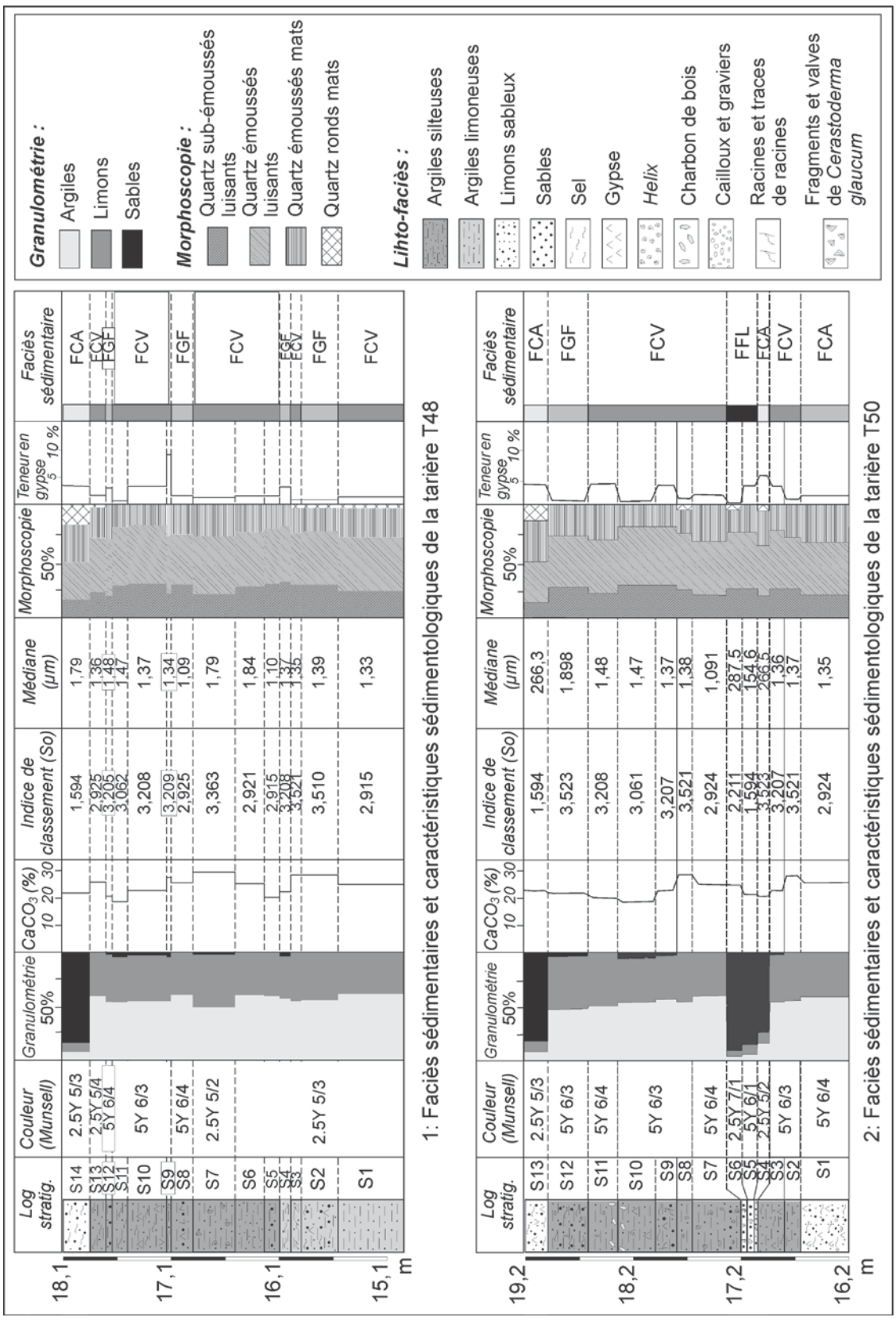


Fig. 7 : Analyses lithoséquentielle et sédimentologique des tarières T48 et T50 de la rive ouest de la sebkha al Kalbiyya
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

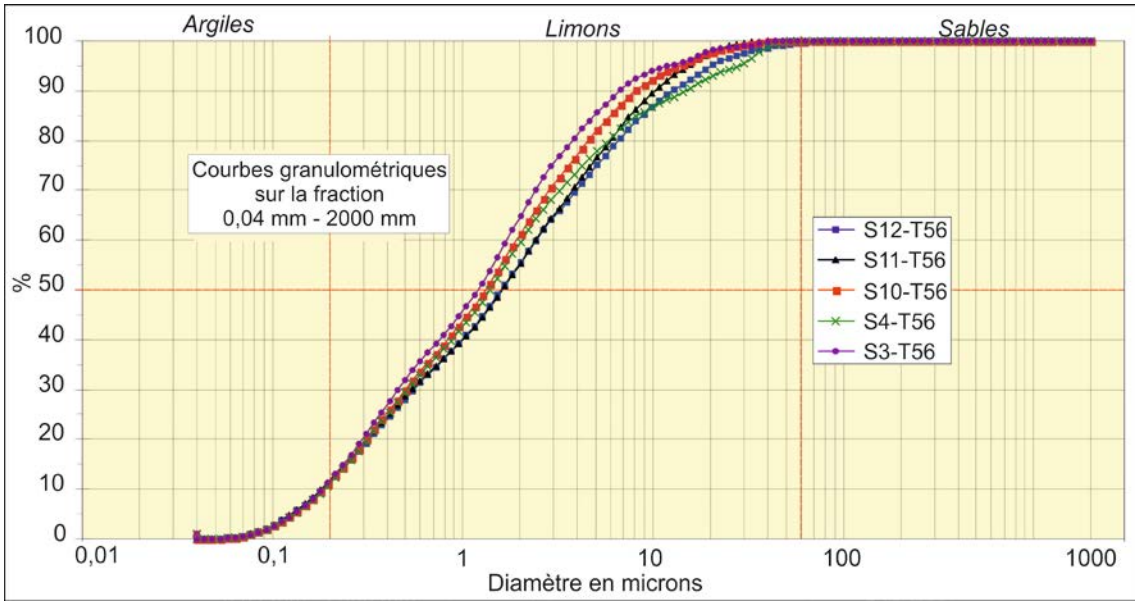


Fig. 8 : Distribution granulométrique des sédiments des séquences lithostratigraphiques S3-4 et S10-12 de la tarière T56 de la rive est de la sebkha al Kalbiyya

III-1-2- Signification morphodynamique et pédologique du faciès

Le remplissage décrit une sédimentation effectuée dans un milieu relativement calme, marqué par l'alternance des cycles submersion/émersion. Les lamines de couleur sombre et claire témoignent d'une certaine rythmicité des dynamiques et des régimes saisonniers de sédimentation (Vatan, 1967 ; Cojan et Renard, 1999 ; Gargani, 2004). Le dépôt correspond principalement aux sédiments de crues allogènes, mis en place par des écoulements intermittents, à faible capacité de transport. Il est vraisemblablement mélangé avec des argiles gypseuses, issues d'apports latéraux sur les formations pléistocènes, oligocènes et aquitaniennes des Dhra as-Satour et Laghmas-ash-Shraif. Les sédiments sont transportés par la suspension uniforme et sont déposés par décantation et en mode libre proche d'une décantation, essentiellement pendant la descente des crues (Fig. 9). L'échantillon de la séquence S9-T54 est mis en place par excès de charge lorsque la turbulence s'est réduite ou a cessé.

Les sédiments ont connu une évolution post-déposionnelle. Les horizons fins noirs indiquent un sol saturé en eau ou en condition anoxique (Lespez *et al.*, 2004). Les taches et les grains noirs témoignent des précipitations ferro-manganiques en milieu hydromorphe (Kaemmerer et Revel, 1989), ou d'une matière organique remaniée et/ou décomposée par oxydation ou par une activité bactérienne (Abichou, 2002 ; Losson et Corbonnois, 2006). Les grains de charbon de bois peuvent indiquer une évolution diagénétique de débris végétaux et leur carbonisation (Boulvain, 2006). Ils peuvent correspondre à des résidus d'incendies naturels ou anthropiques.

Les horizons et les traces d'oxydation rouille expriment la baisse du niveau de l'eau. Les cristaux de gypse témoignent de l'évaporation. Celle-ci provoque le pompage des eaux interstitielles et entraîne la néoformation du gypse dans les vides et les pores de la frange capillaire (Perthuisot, 1974 ; Gaucher et Burdin, 1974 ; Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). Les lits fins de sel expriment un assèchement total et la formation des couches blanches laminaires très solubles à la surface (Boulvain, 2006 ; Cojan et Renard, 1999). Les boules d'argiles semblent être des agrégats éolisés, mis en mouvement par voie éolienne ou des graviers d'argiles détachés et mis en roulement par l'eau (Communication orale avec

M.R. Karray). La présence irrégulière des racines dans le sédiment indique des changements intervenus dans l'évolution spatio-temporelle du domaine de chott.

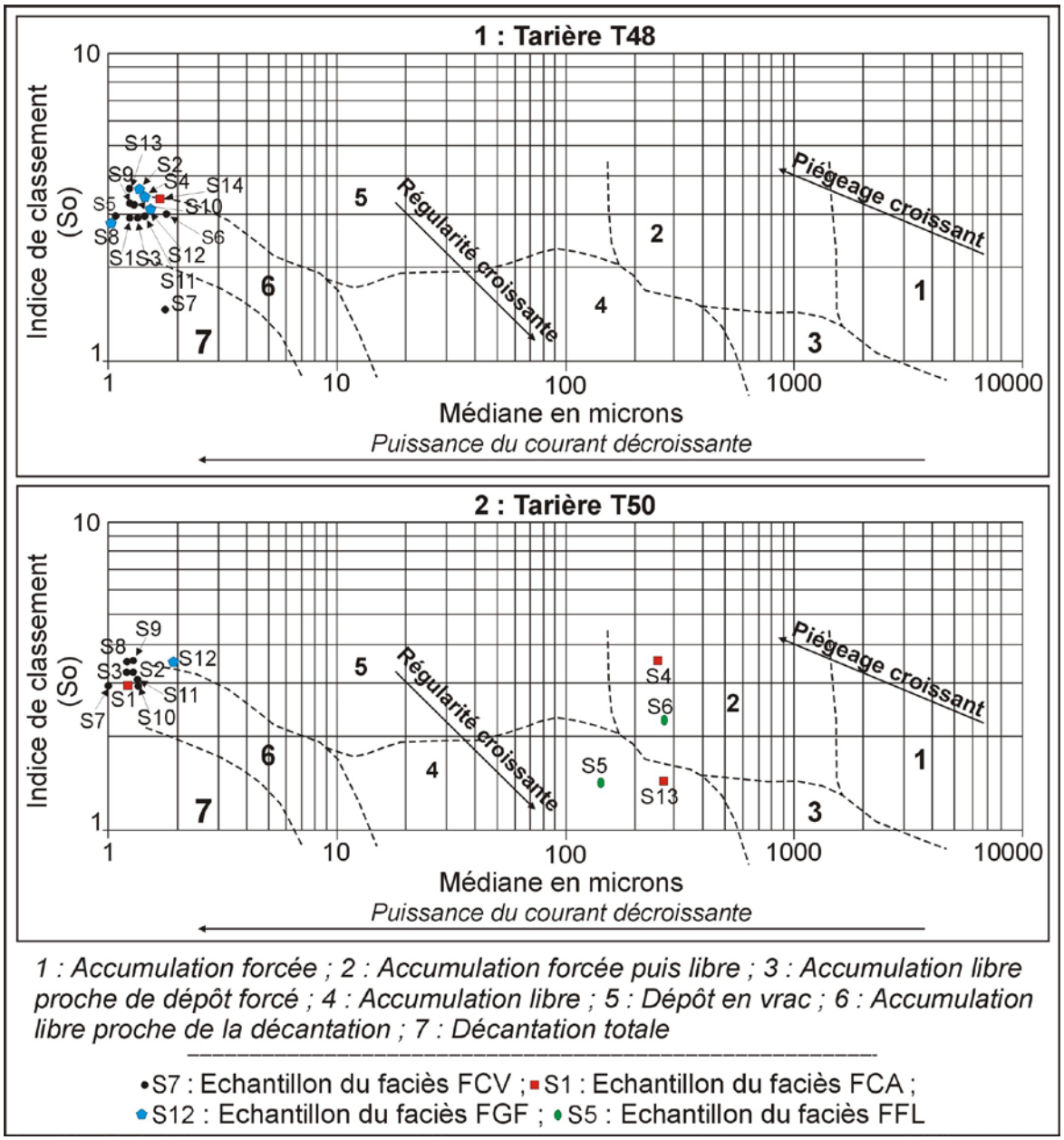


Fig. 9 : Modes d'accumulation de sédiments des tarières T48 et T50 (rive occidentale de la sebkha al Kalbiyya)

III-2- Le Faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)

Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF) est reconnu essentiellement sur la rive est d'al Kalbiyya. Il regroupe huit séquences de la tarière T56 (S1-2, S5-9 et S13), dépassant 69 % des remplissages investigués (Fig. 10). Il englobe également quatre séquences de la tarière T48 (S1, S4, S8 et S12), trois séquences de la tarière T60 (S8, S13, S24) et une séquence des tarières T50 (S12) et T55 (S17).

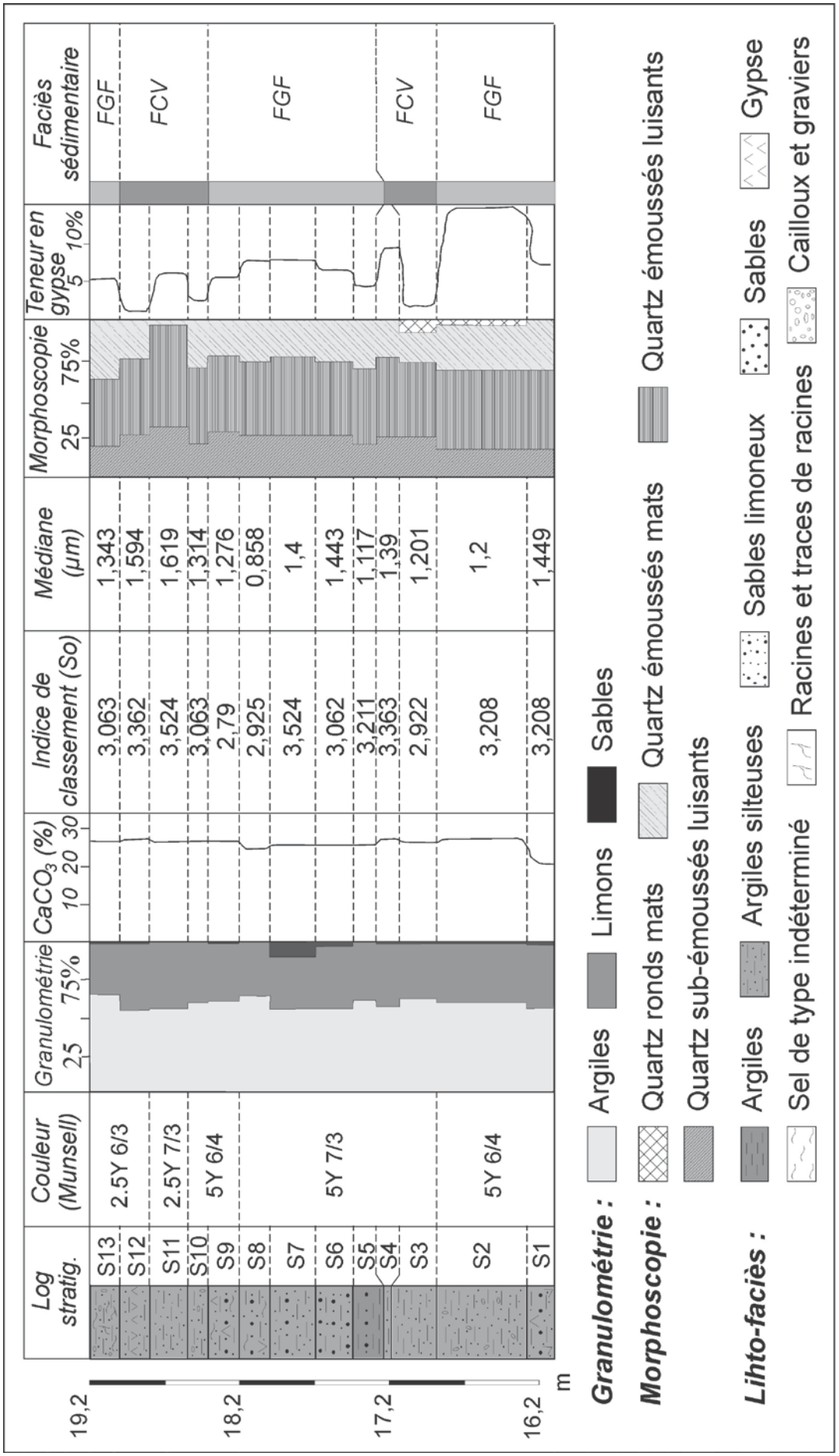


Fig. 10 : Caractéristiques sédimentologiques des dépôts de la tarière T56 (rive est d'al Kalbiyya)
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

III-2-1- Caractéristiques sédimentologiques du faciès

Le dépôt s'organise en doublets de lits fins et grossiers. Des séquences épaisses de 8 à 60 cm montrent **une alternance des lits de sables, de sables limoneux et de limons sableux millimétriques avec des passées d'argiles et d'argiles silteuses millimétriques à pluricentimétriques**. Les sédiments grossiers sont oxydés et de couleur gris clair (2.5Y 7/1), brun jaunâtre (2.5Y 5/3), brun grisâtre (2.5Y 5/2) jaune pâle (5Y 7/4) et jaune (2.5Y 7/8 et 7/6). Un échantillon de la séquence S6-T56 a montré une distribution granulométrique parabolique et un grain moyen dans les sables fins. Les matériaux fins sont de couleur vert olive pâle (5Y 6/4 et 6/3), jaune pâle (5Y 7/3) brun jaunâtre (2.5Y 5/3), et jaune terne (2.5Y 6/3). Ils sont modérément à fortement calcaires et peu gypseux. Ils possèdent un grain moyen dans les argiles granulométriques, une distribution granulométrique hyperbolique (Fig. 11) et un tri moyen à assez bien. Les quartz sub-émoussés luisants (24%) et émoussés luisants (44-52%) dominent. La part des grains émoussés mats reste importante (16-28%).

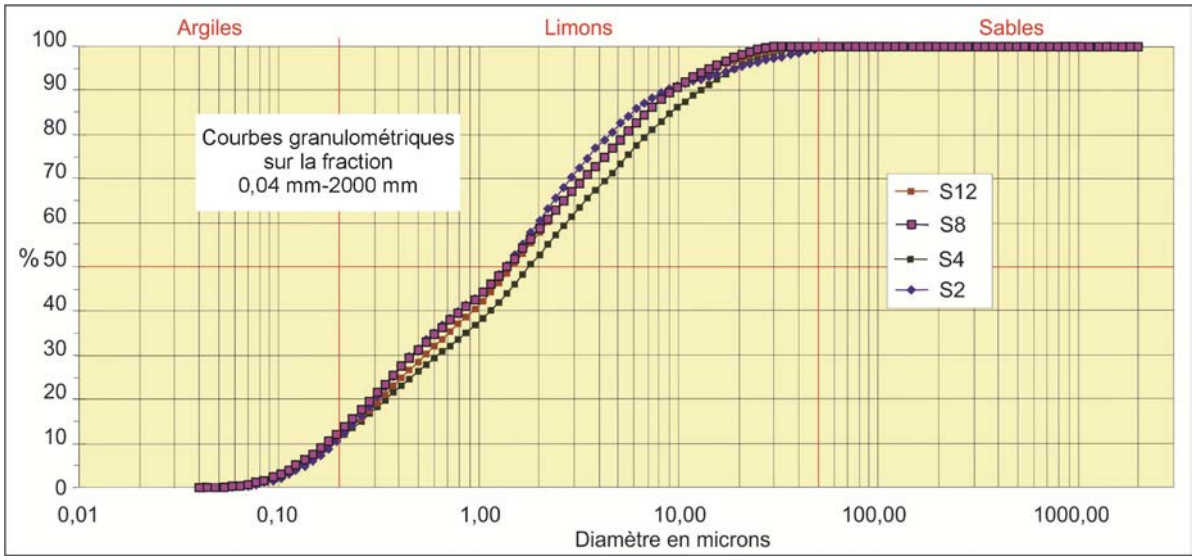


Fig. 11 : Distribution granulométrique des sédiments argileux des séquences lithostratigraphiques S2, S4, S8 et S12 de la tarière T48

La plupart des séquences lithostratigraphiques renferment des horizons fins discontinus et des taches d'oxyde de fer et de sel blanchâtre. Des petits cristaux de gypse marquent les séquences S1, S9, S13-T56 et S26-T60. La séquence S8-T60 contient des macrocristaux et des petites rosettes de gypse. Des amas millimétriques de calcaire crayeux friable et de grès s'intercalent dans les séquences S12, S8 et S9-T56. Les séquences S17-T55, S9-T56, S8 et S13-T60 montrent des grains, des taches diffuses et des horizons noirs. Des gravillons sablo-limoneux et argileux bruns roulés sont observés dans les séquences S2 et S13-T56, S2, S4, et S8-T48 et S12-T50. Des coquilles d'*Helix* sont présentes dans la séquence 13-T60.

III-2-2- Mécanismes et conditions de la morphodynamique et de la pédogenèse

L'alternance des lits grossiers- fins exprime des faits cycliques et la superposition, pendant de grandes crues vraisemblablement rapprochées, de deux temps différents de la morphodynamique qui dépend des fluctuations de la dynamique au moment du transport et du dépôt. Le premier temps correspond au maximum des épisodes de crues. Les flux d'eaux soutenus et compétents apportent les sables et les limons, par la suspension graduée, dans un milieu énergique (Ollivier *et al.*, 2009). Les apports sédimentaires provenant des versants occidentaux et orientaux sont loin d'être négligeables. Le second temps correspond à la

décrue, quand les courants d'eaux subissent une réduction de leur compétence. Il en résulte une accumulation laminaire des argiles et des argiles silteuses issues de la suspension uniforme.

Al Kalbiyya enregistre des cycles inondation/exondation et archive les signes d'une évolution post-dépôt. Les lits fins bruns grisâtres, les taches et les horizons fins noirs témoignent d'une évolution hydromorphique des sédiments en rapport avec la battance de la nappe (Lespez *et al.*, 2004), la stagnation temporaire et/ou d'une circulation limitée des eaux dans la sebkha. Ils peuvent aussi traduire une décomposition active de la matière organique par oxydation ou par activité bactérienne (Schütt, 2000 ; Lespez *et al.*, 2004). Les taches et les horizons discontinus d'oxyde de fer traduisent des sédiments non saturés en eau avec une certaine battance d'une nappe proche et peut-être d'une activité biologique importante (Vizier, 1974, 1984 ; Kervazo et Laville, 1988, Bourgou, 1993). La précipitation des sels indique l'exondation puis l'assèchement d'al Kalbiyya. Les petites rosettes de gypse sont remaniés dans la sebkha et/ou néoformés dans le sédiment par une diagenèse précoce à la suite du pompage évaporatique des eaux interstitielles (Perthuisot, 1974 ; Gaucher et Burdin, 1974 ; Schütt, 1998, 2004).

III-3- Le Faciès proximal colluvio-alluvial (FCA)

Le faciès proximal colluvio-alluvial, d'origine essentiellement proche, n'est recoupé que par les sondages T48, T50, T52 et T54 effectués sur les rives ouest et nord d'al Kalbiyya. Il présente 34,5% des archives investiguées. Il regroupe vingt-sept séquences qui se placent surtout dans les parties médianes et inférieures des tarières, avec une épaisseur variant entre 3 et 46 cm (Fig. 12). De la tarière T54, uniquement les séquences S6 et S7-T54 ont fait l'objet d'analyse granulométrique laser. (Tab. 2).

Séquence lithostratig.	Teneur en CaCO3 (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie					Granulométrie			Indices granulométriques		
				NE	SE	EL	EM	RM	< 2µm	2 à 50 µm	50 à 2000 µm	S0 (Trask)	Moyenne (Mz)	Médiane (µm)
T54-7	4	Olive pale 5Y	0,5	0	24	40	32	4	5,26	3,41	91,33	1,45	2,27	233,30
T54-6	2,3	Jaune pale 5Y	0,2	0	16	36	44	4	1,65	2,63	95,72	1,52	2,23	226,20

Tab. 2 : Caractéristiques sédimentologiques de deux échantillons du faciès proximal colluvio-alluvial de la tarière T54

III-3-1- Un Dépôt grossier très hétérogène

Le faciès proximal colluvio-alluvial se compose de **limons sableux, de sables limoneux et de sables lités**, modérément à fortement calcaires et non à peu gypseux. Les sédiments sont de couleur brun jaunâtre (2.5Y 5/3), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4), jaune terne (2.5Y 6/3), jaune (2.5Y 7/6) et brun grisâtre (2.5Y 5/2). Le grain moyen s'inscrit dans les sables fins à grossiers. Exceptée celle des séquences S6-T52 et S14-T48, la médiane est forte à très forte. La distribution granulométrique du sédiment est parabolique. Elle est sublogarithmique dans les séquences S20-22-T52 et logarithmique dans la séquence S6-T52. La morphoscopie des quartz montre la prédominance d'un aspect émoussé mat (20-44) et émoussé luisant, malpropre et picoté (40-48%).

Les séquences S5-10-T52 et S1, S3 et S4-T54 se caractérisent par des couleurs gris clair (10YR 6/1), gris brunâtre clair (2.5 Y 6/2), vert olive pâle (5Y 6/3 et 6/4), gris vert olive clair (5Y 6/2) et jaune pâle (5Y 7/4). Elles sont les plus riches en fragments d'*Helix* et en *Helix* entiers. Elles sont intercalées d'horizons fins discontinus (1-2 mm) de couleur grisâtre, gris noirâtre, jaune brunâtre et jaune terne. Elles montrent des amas calcaires friables et des graviers calcaires, gréseux, sableux brun et argileux vert olive et brun grisâtre.

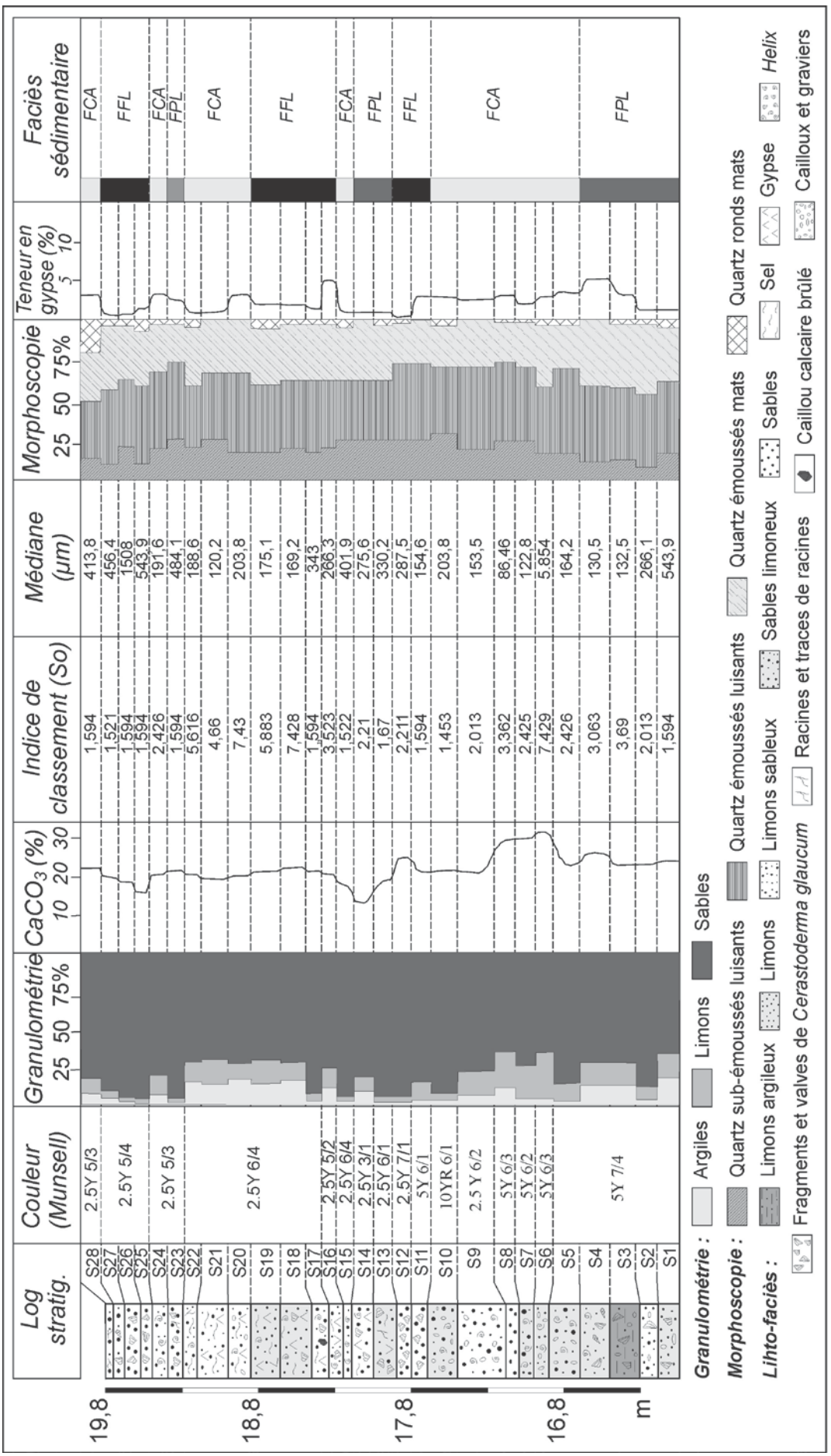


Fig. 12 : Caractéristiques sédimentologiques des séquences lithostartigraphiques de la tarière T52
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

Des dragées quartzeuses, des racines, des cailloux calcaires aplatis et des passées de sables grossiers occupent les séquences S5-7-T54. Les limons sableux des tarières T48 et T50 renferment des lits fins (1-3 mm) de sables quartzeux et des horizons d'oxyde de fer et noirs. Ils montrent des lits discontinus de sel blanc ocre, des cristaux gypseux et des graviers calcaires. Des grains de charbon de bois sont observés dans la séquence S4-T50 et S7-T54.

III-3-2- Interprétation morphodynamique et pédologique du faciès

L'accumulation correspond à des dépôts de sédiments fluviatiles et de ruissellement, étalés sur les marges d'une mare temporaire. L'hétérogénéité des remplissages traduit une différence du fonctionnement de la morphodynamique (Fig. 13). Les limons et les limons sableux des séquences S6-T52 et S14-T48 sont issus d'une suspension uniforme et sont respectivement déposés en vrac et en mode libre proche d'une décantation. Ils expliquent un fort enrichissement en matériaux fins pendant la décrue.

Les sables et les limons sableux des séquences S1, S4, S13-T50 et S8, S9, S22, S24-T52 S6 et S7-T54 sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement. Pendant une crue, la turbulence est très forte, ce qui a fait déposer les éléments grossiers, suivis par les matériaux issus de la suspension graduée. L'accumulation est libre (S4, S13-T50, S6 et S7-T54), en vrac (S8-T52) et forcée d'une crue brève puis libre de décrue (S9, S22, S24-T52 ; Losson et Corbonnois, 2006).

Les sables limoneux et les limons sableux des séquences S5, S7, S10, S15, S20, S21 et S28 du sondage T52 sont issus de la suspension de fond et du transport par roulement. L'emplacement du premier percentile au-dessus de 1000 µm indique une compétence suffisante des flux d'eau pour le transport des matériaux les plus grossiers. L'accumulation est libre, forcée puis libre de décrue et libre proche de dépôt forcé. Les passées de sables grossiers, les dragées de quartz, les graviers et les cailloux calcaires intercalés dans l'accumulation peuvent traduire d'importants apports latéraux intermittents, occasionnés surtout lors de fortes pluies locales. Les quartz émoussés luisants malpropres et picotés sont peut-être remaniés sur les niveaux conglomératiques et oxydés d'âge mio-pliocène de Dhra as-Satour. Ils peuvent indiquer aussi des actions physico-chimiques de dissolution et de fixation de fer dans les creux (Cailleux et Tricart, 1959 ; Boyé et Nesson, 1970).

En dehors des périodes de crues, les dépôts connaissent une évolution post-sédimentaire, de type organique et « évaporatique ». Les horizons discontinus gris, grisâtres et gris noirâtres témoignent d'un engorgement de sédiments en eau, d'une hydromorphie de surface et/ou d'une nappe perchée temporaire. Un tel contexte favorise la ségrégation du fer par les différents processus d'oxydo-réduction et l'activité de micro-organismes pour la décomposition de la matière organique (Vizier, 1984 ; Kaemmerer et Revel, 1989 ; Abichou, 2002 ; Lespez *et al.*, 2004). Les taches et les lits fins d'oxyde de fer (S5-7-T54) traduisent par contre des niveaux non saturés en eau et des remontées périodiques de la nappe, ce qui explique la précipitation et la réoxydation du fer (Vizier, 1974 ; Kervazo et Laville, 1988). La précipitation des sels sous forme diffuse et de filaments indique des variations hydrothermiques (Cojan et Renard, 1999), l'exondation et l'assèchement d'al Kalbiyya, par évaporation.

III-4- Le Faciès fluvio-lacustre (FFL)

Le faciès fluvio-lacustre est riche en fragments et en bivalves de *Cerastoderma glaucum*. Il est principalement reconnu sur les tarières T52 et T55 et réparti sur quinze séquences épaisses de 227 cm (*cf*., Fig. 12). Il regroupe aussi deux séquences issues des parties inférieures de chacune des tarières T50 et T60, dont l'épaisseur ne dépasse pas 13 cm.

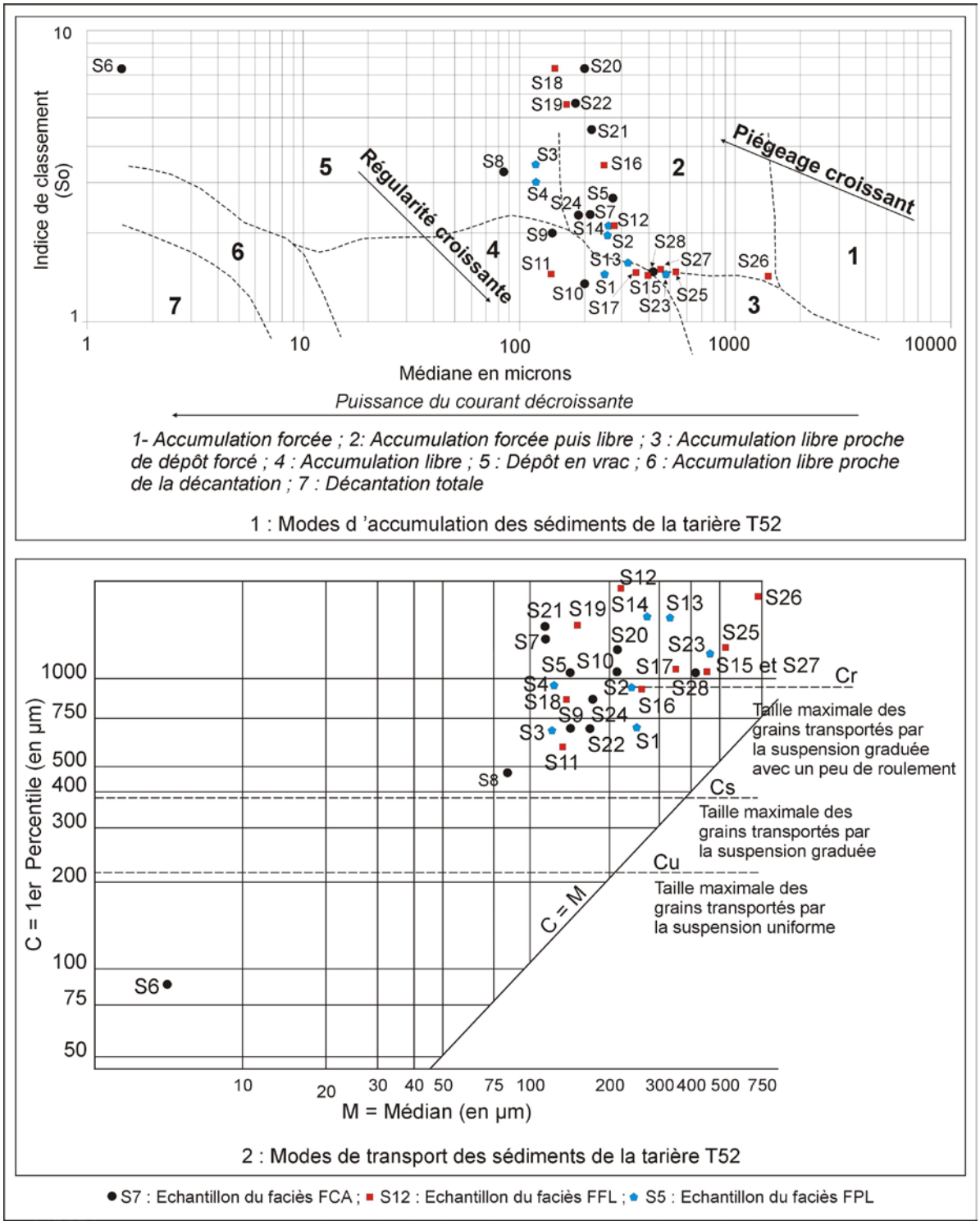


Fig. 13 : Modes d'accumulation et diagramme de Passega des sédiments de la tarière T52 (rive ouest de la sebkha al Kalbiyya)

III-4-1- Un faciès aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Le dépôt est composé de **sables**, de **sables limoneux**, de **limons sableux et** de **limons**, modérément à fortement calcaires et peu à modérément gypseux. Il est de couleur jaune (2.5Y 7/6), jaune pâle (5Y 7/4), vert olive pâle (5Y 6/3 à 6/4) à vert olive (5Y 5/4), brun vert olive (2.5Y 5/4), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4), brun grisâtre (2.5Y 5/2) et gris clair (2.5Y 7/1 et 5Y 6/1). Il est normalement à très bien classé et possède un grain moyen

dans les silts grossiers et les sables fins à moyens. Les courbes granulométriques sont paraboliques. Seulement les échantillons des séquences S18 et S19-T52 ont montré un mauvais tri et des distributions granulométriques paraboliques à sub-logarithmiques. A la loupe binoculaire, les quartz émoussés luisants (40-52 %) et émoussés mats (20-36%) prédominent. Le pourcentage des grains ronds mats oscille entre 4 et 8%.

Les séquences S25-27-T52 et S4-T60 sont fortement oxydées. Les séquences S16-19-T52 et S3-T60 renferment des lits fins gris et gris-blanchâtres, des horizons discontinus de sel et d'oxyde de fer, des macrocristaux de gypse et des débris de coquilles d'*Helix*. Des graviers gréseux et des nodules ferrugineux de taille millimétrique s'individualisent dans les séquences S12-T52 et S9-T55. **Des cailloux calcaires brûlés** sont observés dans la séquence S6-T55. Vers 1,4 m de profondeur, la séquence S17-T 52 a montré **un caillou calcaire brûlé** de 2 cm de diamètre. La séquence S6-T50 contient des graviers calcaires et **un petit éclat en silex, probablement de la culture épipaléolithique à néolithique** (Détermination de Lotfi Belhouchet, INP, août 2007).

III-4-2- Signification morphodynamique et conditions de mise en place du faciès

Le contenu malacologique et les caractéristiques sédimentologiques des remplissages indiquent un milieu de vie et de dépôt strictement lacustre et de forte énergie. Les sédiments généralement grossiers, sont des dépôts de grandes ou brèves et violentes crues, mis en place par des écoulements compétents et à forte capacité de transport.

Les sédiments sont issus de la suspension graduée avec quelques grains roulés. Les sables des séquences S6-T50, S12-T52 et S8-T55 se trouvent à la transition entre les sédiments transportés par la suspension de fond et par roulement et les sédiments transités seulement par roulement. L'accumulation est libre et forcée puis libre de décrue. Les limons de la séquence S9-T55 sont déposés en vrac par excès de charge. Les sables et les limons sableux des séquences S25-27-T52 présentent les caractéristiques de sédiments de fond transportés par roulement. L'accumulation est libre et libre proche de dépôt forcé de petites crues avec un faible piégeage de particules fines (Losson et Corbonnois, 2006).

A l'exutoire d'al Kalbiyya, les sédiments sont moins chargés en carbonates de calcium en comparaison de ceux de la rive ouest. Ceci est probablement en rapport avec les phénomènes de vidange de la dépression. La présence des quartz émoussés mats et ronds mats peut expliquer des remaniements hydriques sur des formations hydroéoliennes lointaines et/ou environnantes. La répartition séquentielle inégale de quantités et de tailles des débris et des bivalves de *Cerastoderma glaucum* et la présence des tests en mauvais état de conservation, témoignent des changements de conditions de la production biocénotique (chimie, profondeur, durée de séjour des eaux,) et des fluctuations de dynamiques lacustres (énergie du milieu, remaniement). Des cycles d'émersion et/ou de variations du plan d'eau lacustre, avec un rabattement de nappe semblent avoir entrecoupé la sédimentation fluvio-lacustre. Ils expliquent l'apparition des horizons grisâtres et la précipitation du sel, du gypse et des oxydes de fer.

III-5- Le faciès fluvio-palu-lacustre (FPL)

Le faciès fluvio-palu-lacustre est reconnu sur les rives occidentale et septentrionale d'al Kalbiyya. Le sondage T52 a recoupé sept séquences d'une épaisseur totale de 106 cm (S1-4, S13-14 et S23). Deux autres séquences, épaisses de 20 et de 40 cm, sont issues des parties inférieures des tarières T55 (S7) et T54 (S2).

III-5-1- Des remplissages sédimentaires très hétérogènes

Des **sables lités** et **oxydés**, des **limons**, des **limons sableux**, des **limons argileux**, des **sables limoneux** et des **argiles silteuses** caractérisent le faciès fluvio-palu-lacustre FPL. Ils renferment des débris et des petites valves de taille millimétrique de *Cerastoderma glaucum* (3 à 6 mm de longueur). La teneur en $CaCO_3$ varie entre 14 et 28%. Les couleurs sont jaune pâle (5Y 7/4), vert olive pâle (5Y 6/4), gris clair (5Y 6/1), gris brunâtre clair (2,5Y 6/2), gris jaunâtre (2.5Y 6/1), brun jaunâtre (2.5Y 5/3) et noir brunâtre (2.5Y 3/1). Le sédiment est peu à modérément gypseux. Le tri est très bon à moyen. La médiane est forte à très forte. Les courbes granulométriques sont paraboliques (Fig. 14). L'échantillon argileux de la séquence S2-T54 présente une distribution granulométrique hyperbolique. Les quartz émoussés luisants parfois maculés et picotés (40-52%) et ceux émoussés mats (24-36%) prédominent.

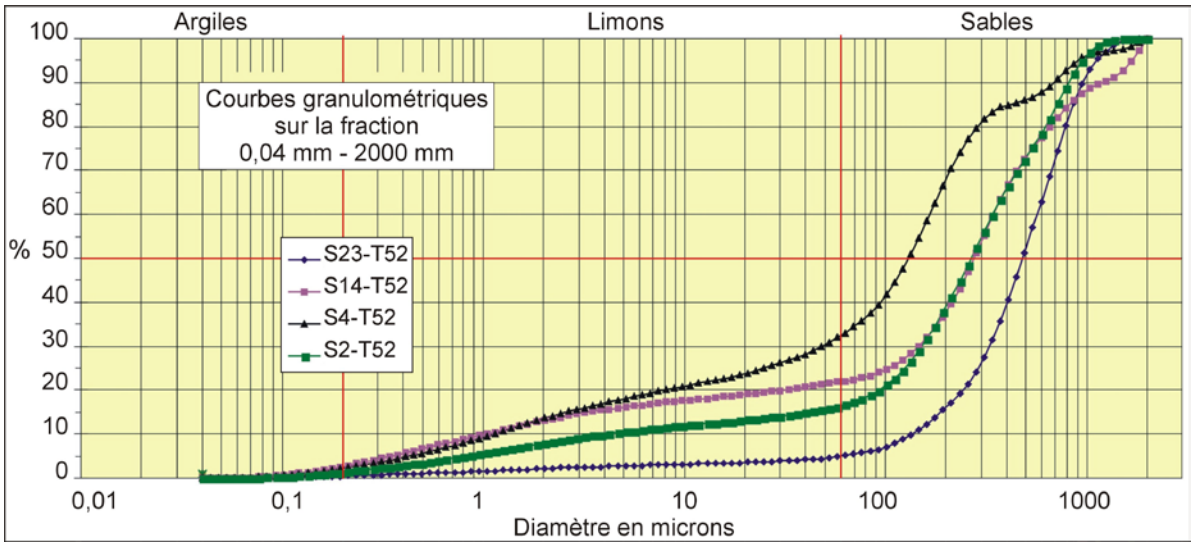


Fig. 14 : Distribution granulométrique des sédiments fluvio-palu-lacustres de la tarière T52

Des racines, des passées millimétriques (3 mm) de couleur gris clair, gris olive et noirâtre, des fragments de coquilles d'*Helix* et des amas calcaires sont observés dans les séquences S1-4-T52 et S2, S7-T55. Les séquences S13-14-T52 renferment des macrocristaux de gypse, des racines et des lits fins de sel blanc et de limons jaunes oxydés, grisâtres et brun noirâtres. La séquence S23-T52 montre des passées quartzeuses, associées à des débris de coquilles et des petits *Helix* entiers.

III-5-2- Interprétation morphodynamique et évolution post-dépôt des sédiments

La présence sur les marges de la sebkha actuelle des petites valves et des débris de *Cerastoderma glaucum* et d'*Helix*, des racines et des horizons de couleur sombre et probablement organiques, peut affirmer l'installation d'un milieu palustre à la périphérie d'un lac.

Les sables, les limons, les limons argileux et les limons sableux des séquences S1-4-T52 et S7-T55 sont issus de la suspension graduée avec un peu de roulement (*cf.*, Fig. 13). L'accumulation est principalement forcée puis libre. Pendant une petite ou brève crue, la forte turbulence a déposé les matériaux grossiers, suivis par les éléments issus de la suspension graduée après la diminution de la vitesse des flux d'eau (Ben Amor *et al.*, 2003 ; Bravard, 1983). Les sables et les sables limoneux des séquences S13 et S14-T52 sont issus de la suspension de fond et d'un transport par roulement. Ils sont probablement mis en place pendant le maximum d'épisodes de crues, quand la forte turbulence a pu remonter les

matériaux les plus grossiers. Les éléments fins sont peu abondants et correspondent aux sédiments de décrue, déposés par décantation. Les sables de la séquence S23-T52 sont charriés seulement par roulement et sont déposés en mode libre proche de dépôt forcé. Une très forte turbulence au début et pendant la crue était suffisante pour amener par roulement les matériaux grossiers. A la fin de crue, la décantation a permis un enrichissement en particules fines (37% argiles). Les argiles de la séquence S2-T54 sont issues de la suspension uniforme et correspondent peut-être à des laisses de crues. Elles sont déposées en mode libre proche d'une décantation.

Les dynamiques étaient généralement actives. Les apports hydriques étaient importants, mais le niveau d'eau a beaucoup varié. Les sables noirs brunâtres et les passées grisâtes, olives et noirâtres certifient une évolution post-dépôt de sédiments en milieu hydromorphe (Lespez *et al.*, 2004 ; Ghilardi *et al.*, 2009). La présence des horizons fins de sel et d'oxyde de fer, des cristaux de gypse, des débris de coquilles d'*Helix*, des passées quartzeuses et des amas calcaires suppose l'exondation des secteurs palustres et l'installation d'un milieu de vie intertidal à supratidal, nourri sporadiquement par des apports latéraux proches. La présence des racines peut indiquer le développement d'une végétation palustre.

III-6- Le Faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)

Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA) est caractéristique des remplissages des rives nord et est d'al Kalbiyya. Il représente plus de 58% des archives investiguées. Il regroupe vingt-quatre séquences, épaisses de 3 à 38 cm, réparties sur les parties inférieures et médianes des sondages T55 et T60 (Fig. 15).

III-6-1- Des séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire est composé de **sables**, de **limons**, de **sables limoneux** et de **limons sableux lités**. Il est remarquablement riche en débris et en petites coquilles d'*Helix*. Il est de couleur jaune vert olive (2.5Y 6/6), vert olive pâle (5Y 6/3 et 6/4), gris clair (5Y 6/1), jaune (2.5Y 7/8 et 7/6), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4 et 5/3), jaune pâle (5Y 7/4) et gris jaunâtre (2.5Y 6/1). Les sédiments sont peu à modérément calcaires et non à peu gypseux. Le tri est très bon en dehors de la séquence S4-T55 qui présente un très mauvais tri. La médiane est forte à très forte. Le grain moyen est dans les sables fins et les silts grossiers. Les courbes granulométriques sont paraboliques. Les quartz émoussés luisants, malpropres et picotés (40-52%), et émoussés mats (20-38%) sont prépondérants.

L'examen lithoséquentiel du faciès montre des différences de détail. Dans la séquence S2-T55, des passées millimétriques de sables gris blanchâtre montrent des racines, des graviers calcaires, des petites dragées de quartz et des horizons noirs. Les séquences S3, S5, S10 et S13-T55 s'arrangent en lits fins de sables et de limons de couleur gris, grisâtre et jaune terne. Elles renferment des débris de coquilles d'*Helix*, des racines, des horizons et des taches d'oxyde de fer. Les limons de la séquence S4-T55 montrent l'intercalation des lits caillouteux et graveleux calcaires et des lits jaunes millimétriques aux tests d'*Helix*. Du sel lité (2 mm) et diffus et des macrocristaux de gypse beige, ont été observés dans les séquences S2, S11-12 et S23-T60. Les séquences S2, S5, S14 et S18-T60 montrent des taches et des horizons fins et discontinus, de couleur noire. La séquence S14-T60 est marquée par la présence des résidus millimétriques (2 à 5 mm) du charbon de bois et des racines. Des lits de sables grossiers (1-3 cm) apparaissent dans les séquences S2, S5-6 et S19-T60. Ils renferment des graviers calcaires et grésifiés (< 10 mm) et des dragées de quartz, dont quelques unes sont rouillées.

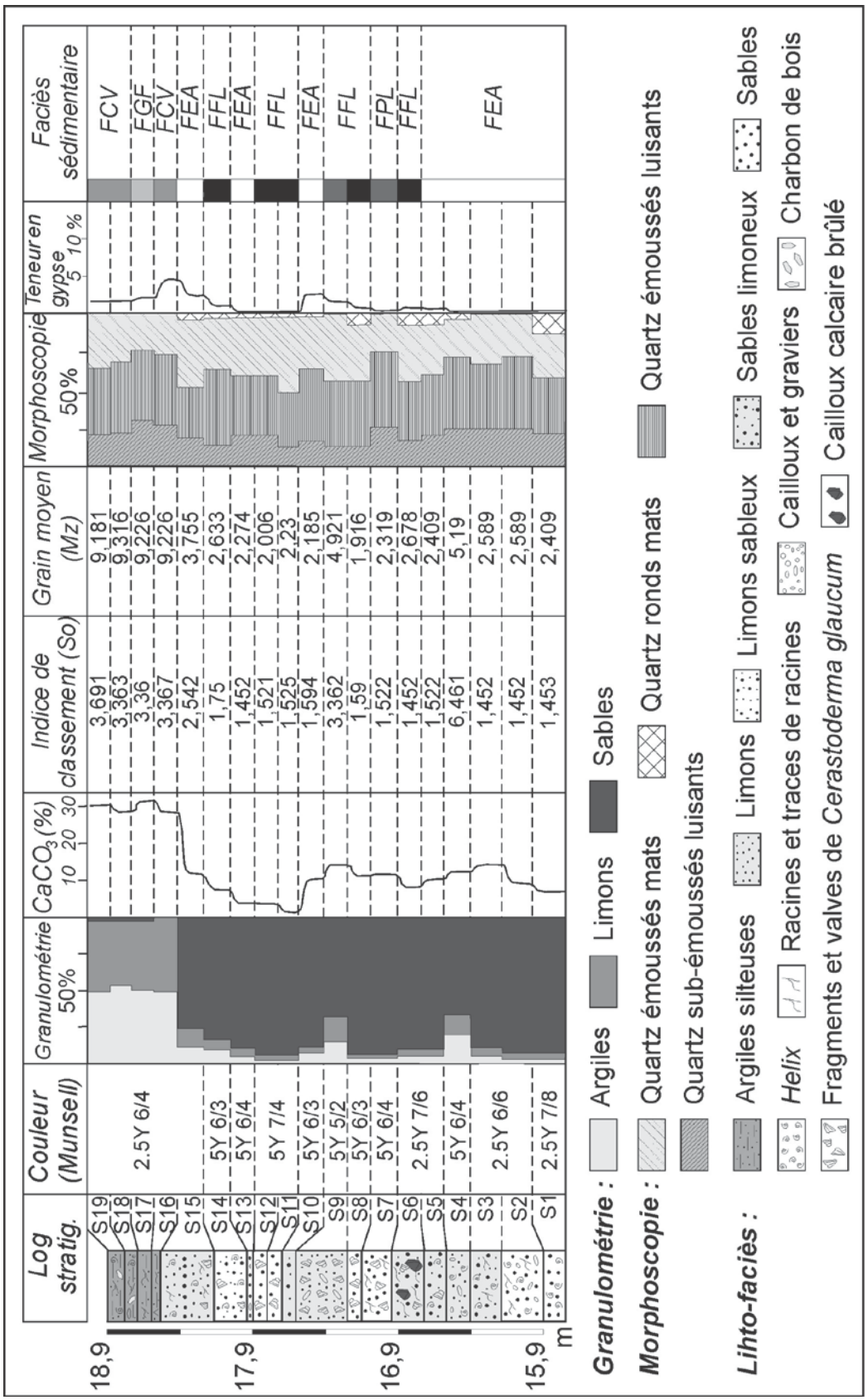


Fig. 15 : Faciès et caractéristiques sédimentologiques des remplissages sédimentaires de la tarière T55 (rive septentrionale de la sebkha al Kalbiyya)

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

III-6-2- Signification morphodynamique et pédologique des dépôts

Le faciès est caractéristique des milieux fluvio-deltaïques. Il témoigne de l'aggradation alluviale des bordures d'une mare temporaire et la progradation d'anciens cônes deltaïques aujourd'hui ensevelis sous des sédiments plus récents. L'épaisseur des séquences, la texture grossière des sédiments, les dragées de quartz, les débris de coquilles d'*Helix*, les cailloux et les graviers calcaires indiquent des dynamiques fluviatiles très actives et une érosion importante dans les bassins de l'extrémité septentrionale des Dhras Laghmas-ash-Shraif.

Les sédiments sont mis en place pendant les grandes ou les brèves et les violentes crues par des écoulements compétents. Ils sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre. Les limons sableux mal classés de la séquence S4-T55, sont issus de la suspension graduée sans roulement. L'accumulation est forcée pendant la crue puis libre de décrue avec un enrichissement en particules fines de décantation. La part importante des grains émoussés mats et ronds mats plaide à la faveur des remaniements hydriques par oued Lahmar-Ghuirga et ses affluents sur les dépôts hydroéoliens de la lunette du Pléistocène supérieur (Karray, 1993 ; Kamoun, 2001).

Les sédiments enregistrent les conséquences des cycles inondation/exondation. Les taches et les horizons noirs fins et discontinus témoignent d'une décomposition de la matière organique et d'une hydromorphie temporaire de surface notamment en milieu marécageux et réducteur (Schütt, 2000 ; Lespez *et al.*, 2004 ; Boulvain, 2006). Les résidus du charbon de bois, d'origine naturelle et/ou anthropique, sont apparemment remaniés sur le bassin. La présence notable des taches et des horizons d'oxyde de fer indique un bon drainage des sédiments ou un abaissement du niveau d'eau dans le sol et une remontée périodique de la nappe (Kervazo et Laville, 1988). Les macrocristaux de gypse sont peut-être de néoformation et/ou remaniés sur les formations mio-pliocènes et les dépôts hydroéoliens pléistocènes des Dhras laghmas-ash-Shraif. Le sel blanchâtre, diffus et lité indique l'assèchement total d'al Kalbiyya.

IV- LES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES DES RIVES SUD ET SUD-EST D'AL KALBIYYA : LE POIDS DES ENVIRONNEMENTS LOCAUX

Quatre sondages à la tarière à main (T57, T58, T59 et T62), profonds de 3,2 m à 4,6 m, ont été effectués sur les rives sud et sud-est de l'enclave d'al Kalbiyya. Le choix de leurs sites d'implantation est guidé en fonction de :

(1) l'hypothèse de la variété des provenances de la matière permettant d'y saisir le signal local et/ou lointain des dynamiques, dans une zone caractérisée par la multiplication des sources d'alimentation sédimentaire (T57, T58, T62) ;

(2) l'existence des sources naturelles, laissant supposer la question de savoir si cet espace dispose des caractéristiques particulières des remplissages sédimentaires (T59) ;

(3) la recherche des niveaux lithostratigraphiques aux *Cerastoderma glaucum*, comparables à ceux de la falaise lacustre reconnue par Karray en 1993 à Dhra Zmenka, sur 3 m de hauteur. Aujourd'hui la forte emprise humaine des bordures de la sebkha n'a laissé aucune trace de surface de ces bio-marqueurs morpho-stratigraphiques (T57, T59) ;

(4) la présence de deux sondages profonds, effectués par DRH en 1968, dans le secteur d'ech Cherachir. Ils signalent l'existence des « niveaux fossilifères » à 43 m d'altitude et à 3 m de profondeur. Les références géographiques (X, Y et Z) de ces niveaux

sont d'un grand intérêt paléoenvironnemental et morphopaysager. Elles permettraient de reconstituer l'ancienne extension du plan d'eau et des rivages lacustres.

Malgré la complexité de l'organisation latéro-verticale des dépôts, ces tarières ont révélé la prédominance de deux catégories de faciès sédimentaires (FEA, FCV). Un trait essentiel caractérise ces tarières ; c'est l'absence des niveaux-jalons au *Cerastoderma glaucum*. On examinera les tarières T58, T59 et T62 jugées les plus représentatives du secteur. Seule la tarière T59 et en partie la tarière T58 ont fait l'objet d'une analyse sédimentologique détaillée.

IV-1- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)

Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire est reconnu sur les trois tarières T58, T59 et T62. Il totalise trente séquences bien différenciées et épaisses de 5 à 53 cm.

IV-1-1- Caractérisation sédimentologique du faciès

Des remplissages grossiers, lités et hétérogènes caractérisent le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire. Il s'agit de **sables limoneux, de limons sableux, de sables, de limons et de limons argilo-sableux**. Leurs caractéristiques sédimentologiques (Tab. 3) rappellent celles du même faciès reconnu sur les rives nord et est.

Séquence lithostratig.	Teneur en CaCO3 (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie				Granulométrie			Indices granulométriques		
				SE	EL	EM	RM	< 2µm	2 à 50 µm	50 à 2000 µm	So (Trask)	Moyenne Mz	Médiane µm
T58-21	20,2	2.5Y 5/2	1,4	20	48	28	4	4,6	3,18	92,22	1,59	1,56	330,20
T58-20	20,6	2.5Y 5/3	1	28	44	28	0	15,9	18	66,1	4,66	4,65	120,20
T58-19	21,7	2.5Y 6/4	0,9	24	40	28	8	16,5	12,7	70,8	5,62	4,25	188,60
T58-18	22,1	2.5Y 5/3	2	20	44	28	8	16,4	14,1	69,5	5,88	4,20	175,10
T58-17	20,2	2.5Y 5/3	1,2	28	40	24	8	2,69	2,54	94,77	1,67	1,51	330,22
T58-16	22,8	2.5Y 6/4	3,2	32	44	16	8	3,89	4,92	91,19	1,45	2,36	203,80
T58-15	20,2	2.5Y 5/3	1,2	28	40	24	8	2,69	2,54	94,77	1,67	1,51	330,29
T58-14	21,1	5Y 6/3	5,3	24	44	28	4	14,3	11,2	74,5	3,52	3,85	266,30
T58-13	20,2	2.5Y 6/4	1,2	28	40	24	8	2,69	2,54	94,77	1,67	1,51	330,24
T58-12	22,8	2.5Y 6/4	3,2	32	44	16	8	3,89	4,92	91,19	1,45	2,36	203,84
T58-11	20,2	2.5Y 6/4	1,2	28	40	24	8	2,69	2,54	94,77	1,67	1,51	330,28
T58-10	22,4	5Y 7/4	3,4	28	48	24	0	6,53	10,57	82,9	1,59	3,13	154,60
T58-9	20,2	2.5Y 6/4	1,2	28	40	24	8	2,69	2,54	94,77	1,67	1,51	330,25
T58-8	22,1	2.5Y 6/4	2,8	28	48	20	4	2,06	2,35	95,59	1,59	1,29	484,10
T58-7	24,3	2.5Y 6/4	3,4	28	48	24	0	63,30	36,70	0,00	2,92	9,99	330,21

Tab. 3 : Caractéristiques sédimentologiques des dépôts fluviatiles d'épandage alluvionnaire reconnus sur la tarière T58 (rive sud-est d'al Kalbiyya)

Neuf séquences surtout de la partie inférieure de la tarière T58 et la séquence S3-T59 montrent l'intercalation des lits sablo-quartzeux, des amas friables, des graviers et des cailloux calcaires. Des horizons fins noirs et noirâtres s'intercalent dans les séquences S2, S11-12, S14-16-T58 et S13-T62. Les séquences S1 et S2-T59 renferment des lits (2-10 mm) grisâtres et gris blanchâtres. Du sel blanc laminaire, en taches ou pulvérulent, est observé dans les séquences S17-19-T58 et S10-T62. Des microcristaux de gypse dispersés dans les séquences S9, S14-15-T58 et S11-T62 passent à des macrocristaux fortement concentrés dans les strates S11-12-T59 et S10-T62. Des horizons discontinus d'oxydes de fer s'intercalent dans les séquences S16-T58, S3-T59 et S11-T62. La séquence S17-T58 a montré des traces diffuses de charbon. Des racines ont été observées dans les séquences S11 et S13-T62.

IV-1-2- Signification morphodynamique des sédiments

L'indice de tri, la médiane, les lits sablo-quartzeux, les graviers et les cailloux calcaires indiquent la domination des dynamiques actives avec éventuellement un mélange de sédiments alluviaux et de colluvions d'apports latéraux sur les versants. Les matériaux sont d'une provenance proche prépondérante. Ils correspondent pour l'essentiel aux sédiments de progradation distale des cônes d'épandage des oueds des confins méridionaux de l'hydrosystème. La plupart des séquences présentent les caractéristiques de dépôts issus d'une suspension de fond et d'un transport par roulement. L'accumulation est effectuée en mode libre (Fig. 16). Pendant les grandes ou vigoureuses crues, la forte turbulence dépose les matériaux grossiers, suivis par les éléments plus fins issus de la suspension.

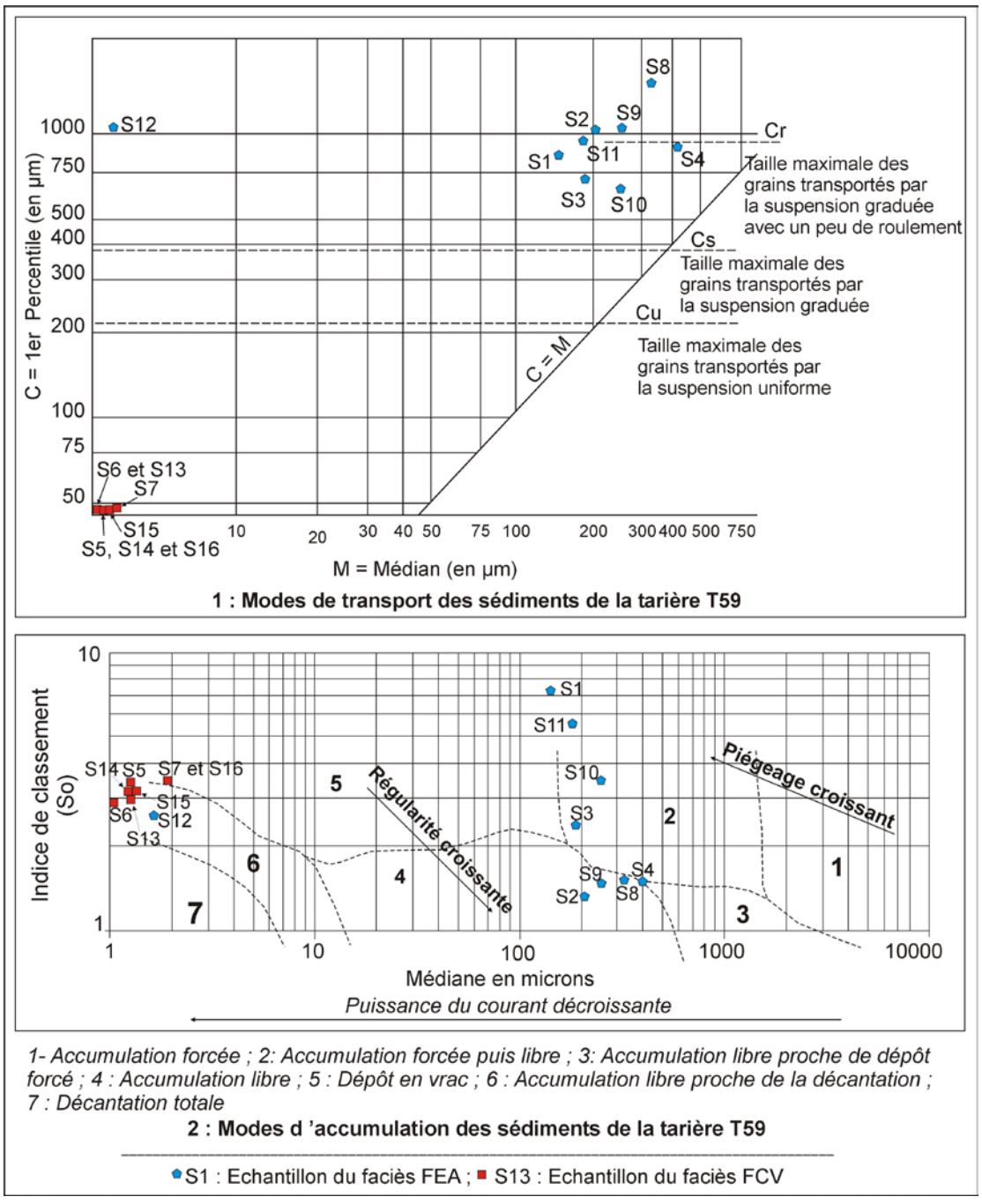


Fig. 16 : Mécanismes morphodynamiques de transport et d'accumulation des sédiments de la tarière T59 (rive sud d'al Kalbiyya)

Les sédiments des séquences S1, S3-4, S8, S10-11, S20-T59 et S14, S19-T58 sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et correspondent essentiellement aux dépôts de crues brèves. L'accumulation est en vrac et forcée puis libre de décrue (Losson et Corbonnois, 2006). La tarière T62 présente des remplissages plus fins. Elle explique un granoclassement latéral de dépôts vers les zones les plus internes de la sebkha. Elle peut aussi témoigner d'une origine lointaine prépondérante des sédiments. Les lits argilo-limoneux bruns, interrompant la masse limono-sableuse et sablo-limoneuse des séquences S3, S9-T58 et S11-T62, correspondent à des dépôts de débordement ou à des laisses de crues, décantées peu après la descente des eaux.

Le dépôt enregistre les conséquences d'alternance des cycles inondation/exondation. La couleur noire, noirâtre, grisâtre, gris blanchâtre de certains horizons et lits fins, l'oxydation du dépôt et la présence de sels attestent des évolutions post-dépôt des sédiments en milieu réducteur ou aéré (Vizier, 1974, 1984 ; Kaemmerer et Revel, 1989 ; Abichou, 2002 ; Schütt, 2000, 2004 ; Bouvlain, 2006).

IV-2- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)

Le faciès de colmatage vaseux regroupe 20 séquences issues surtout de la partie médiane de la tarière T59 et des parties médiane et inférieure de la tarière T62 (*cf.*, Fig. 6).

IV-2-1- Caractérisation sédimentologique du faciès

Le faciès est composé **d'argiles et d'argiles silteuses laminaires**. Ces argiles présentent des caractéristiques sédimentologiques comparables à celles du faciès FCV des tarières T48, T50, T54, T55, T56 et T60 (Fig. 17). Mais, l'analyse lithoséquentielle montre des détails qui font la différence. Des passées (1-2 mm), des taches et des points noirs sont observés dans les séquences S4-T58, S5, S7, S16-T59 et S1, S3, S5-8-T62. Des petits débris de coquilles d'*Helix* marquent les niveaux S4, S6-T58, S6-T59 et S13-T62. Les séquences S5-6-T59 et S4-5-T62, montrent l'intercalation des horizons fins verdâtres, verts olive et olives bleuâtres. Des filaments discontinus de sel blanc s'intercalent dans le remplissage de la tarière T62. Les séquences S6-7 et S13-T59 renferment des amas calcaires friables d'environ 2 à 3 mm de diamètre. Des oxydes de fer diffus, en taches ou en filaments marquent les niveaux S6-7, S16-T59 et S1-2, S4-5, S9-T62. Des racines caractérisent les séquences S14, S16-T59 et S2, S5, S9, 13-T62. Des microcristaux de gypse se dispersent dans les séquences S15-T59 et S1, S3-T62. Les séquences S13-14-T59 sont riches en macrocristaux de gypse. Des boules d'argiles brunes, roulées (1-3 mm) occupent la séquence S16-T59. Des grains de charbon de bois marquent la séquence S13-T62.

IV-2-2- Signification morphodynamique des dépôts

Le faciès est caractéristique des dépôts de petites crues, mis en place par des écoulements intermittents, à faible capacité de transport. Elles indiquent la domination des dynamiques généralement lentes. Les sédiments fins sont transportés par la suspension uniforme et ont été déposés en mode libre proche d'une décantation (*cf.*, Fig. 16). Ils sont d'origine lointaine que les flux d'eau soutenus des oueds de la Tunisie centrale ont pu maintenir en mouvements sur des longues distances. Ils peuvent aussi être de provenance proche et correspondre aux dépôts de débordement et d'épandage des oueds descendant les hauteurs at-Twila-Krousiyya.

Les épaisses séquences argileuses (70 cm) du sommet de la tarière T59 peuvent indiquer des montées en crues successives sur les marges les plus externes de la sebkha. Elles peuvent traduire aussi un enregistrement local des dynamiques des sources de Ghnam, al Gas'a, an-Nkhal et al Magroun. Ces sources ont pu favoriser l'extension des secteurs palustres propices à la stagnation des eaux et à la décantation des lamines de sédiments fins.

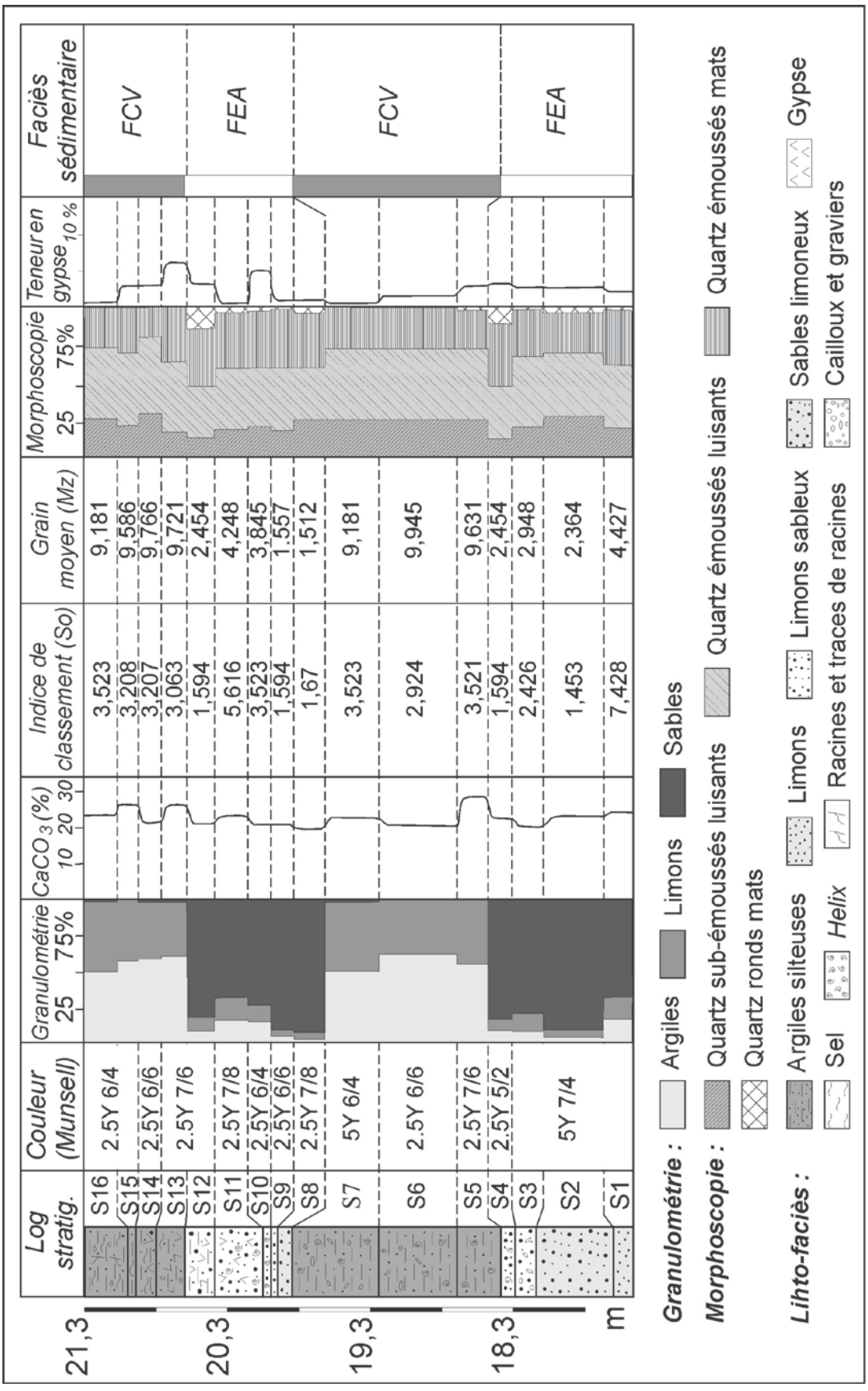


Fig. 17 : Caractéristiques sédimentologiques des séquences lithostratigraphiques de la tarière T59 (rive sud d'al Kalbiyya)

IV-3- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)

Une seule séquence (S5), épaisse de 43 cm et issue de la partie inférieure de la tarière T58, représente le faciès fluviatile aux lits alternés grossiers et fins.

IV-3-1- Alternance des paires de lits aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Le dépôt montre la **succession des lits millimétriques de sables** brun jaunâtres clairs (2.5Y 6/4) **avec des passées centimétriques d'argiles ou d'argiles limoneuses** brun grisâtre (2.5Y 5/2). Les argiles analysées sont modérément calcaires et peu gypseuses. Elles possèdent un tri moyen, une très faible médiane (1,59 µm) et un grain moyen dans les argiles granulométriques. Leur distribution granulométrique est hyperbolique. Des fragments et des petits entiers de coquilles d'*Helix* et des petits amas (2-3 mm) calcaires et gréseux se mêlent aux sables. Les quartz montrent un aspect émoussé luisant dominant (52%).

IV-3-2- Implications morphodynamiques du faciès

Le faciès indique la superposition, pendant une grande crue, de deux phases différentes de la morphodynamique. La première phase est de début ou du maximum d'épisodes de crue. Elle est responsable de la mise en place des sables, quand la turbulence a une compétence suffisante pour faire déplacer les matériaux grossiers sur des longues distances. Les mécanismes morphodynamiques rappellent ceux du même faciès des tarières T50, T55 et T56. La seconde phase est de décrue. Lorsque la turbulence se réduit et l'écoulement subit une réduction de compétence, les sédiments fins issus essentiellement de la suspension uniforme se déposent par décantation.

La succession des paires de lits grossiers-fins peut traduire, au moins saisonnièrement, une certaine rythmicité des dynamiques, des conditions et du fonctionnement hydrosédimentaire. L'association des fragments de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers peut indiquer un environnement de vie et de dépôt de type fluvio-marécageux, sur les marges supratidales d'al Kalbiyya.

V- LES REMPLISSAGES DU FOND D'AL KALBIYYA : PREDOMINANCE DES SEDIMENTS D'ORIGINE ESSENTIELLEMENT LOINTAINE

Les remplissages du fond d'al Kalbiyya sont étudiés grâce à la réalisation de **deux sondages à la tarière à main**. Le premier sondage **T53**, profond de 305 cm, a été implanté sur la partie nord du centre de la sebkha. Le second sondage **T49**, de même profondeur, a été réalisé dans la partie centre méridionale de l'ombilic, sur les marges septentrionales du domaine actuel du chott (*cf.*, Fig. 6).

L'examen lithoséquentiel des tarières, couplé à des analyses détaillées de la sédimentologie ont permis l'inventaire d'une succession de trente-quatre séquences lithostratigraphiques et la définition de trois types de faciès (FVD, FGF, FEA) qui ont montré une répartition spatiale différentielle.

V-1- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)

Le faciès de colmatage vaseux est le faciès le plus caractéristique du fond d'al Kalbiyya, puisqu'il représente plus de 59% des archives sondées. Il regroupe quinze séquences de la tarière T53 (S1-5, S9, S11-19) et six séquences de la Tarière T49 (S1-2, S5-6, S14-15).

V-1-1- Un faciès aux caractéristiques sédimentologiques généralement homogènes

Des séquences épaisses de 8 à 46 cm et composées d'**argiles et d'argiles silteuses laminaires**, caractérisent le faciès de colmatage vaseux. Elles sont marquées par la forte présence des taches et des horizons fins (1-2 mm) et parfois discontinus d'oxyde de fer et par l'absence de tout individu malacologique. Le dépôt est de couleur vert olive pâle (5Y 6/4 et 6/3), jaune pâle (5Y 7/3), brun jaunâtre (2.5Y 5/3) et brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4). Ses caractéristiques sédimentologiques (Tab. 4) sont comparables à celles du faciès FCV précédemment décrit.

La séquence S5-T49 renferme des amas calcaires. Des graviers d'argiles et d'argiles sableuses oxydées, brunes et brunes verdâtres sont observées dans les séquences S1, S14-T49 et S5, S11, S14, S16-18-T53. Des microcristaux de gypse et de sel diffus et en filaments et discontinus marquent les séquences S14-15-T49 et S9, S11, S17-19-T53. Des horizons et des taches diffuses de couleur noire s'intercalent dans la masse de certaines séquences. Des racines sont observées dans les séquences S14-15-T49 et S5, S12 et S19-T53.

Séquence lithostratig.	Teneur en CaCO3 (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie					Granulométrie			Indices granulométriques		
				NE	SE	EL	EM	RM	< 2µm	2 à 50 µm	50 à 2000 µm	So (Trask)	Moyenne (Mz)	Médiane (µm)
S19-T53	28,38	2,5Y 5/3	9,40	0	24	52	24	0	57,30	42,40	0,30	3,209	9,677	1,35
S18-T53	27,52	5Y 6/3	3,73	0	32	52	16	0	55,60	44,20	0,20	3,363	9,586	1,46
S17-T53	27,52	5Y 6/3	2,16	0	28	48	24	0	57,30	42,70	0,00	3,209	9,721	1,36
S16-T53	30,1	5Y 6/3	1,88	0	20	52	28	0	50,60	49,20	0,20	3,363	9,362	1,79
S15-T53	30,53	5Y 6/4	0,64	0	32	52	16	0	49,90	50,00	0,10	3,523	9,228	1,84
S14-T53	31,82	5Y 6/3	0,82	0	28	48	24	0	49,20	50,40	0,40	3,524	9,181	1,90
S13-T53	28,81	5Y 6/4	3,38	0	24	48	28	0	55,50	44,50	0,00	3,208	9,587	1,48
S12-T53	24,94	5Y 6/3	0,77	0	32	52	16	0	56,00	43,80	0,20	3,062	9,631	1,47
S11-T53	24,08	5Y 6/3	3,16	0	24	52	24	0	60,00	39,80	0,20	2,790	9,766	1,30
S9-T53	27,95	5Y 6/3	2,31	0	28	52	20	0	60,60	39,40	0,00	3,062	9,856	1,22
S5-T53	27,09	5Y 6/4	3,82	0	28	48	24	0	65,70	34,30	0,00	3,060	10,170	0,86
S4-T53	24,51	5Y 6/3	0,10	0	32	52	16	0	58,90	41,00	0,10	2,924	9,766	1,35
S3-T53	24,295	5Y 7/3	3,41	0	28	48	24	0	63,30	36,70	0,00	2,925	9,990	1,08
S2-T53	25,37	5Y 6/4	0,31	0	24	48	28	0	63,00	37,00	0,00	2,789	9,901	1,15
S1-T53	28,81	5Y 6/4	0,88	0	28	48	24	0	58,70	41,30	0,00	2,790	9,675	1,38

Tab. 4 : Le faciès de colmatage vaseux du fond d'al Kalbiyya (T53): organisation lithoséquentielle et caractéristiques sédimentologiques

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

V-1-2- Mécanismes et conditions de mise en place et d'évolution post-dépôt des sédiments

Les sédiments fins sont des dépôts de crues, mis en place par des écoulements intermittents et à plus au moins faible capacité de transport. À son entrée, al Kalbiyya est alimentée par plusieurs défluents qui coulent en nappes peu profondes et déposent en mode libre proche d'une décantation les sédiments fins, issus de la suspension uniforme. Les laminations peuvent indiquer une certaine rythmicité du colmatage vaseux, des dynamiques et des événements hydropluviométriques. La forte teneur des argiles en carbonates (24-32% de $CaCO_3$) peut certifier une forte mobilisation des calcaires dans le bassin versant (Abichou, 2002).

Les sédiments archivent les signes d'une évolution post-déposionnelle en contexte hydromorphique puis « évaporatique ». Les lits gris et gris olive, les horizons et les taches noirs et d'oxyde de fer, les sels et le gypse, l'attestent. Les racines expliquent des reconquêtes des parties avancées du fond par une végétation, vraisemblablement halophile.

Elles témoignent de l'évolution des limites aléatoires du domaine de chott en fonction de la fluctuation de la composition chimique du sol.

V-2- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)

Onze séquences lithostratigraphiques, épaisses de 225 cm, correspondent au faciès d'alternance des lits grossiers-fins. Elles sont surtout issues des parties inférieures et médianes des tarières T53 (S6-8, S10) et T49 (S3-4, S7-10, S13).

V-2-1- Caractérisation sédimentologique du faciès

Le dépôt se distingue par un agencement stratigraphique répétitif **des lits centimétriques d'argiles et d'argiles silteuses** vert olive pâle (5Y 6/4 et 6/3), jaune terne (2.5Y 6/3) et brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4), qui viennent **au-dessus des passées millimétriques (1 à 15 mm) de sables, d'argiles sableuses et de limons sableux**. Ces passées sont oxydées et de couleur jaune pâle (5Y 7/4), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4) et brun vert olive clair (2.5Y 5/4). Généralement, le dépôt est modérément à fortement calcaire et peu à modérément gypseux (Fig. 18). Il possède un tri moyen à assez bon et des distributions granulométriques de forme hyperbolique et parabolique.

Les séquences S3, S8-10-T49 renferment de petits amas de calcaire crayeux et gréseux. Des horizons fins (1-2 mm) et des taches d'oxyde de fer s'intercalent dans les strates S3-4, S7, S9-10-T49 et S8, S10-T53. Dans les séquences S4, S7-8-T49 et S10-T53 apparaissent des graviers argileux et sableux de 2 à 5 mm de diamètre. Des horizons millimétriques et discontinus du sel banc et des microcristaux de gypse sont observés dans les séquences S8-10, S13-T49 et S6, S10-T53. Les trois séquences de la partie médiane de la tarière T53 montrent des graviers calcaires et gréseux dans une matrice saleuse et sablo-limoneuse. Des lits fins grisâtres et gris olive s'intercalent dans les strates S7 et S9-T49. Les séquences S9-T49 et S7-8-T53 ont montré des racines et des grains de charbon de bois.

V-2-2- Signification morphodynamique du faciès

L'agencement des dépôts en binômes de lits grossiers et fins rappelle celui du faciès FGF reconnu sur les tarières T50, T55, T56 et T58. Les lits sableux correspondent à une accumulation de début ou pendant le maximum des épisodes de crue, lorsque les flux d'eau ont une compétence suffisante pour charrier les matériaux les plus grossiers d'autant plus loin vers le centre d'al Kalbiyya. Les argiles sont des dépôts de décrue, quand les flux d'eau subissent une réduction de leur compétence et capacité de transport.

Les amas calcaires crayeux et gréseux, les graviers calcaires et gréseux et le gypse peuvent être d'origine détritique et indiquent des remaniements et d'importants apports latéraux sur les versants. Les lits grisâtres et gris olive, les taches et les horizons d'oxyde de fer, le sel, les microcristaux de gypse et les boules d'argile et de sable font appel aux mêmes environnements sédimentaires, conditions et processus d'évolution post-dépôt des sédiments du faciès FCV reconnu sur les rives d'al Kalbiyya. Celle-ci a connu alors des cycles inondation/exondation.

V-3- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)

Sur 23 cm d'épaisseur, seule la tarière T49 a recoupé deux séquences (S11 et S12) qui caractérisent le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire.

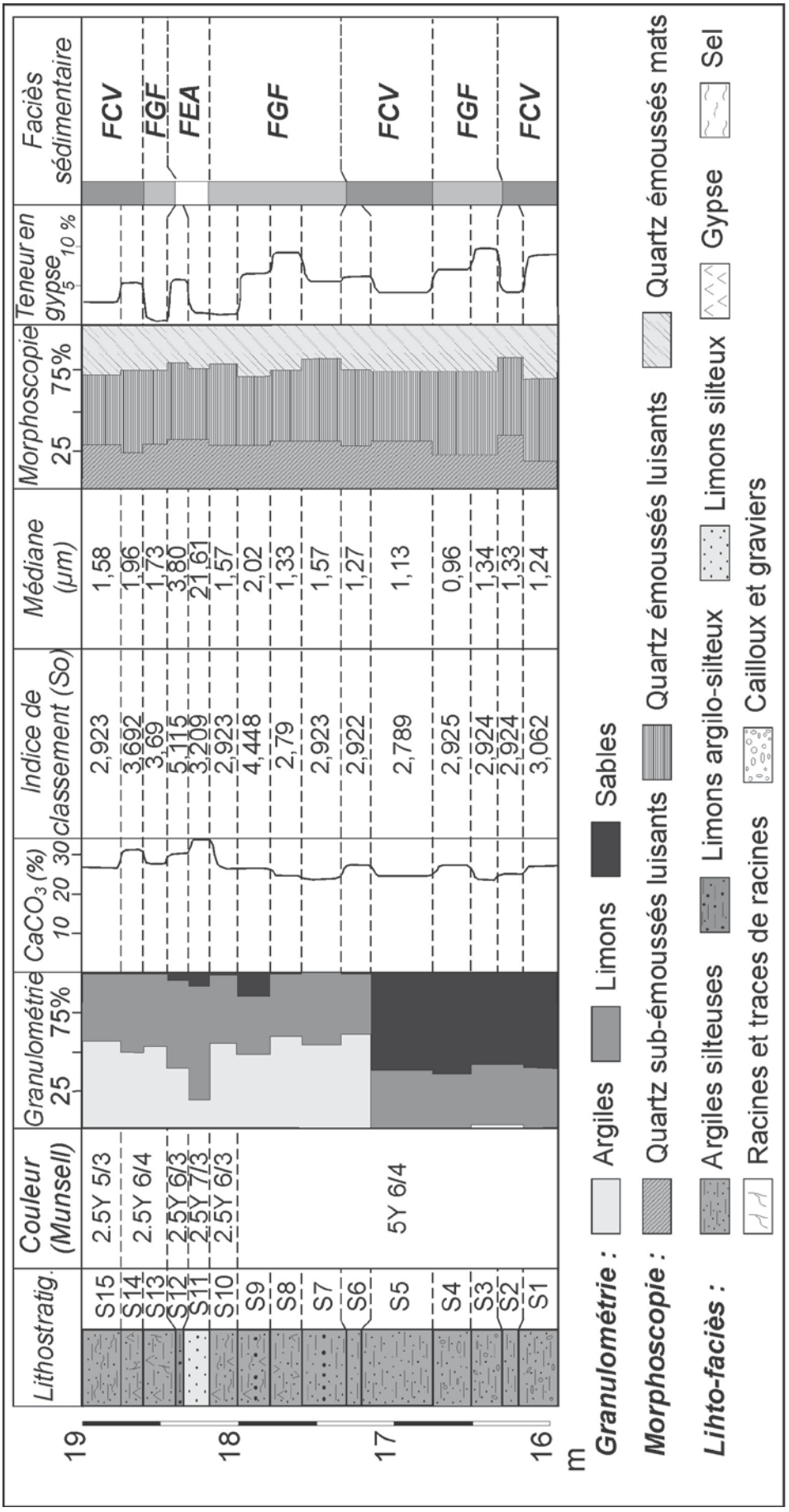


Fig. 18 : Faciès et caractéristiques sédimentologiques du remplissage sédimentaire de la tarière T49 (le centre méridional de l'ombilic d'al Kalbiyya)

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

V-3-1- Deux séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Les deux séquences S11 et S12-T49 correspondent à **des limons et des limons argilo-silteux** fortement calcaires (30,5-35-% de $CaCO_3$) et peu à modérément gypseux. Elles sont de couleur jaune clair (2.5Y 7/3) et jaune terne (2.5Y 6/3). L'échantillon de la séquence S11-T49 possède un tri moyen, une médiane faible et une distribution granulométrique de forme parabolique. Celui de la séquence S12-T49 est mal classé et présente une courbe granulométrique sublogarithmique et une médiane très faible. La séquence oxydée S11-T49 montre des lits fins (1-3 mm) de couleur grisâtre. Des taches et des horizons discontinus d'oxyde de fer, des filaments de sel blanc et des microcristaux de gypse sont observés dans la séquence S12-T49.

V-3-2- Indications morphodynamiques et traits d'évolution post-dépôt des sédiments

Les limons et les limons argilo-silteux sont des dépôts de crue mis en place par des écoulements à plus ou moins faible capacité de transport. Ils expliquent des épisodes d'épandage alluvionnaire peu actifs surtout de l'oued al Atef dans la partie méridionale d'al Kalbiyya. Les sédiments sont issus de la suspension uniforme et sont déposés en vrac par excès de charge (Fig. 19). La position des échantillons dans la partie gauche inférieure de l'image CM, peut indiquer que les sédiments correspondent à des laisses de crues peu après la descente des eaux.

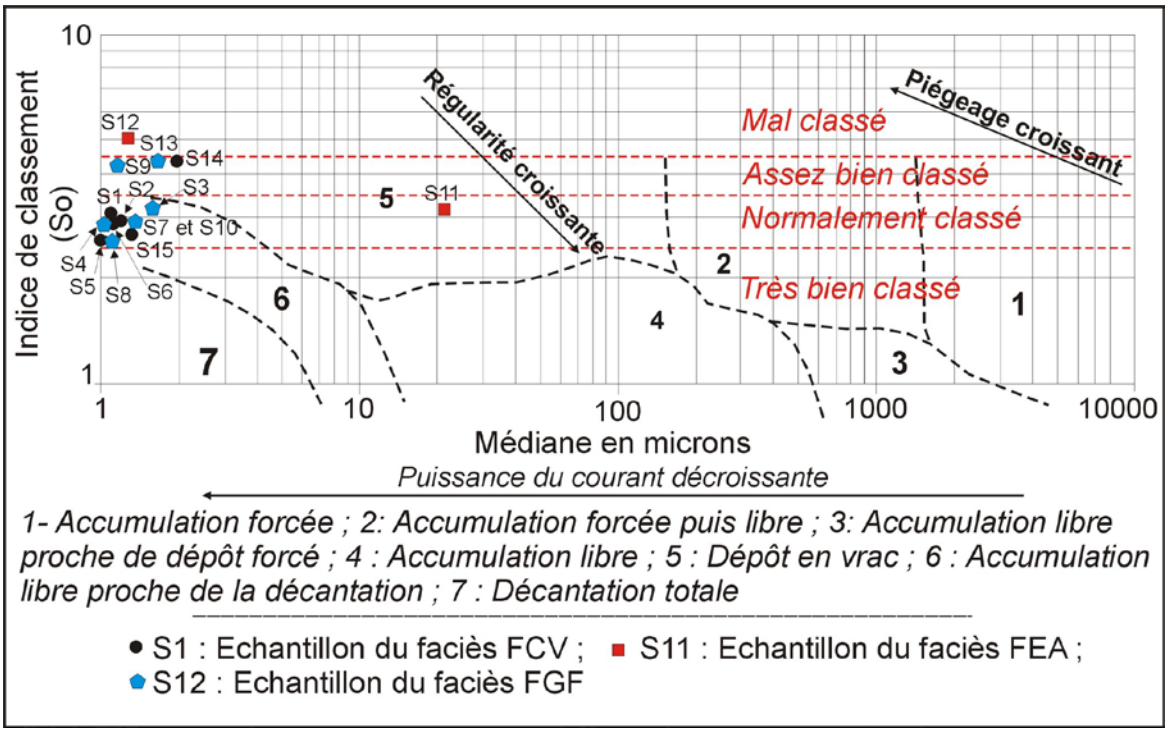


Fig. 19: Modes d'accumulation et typologie des sédiments de la tarière T49 en fonction de leur tri granulométrique et leur médiane

Les deux séquences lithostratigraphiques indiquent des conditions et des mécanismes différents d'évolution post-sédimentaire. Les lits grisâtres de la séquence S11-T49 témoignent d'une hydromorphie temporaire de surface et d'un milieu réducteur (Vizier, 1974, 1984). Les taches et les horizons discontinus de couleur rouille de la séquence S12-T49 correspondent au fer à l'état oxydé. Ils expliquent des sédiments non saturés en eau et une remontée périodique de la nappe permettant la redistribution et la réoxydation du fer

dans le dépôt (Kaemmerer et Revel, 1989). Le pompage évaporatique des eaux interstitielles a conduit à la précipitation du gypse dans les pores et les vides (Gaucher et Burdin, 1974 ; Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). Les filaments de sel témoignent des épisodes d'assèchement et de précipitation pelliculaire des sels en surface.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Les rempliasses sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya sont très variés. Ils montrent des stratigraphies complexes de sédiments très hétérogènes. Ils témoignent des changements spatio-temporels de la provenance des matériaux (proche et/ou lointaine), des dynamiques, des environnements sédimentaires, des conditions et des mécanismes de mise en place et d'évolution post-dépositionelle. Les séquences génétiquement liées ont été regroupées en six grandes catégories de faciès sédimentaires. Ces faciès ont montré une répartition complexe sur les logs lithostratigraphiques. Ils retracent une variation des réponses morphosédimentaires d'al Kalbiyya à l'évolution des dynamiques et des environnements.

Sur la rive occidentale de l'enclave continentale, la matière sondée a rendu accessible, au moins 16 séquences mêlées inégalement aux *Cerastoderma glaucum*. La chronostratigraphie des faciès fluvio-lacustre (FFL) et fluvio-plu-lacustre (FPL) permettra la reconstitution des systèmes particuliers de fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya pendant l'Holocène.

Sur les rives septentrionale et orientale, les archives sédimentaires soulignent la domination de deux ou trois catégories de faciès (FCA, FCV, FEA). Elles mettent en évidence le poids des apports proches et latéraux dans la sebkha et engagent une signification locale prépondérante des dynamiques. Elles permettent de reconstituer l'évolution des dynamiques d'épandage et de colluvionnement, la progradation et l'aggradation des zones d'épandage surtout des oueds tributaires d'al Kalbiyya.

Dans la partie méridionale d'al Kalbiyya, les apports lointains sont prépondérants (FEA, FFG). Ils sont à l'origine de la progradation et de l'aggradation alluviales du vaste cône d'épandage de l'oued al Atef. L'analyse des sédiments contribuent à la connaissance de l'évolution des dynamiques dans les bassins amont et lointains d'al Kalbiyya. Dans le fond se généralise le faciès de colmatage vaseux. Les sédiments d'une provenance lointaine prépondérante, prédominent. Ils soulignent le poids des conditions régionales dans la sebkha.

CHAPITRE II :
DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DURANT L'HOLOCENE : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

Les résultats d'analyses et de caractérisation des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya ont apporté des précisions sur l'organisation lithoséquentielle et spatiale des sédiments et sur leurs significations morphodynamiques et pédologiques. Un zonage en auréoles concentriques caractérise la répartition spatiale des dépôts et des mécanismes morpho-pédologiques. Une approche chrono-spatiale des remplissages permet la reconstitution de l'histoire holocène du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et le calage chronologique de différentes phases majeures de sédimentation et d'évolution des dynamiques et des environnements. Néanmoins, des problèmes méthodologiques ont surgi, rendant difficile la corrélation stratigraphique et l'attribution chronologique des remplissages sédimentaires. En dépit de ces problèmes, la corrélation spatio-temporelle des faciès a permis d'étudier l'évolution des situations hydrologiques, des dynamiques sédimentaires, des milieux et des systèmes holocènes du fonctionnement hydrologique. Elle a permis d'établir une échelle litho-chronostratigraphique de synthèse. Celle-ci montre la succession de quatorze unités sédimentaires dont chacune traduit une phase majeure de sédimentation et un stade de fonctionnement.

Dans ce chapitre on décrit d'abord les particularités de la répartition spatiale des remplissages sédimentaires et les principaux mécanismes et conditions morphodynamiques associés. Ensuite, on précise les problèmes méthodologiques de calage et de corrélation spatio-temporelle des faciès. Puis, on définit les unités sédimentaires d'ensemble des archives prospectées et on établit une nomenclature des systèmes du fonctionnement hydrologique. Enfin, on décrit les phases majeures de sédimentation et les différents systèmes et stades de fonctionnement holocènes.

I- ZONAGE ET PROCESSUS GENERATEURS DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES D'AL KALBIYYA

La répartition des sédiments et la disparité de leurs caractéristiques sont fonction de la configuration du bassin et des changements spatio-temporels des apports, des provenances de la matière, des régimes hydrologiques et des dynamiques dans les bassins versants. Elles dépendent également de l'évolution des facteurs du contrôle local et/ou régional. L'examen de cette répartition permet d'établir **un zonage en trois auréoles ou zones aux limites aléatoires**. Elles sont distinctes par la nature des sédiments, des mécanismes et des milieux de sédimentation (Fig. 20).

I-1- Une première zone supra et intertidale des rives est, nord et ouest

La première zone s'étend sur une bande d'environ 100 à 400 m de largeur. Elle prend plus d'étendue sur les rives orientales, jusqu'à plus de 700 m aux débouchés des oueds. Elle **couvre la zone supra et intertidale de l'enclave** où interfèrent les dynamiques d'accumulation et de remaniement des sédiments. Elle intègre en partie les milieux fluvio-deltaïques et les espaces de progradation et d'aggradation alluviales et colluvio-alluviales des cônes d'épandage des oueds. Elle **coïncide également avec le domaine du Chott**. Les remplissages sédimentaires sont les plus diversifiés de la dépression par suite de l'apport

d'un mélange d'éléments grossiers et fins d'origine proche et lointaine, associés à des flux d'eau de puissances variables.

Les sédiments grossiers prédominent, composés de **sables** et de **sables limoneux** mêlés parfois à des graviers et cailloux calcaires et gréseux. Ils sont essentiellement issus de la suspension du fond et graduée avec un peu de roulement. L'accumulation est surtout forcée, libre et forcée puis libre. **Les dynamiques sont généralement actives**. Dans les petits bas fonds locaux ou pendant la montée en eau dans la dépression, des limons, des argiles et des argiles silteuses d'origine proche et/ou lointaine sont transportés en suspension uniforme et déposés en mode libre proche de décantation. Cette zone externe, marquée par la précipitation du gypse dans la frange capillaire, livre aux vents des matériaux fins susceptibles d'être accumulés surtout sur les rives est d'al Kalbiyya.

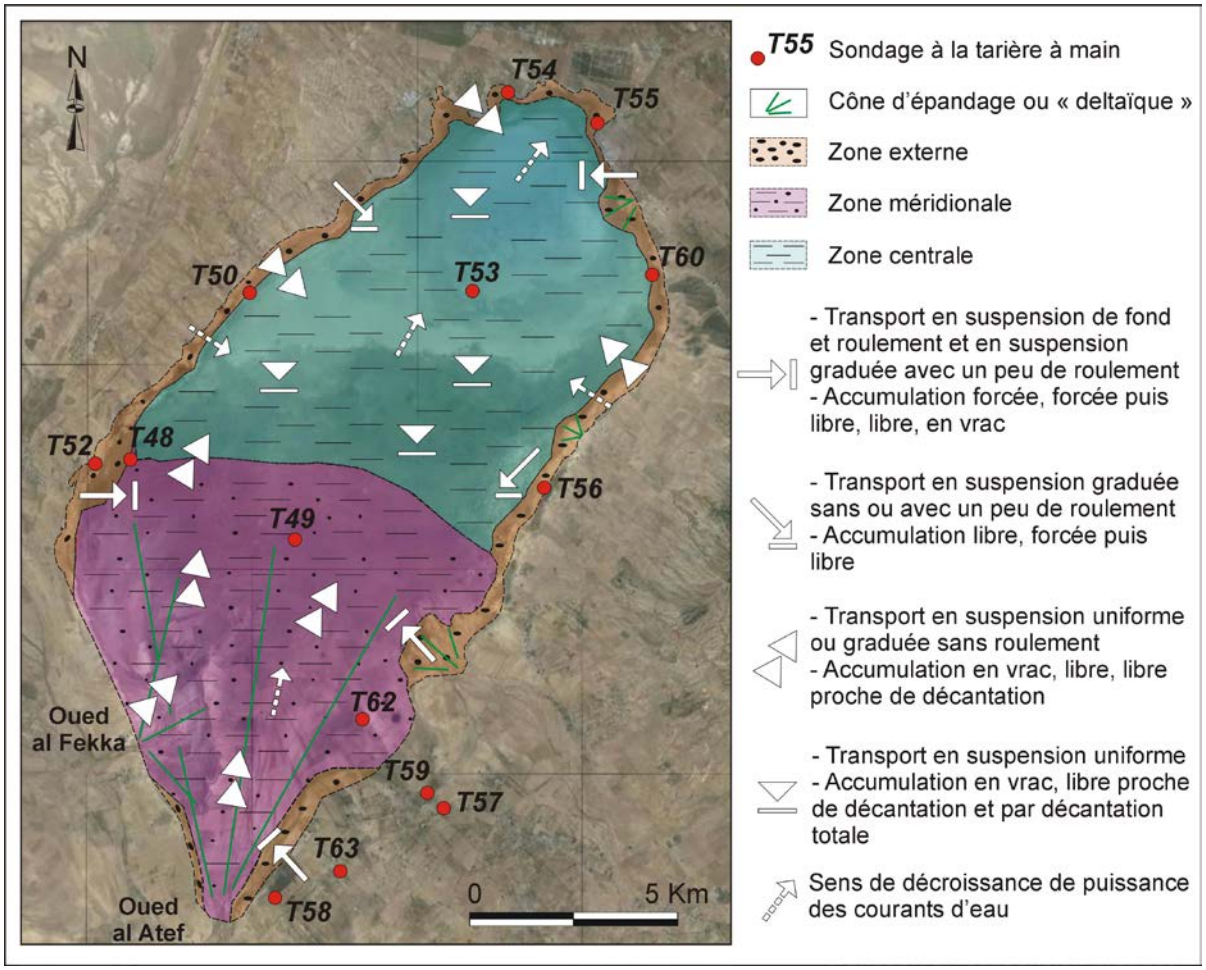


Fig. 20 : Zonage schématique des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya et des mécanismes morphodynamiques associés
Fond cartographique : Image Google, 2012 (Data SIO, NOAA, USA)

I-2- Une deuxième zone méridionale

La deuxième zone occupe la partie méridionale et centro-méridionale d'al Kalbiyya. Elle correspond principalement à la **zone d'alluvionnement et d'épandage de l'oued al Atef**. Les dépôts sont hétérogènes, riches en carbonates de calcium et d'une provenance lointaine dominante avec un peu de sédiments d'apport latéral. Ils se composent d'un mélange d'**argiles,** d'**argiles silteuses,** de **limons,** d'**argiles sableuses**, de **sables** et de **limons argilo-silteux**. Ils correspondent essentiellement aux dépôts de grandes ou brèves et

violentes crues. Les sédiments sont transportés surtout par la suspension uniforme ou graduée sans ou avec un peu de roulement. L'accumulation est en vrac, libre ou libre proche d'une décantation. Les dynamiques sont très à relativement actives. Les archives sédimentaires montrent un agencement prépondérant en binômes de lits de sédiments fins et grossiers indiquant une certaine rythmicité des dynamiques hydro-morphosédimentaires. Les dépôts sont souvent scellés par une mince croûte de sels, probablement de l'halite, et intercalés par des cristaux du gypse de surface et interstitiel.

I-3- Une troisième zone ombilicale

La troisième zone occupe principalement **la partie ombilicale d'al Kalbiyya**. Elle est marquée par l'accumulation d'une matière fine d'**argiles et** d'**argiles silteuses laminaires**, essentiellement **d'une provenance lointaine**. **Les dynamiques sont généralement lentes**. Les matériaux sont transportés par la suspension uniforme ou graduée sans roulement et déposés en vrac ou en mode libre proche de décantation par des écoulements à plus ou moins faible capacité de transport. La zone se caractérise par l'intercalation fréquente d'horizons fins blanchâtres de sels dans les remplissages.

****

En guise de conclusion, la répartition spatiale des sédiments dans la dépression montre un granoclassement latéral décroissant associé à une diminution progressive de l'hydrodynamisme des bordures vers le centre. Les remplissages sédimentaires sont beaucoup plus complexes qu'il n'y paraît. Ils permettent la restitution de deux étapes rythmiques des dynamiques : une première étape sédimentaire comme vecteur d'instabilité de courtes ou de longues durées ; une deuxième étape pédogénique, synonyme de stabilité.

II- UNITES SEDIMENTAIRES ET PROBLEMES DE CORRELATION SPATIO-TEMPORELLE DES FACIES

L'étude de l'évolution spatio-temporelle des remplissages sédimentaires et la reconstitution des systèmes holocènes du fonctionnement hydrologique et des milieux successifs, imposent des corrélations spatio-temporelles des faciès. Souvent, un faciès ne suffirait pas pour caractériser un cortège sédimentaire (Cojan et Renard, 1999), traduisant un système spécifique de fonctionnement et une tendance d'évolution des dynamiques et des environnements pendant une période donnée. On fera la corrélation chronostratigraphique des faciès afin de définir des niveaux lithostratigraphiques et des unités sédimentaires. Ces deniers se distinguent par leurs particularités pédo-sédimentologiques, leur évolution latérale et leurs marqueurs bio et lithostratigraphiques (Cojan et Renard, 1999 ; Hamon, 2004).

Les sondages effectués sont distants et restent peu nombreux. Les corrélations sont délicates, aussi bien pour établir une synthèse stratigraphique des remplissages que pour caler les différentes phases holocènes d'évolution des dynamiques. Le découpage stratigraphique des tarières en unités sédimentaires ou en phases de sédimentation et de fonctionnement pose des problèmes et met en évidence **des différences entre deux parties d'al Kalbiyya**. Une investigation systématique de l'enclave et la recherche des jalons chronostratigraphiques restent nécessaires.

II-1- Les parties ouest, nord et centre-est d'al Kalbiyya : une malacofaune abondante sert des jalons bio-chronostratigraphiques

Sur les rives occidentale, septentrionale et centre-orientale d'al Kalbiyya, et nulle part ailleurs, **la présence de *Cerastoderma glaucum*** est un bon marqueur bioécologique et

chronostratigraphique. Elle a permis de définir des niveaux de référence et de réaliser la corrélation spatio-temporelle des faciès fluvio-palu-lacustre et fluvio-lacustre des tarières **T52, T50, T54, T55 et T60** (Fig. 21.1). Elle a permis également de décrire des provinces faunistiques et des environnements particuliers à forte production biocénotique ou de thanatocénose de la malacofaune et d'apporter des informations supplémentaires sur le changement des milieux et des dynamiques au cours du temps.

Les limites stratigraphiques des unités sédimentaires sont données par l'apparition ou par la disparition des mollusques. Le passage d'une unité à une autre peut se faire progressivement ou brutalement. Les corrélations établies mettent en évidence des tendances évolutives et engagent **la succession au moins de sept unités sédimentaires distinctives**, nommées de la plus anicienne à la plus récente ($UK_{XIV,}$…$UK_{VIII,}$). Des sous-unités ont été également distinguées. Bien que d'épaisseurs variables, les séquences non fossilifères du sommet des tarières T50, T54, T55 et T60, rendent difficile la corrélation des faciès. Elles renseignent sur des nouvelles tendances d'évolution du système d'al Kalbiyya. Latéralement et sur 650 m de distance, les dépôts des tarières T52 et T48 révèlent des discontinuités et une forte variation latérale de faciès. Ils interprètent de grandes variétés de dynamiques, des milieux et des environnements remontant à des phases différentes de l'Holocène.

II-2- La partie centrale, orientale et méridionale d'al Kalbiyya : des problèmes méthodologiques persistent

Dans le centre et sur les bordures orientale et méridionale d'al Kalbiyya, les corrélations spatio-verticales des faciès et leur regroupement en unités sédimentaires, se sont avérés plus compliqués. Les jalons, les bio-marqueurs chronostratigraphiques et les niveaux morphosédimentaires de référence sont absents. La forte variation latérale et/ou la discontinuité de l'enregistrement sédimentaire y concourent. **L'absence de *Cerastoderma glaucum*** permet d'avancer que l'on n'a plus les mêmes conditions, comme par le passé, et qu'al Kalbiyya et son bassin rencontraient de nouvelles tendances d'évolution environnementale et morphogénique.

Compte tenu des profondeurs, des variations des épaisseurs et des provenances de la matière, du granoclassement décroissant dans la distribution latérale des matériaux, il est apparu comme possible de suggérer des corrélations de quelques faciès. Il est aussi possible de hiérarchiser sur le profil de quelques tarières, des phases différentes de la sédimentation, des milieux et de la morphodynamique. Ceci permet, communément et après abstraction des lacunes et des discontinuités sédimentaires, de reconstituer des stades différents du fonctionnement, associés à des situations hydrologiques distinctives.

Sur les tarières T49, T53 et T56 (Fig. 21.2), sept unités sédimentaires se superposent. Par contre, au sud et sud-est de la sebkha, les dépôts des tarières T57, T58, T59 et T62 ne comprennent en abondance que des débris d'*Helix* et des *Helix* entiers. Ces derniers, de très forte tolérance écologique et de faible signification environnementale, ne permettent pas des corrélations biostratigraphiques fiables. Il est ici difficile de marquer une tendance nette dans l'évolution des environnements et du fonctionnent hydrologique d'al Kalbiyya.

II-3- Datations et problèmes de calage chronostratigraphique

Des datations absolues ou relatives peuvent compenser les lacunes stratigraphiques et les difficultés de corrélation spatio-temporelle des faciès. Elles peuvent bien assurément préciser les rythmes de la morphogenèse, l'échelle holocène des variations climatiques et d'évolution des paysages et des environnements.

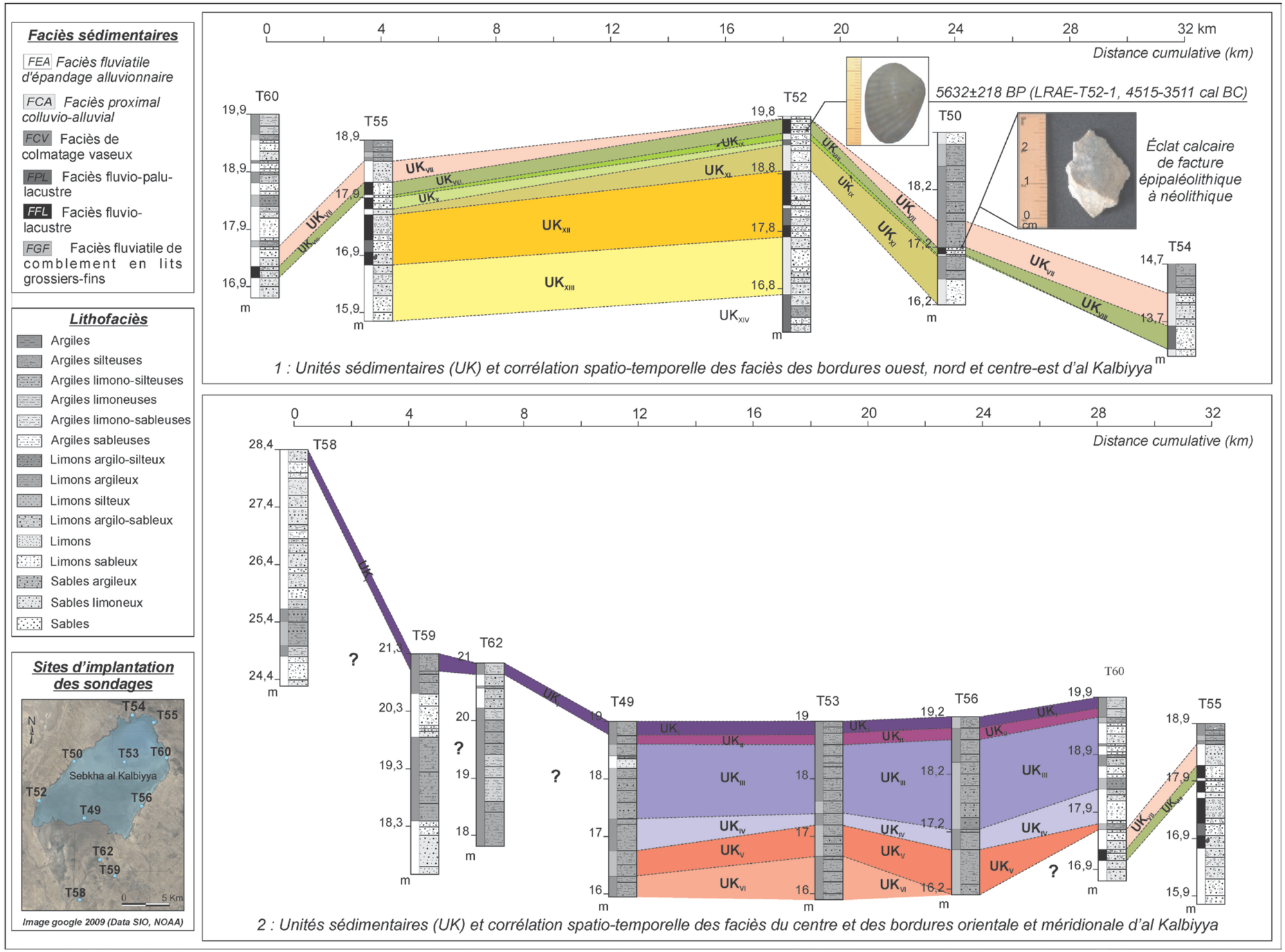


Fig. 21 : Corrélation spatio-temporelle des faciès et unités sédimentaires des remplissages holocènes de la sebkha al Kalbiyya

Une datation au carbone 14 a été effectuée sur les *Cerastoderma glaucum* du sommet du dépôt fossilifère le plus récent de la séquence S24-T52. L'échantillon a été prélevé entre 23 et 30 cm de profondeur (Tab. 5). Il a donné un âge de **5632±218 BP** (LRAE-T52-1 ; 4515-3511 cal BC). Quoique cette datation permette d'affirmer l'âge holocène des niveaux aux *Cerastoderma glaucum*, elle reste insuffisante pour pallier l'incertitude ou l'absence des marqueurs bio-chronostratigraphiques dans le sédiment, ainsi que les problèmes de l'origine de l'échantillon daté, du risque de remaniement des faunes après leur décès (Vella, 1999) et de la représentativité de la séquence calée.

Référence	Matière	Profondeur relative (m)	Profondeur absolue (m)	Age radiocarbone conventionnel (BP)	Age calibré sigma 1 (BC)	Age calibré sigma 2 (BC)
LRAE-T52-1	*Cerastoderma glaucum*	23-30	19,59-18,89	5632 ± 218	4267-3763	4515-3511

Tab. 5 : Calage chronologique de la séquence fluvio-lacustre S24-T52 (rive ouest d'al Kalbiyya)

Cette datation a été complétée par les données préhistoriques et les datations radiométriques disponibles. Les **cailloux calcaires brûlés** (S6-T55 et S17-T 52) et le **petit éclat calcaire** (S6- T50), ont permis **le calage chronologique relatif du faciès fluvio-lacustre.** Ils sont postérieurs, ou à la limite contemporains, aux sites d'occupation épipaléolithique à néolithique des bordures d'al Kalbiyya, **attribués au VIIe et VIe millénaire BC** (communication de S. Mulazzani et L. Belhouchet). En 1993, M.R. Karray a donné aux « *Cardiums* » d'**une falaise lacustre morte**, aujourd'hui non reconnue sur terrain, un âge de **8052±168 BP** (7027-6125 cal BC).

En revanche, aucune datation effectuée ou un élément d'attribution chronologique obtenu pour caler les différentes phases sédimentaires des parties centrale, orientale et méridionale d'al Kalbiyya. On propose alors un agencement des événements dans l'ordre chronologique de leur déroulement. Ainsi, le schéma proposé pour caler les différentes phases de sédimentation et du fonctionnement d'al Kalbiyya ne contredit pas les données recueillies. Elle est même compatible avec le canevas régional de la Tunisie centrale.

III- SYNTHESE STRATIGRAPHIQUE ET DEFINITION DES SYSTEMES HOLOCENES DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA

L'établissement d'une échelle litho-chronostratigraphique complète et précise, associant des archives sédimentaires complexes, est difficile. Ceci est lié aux colonnes lithostratigraphiques obtenues qui sont localement incomplètes, à une forte variation latérale des faciès et à l'absence de nettes coupures et de bons jalons stratigraphiques et d'une série de datations absolues. Pourtant, les résultats obtenus permettent la reconstitution des différents stades holocènes des dynamiques et du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya. **L'échelle litho-chronostratigraphique de synthèse** établie (Fig. 22) montre une succession d'au moins de **quatorze unités sédimentaires** qui se subdivisent parfois en sous-unités. Chacune indique un système particulier de fonctionnement hydrologique. La disparation dans le sédiment des *Cerastoderma glaucum***, depuis environ 5632±218 BP**, permet **la distinction de deux temps différents de l'Holocène**, **précisant des changements de dynamiques hydro-morphosédimentaires et de paléoenvironnements**.

III-1- Le premier temps holocène antérieur à 5632±218 BP

Les données recueillies sur les parties ouest, nord et centre-est d'al Kalbiyya ont rendu possible de discuter et de reconstituer les grandes phases de sédimentation et du fonctionnement hydrologique. On y retrouve des remplissages renfermant une faune abondante de *Cerastoderma glaucum*. Ces derniers dénotent des contextes particuliers de

production biocénotique, mis en place pendant des épisodes de fonctionnement lacustre. **La partie inférieure et médiane de l'échelle litho-chronostratigraphique met en évidence deux systèmes particuliers de fonctionnement hydro-morphosédimentaire : lacustre pérenne et temporaire**. Al Kalbiyya a fonctionné au moins en quatre stades de lacs pérennes aux mollusques séparés par des stades lacustres temporaires.

III-1-1- Le système de lac pérenne ou permanent

Le système de lac pérenne correspond à un étang d'eau douce à peu salée, d'une profondeur décimétrique à métrique (Gautier et Touchart, 1999 ; Cojan et Renard, 1999). Il possède un bilan hydrologique positif (Dussart, 1992 ; Rougerie, 1994) et un régime de drainage souvent exoréique. **Il présente une espérance de vie relativement longue**, de plusieurs d'années, **permettant la prolifération des *Cerastoderma glaucum***. Il résulte des épisodes de maximum d'ennoyages climatiques (Karray, 1990) ou d'une tendance à l'humidification du climat assurant des régimes et des apports hydriques plus réguliers. Des hautes et des basses eaux se succèdent provoquant des variations du volume lacustre et du plan horizontal du lac surtout sur les bordures. Ces dernières les plus soumises aux cycles inondation/exondation, montrent de grands changements spatio-temporels des faciès. Le développement des milieux palustres sur les marges externes du lac permet de définir un système mixte palu-lacustre.

III-1-2- Le système de lac temporaire

Le système de lac temporaire est un milieu plus au moins salé ou saumâtre (Cojan et Renard, 1999) et de faible profondeur, pluridécimétrique, qui s'exprime par la diminution notable des apports hydriques et par la forte irrégularité du régime hydrologique et des écoulements. Les volumes d'eau sont moindres et le plan d'eau s'étale ou se rétracte suivant les variations des apports qui sont très sensibles aux fluctuations mineures du climat (Rougerie, 1994). Le temps de résidence des eaux se compte en quelques mois et exceptionnellement en quelques années à la suite d'exceptionnels événements hydro-pluviométriques ou lors de succession de plusieurs années humides. Le débordement du lac est occasionnel. Quoique temporaire, la disparition du plan d'eau est due à une infiltration lente, à l'évaporation et à l'évapotranspiration (Karray, 1993). Les sels se précipitent et le lac se comporte pour l'essentiel en système semi-fermé (Rougerie, 1994**). Le statut épisodique ou aléatoire ne permet pas un long stationnement des conditions limniques et ne favorise pas une telle production biocénotique**.

III-2- Le second temps holocène postérieur à 5632±218 BP

Dans le centre et sur les bordures orientale et méridionale d'al Kalbiyya, **les archives sédimentaires analysées sont postérieures aux épisodes lacustres holocènes**. Elles annoncent des changements significatifs du fonctionnement d'al Kalbiyya, des dynamiques et des environnements, signalés par la cesse des conditions de lacs permanents et l'interruption de la production biocénotique. Ces archives, **vraisemblablement d'âge holocène moyen et supérieur**, ont aidé à compléter l'échelle litho-chronostratigraphique.

Néanmoins, les colonnes sédimentaires incomplètes des tarières T49, T53, T56, T58, T59, T60, et T60 ont rendu difficile et parfois hasardeux la corrélation des faciès et l'établissement d'une chronostratigraphie correcte des unités sédimentaires. Ceci a empêché de finir convenablement l'échelle litho-chronostratigraphique de synthèse. On propose alors l'établissement des corrélations plus restreintes sur un domaine très limité, reliant seulement les tarières T49, T53 T60 et T55, dont les logs stratigraphiques sont jugés les plus complets. **Sept unités sédimentaires ont été définies**. Elles se succèdent selon le principe de superposition, sans précisions chronologiques.

Profondeur	Litho-stratig.	Faciès et niveaux sédimentaires	Unité sédimentaire	Sous-unité sédimentaire	Tarière	Éléments de corrélation et de calage chronostartigaphiques	Stade et système de fonctionnement hydrologique	Essai de corrélation
0		FCV9 FCA5	UK_{I}		T49, T50, T53, T55, T56, T59, T60	Non trouvés	SK_{I} : Lac temporaire-sebkha et sebkha	
		FCV8	UK_{II}		T49, T53, T56, T60		SK_{II} : Sebkha	
		FEA8FGF5FCV7	UK_{III}	UK_{III-4}	T53, T56, T60		SK_{III} : Lac temporaire-sebkha	
1		FEA7 FCV6		UK_{III-3}	T53, T56, T60			
		FEA6FGF4FCV5		UK_{III-2}	T49, T53, T56, T60			
2		FGF3		UK_{III-1}	T53, T56, T60			
		FCV4 FEA5	UK_{IV}		T53, T56, T60		SK_{IV} : Sebkha	
3		FGF2	UK_{V}		T53, T56, T60		SK_{V} : Lac temporaire-sebkha	
		FGF1 FCV3	UK_{VI}		T48, T49,T53, T56		SK_{VI} : Sebkha	
		FEA4FCA4FCV2	UK_{VII}		T50, T55, T54, T60	*Cerastoderma glaucum 5632±218 BP* Éclat calcaire de facture épipaléolithique à néolithique	SK_{VII} : Lac temporaire	
4		FFL4 FPL4	UK_{VIII}		T52, T50, T55, T54, T60		*SK_{VIII}* : Lac pérenne	Paléolac de Sabkhet Erg el Makhzen, vers 6700 BP (Abichou, 2002)
		FCA3 FEA3	UK_{IX}		T52, T50, T55		*SK_{IX} : Lac temporaire*	
		FFL3FPL3 FCV1	UK_{X}		T52, T55, T60	*Cerastoderma glaucum*	*SK_{X}* : Lac pérenne	
5		FCA2 FEA2	UK_{XI}		T52, T50 T55, T60	Non trouvés	SK_{XI} : Lac temporaire	Paléolacs de la bordure est du Grand Erg oriental entre 8300 et 5500 BP (Petit-Maire et *al.*, 1991)
		FFL2	UK_{XII}	UK_{XII-3}	T52, T55	Cailloux brûlés (VIIe-VIe millénaire BC) *Cerastoderma glaucum*	*SK_{XII-3}*: Lac pérenne	
6		FPL2		UK_{XII-2}	T52, T55	*Cerastoderma glaucum*	*SK_{XII-2} : Interstade palu-lacustre*	
		FFL1		UK_{XII-1}	T52, T55	Cailloux brûlés/*Cerastoderma glaucum*	*SK_{XII-1}*: Lac pérenne	
7		FCA1 FEA1	UK_{XIII}		T52, T55	Non trouvés	SK_{XIII} : Lac temporaire	Falaise lacustre, Dhra ez-Zmenka, bordures sud-ouest d'al Kalbiyya 8052±168 BP (7027-6125 cal BC; Karray, 1993)
m		FPL1	UK_{XIV}		T52	*Cerastoderma glaucum*	SK_{XIV} : Lac pérenne	Paléolac d'ez-Zobbas sud tunisien 8230±70 BP (Petit-Maire et *al.*, 1991)

Lihto-faciès : Argiles · Argiles silteuses · Argiles limono-silteuses · Argiles limoneuses · Argiles limono-sableuses · Argiles sableuses · Limons argilo-silteux · Limons · Limons argileux · Limons silteux · Limons argilo-sableux · Limons sableux · Sables argileux · Sables limoneux · Sables · Cailloux et graviers · Nodules et concrétions calcaires · Galets · Gypse · Sel · *Helix* · Fragments et valves de *Cerastoderma glaucum* · Rosette de gypse · Pierre taillée · Charbon de bois · Cailloux calcaires brûlés · Racines

Faciès sédimentaires : FCA Faciès proximal colluvio-alluvial · FCV Faciès de colmatage vaseux · FEA Faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire · FPL Faciès fluvio-palu-lacustre · FFL Faciès fluvio-lacustre · FGF Faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins

Fig. 22 : Échelle litho-chronostratigraphique de synthèse et systèmes holocènes de fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya

Telle qu'elle est aujourd'hui et **depuis environ 5632±218 BP** et sur la base d'une approche comparative des caractéristiques sédimentologiques des sédiments de surface et des remplissages plus anciens, **al Kalbiyya s'apparente à un lac temporaire ou à une sebkha**. Elle fonctionne aussi en système complexe de lac temporaire-sebkha.

III-2-1- Le système de lac temporaire-sebkha

Pendant les grandes crues ou lors des inondations rapprochées, la cuvette se remplit et se transforme en **lac temporaire parfois étendu et occasionnellement débordant** (crues 1931-1933, 1945, 1969, … ; Despois, 1955 ; Poncet, 1970 ; Barrot, 1972b ; Karray, 1993). La profondeur est variable, d'ordre décimétrique à pluridécimétrique. Sous le contrecoup combiné de la réduction ou de l'arrêt des apports hydriques et de l'évaporation, la tranche d'eau s'abaisse et se rétracte (Joly, 1997). **Une sebkha desséchée et salée s'installe**. **Le semi-endoréisme l'emporte**. Le système de lac temporaire-sebkha fonctionne autant aux rythmes des événements hydro-pluviométriques que saisonniers. Ils se distinguent par la durée de stationnement de l'un des régimes de sebkha ou de lac.

III-2-2- Le système de sebkha

La sebkha salée à sur-salée (plus de 5 g/l ; Rougerie, 1994) **est à sec la plupart du temps**. Elle est souvent le siège d'un pompage évaporatique qui aboutit à la précipitation du gypse et à la formation des croûtes et des horizons de sels en surface et/ou dans la frange capillaire (Schütt, 2000 ; Encyclopedia of Geomorphology, 2006). Sa mise en place et sa durée de stationnement sont fonction des fréquences, de l'intensité et de la durée des périodes sèches et d'exondation. **L'endoréisme est total**.

IV- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA JUSQU'A ENVIRON 5632±218 BP

La partie inférieure et médiane de l'échelle litho-chronostratigraphique de synthèse montre la succession de **sept unités sédimentaires** (*cf.*, Fig. 22). Ces unités couplées aux assemblages faunistiques et aux données pédologiques reconnus sur les tarières des bordures ouest, nord et centre-est de l'enclave ont permis la reconstitution de **sept stades de fonctionnement hydromorphologique**. Pendant l'Holocène inférieur et jusqu'à environ **5632±218 BP** (âge du dépôt lacustre le plus récent), al Kalbiyya a connu au moins quatre phases distinctives de remplissages fossilifères. Ces remplissages expliquent l'installation de **quatre stades de lacs pérennes**, séparés par **trois phases lacustres temporaires**. Un interstade palu-lacustre est identifié.

IV-1- Les stades de lacs pérennes SK_{XIV}, SK_{XII}, SK_X et SK_{VIII}

Les niveaux fluvio-lacustres **FFL1, FFL2, FFL3 et FFL4** et fluvio-palu-lacustres **FPL1, FPL2, FPL3 et FPL4** se distinguent par la prolifération de masses variables de naissains et d'adultes (à plus de 2 cm de taille) de *Cerastoderma glaucum* et par la domination de sédiments d'origine lointaine. Ces niveaux **définissent l'installation de quatre stades de lacs pérennes** (SK_{XIV}, SK_{XII}, SK_X et SK_{VIII}) qui montrent des différences de sédimentation, de dynamique et du contexte des remplissages lacustres.

IV-1-1- Le premier stade de lac pérenne SK_{XIV}

Le faciès palu-lacustre FPL1 de la base de la tarière T52 permet de définir **un premier stade de lac pérenne (SK_{XIV})**. Néanmoins les données d'une seule tarière ne permettent pas de suivre la dynamique sédimentaire d'al Kalbiyya. La cuvette lacustre a connu **un exhaussement d'environ 65 cm**. Les remplissages lités sont des dépôts de crues et indiquent un mélange de sédiments fluviatiles avec des matériaux d'apports latéraux. Les

limons, les limons argileux et sableux lités sont issus de la suspension graduée avec un peu de roulement Ils indiquent la domination des dynamiques relativement actives. L'accumulation est principalement forcée puis libre. L'oxydation du matériel et l'intercalation des passées de couleur vert olive pâle et gris clair témoignent d'une certaine évolution en deux contextes différents d'hydromorphie et d'émersion. Elles indiquent la variation du plan d'eau d'un lac pérenne à marée. Elles peuvent expliquer l'apparition des secteurs palustres ou marécageux, dans les domaines intertidaux. Ici, les eaux sont moins profondes et la malacofaune est peu abondante. La présence des débris de coquilles d'*Helix* suppose le développement d'habitats beaucoup plus secs, en arrière des zones palustres du lac (Haddoumi et *al.*, 2008).

IV-1-2- Le deuxième stade de lacs pérennes SK_{XII}

Le stade lacustre SK_{XII} réunit deux phases de fonctionnement lacustre permanent (SK_{XII-1} et SK_{XII-3}), séparées par un interstade palu-lacustre (SK_{XII-2}).

IV-1-2-1- Le premier épisode lacustre SK_{XII-1}

Le niveau fluvio-lacustre **FFL1** (T52, T55), **épais de 21 cm en moyenne**, définit **l'installation de l'épisode lacustre SK_{XII-1}**. Il explique un milieu de vie et de dépôt généralement énergique, associé probablement à des fortes pluies et/ou à des crues vigoureuses dans le bassin. De sud-ouest au nord-est, les sables riches en valves et en débris de *Cerastoderma glaucum* et en gravillons gréseux passent à des sables limoneux renfermant des tests de *Cerastoderma glaucum.* Les sédiments sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et par la suspension de fond et par roulement. Ils ont été mis en place par des écoulements sélectifs et à forte capacité de transport, permettant un bon tri hydrodynamique. Le sel diffus dans les dépôts est synonyme d'une certaine variation, vraisemblablement saisonnière, du plan d'eau et/ou de l'émergence au moins des marges du lac. Sur les bordures ouest, les apports latéraux sont plus marqués.

IV-1-2-2- Le deuxième épisode lacustre SK_{XII-3}

Le deuxième épisode lacustre SK_{XII-3} signale des changements de modalités et de conditions de mise en place des sédiments (**FFL2**). La sédimentation de plus en plus limoneuse montre des variations verticales et un granoclassement latéral. A l'ouest, des limons sableux et des limons sont déposés en mode libre, forcé puis libre et libre proche de dépôt forcé sur **60 cm d'épaisseur**. Ils correspondent à des sédiments de crues, transités par la suspension de fond et par roulement et par la suspension graduée avec un peu de roulement. Ils ont été mis en place par des flux d'eau à plus ou moins forte capacité de transport. Vers le nord-est, les dépôts passent à des sables puis à des limons sans changement significatif des mécanismes morphodynamiques. Durant cet épisode les phénomènes de saisonnalités semblent plus prononcés. Des émersions sur des larges bandes des zones du balancement des marées et une évaporation prononcée et/ou intense étaient à l'origine des sels, des macrocristaux de gypse, des passées et des nodules oxydés.

IV-1-2-3- L'interstade palu-lacustre SK_{XII-2}

Un remplissage fluvio-palu-lacustre **FPL2 épais de 22 à 31 cm**, sépare les deux niveaux fluvio-lacustres FFL1 et FFL2. Il signale **l'installation d'un interstade palu-lacustre (SK_{XII-2})**. Il explique un abaissement général du niveau d'eau dans le lac, une forte amplitude des zones du balancement des eaux et le développement des milieux marécageux. De larges auréoles palustres sous de faibles tranches d'eau ont couronné le lac. Elles sont marquées par le développement de la végétation et par une forte pédogenèse typique d'un milieu hydromorphe. Les racines abondantes, la couleur grise jaunâtre, noire brunâtre et grise olive du dépôt les attestent.

Al Kalbiyya a connu une accumulation libre de sables et de sables limoneux issus d'une suspension de fond et d'un transport par roulement et d'une suspension graduée avec quelques grains roulés. Vers l'exutoire, l'accumulation passe à des limons. Elle indique un granoclassement latéral des sédiments en rapport avec les variations de la puissance des courants d'eau et de la compétence des écoulements.

Un abaissement du niveau local a pu favoriser les apports latéraux sur les versants vers les marges palustres. Des limons sableux non fossilifères proximaux colluvio-alluviaux (**FCA, S15-T52**) viennent en-dessus du faciès fluvio-palu-lacustre. Ils ont marqué surtout les bordures ouest du lac. Ils témoignent des dynamiques de l'**aggradation** et de la **progradation colluvio-alluviales des zones d'épandage des oueds tributaires d'al Kalbiyya**. L'oxydation des sédiments et la présence des lits fins de sel blanc et des macrocristaux de gypse peuvent indiquer une certaine battance de la nappe et/ou l'exondation puis le pompage évaporatique des domaines palustres.

IV-1-3- Le troisième stade de lacs pérennes SK_X

Le niveau fluvio-lacustre **FFL3** et fluvio-palu-lacustre **FPL3** (UK_X) annonce **la réinstallation d'un nouveau épisode lacustre pérenne SK_X**. Les remplissages sont généralement grossiers et riches en débris de *Cerastoderma glaucum*. Sur les bordures nord et sud-est, les sables et les sables limoneux, épais de **15 cm en moyenne** (FFL3 : S11-12-T55 et S3-T60) sont remarquablement triés et fortement oxydés. Ils ont transité par la suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre pendant de grandes ou vigoureuses crues. Ils témoignent d'une morphodynamique active.

Au sud-ouest, se mettent en place des sables fluvio-palu-lacustres (S23-T52), épais de 10 cm, intercalés des passées quartzeuses millimétriques. Ils indiquent vraisemblablement un mélange de sédiments fluviatiles d'une provenance lointaine avec des matériaux d'apports latéraux. Les sédiments sont charriés au fond par roulement et sont déposés en mode libre proche de dépôt forcé. La sédimentation s'est effectuée sur les marges palustres d'un lac temporairement émergé et marqué par le développement d'une végétation (racines). Au centre-ouest, le remplissage est devenu argilo-silteux, de colmatage vaseux (**FVD1 : S2-3-T50**). Les sédiments fins sont issus de la suspension uniforme et sont déposés en mode libre proche de décantation. L'accumulation s'est effectuée en période de hautes eaux, dans les marges peu profondes et calmes de la cuvette lacustre.

IV-1-4- Le quatrième stade lacustre pérenne SK_{VIII} (5632±218 BP)

Le niveau fluvio-lacustre **FFL4** et fluvio-palu-lacustre **FPL4** marque **le retour d'un épisode lacustre pérenne**. Celui-ci se distingue des phases lacustres précédentes par une forte variation latérale des sédiments, une très forte densité des débris et des valves de *Cerastoderma glaucum* jeunes et adultes et par la présence d'une malacofaune conique de taille millimétrique.

Sur les rives occidentales, le remplissage est sableux et limono-sableux. Il est fortement oxydé et épais de **11 à 27 cm** (S25-27-T52 ; S5-6-T50). Il est mis en place pendant les grandes ou les brèves et violentes crues par des écoulements compétents. Le transport est effectué au fond par roulement et par une suspension graduée avec un peu de roulement. Le mode d'accumulation est libre et libre proche de dépôt forcé. Au site d'implantation du sondage T52, le remplissage fossilifère est recouvert par des alluvions récentes, épaisses de 30 cm en moyenne. Au nord de la localité d'al Bshashma, il affleure en arrière du domaine de chott actuel et s'étale en **une plage ou un estran lacustre très riche en débris et en valves de *Cerastoderma glaucum***.

A l'est et au nord-est, des limons sableux et des sables limoneux (S14-T55 ; S4-T60), épais de **15 cm en moyenne**, comblent les rivages du lac. Les dépôts principalement de grandes crues, indiquent la domination des dynamiques fluvio-lacustres généralement actives. Les sédiments sont issus d'une suspension graduée avec un peu de roulement et d'un transport par roulement. L'accumulation est libre et libre proche de dépôt forcé. Sur les bordures orientales, les apports latéraux sur les versants sont notables.

Au nord et sur les marges du lac, le remplissage passe à des argiles silteuses, épaisses de **40 cm**, aux passées grises noirâtres et riches en racines (**FPL4 ; S2-T54**). Elles indiquent le développement d'un milieu palustre occupé par une végétation vraisemblablement dense. Les sédiments, issus surtout de la suspension uniforme, sont déposés surtout pendant la descente des eaux. Ici, les dynamiques fluviatiles sont lentes.

IV-2- Les stades de lacs temporaires SK_{XIII}, SK_{XI} et SK_{IX}

L'arrêt de la production biocénotique, la nature des sédiments, le caractère de leur évolution post-dépôt et la prédominance d'une provenance proche des matériaux peuvent indiquer le changement du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya, des dynamiques et des milieux. Jusqu'à environ 5632±218 BP, trois stades de lacs temporaires ont entrecoupé le fonctionnement lacustre pérenne.

IV-2-1- Le premier stade de lac temporaire SK_{XIII}

Un niveau de sédiments proximaux colluvio-alluviaux (**FCA1**) et fluviatiles d'épandage alluvionnaire (**FEA1**) entrecoupe les niveaux fluvio-palu-lacustre FPL1 et fluvio-lacustre FFL1. Il annonce **un stade de bas niveau lacustre** et l'évolution d'al Kalbiyya en système de lac temporaire.

L'enclave lacustre s'est comblée de sédiments de forte hétérogénéité spatio-verticale (T52, T55), témoignant d'importantes variations de l'hydrodynamisme. Sur les bordures ouest, des sables limoneux, des limons, des limons sableux et des sables, épais de **8 à 32 cm** (S5-10-T52), se superposent. Les sédiments sont principalement charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et par la suspension de fond et roulement. La turbulence est souvent forte et les flux d'eaux ont eu une compétence suffisante pour le transport des matériaux grossiers. L'enrichissement en matériaux fins pendant la décrue était plus important. Les apports latéraux sur le versant de la barre gréso-calcaire de Dhra as-Satour étaient notables. Le sédiment referme des gravillons et des graviers calcaires et gréseux. La malacofaune est limitée à des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers habitant tout particulièrement les milieux fluvio-deltaïques ou supratidaux du lac temporaire.

Sur la rive nord-est, le remplissage est de plus en plus grossier. Des sables et des sables limoneux aux dragées quartzeuses et aux cailloux et graviers calcaires comblent les marges lacustres sur **environ 1 m d'épaisseur**. Ils sont principalement issus d'une **dynamique fluviatile active de la progradation des cônes d'épandage des oueds**. Les sédiments ont transité par la suspension graduée sans et avec un peu de roulement et ont été déposés en modes libre et forcé puis libre.

Les apports hydriques dans le lac temporaire étaient moins abondants que ceux du stade lacustre pérenne SK_{XIV}. L'abaissement du niveau lacustre, l'assèchement ou la rétraction des eaux vers le centre de la cuvette ont favorisé l'**action éolienne sur les parties exondées et asséchées** (agrégats sableux et argileux roulés des séquences S9 et S10-T52).

IV-2-2- Le deuxième stade de lac temporaire SK_{XI}

L'unité sédimentaire UK_{XI} relie latéralement deux faciès proximal colluvio-alluvial **FCA2** (S20-22-T52 et S1-T50) et fluviatile d'épandage alluvionnaire **FEA2** (S10-T55 et

S1-2-T60). Les dépôts superposent le niveau fluvio-lacustre fossilifère FFL2 et accusent des faits notables de saisonnalité et d'irrégularité des apports hydriques. Ils annoncent **la réinstallation d'un nouveau stade de lac temporaire**.

Les modalités de répartition de sédiments, les mécanismes et les conditions de la morphodynamique rappellent ceux du premier stade de lacs temporaires SK_{XIII}. Des limons sableux contenant des cailloux calcaires, des sels, du gypse et des lamines grisâtres et noires remplissent les bordures ouest sur **environ 45 cm d'épaisseur**. Ils correspondent essentiellement aux dépôts de crues brèves, mis en place dans un milieu agité par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. **A l'est et au nord-est**, des sables limoneux et des limons sableux d'épandage alluvionnaire **(FEA2** ; T60, T55) **exhaussent les marges lacustres de 10 à 35 cm**. Les dynamiques de la **progradation alluviale des cônes deltaïques des oueds tributaires d'al Kalbiyya** (Oued Khaled, oued Dar La'Zib,), étaient actives.

Généralement, les apports latéraux et proches sont loin d'être négligeables. Les régimes hydrologiques sont intermittents et contrastés permettant un mauvais tri hydrodynamique. Le niveau d'eau est variable et le bilan hydrique est souvent négatif, permettant parfois l'évolution du lac temporaire en sebkha desséchée (gypse et sels).

IV-2-3- Le troisième stade de lac temporaire SK_{IX}

L'unité sédimentaire UK_{IX} instaure **un système de lac temporaire, affirmé par l'absence de *Cerastoderma glaucum* dans le sédiment** et par les particularités sédimentologiques d'un remplissage hétérogène.

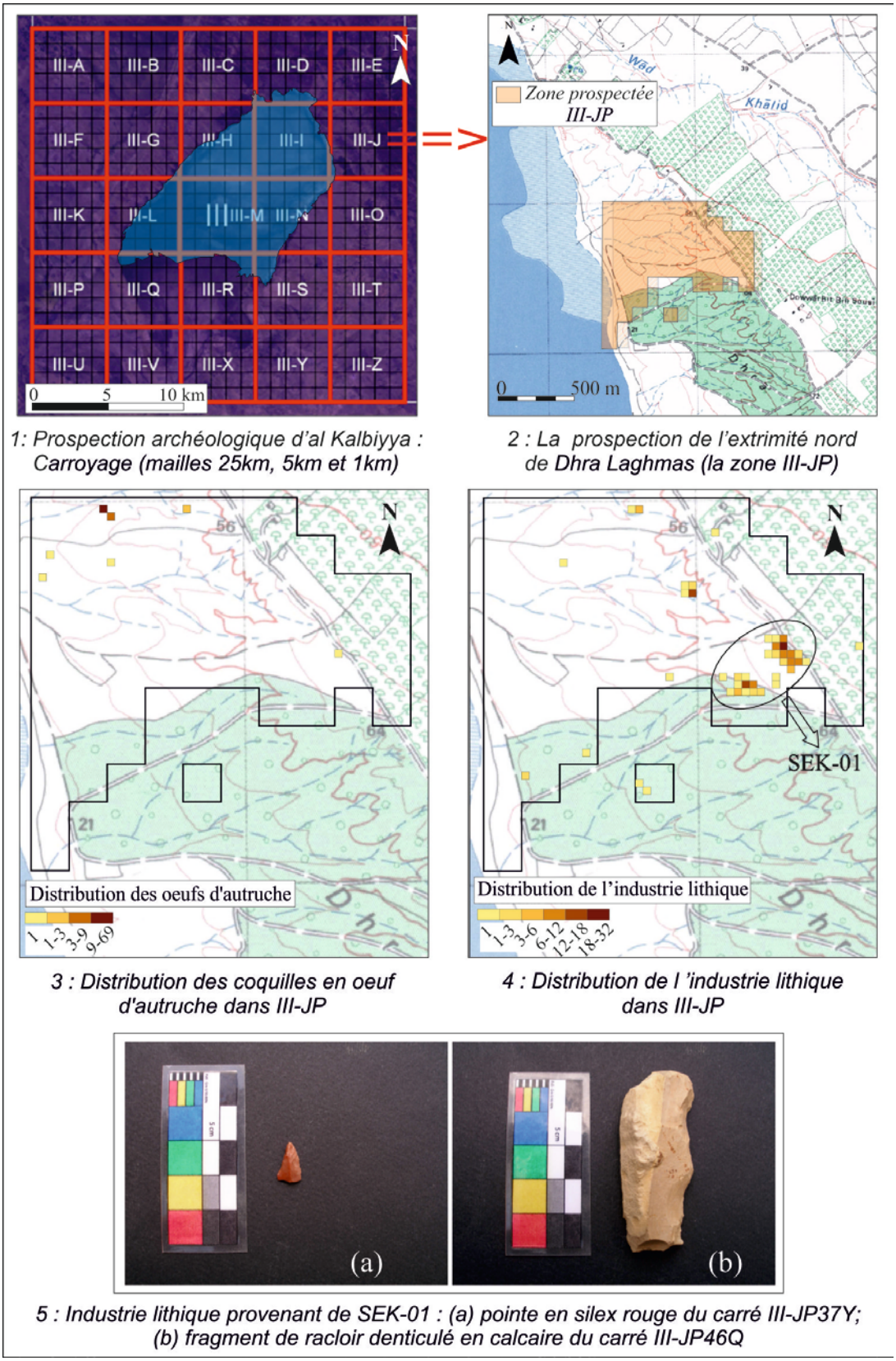
Sur les bordures occidentales, un niveau proximal colluvio-alluvial (**FCA3**, S4-T50, S24-T52), **épais de 3 à 10 cm**, ensevelit les dépôts fluvio-lacustres du stade lac pérenne SK_X. Des limons sableux, nourris de matériaux latéraux grossiers, sont mis en place par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. Ils sont issus d'une suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre et forcé puis libre. Au nord-est, le remplissage passe à des **sables fluviatiles d'épandage alluvionnaire, de quelques centimètres d'épaisseur** (**FEA3** ; S13-T55). Ils sont principalement des dépôts de crues brèves et violentes, mis en place par des écoulements compétents sur les marges intertidales du lac temporaire. Ils sont surtout issus des apports alluviaux de l'oued Lahmar-al Ghuirga. Les **dynamiques fluvio-deltaïques d'aggradation et de progradation des zones distales des cônes d'épandage** sont **relativement actives**. Les mécanismes morphodynamiques précités demeurent les mêmes.

Les apports hydriques, les conditions et les régimes hydrologiques rappellent ceux du stade $SK_{XI.}$ Le plan d'eau est fluctuant comme en témoignent les lits d'oxyde de fer, les débris de coquilles d'*Helix* (émersion, milieu plus sec) et les horizons gris (hydromorphie de surface).

IV-3- Essai de calage et de corrélation chronologiques

Il est difficile d'établir une chronostratigraphie précise de toutes les phases de sédimentation en absence de datations absolues. **Des cailloux calcaires incendiés** ont récoltés sur les sédiments fluvio-lacustres des séquences S6-T55 et S17-T52 des épisodes de lacs pérennes SK_{XII-1} et SK_{XII-3}. **Un éclat calcaire beige de facture épipaléolithique à néolithique** (*cf.*, Fig. 21 ; identification L. Belhouchet, INP) a été prélevé sur la séquence S6-T50 du stade lacustre pérenne SK_{VIII}. Des sites épipaléolithiques et néolithiques longent aujourd'hui les bordures est et ouest d'al Kalbiyya (Karray, 1990, 1993 ; Crema, 2006 ; Bianchi, 2008 ; Fig. 23). L'attribution des cailloux incendiés et de l'éclat trouvés dans ces

sites reste incertaine. **Ces données n'autorisent qu'une chronostratigraphie floue et délicate**.



1: Prospection archéologique d'al Kalbiyya : Carroyage (mailles 25km, 5km et 1km)

2 : La prospection de l'extrimité nord de Dhra Laghmas (la zone III-JP)

3 : Distribution des coquilles en oeuf d'autruche dans III-JP

4 : Distribution de l 'industrie lithique dans III-JP

5 : Industrie lithique provenant de SEK-01 : (a) pointe en silex rouge du carré III-JP37Y; (b) fragment de racloir denticulé en calcaire du carré III-JP46Q

Fig. 23: Distribution des coquilles d'œuf d'autriche et de l'industrie lithique dans la zone prospectée III-JP de l'extrémité septentrionale de Dhra Laghmas-ash-Shraif (D'après Crema, 2006 ; regroupé et légèrement modifié)

La datation radiométrique ^{14}C effectuée sur des valves et des débris de *Cerastoderma glaucum* de la séquence S25-T52 (LRAE-T52-1 ; **5632±218 BP** ; 4515-3511 cal BC) permet d'affirmer **l'âge holocène moyen du sommet du remplissage fossilifère** lacustre d'al Kalbiyya. Elle a permis également d'apprécier l'âge du stade lacustre pérenne SK_{VIII}. D'ailleurs, Karray (1993) a pu dater des « *Cardiums* » d'une falaise lacustre à Draa ez-Zmenka sur les bordures sud-ouest d'al Kalbiyya. L'âge obtenu est de **8052±168 BP** (7027-6125 cal BC). Mais, faute d'une forte emprise anthropique sur les milieux, cette falaise n'a pas été reconnue aujourd'hui sur le terrain.

Le fonctionnement hydrologique de la sebkha actuelle en alternances de lacs pérennes et temporaires paraît s'être déroulé entre 8052±168 BP et 5632±218 BP. Cette fourchette chronologique est très corrélable avec celle des paléosystèmes lacustres reconnus sur tout le sud tunisien. Vers 6700 ans BP, la sebkha Erg el Makhzen a connu une période lacustre, d'émergence des sources et d'approvisionnement régulier (Abichou, 2002). Des paléolacs à *Cerastoderma glaucum* ont été également observés à la bordure est du Grand Erg Oriental (8300-5500 ans BP ; Petit-Maire et *al.*, 1991) et en particulier à ez-Zobbas (vers 8230±70 BP ; 7026-6469 cal BC ; Petit-Maire et *al.*, 1991 ; Ballais, 1991).

V- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DEPUIS ENVIRON 5632±218 BP

Une évolution importante des milieux apparaît à l'examen des archives sédimentaires des parties centre, sud et est d'al Kalbiyya. **Depuis environ 5632±218 BP** (LRAE-T52-1 ; 4515-3511 cal BC), **les sédiments ne contiennent plus de la malacofaune lacustre**, impliquant des modifications des conditions et des environnements sédimentaires.

La corrélation spatio-verticale des faciès a permis de définir sur l'échelle litho-chronostratigraphique **sept autres unités sédimentaires** (UK_{VII} à UK_I ; *cf.*, Fig.22). Elles établissent de nouvelles tendances hydromorphologiques et environnementales. **Al Kalbiyya a fonctionné en une alternance de lacs temporaires et de sebkhas**, **mais sans aucune attribution chronologique précise**. Une lacune et un problème majeur résident dans l'absence de datations absolues permettant de caler les différentes phases de sédimentation et stades de fonctionnement hydrologique depuis la deuxième moitié de l'Holocène moyen.

Parfois, les sédiments ne montrent pas des coupures litho-chronostratigraphiques nettes, permettant d'apprécier une tendance particulière d'évolution des milieux et des environnements sédimentaires. La distinction des discontinuités ou des phases de transition entre deux stades de lac temporaire et de sebkha est alors floue. Al Kalbiyya fonctionne alors en système complexe de lac temporaire-sebkha.

V-1- Le quatrième stade de lac temporaire SK_{VII}

L'unité sédimentaire UK_{VII} rétablit la dynamique sédimentaire des bordures occidentale, septentrionale et orientale d'al Kalbiyya. Elle corrèle des **faciès de colmatage vaseux (FCV2, S7-T50), proximal colluvio-alluvial (FCA4 ; S3-7-T54) et fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA4** ; S15-T55 ; S5-7-T60). **Al Kalbiyya a fonctionné en système de lacs temporaires**.

A l'ouest, des argiles et des argiles silteuses laminaires comblent les marges lacustres sur environ **46 cm d'épaisseur** (FCV2). Le lac recevait des apports lointains et des sédiments fins gypseux issus des formations oligocènes et aquitaniennes de Dhra as-Satour. Les matériaux sont transportés par la suspension uniforme par des flux d'eau intermittents et

à faibles capacité et compétence de transport. Le dépôt est effectué en mode libre proche de décantation pendant la descente des crues dans un milieu relativement calme.

Au nord du lac, le remplissage passe à une succession de séquences sablo-limoneuses et sableuses, **épaisses de 58 cm**. Il contient des dragées de quartz, des gravillons et des cailloux calcaires et des débris de coquilles d'*Helix* (**FCA4**, S3-7-T54). Les sédiments d'une provenance essentiellement proche ont transité par la suspension graduée à proximité de fond avec un peu de roulement. Ils ont été mis en place en mode libre par des écoulements et des ruissellements à forte, à plus ou moins forte capacité de transport.

A l'est et au nord-est, une dynamique prépondérante d'épandage alluvionnaire est responsable de **l'exhaussement alluvial des bordures des lacs temporaires** (FEA4, S15-T55, S5-7-T60). Des limons et des sables limoneux, épais de **37 cm en moyenne** et contenant des graviers gréseux et des débris de coquilles d'*Helix*, sont mis en place pendant les grandes ou brèves et violentes crues. Les sédiments sont issus d'une suspension graduée avec un peu de roulement. L'accumulation est effectuée en mode libre et forcé puis libre en milieux « fluvio-deltaïques ». Les dynamiques fluviatiles sont généralement actives. Il en résulte la progradation et l'aggradation alluviales des cônes d'épandage de l'oued Khaled et des drains de la terminaison septentrionale des Dhras Laghmas-ash-Shraif.

V-2- Les stades de sebkha SK_{VI}, SK_{IV} et SK_{II}

Les unités sédimentaires UK_{VI}, UK_{IV} et UK_{II} relient latéralement les faciès d'émersion, riches en gypse et en sels sur les bordures, aux faciès de colmatage vaseux déposés dans l'ombilic et marqués par une forte oxydation des argiles. Elles **témoignent de l'installation de trois stades de sebkha** (SK_{VI}, SK_{IV} et SK_{II}).

V-2-1- Le premier stade de sebkha (SK_{VI})

Le niveau fluviatile en lits grossiers-fins **FGF1** et de colmatage vaseux **FCV3**, certifie l'installation du **premier stade de sebkha SK_{VI}**. Sur les bordures orientales, un remplissage épais de **20 cm** montre des alternances de lits sablo-limoneux et argileux (**FGF1**, S1-T56). Les sédiments sont principalement des dépôts de grandes ou de brèves crues. Les matériaux les plus grossiers sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre dans un milieu relativement énergique. Les lamines d'argiles sont déposées pendant la descente des eaux, quand la turbulence se réduit.

Sur les bordures occidentales et dans le centre, se généralise un faciès fin de colmatage vaseux (**FCV3**, S1-T48, S1-5-T53 ; S1-2-T49). Des argiles et des argiles silteuses laminaires et d'origine essentiellement lointaine, **comblent l'enclave endoréique sur 20 à 78 cm d'épaisseur**. Le dépôt est issu d'une suspension uniforme et mis en place en mode libre proche de décantation. Les dynamiques sont généralement lentes.

Al Kalbiyya connait des inondations périodiques ou occasionnels en lame d'eau peu profonde, par des ruissellements et écoulements étalés et à plus ou moins faible capacité de transport. L'exondation puis l'assèchement de la sebkha ainsi que la remontée périodique de la nappe, entrainent l'oxydation du matériel et la précipitation des macrocristaux de gypse dans les sédiments. La surface argilo-silteuse, asséchée et craquelée, favorise la déflation éolienne. Des agrégats argileux roulés sont piégés dans le sédiment.

V-2-2- Le deuxième stade de sebkha (SK_{IV})

L'unité sédimentaire UK_{IV} corrèle un faciès de colmatage vaseux (**FCV4**, S9-T53, S3-4-T56), à un faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (**FEA5**, S9-12-T60). Elle annonce **la réinstallation d'un système de sebkha**.

Des argiles et des argiles silteuses laminaires et épaisses de **27 cm en moyenne**, sont mises en place dans l'ombilic et sur les marges nord-est d'al Kalbiyya. Le matériel fin est issu de la suspension uniforme. Il est mis en place pendant les petites crues par des flux d'eau à plus ou moins faible capacité de transport. L'accumulation est libre proche de la décantation. La montée des eaux dans la sebkha a pu assurer l'étalement des matériaux sur une grande étendue. Les dynamiques fluviatiles sont lentes.

A l'est, al Kalbiyya recevait des **matériaux** plus grossiers **d'épandage alluvionnaire, épais de 60 cm**. Des sables limoneux, des limons et des limons sableux sont mis en place en milieux fluvio-deltaïques par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. Les sédiments sont transportés par la suspension de fond et par roulement et par la suspension graduée avec un peu de roulement. L'accumulation est libre, forcée puis libre et en vrac. Au moins saisonnièrement, l'abaissement du niveau d'eau puis l'assèchement de la sebkha entrainent l'apparition des horizons d'oxyde de fer scellant les lamines argileuses. Al Kalbiyya connait également la précipitation du gypse et la formation des planchers pelliculaires de sels couvrant la zone ombilicale (S9-T53, 12-T60).

V-2-2- Le troisième stade de sebkha (SK_{II})

L'unité sédimentaire UK_{II} reconstitue les conditions **d'une sebkha endoréique**. Un remplissage vaseux, homogène et laminaire, intercalé régulièrement de traces d'hydromorphie et d'émersion, prend place sur l'ensemble de la dépression (**FCV8**, S14-T49, S17-T53, S12-T56, S25-T60). Des argiles et des argiles silteuses comblent al Kalbiyya sur **15 à 20 cm d'épaisseur**. Les sédiments, d'origine essentiellement lointaine, ont transité en suspension uniforme par des flux d'eau à faible à plus ou moins faible capacité de transport. L'accumulation est libre proche de la décantation. Les dynamiques fluviatiles sont généralement lentes. Localement, des lits de sables grossiers et des cailloux calcaires s'engagent dans le dépôt vaseux (S12-T50 ; S12-T56). Ils sont issus des écoulements occasionnellement torrentiels et brefs, survenus lors des averses locales orageuses.

Les oxydes de fer, les sels, les cristaux et les amas gypseux dans les vases, expriment des épisodes d'exondation et d'assèchement de durée et d'intensité variables. La surface craquelée de la sebkha est soumise à la déflation éolienne (agrégats d'argile roulés, S17-T53, S14-T49, S12-T56).

V-3- Les stades SK_V, SK_{III} et SK_I de lac temporaire-sebkha

Les faciès de colmatage vaseux (**FVD5-7 et 9**), d'épandage alluvionnaire (**FEA6**) et de comblement en lits grossiers-fins (**FGF2-5**) sont omniprésents. Les sédiments sont moins riches en sels, oxydés et d'une provenance lointaine prépondérante. Ils annoncent **l'évolution d'al Kalbiyya en systèmes complexes de lacs temporaires-sebkhas**. Le passage d'un système ou d'un régime à un autre est graduel. Il dépend des variations de la bathymétrie, de l'abaissement du niveau d'eau, du changement des états de surface et son assèchement et de la précipitation des sels. On distingue trois stades.

V-3-1- Le premier stade SK_V

Un remplissage fluviatile en lits grossiers-fins **(FGF2**, S6-8-T53, S2-T56, S8-T60) comble le centre et les bordures d'al Kalbiyya sur **10 à 60 cm d'épaisseur**. Pendant le maximum des épisodes de crues, des flux d'eau soutenus et compétents font remonter et

déplacer les matériaux les plus grossiers jusqu'au centre d'al Kalbiyya. Ces matériaux sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre. Au moment de la descente des eaux, la réduction de la compétence des flux fait que les sédiments fins issus de la suspension uniforme se déposent en mode libre proche de décantation.

Les apports hydro-sédimentaires dans la cuvette sont intermittents et parfois importants permettant l'extension d'un lac temporaire. Sa durée de stationnement dépend de la répartition et de l'intensité de la pluviométrie, de la régularité des débits des oueds et de la fréquence des crues. Al Kalbiyya connait une certaine hydromorphie de surface et une évolution pédologique des sédiments en milieu réducteur et confiné (horizons noirâtres, gris vert olive, brun vert olive). Les dépôts affirment progressivement l'assèchement du lac, l'émersion des sédiments, une certaine battance de la nappe et l'instauration d'un système de sebkha (sel, oxyde de fer, macrocristaux et rosettes de gypse).

V-3-2- Le deuxième stade SK_{III}

L'unité sédimentaire UK_{III} exprime l'installation du **deuxième stade de lac temporaire-sebkha SK_{III}**. Les deux faciès fluviatiles de comblement en lits grossiers-fins (**FGF3-5**) et de colmatage vaseux (**FCV4**) sont prépondérants. Les modalités de répartition des sédiments et la corrélation spatio-temporelle des faciès sur les bordures sont compliquées. **L'unité sédimentaire UK_{III} se subdivise en trois sous-unités** et permet de reconstituer trois sous-stades qui montrent des différences dans l'organisation et les contextes sédimentaires.

V-3-2-1- Le sous-stade SK_{III-1}

Le niveau fluviatile **FGF3** d'alternances de lits sablo-limoneux et argileux, **épais de 20 cm en moyenne** (T56, T60), signe l'installation du **premier sous-stade SK_{III-1} de lac temporaire-sebkha**. Al Kalbiyya est irrégulièrement envahie par les eaux de grandes ou de brèves et violentes crues. Au début d'une crue, les courants d'eau puissants font s'étaler les matériaux les plus grossiers sur des grandes étendues. La forte turbulence y dépose en mode libre les sables, suivis par les matériaux issus de la suspension graduée. A la décrue, la réduction de la vitesse et de la compétence des flux d'eau entraine la décantation des argiles.

Les taches et les horizons d'oxyde de fer dans le sédiment traduisent l'abaissement du niveau de l'eau et l'exondation du lac avec un certain rabattement d'une nappe proche. Différemment au stade précédent SK_V, les sels et le gypse sont peu représentés dans les dépôts. Vraisemblablement, al Kalbiyya a connu des submersions successives et/ou rapprochées dans le temps empêchant une forte précipitation des sels.

V-3-2-2- Le sous-stade SK_{III-2}

La sous-unité sédimentaire UK_{III-2} rétablit une hétérogénéité spatio-verticale des sédiments. Elle relie latéralement les faciès fluviatiles de comblement en lits grossiers-fins (**FGF4**, T56), de colmatage vaseux (**FVD5**, T53, T60) et d'épandage alluvionnaire (**FEA6**, T60).

Au sud, **des alternances de lits sablo-limoneux et argilo-silteux**, épais d'**environ 35 cm**, marquent les marges d'al Kalbiyya (**FFG4**). La nature des sédiments et leurs modalités de mise en place et d'évolution rappellent celles du sous-stade précédent. Au début de crue ou pendant le maximum des épisodes de crue, l'oued al Atef dépose rapidement et en vrac les sédiments les plus grossiers. Les flux d'eau soutenus transportent les matériaux les plus fins par la suspension uniforme vers le centre et les bordures de la

dépression. Les eaux qui y stagnent déposent les argiles en mode libre proche de la décantation ce qui explique la lamination du dépôt (S7-10-T49, S11-12-T53).

Sur les bordures orientales, **des argiles** de colmatage vaseux, **épaisses de 20 cm** (**FVD5** ; S14-15-T60) comblent les marges lacustres. Elles sont principalement d'origine lointaine et indiquent des montées d'eau dans le lac temporaire et des dynamiques fluviatiles généralement lentes. Elles viennent en-dessous d'un niveau de comblement en lits grossiers-fins (FGF4, S5-6-T56) et d'épandage alluvionnaire (FEA6, S16-17-T60). Des **limons sableux et des argiles silteuses épais de 20 à 45 cm**, traduisent des **dynamiques actives de progradation et d'aggradation alluviales des cônes deltaïques**.

Les remplissages sont plus riches en sels que ceux du sous-stade précédent (S8-10-T49, S12-S13-T53). Les périodes ou les saisons sèches étaient vraisemblablement prolongées et/ou de forte intensité. Une végétation halophile est momentanément avancée vers le centre de la sebkha (S9-T49 ; S12-T53). Elle renseigne sur la dynamique spatio-temporelle des domaines de chott.

V-3-2-3- Le sous-stade SK_{III-3}

La sous-unité sédimentaire UK_{III-3} rétablit une organisation spatio-stratigraphique des sédiments et une dynamique morphosédimentaire comparables à celles du sous-stade précédent. Sur les marges orientales d'al Kalbiyya, se superposent deux faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire **FEA** (S18-19-T60) et de colmatage vaseux **FCV6 (**S20-T60). Leurs caractéristiques sédimentologiques et les mécanismes de la morphodynamique rappellent ceux du sous-stade SK_{III-2}. Dans la partie méridionale, un faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (**FEA7**, S11-12-T49) remplace le faciès de comblement en lits grossiers-fins (**FGF4**) de la sous-unité UK_{III-2}. Des sables limoneux et des limons silteux, **épais de 23 cm**, sont charriés par la suspension de fond et par roulement et déposés en mode libre et en vrac. Des flux d'eau compétents et à plus ou moins forte capacité de transport ont envahi le lac et ont contribué à l'exhaussement de la plaine d'épandage de l'oued al Atef.

Dans le centre et sur les bordures nord et ouest, le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire passe latéralement à un faciès de colmatage vaseux (**FVD6**, T53, T56). Des écoulements soutenus ont pu assurer le transport des sédiments sur des longues distances. A la décrue, les eaux étalées déposent uniformément -par décantation- les argiles en suspension. **Le remplissage est de 15 à 28 cm d'épaisseur**.

V-3-2-4- Le sous-stade SK_{III-4}

La sous-unité sédimentaire UK_{III-4} reconstitue une **nouvelle phase de lacs temporaires évolués en sebkhas**. Le remplissage témoigne des dynamiques intermittentes, des changements latéraux des faciès et un granoclassement généralement nord-sud. A l'ouest (S12-T48) et dans la partie méridionale de la dépression (S13-T49), prend place un faciès fluviatile en lits grossiers-fins (**FGF5**). Les sables limoneux et les argilo-silteuses, épais d'une quinzaine de centimètres sont des dépôts de crues, mis en place par écoulements contrastés avec vraisemblablement un mélange de sédiments d'apports lointains et latéraux. Les mécanismes et les conditions morphodynamiques rappellent ceux des sous-stades précédents SK_{III-2} *et* SK_{III-3}.

Au centre-est d'al Kalbiyya, le dépôt est plus grossier. Les sables, les sables limoneux et les limons sableux sont fluviatiles d'épandage alluvionnaire (**FEA8**, S21-23-T60). Les sédiments ont transité par la suspension graduée avec un peu de roulement et par la suspension de fond et par roulement. L'accumulation est libre et en vrac dans un milieu fluvio-deltaïque peu agité. **Le remplissage épais de 35 cm** peut témoigner d'une érosion pluviale manifestement exercée sur les bordures de la sebkha. Dans le reste d'al Kalbiyya se

généralise un faciès de colmatage vaseux (**FVD7**, S15-S16-T53). Des argiles et des argiles silteuses sont mises en place à la décrue en mode libre proche de la décantation.

Les conditions sont celles de lacs temporaires peu profonds, connaissant des apports hydro-sédimentaires hétérogènes et intermittents et des formes multiples d'hydromorphie (horizons noirs et grisâtres). Les remplissages impliquent d'importantes crues allogènes et des averses locales érosives. Pendant les périodes ou les saisons sèches, l'évaporation intense et/ou prolongée provoque l'exondation puis l'assèchement d'al Kalbiyya. Des sels et des microcristaux de gypse se précipitent dans le centre et sur les bordures de la dépression (S12-13-T49, 23-24-T60). Une sebkha se réinstalle, soumise à une déflation éolienne (agrégats argileux roulés, S16-T53 ; S10-T56).

V-4- Le dernier stade SK_I de lac temporaire-sebkha et de sebkha

L'unité sédimentaire UK_I correspond aux dépôts de surface et de sub-surface d'al Kalbiyya. Elle exprime les réponses morphosédimentaires de la cuvette continentale et des bassins versants proches et lointains aux changements des milieux, des environnements et des dynamiques, survenus depuis environ l'Historique et durant l'Actuel. Le remplissage sédimentaire a montré une répartition spatio-temporelle de trois faciès.

Au centre et au nord d'al Kalbiyya, le dépôt est de colmatage vaseux **épais d'environ 20 cm** (**FVD9** ; T53, T49, T55). Il correspond à des lamines d'argiles et d'argiles silteuses, empilées les unes sur les autres. A l'occasion d'une crue, les eaux allogènes s'étalent en nappes peu à relativement profondes. Elles entraînent le dépôt en mode libre proche de la décantation les sédiments issus de la suspension uniforme. **Sur les marges est et ouest**, les vases passent latéralement à un dépôt proximal colluvio-alluvial (**FCA4** ; T50, T57, T58) et fluviatile aux lits grossiers-fins (**FFG8** ; T56). Les dynamiques sont plus actives. Les apports latéraux sont notables. Les sables, les sables limoneux et les limons sableux sont des dépôts de crues, mis en place par des écoulements à forte à plus ou moins forte capacité de transport. Ils sont issus d'une suspension graduée avec un peu de roulement et sont déposés en mode libre et en vrac.

Pendant plusieurs années exceptionnellement pluvieuses ou à l'occasion des crues abondantes et/ou rapprochées, se produit une régularisation momentanée des régimes hydrologiques et des débits des oueds. **Un lac temporaire s'installe**. Des déversements exceptionnels dans Halq al Minjil ne sont pas exclus. Durant les saisons et des périodes sèches, la défaillance progressive de la desserte hydraulique entraîne la diminution du niveau d'eau, l'exondation puis l'assèchement d'al Kalbiyya. **Le lac évolue en une sebkha**. La présence des sels, de l'oxyde de fer et des cristaux de gypse en témoigne. La quasi-absence des traces d'hydromorphie sur les bordures est et ouest, peut traduire une émersion rapide des rivages de lacs temporaire. Elle est de plus en plus rapide que les apports hydriques sont faibles et l'évaporation est forte (Karray, 1993).

L'augmentation de la fréquence des sécheresses prolongées et/ou accentuées et la diminution des apports hydriques favorisent la prolongation de la durée de stationnement d'un système de sebkha. Al Kalbiyya est à sec, occasionnellement remplie d'eau et souvent blanche d'un plancher de sel. Les terrains alentours abritent une végétation halophile (racines dans les sédiments S28-T52 ; S9-T54 ; S10-T49 ; S13-T56 ; S26-T60). La floculation des argiles limoneuses favorise la déflation éolienne. Des agrégats d'argiles roulées se déplacent par saltation ou rotation en surface (S12-T50, S17-T53, S14-T49 et S12-T56).

CONCLUSION DU CHAPITRE

A l'Holocène inférieur et pendant la première moitié de l'Holocène moyen, al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de lacs pérennes et temporaires. Au moins sept phases majeures de sédimentation ont été distinguées. Les dépôts fluvio-lacustres et fluvio-palu-lacustres aux valves et débris de *Cerastoderma glaucum* ont marqué l'originalité des remplissages sédimentaires durant cette période de l'Holocène. De fréquentes traces d'hydromorphie et d'émersion marquent les dépôts. Al Kalbiyya a enregistré des cycles inondation-exondation. La cuvette exoréique à semi-endoréique est remplie de sédiments hétérogènes, relativement épais (plus de 4,6 m) et généralement grossiers. Les matériaux sont d'une provenance lointaine prépondérante mêlés avec des sédiments d'apports latéraux sur les versants immédiats. Les dynamiques fluvio-lacustres sont souvent actives. Les apports latéraux sont plus notables sur les marges des lacs temporaires. Ces derniers, différemment aux lacs pérennes, ont connu des apports hydro-sédimentaires moins abondants et plus irréguliers et expriment des régimes hydrologiques intermittents. Depuis l'interstade palu-lacustre SK_{XII-2}, les caractères de la sédimentation témoignent d'une saisonnalité plus prononcée et d'une évaporation plus marquée.

A partir de 5632±218 BP environ (LRAE-T52-1 ; 4515-3511 cal BC), al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de lac temporaire et sebkha. Le granoclassement latéral des sédiments est notable. Dans l'ombilic, les remplissages sont à dominance argilo-limoneuse laminaire, rythmée régulièrement par les traces d'une évolution pédologique post-sédimentaire. Sur les bordures, les sédiments sont plus grossiers, sablo-limoneux en général. Ils s'organisent dans des séquences lithostratigraphiques, épaisses de 3 à 60 cm. Les signes d'une évolution post-dépôt en milieu exondé et asséché sont plus marqués dans le sédiment en comparaison de la phase holocène précédente. L'exhaussement et le comblement d'al Kalbiyya ont été essentiellement commandés par les apports lointains des oueds de la Tunisie centrale. Les signes de dynamiques locales exacerbées ne sont largement archivés que dans les sédiments des bordures orientales d'al Kalbiyya. En milieux fluvio-deltaïques et intertidaux, une sédimentation fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA4-7) plus ou moins dilatée (plus 2,3 m) est mise en place. Les dynamiques de progradation et d'aggradation alluviales des zones distales des cônes d'épandage des oueds de la rive est d'al Kalbiyya étaient occasionnellement actives.

Les modifications spatio-verticales des caractéristiques sédimentologiques et pédologiques des archives sédimentaires holocènes d'al Kalbiyya attestent l'instabilité des conditions climatiques et morphogéniques et des situations hydromorphologiques. L'installation des systèmes de sebkhas asséchées favorise la floculation des matériaux fins et la mise en action des processus éoliens. Sur les bordures d'al Kalbiyya, les modelés hydroéoliens sont multiples.

CHAPITRE III :
MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS D'AL KALBIYYA

Dans les remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya, les quartz émoussés mats et ronds mats et les agrégats roulés d'argiles et de limons témoignent des faits de remaniement hydrique sur les dépôts éoliens et/ou de prélèvement éolien sur la sebkha. Al Kalbiyya constitue une zone source et un piège à sédiments éoliens. Même si les édifices hydroéoliens sont peu nombreux, l'activité éolienne a eu une place privilégiée dans la morphogenèse (Coque, 1979 ; Karray, 1993 ; Kamoun, 2001).

Les héritages hydroéoliens identifiés correspondent à un bourrelet, des placages et des voiles. Ils marquent essentiellement les bordures orientales et sud-est de la dépression. L'étude s'est appuyée sur un échantillonnage réduit. Les quelques analyses sédimentologiques et la datation radiométrique ^{14}C effectuées, ont permis d'en affirmer l'origine et d'en apprécier l'âge et les dynamiques expliquant la mise en place du bourrelet de la rive est d'al Kalbiyya.

Avant de parler du modelé hydroéolien holocène, il est important de présenter brièvement les héritages d'âge pléistocène. Le but est d'essayer d'apporter des éléments de précision concernant les problèmes de genèse, d'organisation spatiale et de chronologie des formes et des dépôts hydroéoliens d'al Kalbiyya, qui demeurent un sujet de controverses perpétuelles (Coque, 1979 ; Belkhouja, 1972 ; Karray, 1993 ; Kamoun 2001 ;…).

I- DES MODELES HYDROEOLIENS ONT LARGEMENT EVEILLE L'INTERET DES CHERCHEURS

Les bordures orientales d'al Kalbiyya présentent des particularités morphologiques notables. Des études ont montré l'importance des accumulations d'argiles éoliennes. Elles ont posé toute une série de problèmes et de contradictions sur l'origine, l'organisation spatiale et morphologique et la chronologie des édifices.

Longtemps, les dépôts éoliens ont été attribués au Pliocène continental (Solignac, 1934). En 1956, Burollet les a assimilé à la période du pluvial antérieur au Tyrrhénien. Depuis, les accumulations éoliennes d'al Kalbiyya ont été désignées sous forme d'un voile de pseudo-sables mis en place durant une période aride du Pléistocène supérieur au-dessus du complexe mio-pliocène (Belkhouja, 1972). Elles ont été également attribuées à une massive lunette occupant Dhras Laghmas-Hanshir-Krousiyya (Coque, 1979) ou à une simple accumulation de bourrelets éoliens d'âge post-flandrien, à l'endroit des Dhras Laghmas-ash-Shraif (Bel Haj Ali *et al.*, 1988, *in* Kamoun, 2001).

En 1993, M.R. Karray a défini au même lieu un bourrelet perché sur le Mio-Pliocène, recouvrant la croûte du Quaternaire moyen. Il lui a attribué, sur la base des outils de facture épipaléolithique, un âge pléistocène supérieur. Au sud-est, à Dhra Zmenka, le même auteur a signalé la présence des argiles gypseuses éoliennes d'âge préromain. En 2001, Kamoun a apporté une précision stratigraphique par datations radiométriques et a proposé une nouvelle organisation morphologique des accumulations éoliennes atteignant la centaine de mètres de puissance. Il a distingué trois ensembles. De la plus distante à la plus proche de la sebkha, il s'agit de la lunette « d'al Bal'oum ou al Kalbiyya 1 » d'âge pléistocène supérieur basal, celle « d'ash-Shraif ou al Kalbiyya 2 », d'âge 30 000±150 ans BP et celle de « Dhra Rommana ou al Kalbiyya 3 » d'âge holocène. Bien que la nouvelle

carte géologique de la sebkha al Kalbiyya détaille le Quaternaire (Ghanmi *et al.*, 2004), elle a regroupé sans précision cartographique deux générations de dépôts de bourrelets hydroéoliens sous l'étage holocène « gQ ». Toutefois, tous les résultats ne pourront être exposés et bon nombre de problèmes ne sont pas encore résolus (processus, genèse et évolution, calage chronologique).

II- LES HERITAGES HYDROEOLIENS PLEISTOCENES

La principale des formes hydroéoliennes, bien dégagée dans le paysage, correspond à **une lunette** la plus ancienne du système, **d'âge pléistocène supérieur** (Karray 1993 ; Kamoun, 2001). **Des placages, des voiles et des recouvrements de sommets d'interfluves, très localisé**s, ont été reconnus à l'ouest et au sud-est d'al Kalbiyya.

II-1- La lunette pléistocène des Dhras Laghmas-ash-Shraif (QP3f)

II-1-1- Caractérisation morphologique et sédimentologique

Sur les bordures orientales d'al Kalbiyya, un bourrelet hydroéolien forme l'essentiel du relief des Dhras Laghmas-ash-Shraif (Fig. 24). Il se trouve perché au-dessus du substrat missinien-pliocène et des dépôts à nodules calcaires du Pléistocène supérieur. L'édifice domine la sebkha de 145 à 45 m de hauteur et s'allonge en demi-croissant sur plus de 10 km de long. Il est éloigné de la berge actuelle de la sebkha de 0,5 à 4,5 km environ. Sa morphologie est typique d'**une lunette aux versants nettement dissymétriques et à concavité tournée contre les vents actifs et dominants du secteur nord-ouest**.

La construction est de quelques mètres à plus de 25 m d'épaisseur dans le cours amont de l'oued al Gharig. Elle montre des discontinuités et des différences dans l'accumulation éolienne. Celle-ci est généralement composée d'argiles et d'argiles silteuses (plus de 70%), souvent compactes, modérément calcaires (24% de $CaCO_3$) et de couleur brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4). Elle présente une structure polyédrique ou finement litée à entrecroisée et renferme des débris de coquilles d'*Helix*, des *Helix* entiers et des racines. Elle montre de haut en bas un enrichissement en sel diffus et microcristaux de gypse, avec une moyenne dépassant 13% du sédiment. L'examen morphoscopique des quartz réaffirme l'origine éolienne du matériel. Les grains émoussés mats et les ronds mats dépassent 60% des éléments examinés.

En 2001, Kamoun a écrit que la lunette était formée d'un complexe de bourrelets dunaires séparés par des espaces inter-dunaires et disposés selon deux directions orthogonales N135 (SE-NO) et N50 (NE-SO). Cette structuration en deux directions est selon lui à l'origine de l'organisation du réseau hydrographique. Cependant, si les corps dunaires N50 coïncident bien avec la résultante dynamique des vents dominants du nord-ouest (Jauzein, 1967), ceux N135 posent le problème de la direction des vents actifs et celui des zones sources de sédiments éoliens. Qui plus est, la forte dissection du relief par un chevelu hydrographique dense, hiérarchisé et associé à une diversité de processus morphogéniques (suffusion, glissement, ravinement généralisé), explique entre autre ce « caractère dunaire » et précisément les interfluves effilés d'orientation variable à l'intérieur de la lunette. Elle est également à l'origine d'un paysage de bad-lands.

II-1-2- Attribution chronologique

La lunette des Dhras Laghmas-ash-Shraif est d'âge pléistocène supérieur. Elle recouvre la croûte calcaire du Pléistocène supérieur (Karray, 1993) et les dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur. Karray avait ramassé en 1993 des outils de facture épipaléolithique sur les colluvions du versant de l'édifice, mais sans préciser la

localisation du site de récolte. Kamoun (2001) a distingué deux « générations de lunettes ». La première génération « al Kalbiyya 1 » est d'âge pléistocène supérieur basal. Elle est bordée au sommet par les dépôts de la deuxième génération ou « d'al Kalbiyya 2 ». Celle-ci est d'âge **pléistocène supérieur terminal** (**30000±150 BP** ; 35018-34483 cal BP/33069-32534 cal BC). Elle serait contemporaine des placages éoliens des collines de Sidi al Hani d'âge 32940^{+23-93} (Ben Jmaa, 2008). Les fonds des ravins, qui séparent les interfluves effilés, présentent souvent un modelé de terrasses d'accumulation historiques.

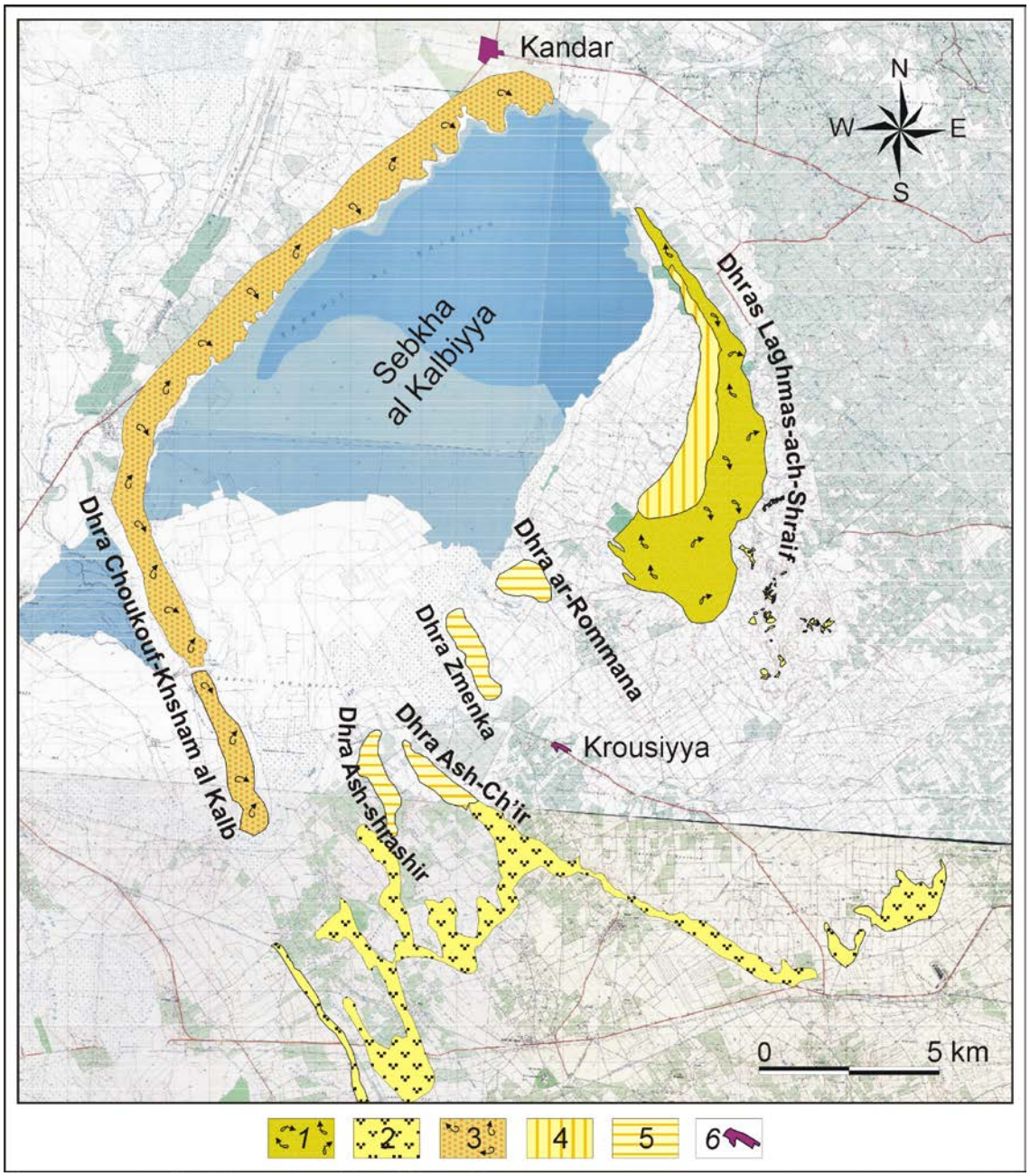


Fig. 24 : Héritages hydroéoliens des bordures de la sebkha al Kalbiyya
Fonds topographiques utilisés : sebkha al Kalbiyya (n°56, NE, NO, SE, SO, 1991-1992) ; Sidi al Hani (n°64, NE, 1995) au 1/25000

Légende : 1 : Lunette du pléistocène supérieur terminal ; 2 : Voile éolien des sommets d'interfluves d'âge pléistocène supérieur terminal ; 3 : Témoins de placages éoliens d'âge pléistocène supérieur terminal à holocène avec localement des sédiments de saupoudrage éolien et voile d'âge holocène ; 4 : Bourrelet antique ; 5 : Voile éolien antique ; 6 : Village.

II-1-3- Contexte de mise en place

L'origine de l'édifice par voie de déflation éolienne depuis la sebkha et les plaines immédiates, a été soulignée par Jauzein (1967), Belkhouja (1972); Coque (1979), Karray (1993) et Kamoun (2001). Une végétation halophile a joué un rôle important par le piégeage des agrégats éolisés (Perthuisot et Jauzein, 1975 ; Jauzein, 1967 ; Bourgou, 1993 ; Bourgou et Oueslati, 1994). La taille et l'extension de la lunette laissent penser à des sécheresses importantes de point de vue cyclique et/ou durée. La fixation de l'édifice et la compaction des argiles sont le résultat conjugué de la défloculation et de la destruction des conditions physico-chimiques du dépôt. Celles-ci découlent du lessivage et/ou de la dissolution des sels par percolation des eaux pluviales (Belkhouja, 1972 ; Hachicha *et al.*, 1987) dans un contexte d'humidification ayant marqué vraisemblablement la fin du Pléistocène (Brun, 1991).

II-2- Les placages et les voiles éoliens des bordures méridionales et occidentales d'al Kalbiyya (QP3f)

Au sud et au centre-est d'al Kalbiyya, le dépôt de lunette passe à des dépôts éoliens discontinus et localisés (*cf.*, Fig. 24). Ils correspondent à des **voiles et des recouvrements de sommets d'interfluves**. Ils surmontent les argiles brunes gypseuses du Mio-Pliocène dans le bassin de l'oued Bou Ghorbal. Au sud à Hanshir Krousiyya, ils se mêlent aux dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur. Ici, ils correspondent à des argiles silteuses et des limons modérément calcaires (20% de $CaCO_3$), jaunes brunâtres (10 YR 6/6) et d'une teneur en gypse toujours inférieure à 11%. La structure est prismatique à granulaire. Les quartz émoussés mats prédominent (48%). Les quartz émoussés luisants passent du bas en haut de 32 à 36%. Les grains sub-émoussés luisants représentent 16 à 20% des quartz examinés. Ces pourcentages peuvent indiquer des remaniements éoliens des sédiments fluviatiles sur les fonds des vallées et/ou un éventuel remaniement hydrique de surface.

Sur la rive ouest d'al Kalbiyya, une morphologie d'un glacis d'ablation laniéré apparait au pied des restes étriqués de la croûte calcaire légèrement pentue (5-10%) du Pléistocène ancien à moyen (Karray, 1993). Cette morphologie porte **les témoins de placages** limoneux et sablo-limoneux, labourés, de couleur rose (5YR 8/3). Ils sont mêlés aux sables à nodules et concrétions calcaires du Pléistocène supérieur. Karray (1991) a récolté en surface des éclats fini-acheuléens à moustériens.

Localement au nord-ouest, à Hanshir Sorrah el Bgar, et **sur les Dhras Choukouf-Khsham al Kalb**, il apparaît des **nebkas** décimétriques **et un voile éolien plus récents**. Ils sont formés de limons et de sables argileux, de couleur jaune brunâtre (10 YR 6/8) et mêlés à des amas calcaires vraisemblablement remaniés. Ces formations témoignent des vents actifs mais secondaires des cotés est et sud-est. A l'ouest de l'hydrosystème, la garaa Haria d'al Mitbasta a fourni possiblement de la matière aux vents du nord-ouest.

III- LES MODELES HYDROEOLIENS D'AGE HOLOCENE

III-1- Le bourrelet hydroéolien de la rive est d'al Kalbiyya (QH3a) : identification et essai de précision chronologique

L'édification d'un bourrelet sur les bordures orientales d'al Kalbiyya, nous renseigne sur la place des vents dans la morphogenèse holocène. Sa présence et son âge sont prouvés par des données géomorphologiques et une datation radiométrique ^{14}C.

III-1-1- Localisation, extension et caractéristiques morpho-sédimentologiques

Sur les bordures est d'al Kalbiyya, une accumulation éolienne s'allonge entre le pied de la lunette pléistocène et la plaine d'al Hanya (Fig. 25.1). Elle culmine de 100 à 70 m à Dhra ash-Shraif et de 60 à 40 m à Dhra Laghmas. Elle est bordée sur la carte topographique par deux ruptures de pente bien marquées. Sa morphologie épouse celle de la lunette pléistocène. Elle se présente sous la forme d'un demi-croissant, étendu sur environ 8,5 km de longueur et 1 à 0,15 km de largeur, dont la concavité est tournée vers le nord-ouest. L'accumulation, plus ou moins éloignée des berges de la sebkha (3 à 0,3 km), est façonnée en **bourrelet très apparent dans le paysage**. Elle domine le fond d'al Kalbiyya de 45 à 85 m de hauteur. L'épaisseur dépasse 3 m environ. L'incision active des oueds découpe l'édifice en lanières.

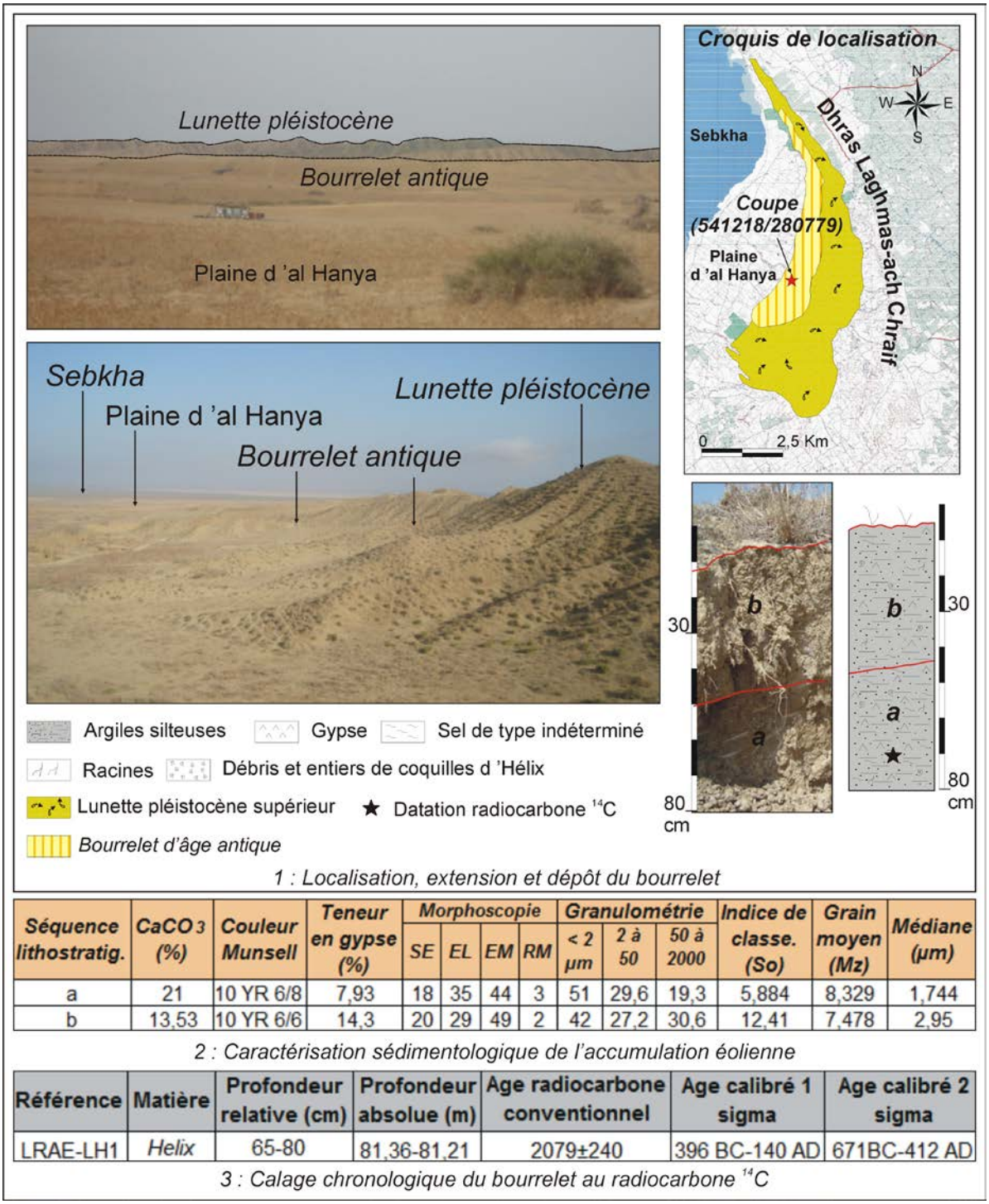
Les sédiments de l'accumulation ne sont observés que sur quelques ravines peu profondes. Les tranchées des ravins sont souvent masquées par les pans d'éboulement et/ou endommagées par la suffusion et les tunnels de l'écoulement hypodermique. Sur un mètre, une coupe montre du bas en haut, la superposition de deux séquences (Fig. 25.1 et 2) :

a/ des **argiles silteuses épaisses de 40 cm**, compactes et modérément calcaires (21% de $CaCO_3$). Elles sont de couleur jaune brunâtre (10 YR 6/8) et présentent une médiane très faible (1,7 µm) et un mauvais tri. Elles sont riches en filaments subverticaux et horizontaux de sel blanc de type indéterminé et en microcristaux de gypse jaune ocre. Les sables sont faiblement représentés (19,3%). La distribution des sédiments est logarithmique (Fig.26). Des quartz, des racines, des débris et des entiers de coquilles d'*Helix*, des horizons discontinus gris foncés millimétriques et des grains noirs de charbon s'intercalent dans la masse. A la loupe binoculaire, on observe sur un bout compact de sédiment des microfissures et des vides tubulaires. Les quartz émoussés mats (44%) et émoussés luisants (35%) dominent. Les grains ronds mats sont faiblement représentés (4%). Le dépôt craquelé présente une structure litée.

b/ des **argiles silteuses** (69,4%), peu compactes, très mal classées et modérément calcaires (13,5% de $CaCO_3$). Elles renferment des débris d'*Helix*, des racines et peu de quartz. Elles sont moins riches en sel et en gypse qui s'individualise en microcristaux et en forme de poches millimétriques. La fraction sableuse s'élève à 30,6%. L'épaisseur moyenne est d'environ 50 cm. La couleur est jaune brunâtre (10YR 6/6). La médiane est très faible (2,9 µm). La structure est tantôt massive tantôt granulaire. La distribution granulométrique des sédiments est sublogarithmique (Fig. 26). Les quartz présentent un aspect émoussé mat (49%) et émoussé luisant (29%) prédominant. Les grains ronds mats représentent seulement 3% des quartz examinés.

III-1-2- Interprétation morphodynamique et évolution post-sédimentaire

La morphologie de l'édifice répond au schéma théorique des bourrelets hydroéoliens. Les caractéristiques sédimentologiques confirment l'origine éolienne du matériel et l'importance de sa fraction argileuse (42-51%). **Les vents du secteur nord-ouest sont responsables du surcreusement d'al Kalbiyya, du transport et de l'accumulation** des argiles silteuses en contrebas de la lunette pléistocène. La présence de la fraction sableuse et limoneuse n'exclue pas des remaniements éoliens sur les fonds des oueds et sur la plaine d'al Hanya (Karray, 1993).



1 : Localisation, extension et dépôt du bourrelet

Séquence lithostratig.	$CaCO_3$ (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie				Granulométrie			Indice de classe. (So)	Grain moyen (Mz)	Médiane (µm)
				SE	EL	EM	RM	< 2 µm	2 à 50	50 à 2000			
a	21	10 YR 6/8	7,93	18	35	44	3	51	29,6	19,3	5,884	8,329	1,744
b	13,53	10 YR 6/6	14,3	20	29	49	2	42	27,2	30,6	12,41	7,478	2,95

2 : Caractérisation sédimentologique de l'accumulation éolienne

Référence	Matière	Profondeur relative (cm)	Profondeur absolue (m)	Age radiocarbone conventionnel	Age calibré 1 sigma	Age calibré 2 sigma
LRAE-LH1	*Helix*	65-80	81,36-81,21	2079±240	396 BC-140 AD	671BC-412 AD

3 : Calage chronologique du bourrelet au radiocarbone ¹⁴C

Fig. 25 : Bourrelet hydroéolien de la rive est d'al Kalbiyya : localisation, caractéristiques morphosédimentologiques et âge

La variation stratigraphique des caractéristiques sédimentologiques de l'accumulation et de la structure des dépôts indique des changements des conditions et des mécanismes de la morphodynamique éolienne. La compaction des sédiments et la présence du gypse certifient une certaine évolution post-dépôt. L'appauvrissement des sédiments en sels et en gypse, du bas en haut, et l'évolution inverse des teneurs en carbonate de calcium expliquent la dissolution du profil par un processus de lessivage et de désalinisation. Ils témoignent du remplacement des sels ou du sodium échangeable par le calcium par un processus de désodisation (Hachicha *et al.*, 1987). Les horizons gris foncés traduisent une

forte concentration du gypse à l'état réduit (Abichou, 2002) ou une décomposition des racines ou des restes végétaux surtout par une activité bactérienne pendant les saisons ou les périodes humides (Vizier, 1974 ; Kaemmerer et Revel, 1989). Les grains de charbon sont peut-être d'origine éolienne, remaniés sur des sites environnants ou sur des incendies proches. La présence des racines prouve le rôle d'une végétation halophile dans le piégeage des éléments éolisés et la stabilisation de l'édifice.

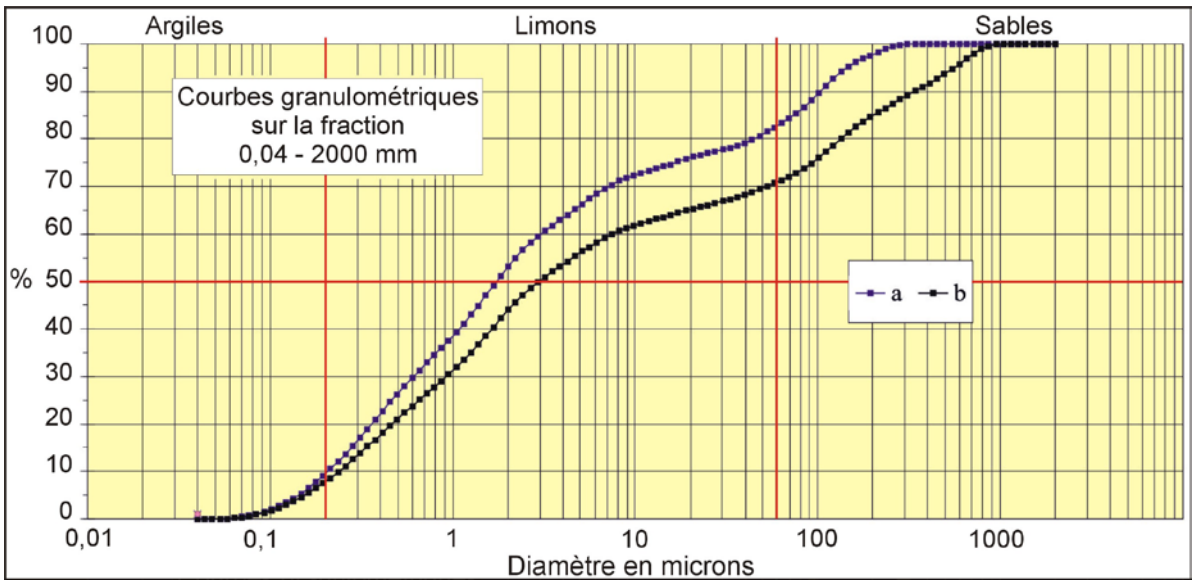


Fig. 26 : Distribution granulométrique des sédiments du bourrelet holocène d'al Kalbiyya

III-1-3- Attribution chronologique de l'édifice

Le bourrelet s'interpose entre la lunette du Pléistocène supérieur et les dépôts alluviaux d'aggradation historique de la plaine d'al Hanya. Des terrasses d'accumulation historiques, modelant les fonds des vallées, entrecoupent le bourrelet. **Une datation radiométrique au carbone ^{14}C a été effectuée sur les *Helix*** de la base de l'accumulation éolienne, entre 65 et 80 cm de profondeur (Fig. 25.3). Elle a donné un âge de **2079±240 BP** (LRAE-LH1 ; 2620-1538 cal BP/671 BC-412 AD). En considérant le risque d'erreur que pourrait introduire la nature même de l'échantillon daté (Goodfriend, 1987 ; Rahmani, 2004), la datation obtenue présente une certaine cohérence avec le canevas chronologique de l'ensemble de l'hydrosystème. On ne connait pas encore ni l'épaisseur précise, ni la limite inférieure de la formation. Mais, le début de sa mise en place est certainement postérieure à 5632±218 BP (LRAE-T52-1 ; 6931-5935 cal BP/4982-3986 cal BC), date limite de l'installation des stades lacustres aux *Cerastoderma glaucum*. **L'édifice hydroéolien date de l'Antiquité**.

III-2- Les voiles éoliens des Dhras sud-est d'al Kalbiyya (QH3a)

Au sud-est d'al Kalbiyya, une couverture étalée en **voile** peu épais et plus ou moins continu, recouvre les Dhras Zmenka, ar-Rommana, ash-Shrashir et ach-Sh'ir (*cf.*, Fig. 24). Des petites entailles à la terminaison ouest de Dhra ar-Rommana montrent des dépôts éoliens de limons et d'argiles silteuses jaune brunâtre (10 YR 6/6), peu compacts et épais de 40 cm en moyenne. Ils renferment du sel, des amas et des cristaux de gypse, des fragments de coquilles d'*Helix* et des racines (Fig. 27). Ils portent en surface des champs de poterie romaine et des nebkas pluridécimétriques d'argiles limono-sableuses, dirigeant leurs pointes vers le sud-est.

Ces dépôts superposent un niveau argilo-silteux épais de 30 cm en moyenne. Il montre une forte concentration de cristaux de gypse jaune ocre et du sel blanc en état diffus et en filaments. Il contient des racines et des débris de coquilles d'*Helix*. Il est de couleur brun jaunâtre (10 YR 5/6) et possède une structure litée et craquelée par un réseau dense de fissures de dessiccation. Les argiles silteuses sont vraisemblablement des dépôts de laisses de crues, décantées dans un milieu marécageux de bordures de la sebkha par des écoulements à faible capacité de transport.

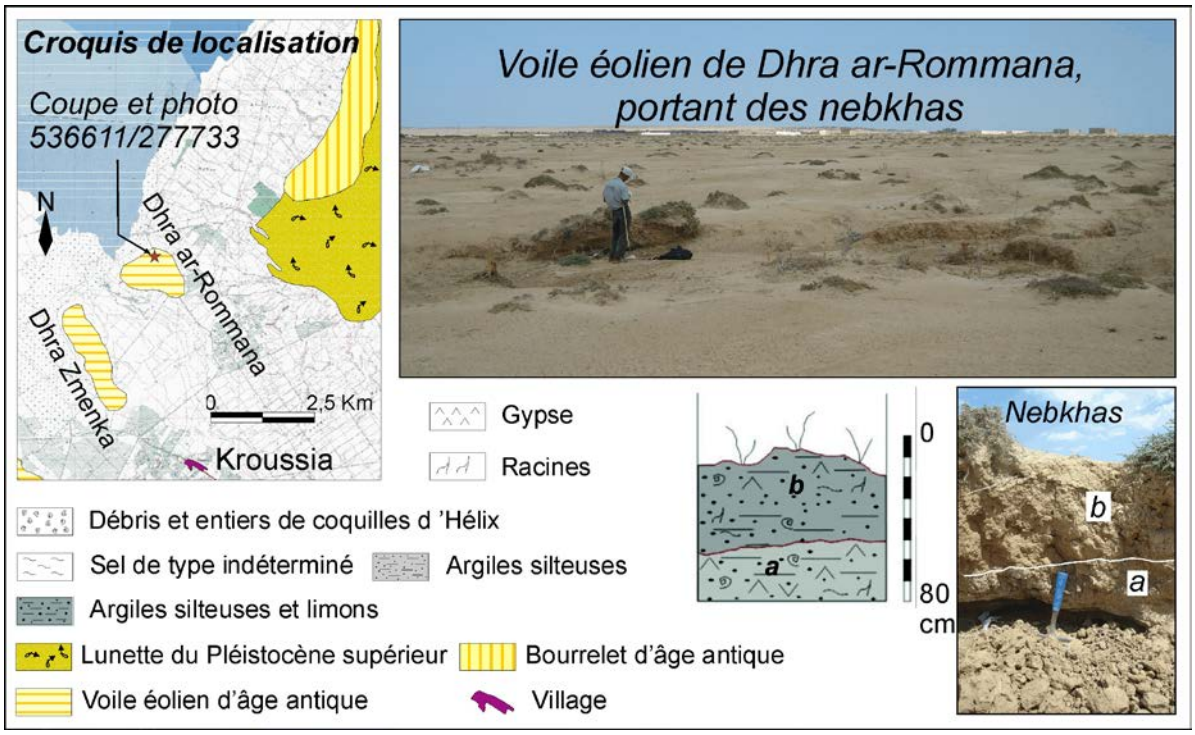


Fig. 27 : Les voiles éoliens antiques des Dhras ar-Rommana et Zmenka sur les bordures sud-est d'al Kalbiyya

Les dépôts éoliens rappellent ceux identifiés par Karray à Dhra Zmenka (1993). Ils recouvrent une falaise lacustre morte aux *Cerastoderma glaucum* et sont ensevelis au sommet par une couche d'occupation romaine. Aujourd'hui, des débris de *Cerastoderma glaucum* dispersés au pied du Dhra ont été reconnus. A cause de la forte emprise humaine des alentours de la sebkha et du Dhra (labour profond), la falaise est détruite. Les voiles éoliens sont probablement contemporains du bourrelet de la rive est d'al Kalbiyya.

IV- FONCTIONNEMENT HYDROEOLIEN D'AL KALBIYYA PENDANT L'HOLOCENE : ESSAI DE SYNTHESE

Pendant l'Antiquité, la mise en place d'un bourrelet métrique et des voiles peu épais et plus ou moins étendus témoignent d'un ou d'assèchements climatiques ou d'un contexte général de détérioration du climat. Le régime climatique était vraisemblablement dans le contexte de la semi-aridité favorisant le développement d'une végétation steppique et halophile. La forte variabilité des pluies et l'irrégularité des écoulements, contrôlées par des sècheresses intenses et/ou prolongées, étaient responsables de l'assèchement fréquent d'al Kalbiyya. Ils ont permis l'installation d'un régime d'endoréisme favorisant l'activité morphologique des vents surtout du secteur nord-ouest. **Al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de sebkha et de lac-temporaire-sebkha**. Elle a connu des inondations temporaires ou épisodiques. L'assèchement du fond de la sebkha et la ségrégation des

argiles par les sels ont fragilisé les structures et ont rendu le matériel très vulnérable au remaniement et à la déflation éoliens. De telle activité éolienne contribue au surcreusement d'al Kalbiyya. Des épisodes d'abondance hydrologique sont à l'origine de la fixation du bourrelet et des voiles hydroéoliens.

Pendant la période historique, les signes d'une activité éolienne sont localement mis en évidence (voir chapitre 7, 3ème partie de la thèse). Des lits fins plurimillimétriques à centimétriques de sables et de limons éoliens s'intercalent dans les accumulations alluviales des terrasses historiques des oueds drainant l'alignement des Dhras Laghmas-ash-Shraif. Ils indiquent la discontinuité des dynamiques hydriques et une mise en œuvre des processus éoliens de prélèvement, sur les fonds et les zones d'épandage des oueds.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Un bourrelet et des voiles hydroéoliens de l'Antiquité marquent le paysage des bordures orientales d'al Kalbiyya. Des sédiments fins de limons et d'argiles silteuses sont mis en place par les vents du secteur nord-ouest. L'ampleur des constructions hydroéoliennes révèle l'importance de la morphogenèse éolienne. De telles archives s'intègrent dans les changements morphologiques et les fluctuations climatiques qu'ont connu al Kalbiyya et ses environs durant l'Antiquité. Elles témoignent d'une rupture des systèmes et des conditions lacustres et d'un changement du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya depuis la deuxième moitié de l'Holocène moyen.

Al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de sebkha et de lac-temporaire-sebkha dans un contexte climatique vraisemblablement de type méditerranéen semi-aride. Les changements des caractéristiques sédimentologiques des sédiments éoliens et de l'intensité des processus morphodynamiques et pédologiques expliquent l'instabilité des conditions et des environnements sédimentaires et une mise en place polyphasée des édifices éoliens.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

L'enclave semi-endoréique d'al Kalbiyya est remplie d'une sédimentation variée et plus ou moins dilatée. Elle dispose d'un grand potentiel d'archivage de l'histoire holocène des dynamiques et des environnements sédimentaires. Les sondages à la tarière à main ont rendu accessibles six faciès très distincts. Ils présentent des fortes discontinuités latérales et des variations dans la répartition spatiale et stratigraphique en fonction de la provenance de la matière, de l'hydrodynamisme et des milieux de sédimentation.

Les remplissages des marges ouest sont marqués par la succession de plusieurs séquences litho-stratigraphiques mêlées inégalement aux valves et aux débris de *Cerastoderma glaucum*. Sur les bordures septentrionales et orientales de la sebkha actuelle, la sédimentation est beaucoup plus variée. L'identification des faciès fluviatiles d'épandage alluvionnaire (FEA) et proximal colluvio-alluvial (FCA) engage une signification locale prépondérante des dynamiques. Des matériaux principalement sablo-limoneux sont à l'origine de la progradation alluviale des cônes d'épandage des oueds descendant les Dhras Laghmas-ash-Shraif. Au sud et à l'entrée d'al Kalbiyya, les apports fluviatiles essentiellement lointains expliquent un important exhaussement de l'enclave et l'aggradation alluviale de la plaine d'épandage de Hanshir al Magroun. Dans l'ombilic, se généralise un faciès de colmatage vaseux (FCV), composé d'une matière fine, essentiellement allogène.

Sur les bordures ouest, nord et centre-est d'al Kalbiyya, la présence de *Cerastoderma glaucum* a rendu possible la corrélation des niveaux stratigraphiques et la reconstitution des systèmes particuliers de fonctionnement hydrologique. Dans le centre et sur les bordures orientale et méridionale, les corrélations spatio-verticales des faciès et leur regroupement en unités sédimentaires sont apparus plus compliqués. La synthèse litho-chronostratigraphique du remplissage d'al Kalbiyya a permis d'établir la superposition d'au moins quatorze (14) unités sédimentaires associées à une succession de stades différents de sédimentation et de fonctionnement hydrologique de la sebkha actuelle.

Durant l'Holocène, al Kalbiyya a évolué en deux grandes phases différentes. La première phase débute de l'Holocène inférieur jusqu'à environ la première moitié de l'Holocène moyen. Elle correspond aux sept (7) premières unités sédimentaires de l'échelle litho-chronostratigraphique des remplissages holocènes. Son originalité réside dans le développement d'une série de séquences lithostratigraphiques à *Cerastoderma glaucum*. Durant cette période, al Kalbiyya a connu l'installation de quatre stades de paléolacs pérennes en alternance avec trois stades d'anciens lacs temporaires. Depuis environ 5632±218 BP (LRAE-T52-1 ; 4515-3511 cal BC) débute la deuxième phase. Elle ne montre aucun indice de prolifération biocénotique. Al Kalbiyya, appartenant à un régime hydrologique d'une enclave endoréique à semi-endoréique, est bien une conséquence de l'accentuation de l'aridité. Elle a fonctionné en une alternance de sept stades de lacs temporaires-sebkhas et de sebkhas. Pendant cette phase, l'édification d'un bourrelet et des voiles hydroéoliens sur les bordures orientales, sud et sud-est de la dépression, est révélatrice d'une morphogenèse éolienne active et d'une certaine détérioration des conditions climatiques.

L'hétérogénéité et l'ampleur des archives sédimentaires et la complexité du fonctionnement d'al Kalbiyya nous amènent à nous poser des questions, en particulier, quels sont les facteurs explicatifs des dynamiques et d'évolution holocène de la sebkha actuelle ?

L'ampleur de la sédimentation permet-elle de se faire une idée du rôle d'une subsidence active ? La progradation alluviale des cônes d'épandage des oueds de la rive orientale d'al Kalbiyya, la forte discontinuité latérale des faciès sur les bordures et la configuration de la rive occidentale en replat tidal lacustre d'âge holocène moyen (dépôt fossilifère en surface) peuvent-elles prouver l'hypothèse d'un jeu de failles ayant morcelé la zone d'étude et contrôlé la sédimentation (Lamti, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1993) ? Nous répondons à ces questions dans la quatrième partie de la thèse.

DEUXIEME PARTIE :

LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN : COMPLEXITE D'UN SYSTEME A L'INTERFACE TERRE/MER

CHAPITRE IV : REMPLISSAGES DU FOND ET DEPOTS DES RIVES DE HALQ AL MINJIL : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

CHAPITRE V : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

CHAPITRE VI : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS DE LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL

INTRODUCTION

Halq al Minjil se situe à l'interface terre/mer, au milieu du golfe de Hammamet. Elle occupe la position aval de l'hydrosystème. Elle présente le niveau de base de l'ensemble de la Tunisie centrale. Elle fait partie de l'extrémité nord-est de la large gouttière mio-plio-quartenaire, allongée de Kairouan jusqu'au golfe de Hammamet. Elle est riche en sites préhistoriques et surtout en ramadiyas. Ces données permettent d'engager les rôles respectifs des facteurs structuraux, climato-eustatiques, morphodynamiques et anthropiques dans la genèse, la dynamique et l'évolution de la sebkha côtière. En outre, la présence d'une malacofaune fossile lagunaire, des modelés variés et des générations de dépôts laguno-marins, hydroéoliens et fluvio-deltaïques dans et en bordures de la dépression littorale, pose d'importants problèmes concernant l'évolution des dynamiques et du fonctionnement holocènes.

Halq al Minjil offre un potentiel intéressant pour des reconstitutions paléoenvironnementales et de l'évolution des dynamiques hydro-morphosédimentaires. Les travaux de terrain et d'investigation *in situ* ont permis d'identifier une multitude de modelés hydroéoliens et fluvio-deltaïques et d'accéder à des archives sédimentaires dilatées, hétérogènes et variées. Une étude géomorphologique et sédimentologique, étayée par des analyses multiparamètres et des datations radiocarbones, permet de bien caractériser les sédiments, d'analyser les faciès sédimentaires et de déterminer leur signification morphodynamique et environnementale. Elle permet d'établir la chronostratigraphie holocène de différentes phases majeures de sédimentation et celle de l'évolution des dynamiques fluviatiles, marines, lagunaires et éoliennes. Elle permet également d'apprécier l'histoire des rapports terre/mer, des changements de milieux et du fonctionnement hydrologique et éolien du système côtier pendant l'Holocène.

La recherche menée à Halq al Minjil a un triple objectif :

(1) l'inventaire des remplissages de l'enclave littorale afin de définir les faciès sédimentaires, de caractériser les processus et les conditions morphodynamiques et dedécrire les milieux de sédimentation aussi bien dans l'ombilic que sur les rives de la dépression.

(2) l'établissement d'une échelle litho-chronostratigraphique de synthèse des remplissages sédimentaires pour reconstituer l'histoire morphosédimentaire et les différents stades et systèmes du fonctionnement hydrologique.

(3) l'étude des modelés hydroéoliens de bordures et l'appréciation des processus dépositionnels et d'évolution post-dépôt des sédiments éoliens afin de comprendre le fonctionnement hydroéolien de Halq al Minjil durant l'Holocène.

CHAPITRE IV :
REMPLISSAGES DU FOND ET DEPOTS DES RIVES DE HALQ AL MINJIL : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE

L'examen des paysages actuels des environs de Halq al Minjil laisse rapidement apprécier la grande variété de modelés et de dépôts ainsi que la complexité du fonctionnement du système côtier. L'étude des remplissages du fond et de bordures de la sebkha littorale, dans leur contexte topo-structural, permet la connaissance de la répartition, de la dynamique et de l'évolution des sédiments et des modelés associés. L'inventaire des archives sédimentaires du fond et des rives de Halq al Minjil s'est appuyé sur la réalisation de **trois sondages carottés profonds**, complétés par **trente-et-un sondages à la tarière à main**. Une **description lithoséquentielle**, **cinq datations ^{14}C AMS** et des **analyses multi-paramètres et multi-échelles**, ont été poussées principalement sur les carottes. Elles ont permis de bien caractériser les sédiments, de déterminer les mécanismes morphodynamiques et les environnements sédimentaires et de préciser la chronostratigraphie des dépôts. Sur une tarière ou une carotte, les séquences lithostratigraphiques aux caractéristiques semblables et génétiquement liées sont inventoriées et regroupées en assemblages de faciès. **Sept grandes catégories de faciès des remplissages du fond et de rives de Halq al Minjil** ont été distinguées.

Dans ce chapitre, on étudie, en premier lieu, la physiographie, les milieux géographiques, la genèse et les différentes étapes de la configuration morphologique de l'enclave côtière de Halq al Minjil. On définit, ensuite, la typologie des faciès des remplissages sédimentaires. On caractérise, par la suite, les dépôts de l'ombilic puis ceux des rives de Halq al Minjil, afin d'apprécier les dynamiques dans deux contextes différents de la sédimentation. La signification morphodynamique et pédologique ainsi que l'environnement sédimentaire de chaque faciès seront également présentés.

I- PHYSIOGRAPHIE, GENESE ET MILIEUX GEOGRAPHIQUES DE HALQ AL MINJIL

L'étude des caractéristiques physiographiques, du cadre topo-géologique, de la genèse et des milieux géographiques de la dépression littorale permet d'acquérir des éléments de compréhension de l'ampleur et de l'hétérogénéité de la sédimentation holocène. Elle aide à comprendre la complexité des dynamiques sédimentaires et l'évolution du fonctionnement holocène d'un système à l'interface terre/mer.

I-1- Caractéristiques physiographiques et morphologie de Halq al Minjil

La lagune occasionnelle ou la sebkha littorale de Halq al Minjil, surnommée ci-après sebkha-lagune, occupe le fond d'une dépression littorale, allongée sud-est/nord-ouest (Fig. 28). Cette dépression se situe sur les marges méridionales et occidentales du village antique Hirgla (Horrea Coelia), au milieu du golfe de Hammamet. Elle se trouve à l'extrémité nord-est de la gouttière sud-ouest/ nord-est reliant la plaine de Kairouan au golfe de Hammamet.

L'enclave littorale occupe un espace ouvert de basse topographie, inférieure à 15 m (Boujelben, 2013a). Elle s'étend entre les collines surbaissées de Sidi Bou Ali au sud et la lisière méridionale de la plaine d'Enfidha au nord. A l'ouest, elle limite le plateau, bas et laniéré de Kandar-Sidi-Bou Ali. Au nord-est, elle est séparée de la sebkha Assit aj-Jriba par le cordon fossile d'Adh-Dhra. Vers la mer, Halq al Minjil est barrée, sur environ 3,9 km, par un cordon tyrrhénien étriqué, haut de 1,6 à 5,7 m et discontinu. A deux kilomètres au sud du

village de Hirgla, ce cordon est interrompu par deux ensellements. Il s'agit de véritables discontinuités topographiques, de 500 et de 250 m d'ouverture et à la cote de 1,5 m en moyenne. Elles correspondent à **des paléograus ayant assurés autrefois la communication mer/Halq al Minjil**. Aujourd'hui, elles sont colmatées par une formation colluvio-alluviale, taillée en petite falaise décimétrique. Cette dernière est occasionnellement franchie par les vagues de tempêtes. Les enrochements aménagés y sont des témoins. Plus au sud-est, **un troisième ensellement s'ouvre en grau fonctionnel**, large plus de 200 m, permettant à Halq al Minjil de communiquer avec la mer. Le grau présente un tracé sinueux et une profondeur d'ordre décimétrique. Les courants d'eau marine dirigés vers l'intérieur sont ralentis et contribuent fortement au confinement du plan d'eau.

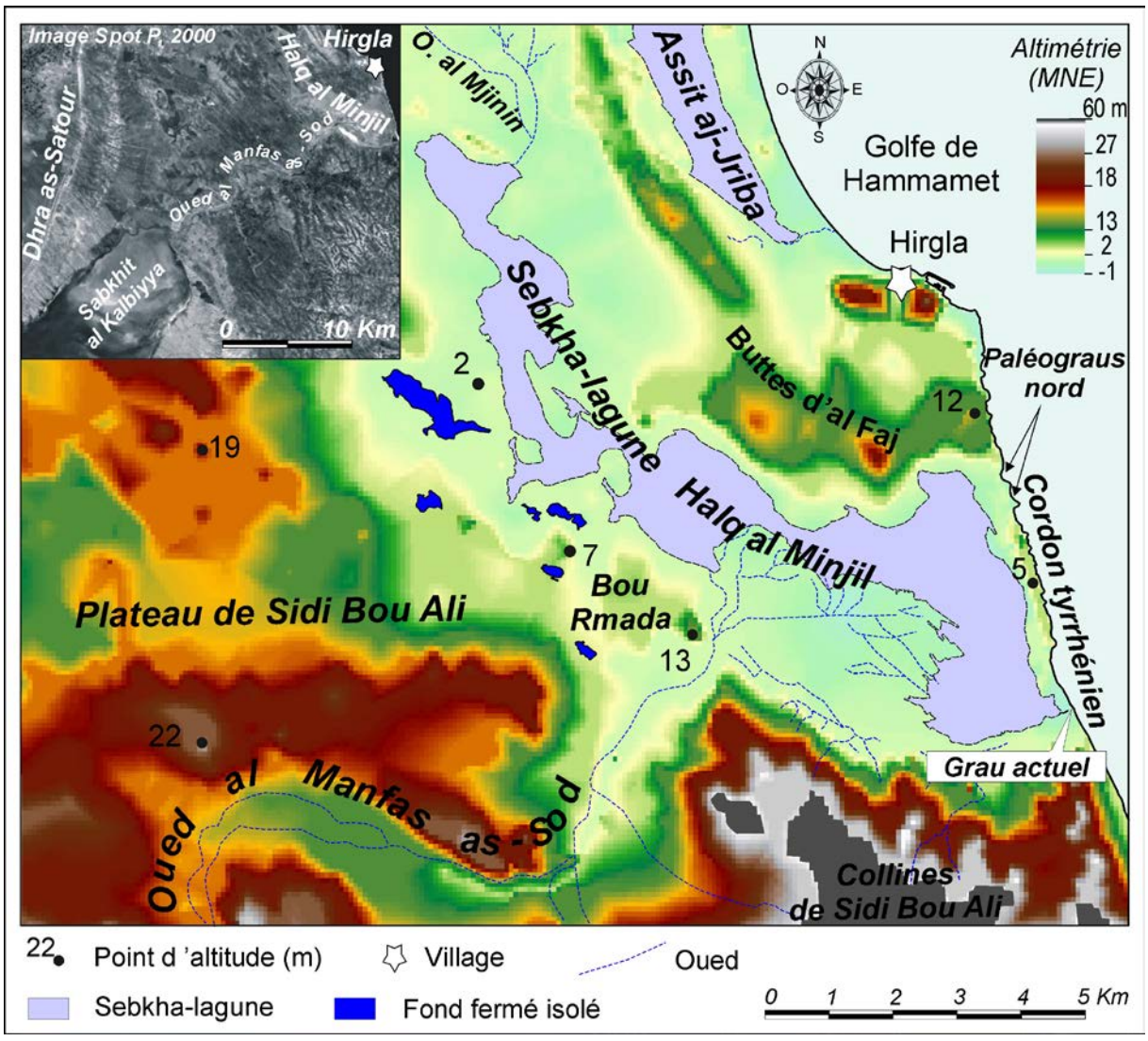


Fig. 28 : Cadre orohydrographique de Halq al Minjil
Sources : - Feuilles topographiques de Halq al Minjil n°50 et de Sidi Bou Ali n°49, NE et SE, au 1/25000
- Levés topométriques de terrain (O. Maquaire et A. Boujelben)

La sebkha à proprement dite est d'environ 17 km² de superficie, soit douze fois plus petite que son bassin versant (Feuilles topographiques de Halq al Minjil n°50 et de Sidi Bou Ali, n°49, NE et SE au 1/25000, 1991-1992). La largeur, étroite au nord, varie de 0,3 à 4,7 km. La longueur est d'environ 14,5 km. Les rives sont sinueuses. Elles sont localement délimitées par des microfalaises, centimétriques à décimétriques, et/ou par des petites

éminences de bordures de 2 m de hauteur en moyenne. Le fond quasi-plat, penche doucement du nord au sud de 2,95 m à -1 m environ. La pente transversale est en berceau.

Halq al Minjil occupe la partie aval de l'hydrosystème. Elle est l'exutoire naturel de deux oueds. Au nord, l'oued Sidi adb al Gwi-al Mjinin est le collecteur des eaux des oueds depuis Jbel Fadhloun. Le bassin versant couvre une superficie de 121 km^2, soit sept fois la surface de la sebkha. Au sud-ouest, l'oued al Manfas as-Sod est le collecteur local des eaux des hauteurs de Qal'a al Kbira et l'évacuateur des trop-pleins de la sebkha al Kalbiyya. **Halq al Minjil est l'ultime réceptacle des eaux de l'ensemble de la Tunisie centrale, en drainant un bassin potentiel de plus 15870,5 km^2**.

Au centre-ouest de la sebkha, des petits fonds inondables, isolés et peu profonds marquent le paysage du système paralique. Leurs superficies vont de quelques centaines de mètres carrés à environ 48 hectares. Ils sont séparés par **des bourrelets allongés sud-est/nord-ouest** ou par des surfaces relativement planes. Au sud, un petit relief dissymétrique culminant à 2 m et allongé nord-est/sud-ouest, occupe le fond de la sebkha. Il évoque la forme d'**un îlot dunaire**, appelé localement « **Guataya** ». Au nord et au nord-ouest de la localité al Aribat, un alignement d'îlots similaires, est orienté sud-est/nord-ouest et s'élève à 5 m d'altitude. Il borde Halq al Minjil du coté nord et nord-est, séparant ainsi un petit bassin annexe du corps principal de la sebkha littorale.

I-2- Genèse et étapes de la configuration morphologique de l'enclave littorale de Halq al Minjil

La genèse et la configuration de la dépression de Halq al Minjil ont été détaillées par Tagorti (1990). Elles sont conditionnées par deux facteurs essentiels : (1) une subsidence ancienne associée à des paléofractures majeures, (2) la dynamique et l'évolution morphologique du littoral tyrrhénien.

I-2-1- Une subsidence ancienne, moteur majeur de la genèse des zones déprimées

L'analyse sismostratigraphique du substratum tertiaire des environs de Hirgla, a montré une importante paléofracturation. Celle-ci est responsable de la subsidence et constitue le moteur majeur de la création des aires déprimées propices à l'instauration d'environnements lagunaires (Tagorti, 1990).

Depuis le Langhien, une zone de dépression est-ouest, actuellement occupée par le plateau de Sidi Bou Ali et le complexe des sebkhas Halq al Minjil et Assit aj-Jriba, était présente sur une paléostructure synclinale, profonde et subsidente, sollicitée par les régressions et les transgressions (Fig. 29). Elle est limitée au sud par des failles normales est-ouest, à l'ouest par l'axe fracturé d'as-Satour et à l'est par les accidents environ N160 (Tagorti, 1990). Cette tectonique faillée est responsable de l'ennoyage des structures atlasiques occidentales en subsurface, par les dépôts néogènes et quaternaires (Bédir 1988). Dans un essai de corrélations des niveaux repères mio-plio-quaternaires, Tagorti (1990) a montré un épaississement des dépôts au niveau de Halq al Minjil, puis une nette diminution au sud de la sebkha littorale et sur les bordures occidentales de Assit aj-Jriba. Ces données peuvent annoncer le caractère subsident de l'enclave littorale depuis le Miocène et l'exhaussement du secteur ouest de la sebkha Assit aj-Jriba. Il est probablement en relation avec la paléostructuration profonde allongée E-W, détecté dans les courbes isopaques du Tertiaire en subsurface (Tagorti, 1990).

Au Tyrrhénien, une distension dirigée nord-est/sud-ouest a repris le réseau des failles du Pléistocène inférieur. Elle a commandé l'association des jeux de décrochements est-ouest dextres et nord-sud sénestres (Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990). Elle a favorisé une subsidence locale et a dirigé en surface les limites de l'enclave littorale et sa morphologie

fragmentée. L'examen des cartes topographiques montre des linéaments est-ouest et subméridiens qui longent les limites actuelles de la dépression.

Halq al Minjil appartenait à une dépression contrôlée par une subsidence continue depuis le Miocène.

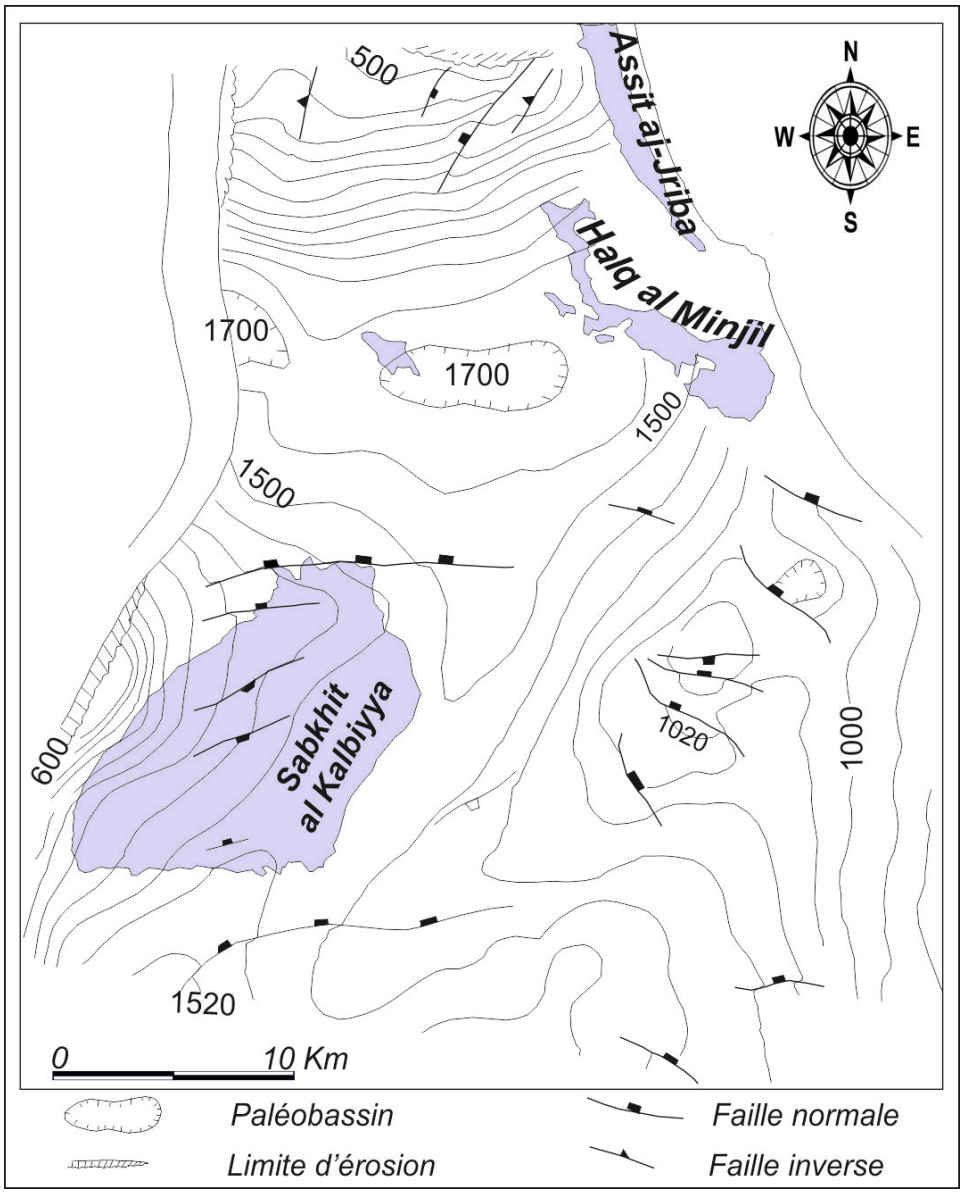


Fig. 29 : Depuis le Langhien, un contexte géologique prédisposant à l'accueil des domaines déprimés

Source : Tagorti, 1991 (Cartes isopaque et isochrone temps Aïn Ghrab et Aïn Ghrab-Quaternaire ; redessinées)

I-2-2- Dynamiques littorales, paléogéographie et étapes de la configuration morphologique de la dépression littorale

D'origine tectonique, le site d'accueil de la dépression côtière, va être barré par un cordon littoral. **Halq al Minjil est un système paralique de barrage**, installé en arrière d'un cordon tyrrhénien dû à l'action conjuguée marine et éolienne. Sa configuration morphologique et les étapes de l'évolution paléogéographique s'appréhendent à travers l'agencement des dépôts tyrrhéniens et la succession de **trois phases de transgression et de régression** (Fig. 30).

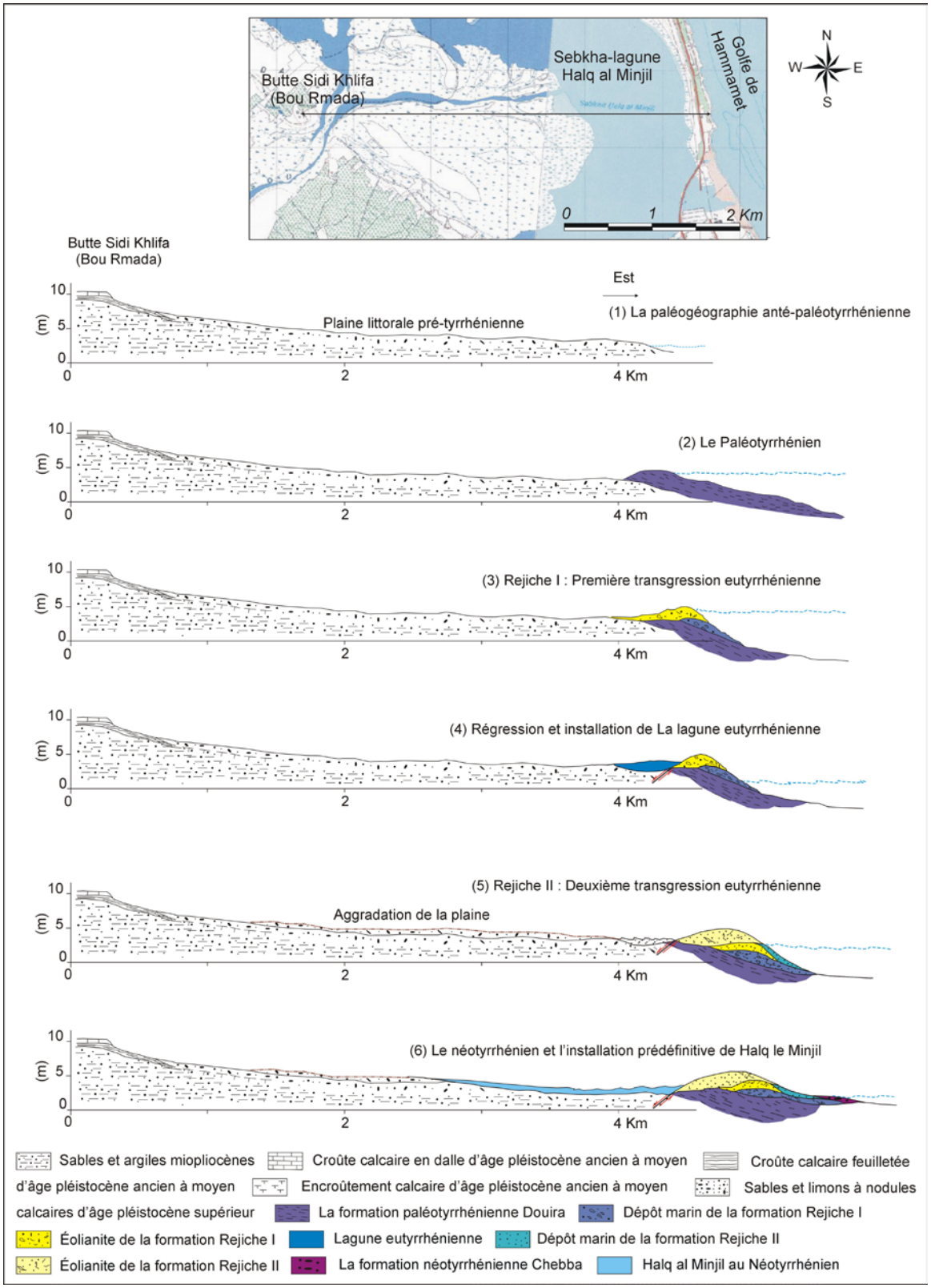


Fig. 30 : Genèse et phases d'installation de Halq el Minjil : essai de reconstitution (Tagorti, 1991, redessiné et complété)

I-2-2-1- La première phase paléotyrrhénienne (>120000 BP)

Une plaine côtière anté-tyrrhénienne occupe l'emplacement actuel de Halq al Minjil. Elle s'étend au pied de la retombée péri-anticlinale de la structure de Qal'a al Kbira, des buttes et des collines de Bou Rmada (Fig. 30.1). Sa mise en place est postérieure aux

déformations qui ont affecté la croûte pléistocène ancien à moyen (Boujarra et Gammar, 1993). Les eaux continentales ont rongé la croûte calcaire et le substratum mio-pliocène (Barrot, 1972b). Des paléotalus d'érosion ou des « paléofalaises » mortes taillées dans la croûte calcaire longent aujourd'hui les rives sud-ouest et centre-est de Halq al Minjil.

Une première transgression est responsable de la mise en place de **la formation paléotyrrhénienne Douira** (Paskoff et Sanlaville, 1976, 1980, 1983 ; Mahmoudi, 1986 ; Jédoui *et al.*, 1987 ; Tagorti, 1990 ; Oueslati, 1993, 1994). Elle a conduit à la construction d'une barrière littorale (Fig.30.2). Aujourd'hui, la formation n'apparaît qu'à la pointe rocheuse qui limite vers le nord la première entaille rompant le cordon (Fig. 31, photo1). Elle montre un pendage d'environ 40° vers l'Est. L'oued al Manfas as-Sod a communiqué avec la mer par des entailles encaissées. Le goulet méridional, encore fonctionnel, et les paléograus septentrionaux sectionnant aujourd'hui le cordon au nord, peuvent en témoigner. Dans le premier goulet, on souligne l'absence d'une sédimentation tyrrhénienne, en affleurement.

I-2-2-2- La deuxième phase eutyrrhénienne (vers 100-120000 ans BP)

L'Eutyrrhénien ou la formation Rejiche affleure le long de la section littorale de Halq al Minjil, présentant le haut relief de la côte. **Il est formé de deux unités : Rejiche I et Rejiche II** (Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Mahmoudi, 1986 ; Tagorti, 1990 ; Oueslati, 1993, 1994 ; Mejri, 2012)**.** Chacune est composée d'**un dépôt marin** (Fig. 31, photo 2, a-1 et c-1)**, suivi d'une éolianite (**Fig.31, photo 2, a-2 et c-2). Les deux unités sont séparées par un niveau lagunaire (Fig. 31, Photo 2, b).

Après la mise en place de l'unité Rejiche I (Fig.30.3), **une lagune s'est formée à l'endroit de Halq al Minjil** (Fig.30.4). Les trois goulets ont assuré la communication avec la mer. Les deux paléograus septentrionaux montrent des argiles silteuses vertes à une dizaine de centimètres au-dessus du niveau actuel de la mer. La lagune a occupé apparemment les zones où la continentalisation l'a emporté sur la régression de l'unité Rejiche inférieure (Tagorti, 1990). Les sondages effectués à la tarière à main montrent un profil transversal en berceau et une largeur réduite, traduisant une morphologie de lagune comparable à celle de Sabkhit Assit aj-Jriba aujourd'hui.

La formation Rejiche II comble la plupart des zones basses et touche même par endroits le Tertiaire et le Quaternaire. Elle se trouve à 3,5 m au dessus du niveau marin actuel (Fig.30.5). Elle témoigne **des variations eustatiques de grande ampleur (+10 m) et/ou des mouvements néotectoniques de subsidence** (Paskoff et Sanlaville, 1983, Tagorti, 1990). Au cours de Rejiche II, les dépôts marins et dunaires ont recouvert toute la lagune préexistante, formant définitivement **une barrière entre le milieu lagunaire ancien et la mer ouverte**. Sur les berges actuelles de Halq al Minjil, les sondages à la tarière à main ont montré la superposition de Rejiche II sur les dépôts paléolagunaires.

En arrière du cordon Rejiche II, la dépression côtière barrée a gardé certains liens de communication et d'échange avec la mer. Depuis, la configuration actuelle de l'enclave littorale s'est installée. Au sud de Halq al Minjil et dans la section littorale de Shat Maryam, les dépôts eutyrrhéniens ont été trouvés dans le cours moyen de l'oued Brahim sous l'accumulation alluviale de la basse terrasse historique (Boujelben, 2002). Ici, la paléogéographie annonce **une ancienne baie pré-tyrrhénienne qui s'étendait au sud du village de Hirgla au-delà de 1,5 km du rivage actuel**.

I-2-2-3- La troisième phase néotyrrhénienne (vers 80000 ans BP)

La formation Chebba est attribuée à la dernière pulsation marine **néotyrrhénienne** (Fig. 30.6 ; Fig. 31, Photo 3 et 4). A environ 4,5 km au sud de Hirgla, un seul site fait

apparaître **une plateforme d'abrasion** taillée dans les grès coquilliers de l'unité Rejiche inférieure (Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Oueslati, 1993, 1994 ;). La formation, contigüe aux pieds de la falaise eutyrrhénienne, indique une côte rocheuse, sur laquelle les vagues viennent buter sans avoir pu la franchir. Aujourd'hui en restes exigus, **cette formation reconstitue un niveau marin relatif de + 2-3 m** (Paskoff et Sanlaville, 1983). Les eaux néotyrrhéniennes ont envahi Halq al Minjil par les trois graus.

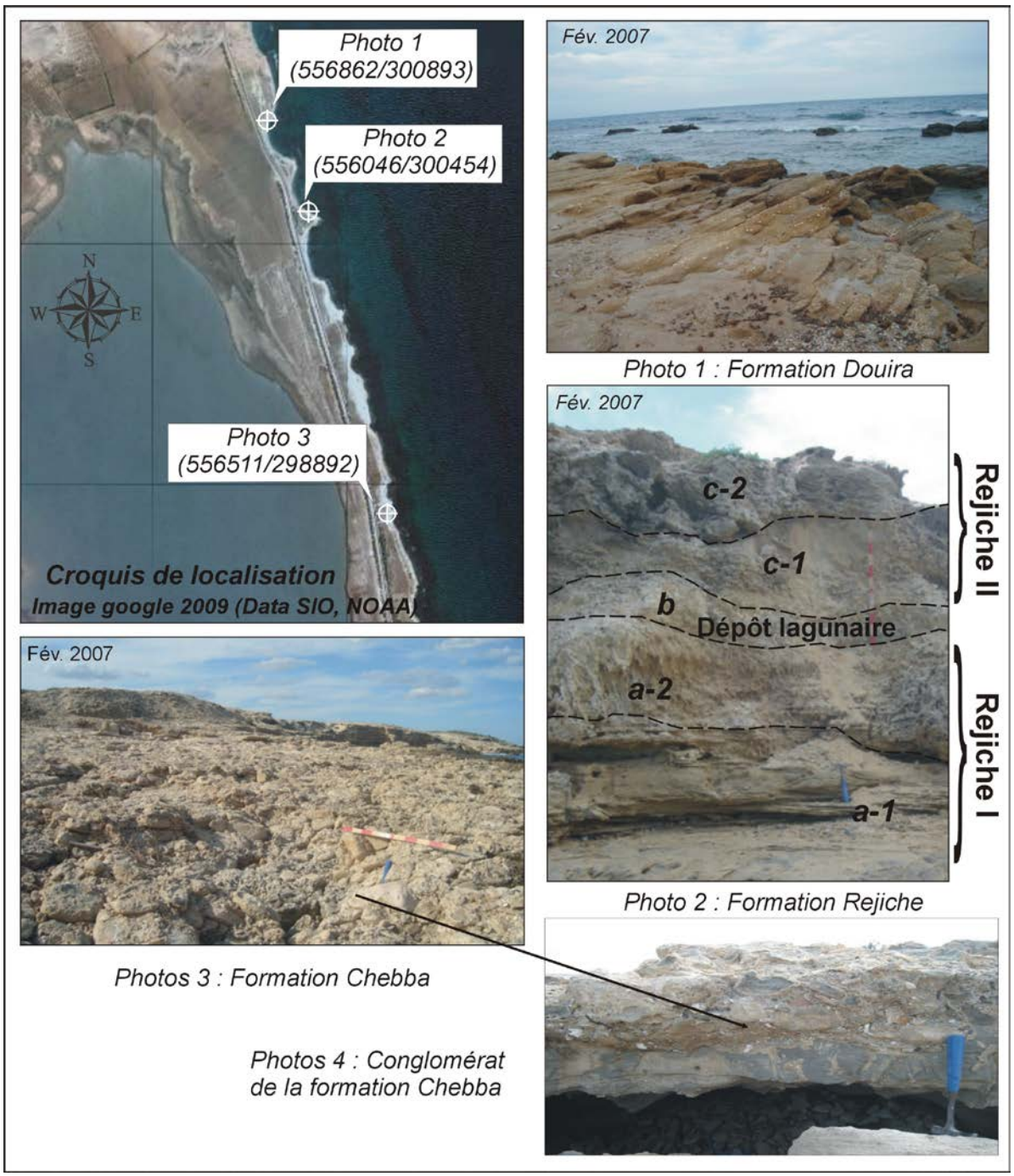


Fig. 31 : Formations tyrrhéniennes du cordon littoral de Halq al Minjil

Pour conclure, **Halq el Minjil est d'origine double : structurale et hydro-éolienne.** Elle est inscrite dans une dépression d'origine tectonique, façonnée et retouchée au cours les différents cycles climatiques du Pléistocène moyen et supérieur. Elle est séparée de la mer par un cordon fossile tyrrhénien, bordant un ancien golf subsident

(El Batti, 1974 ; Tagorti, 1990). Les dynamiques côtières, marines et éoliennes, sont génératrices de la barrière tyrrhénienne. **Les épandages fluviatiles** des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin **ont repoussé la dépression de Halq al Minjil vers l'est** exprimant son étendue longitudinale tout le long du cordon littoral.

I-3- Milieux géographiques et situations hydrologiques de Halq al Minjil

Suivant sa position, ses situations hydrologiques et ses potentiels écologiques, Halq al Minjil est nommée selon les riverains, les aménageurs et les chercheurs : sebkha, sebkha paralique, sebkha littorale, lagune ou zone sensible. En remontant la dépression littorale du sud au nord, on distingue pourtant vite un certain ordonnancement de deux types de milieux différents. Le premier méridional, s'apparente à un milieu de lagune en communication avec la mer et qui, de ce fait, en subit quasi-constamment l'influence. Le second septentrional est proprement dit, une sebkha qui se trouve sous la stricte influence des dynamiques continentales. Sur les bordures des deux milieux s'étend une auréole de chott. Cette juxtaposition de deux milieux traduit l'originalité et la complexité du fonctionnement de Halq al Minjil en **système de sebkha-lagune** (Fig. 32.1).

I-3-1- Le milieu méridional de lagune

Dans la partie méridionale de la dépression, un plan d'eau quasi-permanent définit **un milieu de lagune** (Fig. 32.2a). Un goulet sud-est, d'une centaine de mètres de large, lui assure la communication avec la mer. Le niveau de l'eau est très variable, de quelques centimètres à plus de 1 m. Le marnage interne n'est que de quelques centimètres provoquant des seiches. Les volumes d'eau sont réglés par l'incursion marine, les apports pluviaux et fluviaux et l'évaporation. Halq al Minjil reçoit également les eaux usées de la ferme aquacole « Aquaculture Tunisienne » et de la laiterie « Tunisie Lait » ainsi que les eaux épurées de la station STEP de Sidi Bou Ali.

La taille de la lagune varie entre 7 et 11,5 km². La lagune peut voir son niveau monter rapidement et atteindre la sebkha à l'amont de la route R.V.E 812. Elle connaît aussi un assèchement rapide, surtout dans sa partie nord en été et pendant les sècheresses. Les zones de balancement de marées sont larges surtout au nord, montrant au delà du plan d'eau quasi-permanant une forte variation d'états de surface (Fig. 32.3a). On passe graduellement d'une surface interne (subtidale) mouillée et vaseuse à une surface externe (intertidale) fortement craquelée (Fig. 32.3b). La première surface montre des polygones de dessiccation. La seconde est couverte d'une croûte fine et discontinue de sels et ouverte par un réseau dense de fentes de dessiccation. Ces fentes dessinent des polygones aux dimensions variables qui vont commander le cheminement des filets d'eau lors du prochain flux hydrique. Des fech-fech caractérisent le supratidal de la lagune (Fig. 32.3c). La déflation éolienne est relativement limitée du fait du caractère mouillé ou humide des sols.

I-3-2- Le milieu septentrional de sebkha

La sebkha occupe la partie septentrionale de la dépression littorale, au-dessus de 1 m d'altitude. Le fond est rigoureusement plane, sans végétation, composé de limons et d'argiles silteuses, exclusivement continentaux (Fig. 32.4a) Le régime hydrologique saisonnier, est très irrégulier. La surface est souvent asséchée, aux nuances blanches de croûtes fines et fraiches de sel et de gypse (Fig. 32.4b). Elle est crevassée de fentes de dessiccation en forme de polygones de tailles variables surtout développés sur les marges les plus asséchées (Fig. 32.4c). Ici, l'évaporation est responsable de la structure spongieuse de la pellicule saline prenant l'aspect de fech-fech. Les limons et les argiles poudreux sont vulnérables à l'action éolienne.

De temps en temps, les apports de l'oued al Mjinin provoquent un ennoyage superficiel sporadique de la sebkha. La surface est submergée par une tranche d'eau pelliculaire d'ordre centimétrique. La route R.V.E 812, reliant la GP1 au village de Hirgla, subdivise la dépression en deux parties nord et sud. De ce fait le transit sédimentaire est déréglé et les transferts d'eaux amont-aval sont réduits. Ils se font à travers des buses ce qui accentue l'assèchement de la sebkha à l'amont. **Un domaine intermédiaire mixte assure le passage au milieu lagunaire à l'aval** (Fig. 32.1).

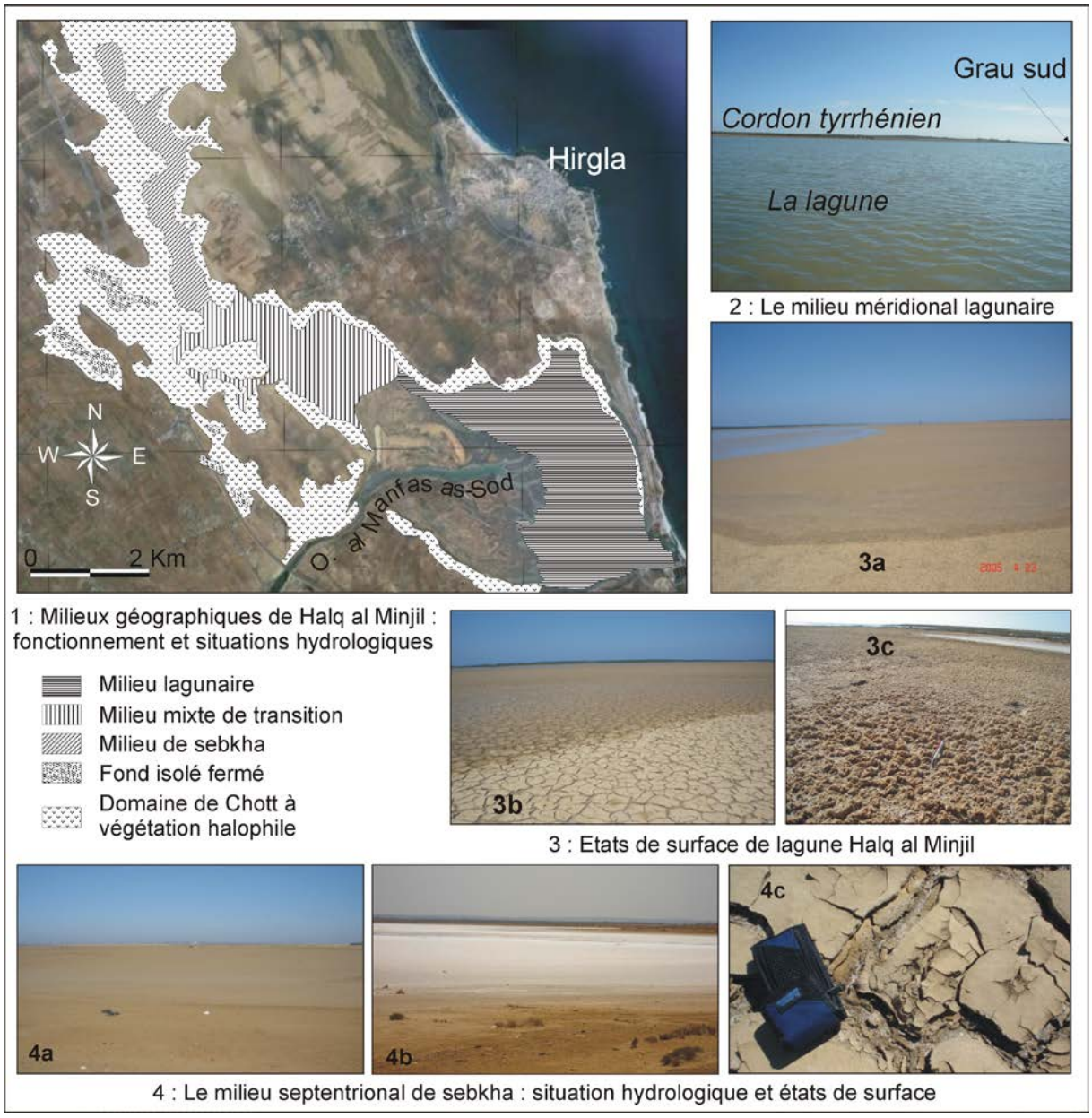


Fig. 32 : Milieux géographiques et états de surface de l'enclave littorale de Halq al Minjil
Sources : Image Google 2009 (Data SIO, NOAA) ; Photos aériennes 1963 et 1998, missions : Tu XLIX/250 et Tu 828/250 ; Observations de terrain

I-3-3- L'auréole externe de Chott

Une végétation halophile pousse sur les marges de la sebkha et de la lagune. Elle est fortement marquée par les caractéristiques pédologiques et physico-chimiques des sols. **Un domaine de chott** d'environ 3,5 km² de superficie, **occupe essentiellement la rive ouest et**

la partie septentrionale de la dépression littorale. Il est presque absent au sud et d'extension réduite sur les rives orientales.

Le chott, de moindre salinité, est sporadiquement envahi par les eaux lagunaires. Il est fréquemment retouché par les apports latéraux sur les versants. Les sables et les limons favorisent la déflation éolienne, là où les taux de couverture végétale sont faibles. Depuis quelques décennies, les chotts ont montré une tendance d'extension vers l'intérieur de Bled Bou Rmada et des champs d'oliviers. Ces derniers sont aujourd'hui intégrés dans le système de la sebkha-lagune (Boujelben, 2002), à cause de l'augmentation de la salinité des terrains bas côtiers (Oueslati, 2003).

La végétation est dominée par les Chenopodiaceae, en particulier *Halocnemum strobilaceum, Salicornia arabica, Suaeda mollis, Suaeda vera, Atriplex inflata et Arthrocnemum indicum*. À l'embouchure de l'oued al Manfas-as-Sod, au niveau du cône deltaïque et des chenaux d'écoulement, on rencontre *Typha latifolia* avec d'autres espèces vivaces telles que, *Tamarix africana, Juncus maritimus, Salicornia arabica, Atriplex halimus* et *Suaeda vera* (Jaouadi, 2009). Des rebelles de salicornes ont favorisé la formation de nebkas sur les deux rives orientale et occidentale de l'enclave.

II- TYPOLOGIE DES FACIES DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES

L'inventaire des archives sédimentaires du fond et de bordures de Halq al Minjil est rendu possible par la réalisation de trois sondages carottés (C1, C2, C3), complétés par trente-et-un sondages à la tarière à main (Fig. 33). Ces sondages ont permis de préciser l'ampleur, la répartition spatiale et le changement vertical des sédiments. La description lithoséquentielle haute résolution des remplissages et l'analyse sédimentologique des dépôts (granulométrie laser, morphoscopie des quartz, calcimétrie et indices granulométriques) ont permis d'établir des logs lithostratigraphiques détaillés (Fig. 34), de bien caractériser les sédiments et de déterminer les processus morphodynamiques. Sur les tarières, seuls les remblaiements posant des problèmes sur l'origine et sur l'environnement de dépôts ont fait l'objet d'analyses sédimentologiques. Dans l'ombilic, il était parfois difficile d'identifier l'origine de la matière. L'interprétation comparée des associations géochimiques et minéralogiques a été d'un grand secours. L'examen micromorphologique préliminaire de cinq lames minces a aidé à caractériser le faciès microscopique et d'en préciser les mécanismes sédimentaires et post-dépositionnels.

Les résultats d'analyses multiparamètres ont permis de distinguer, sur les carottes et les tarières, des successions de séquences lithostratigraphiques génétiquement liées, partageant des caractéristiques semblables. Ils ont permis de définir une typologie des faciès sédimentaires. Un faciès regroupe des séquences sur la base de la provenance de la matière (fluviatile, éolienne, marine, mixte), des processus sédimentaires et pédogéniques et le milieu de sédimentation (fluviatile, deltaïque, ombilical, supratidal, intertidal, infratidal). Il représente de grands changements spatio-temporels des dynamiques et des environnements sédimentaires (Cojan et Renard, 1999 ; Hamon, 2004, Catuneanu *et al.*, 2011).

A l'interface Terre/Mer, Halq al Minjil est sous l'influence marine et continentale. Le faciès sédimentaire est souvent mixte. Mais, des éléments distinctifs permettent de lui attribuer une origine particulière ou une influence notable au détriment de l'hydrodynamisme marin ou continental. On distingue sept catégories de faciès (Tab. 6).

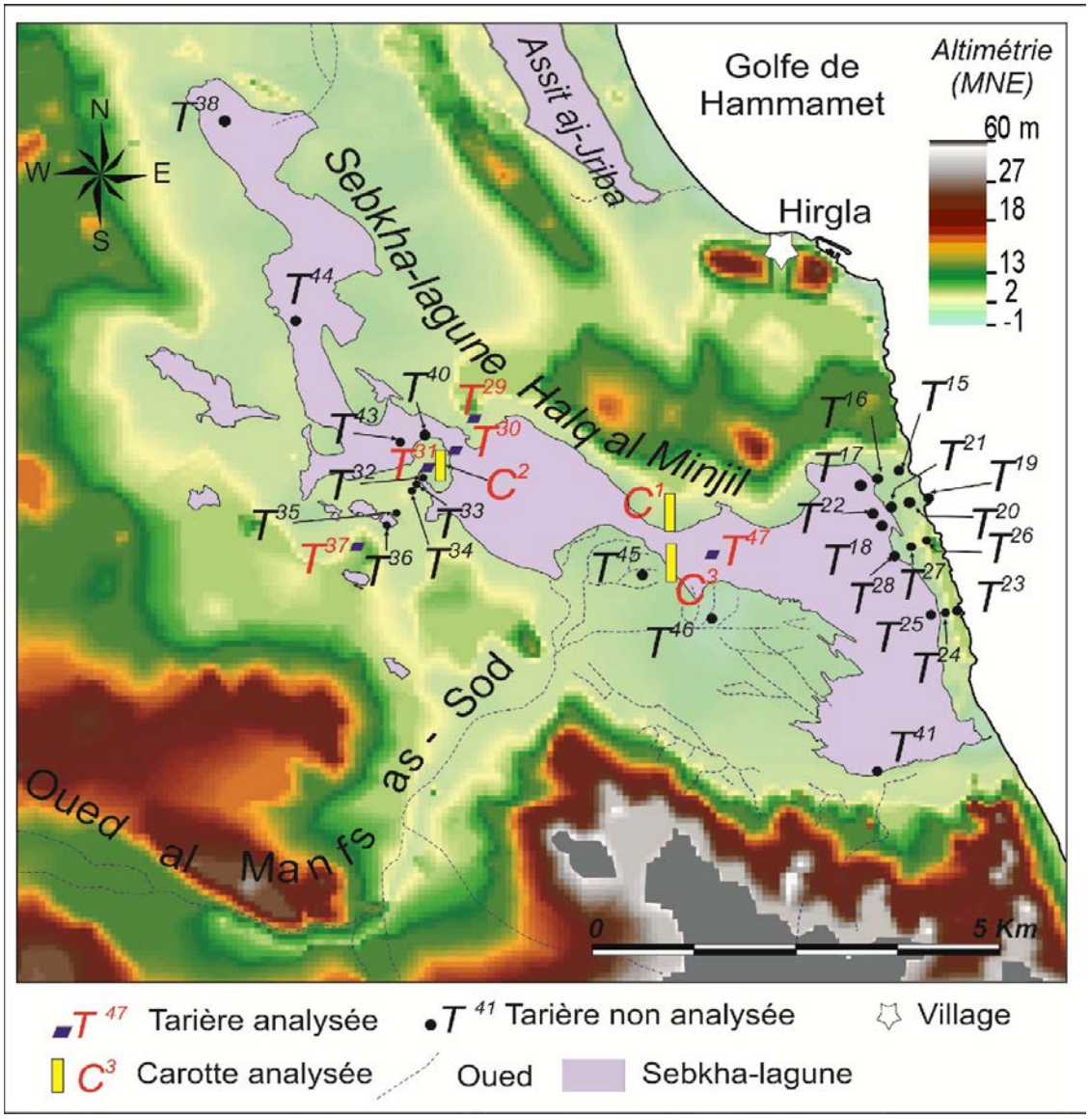


Fig. 33 : Sites d'implantation des sondages carottés et à la tarière à main dans l'ombilic et sur les rives de la sebkha-lagune Halq al Minjil

II-1- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)

Le faciès mixte ou fluvio-marin définit des séquences sédimentaires déposées dans un système côtier, alimenté à la fois par les eaux marines et continentales (Saaidi, 1988). Le faciès mixte aux apports fluviatiles et latéraux notables est reconnu par l'importance des éléments grossiers remaniés des formations dans le bassin (amas, cailloux, nodules et concrétions calcaires et/ou gréseux). Il se distingue par l'intercalation fréquente, dans les argiles fluvio-marines, de lits sableux et limono-sableux aux débris d'*Helix* et aux *Helix* entiers. Le faciès est caractéristique des milieux fluvio-deltaïques, aux débouchés des oueds.

II-2- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)

Le faciès sulfato-carbonaté explique des influences fulviatiles notables. Il est marqué par une forte richesse des sédiments détritiques en carbonates. Il est composé des argiles et des argiles silteuses à très forte teneur en carbonate de calcium et riches en calcite, dolomite, ankérite, halite et gypse. Les apports terrigènes chargés en calcaire dissous sont abondants. Les phénomènes diagénétiques associés à des phases d'émersion ou de proche émersion sont importants permettant ainsi la précipitation des sels.

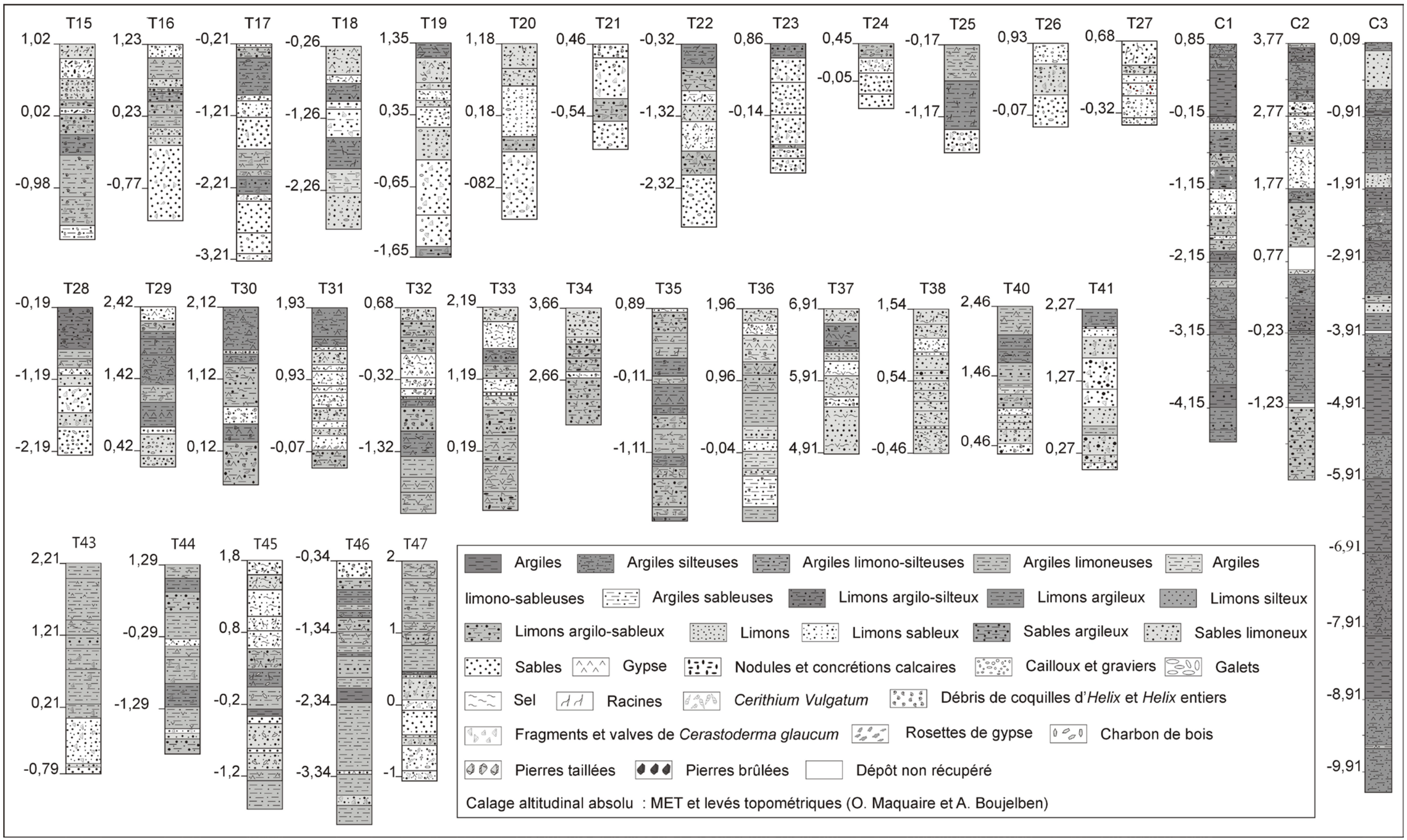


Fig. 34 : Stratigraphie séquentielle haute résolution des remplissages sédimentaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Typologie de faciès	Caractères spécifiques	Mécanismes morphodynamiques	Milieu de sédimentation
Faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)	Éléments grossiers, intercalations sableuses, *Helix*	Suspension uniforme Accumulation en vrac, libre proche de décantation	Milieux fluvio-deltaïques, intertidaux à subtidaux
Faciès sulfato-carbonaté (FSC)	Matière fine laminaire, dolomite ou ankérite, calcite, gypse et halite	Suspension uniforme et graduée sans roulement; Accumulation en vrac/libre proche de décantation	Lac temporaire Sebkha-lagune occasionnellement abritée des influences marines
Faciès mixte aux influences marines notables (FMM)	Dépôt fin laminaire ; aragonite, magnésium, sodium et potassium ; sapropèle	Suspension uniforme Suspension graduée avec un peu de roulement Accumulation en vrac, libre proche de décantation	Lagune-sebkha Milieu peu ou occasionnellement ouvert sur le large
Faciès lagunaire (FL)	*Dépôt hétérométrique Cerastoderma glaucum, Cerithium vulgatum, Donax trunculus* foraminifères benthiques	Suspension graduée avec un peu de roulement, Suspension uniforme Accumulation en vrac, libre proche de décantation	Lagune relativement/semi-ouverte sur le large
Faciès « évaporatique » (FE)	Dépôt fin, gypse, halite/ sulfates et chlorures (potassium, calcium, strontium, sodium)	Suspension uniforme Accumulation libre proche de décantation, en vrac	Sebkha littorale
Faciès fluviatile ou d'épandage fluviatile (FF)	Dépôt grossier, hétérométrique *Helix*	Suspension uniforme et graduée avec un peu de roulement ; Accumulation libre, en vrac, libre proche de décantation	Milieu fluvio-deltaïque Embouchures des oueds
Faciès éolien (FEO)	Stratification entrecroisée à litée des dépôts, Quartz émoussés mats et ronds mats dominants.	saltation, reptation, déflation éolienne, tourbillons	Modelés hydroéoliens de bordures

Tab. 6 : Typologie des faciès sédimentaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil

II-3- Le faciès mixte aux influences marines notables (FMM)

Le faciès mixte aux influences marines notables caractérise une sédimentation principalement limono-argilo-silteuse et argilo-silteuse possédant des fortes teneurs en magnésium, sodium et potassium. Il renferme de l'aragonite qui le distingue du reste des remplissages sédimentaires. Les sédiments sont souvent de couleur gris olive foncé et mis en place dans un milieu réducteur, peu profond et relativement abrité.

II-4- Le faciès lagunaire (FL)

Le faciès lagunaire se distingue par son contenu malacologique en *Cerastoderma glaucum, Cerithium vulgatum, Donax trunculus et* foraminifères benthiques. Les sédiments sont hétérométriques et contiennent de l'aragonite. Le faciès est caractéristique des milieux semi-ouverts sur le large et peu à relativement profond.

II-5- Le faciès d'évaporites ou « évaporatique » (FE)

Il ne s'agit pas de vrai gisement ou formations évaporatiques de saumures et de sels. Le faciès « évaporatique » se particularise par sa forte teneur en gypse et en halite, qui dépasse parfois le tiers du sédiment. Il regroupe des séquences lithostratigraphiques très riches en sulfates et en chlorures (potassium, calcium, strontium, sodium) remaniés et/ou

diagénétiques. Le faciès est typique d'une sebkha littorale, occasionnellement inondée par les eaux marines et/ou continentales (Kendall, 1978) et connaissant un comportement « évaporatique » en rapport avec une tendance à l'accentuation du semi-endoréisme.

II-6- Le faciès fluviatile ou d'épandage fluviatile (FF)

Le faciès fluviatile est nettement continental. Il correspond à un matériel détritique grossier, composé surtout de sables et de limons en vrac, aux débris d'*Helix* et aux *Helix* entiers. Il définit les dépôts d'embouchures des oueds en milieu fluvio-deltaïque d'une sebkha-lagune. Il peut aussi correspondre aux alluvions d'épandage fluviatile, en s'avançant d'autant plus loin vers le centre de l'enclave littorale pendant les grandes ou les brèves et les violentes crues.

II-7- Le faciès éolien (FEO)

Le faciès éolien définit un dépôt fin entrecroisé à lité. L'aspect émoussé mat et rond mat des quartz est dominant. Les grains émoussés luisants sont malpropres et picotés et présentent souvent d'importantes traces d'oxydation. Le faciès caractérise les milieux supratidaux et les modelés hydroéoliens de bordures de la sebkha (dunes et bourrelets).

III- LES REMPLISSAGES DE L'OMBILIC DE HALQ AL MINJIL : FACIES, MORPHODYNAMISME ET ENVIRONNEMENTS SEDIMENTAIRES

Un sondage carotté C3, à la cote de 9 cm au-dessus du niveau marin**,** a atteint **une profondeur de 10,3 m**. **Il est localisé dans l'ombilic de la sebkha-lagune**, à l'aval du front de l'ancien cône deltaïque de l'oued al Manfas as-Sod (*cf.*, Fig. 33 ; 553115/299363). Il a permis d'accéder, sans atteindre le substratum, à la colonne la plus complexe des archives sédimentaires étudiées. L'inventaire des archives sédimentaires est complété par **dix sondages à la tarière à main**. Ils ont été réalisés dans les parties nord et sud de l'enclave littorale (T30, T38, T40, T43, T44, T46), dans des petits fonds fermés en arrière de la sebkha actuelle (T31, T34, T35, T36) et sur des modelés de cône-deltaïque et de dune hydroéolienne, occupant aujourd'hui une position avancée dans la sebkha-lagune (T46, T47). L'objectif est de connaître la répartition spatiale et l'évolution latérale des faciès et des dynamiques sédimentaires.

Les analyses multiparamètres ont été entamées seulement sur la carotte C3. Le log stratigraphique a montré la superposition de **vingt-cinq séquences**, appartenant à **six grandes catégories de faciès sédimentaires**.

III-1- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)

Le faciès sulfato-carbonaté est le plus dilaté des remplissages de la carotte C3 (51,9% ; Fig. 35). Il regroupe sept séquences lithostratigraphiques issues de la partie inférieure de la carotte (S1-5, S7-8-C3).

III-1-1- Caractéristiques sédimentologiques et datation du dépôt

Le dépôt, épais de 535 cm, est composé d'**argiles et d'argiles silteuses** oxydées, parfois compactes et tantôt laminaires tantôt massives. Il est modérément à fortement calcaire et peu à modérément gypseux. Le tri est moyen à assez bon. La couleur est brune jaunâtre claire (2.5Y 6/4), jaune olive (2.5Y 6/6), jaune pâle (2.5Y 7/4, 5Y 7/3 et 7/4) et verte olive pâle (5Y 6/4 et 5Y 6/3). La médiane est très faible. Le grain moyen est dans les silts fins. Les quartz émoussés luisants souvent picotés (36-52%) et les grains émoussés mats (28-36%) prédominent. Les courbes granulométriques sont hyperboliques.

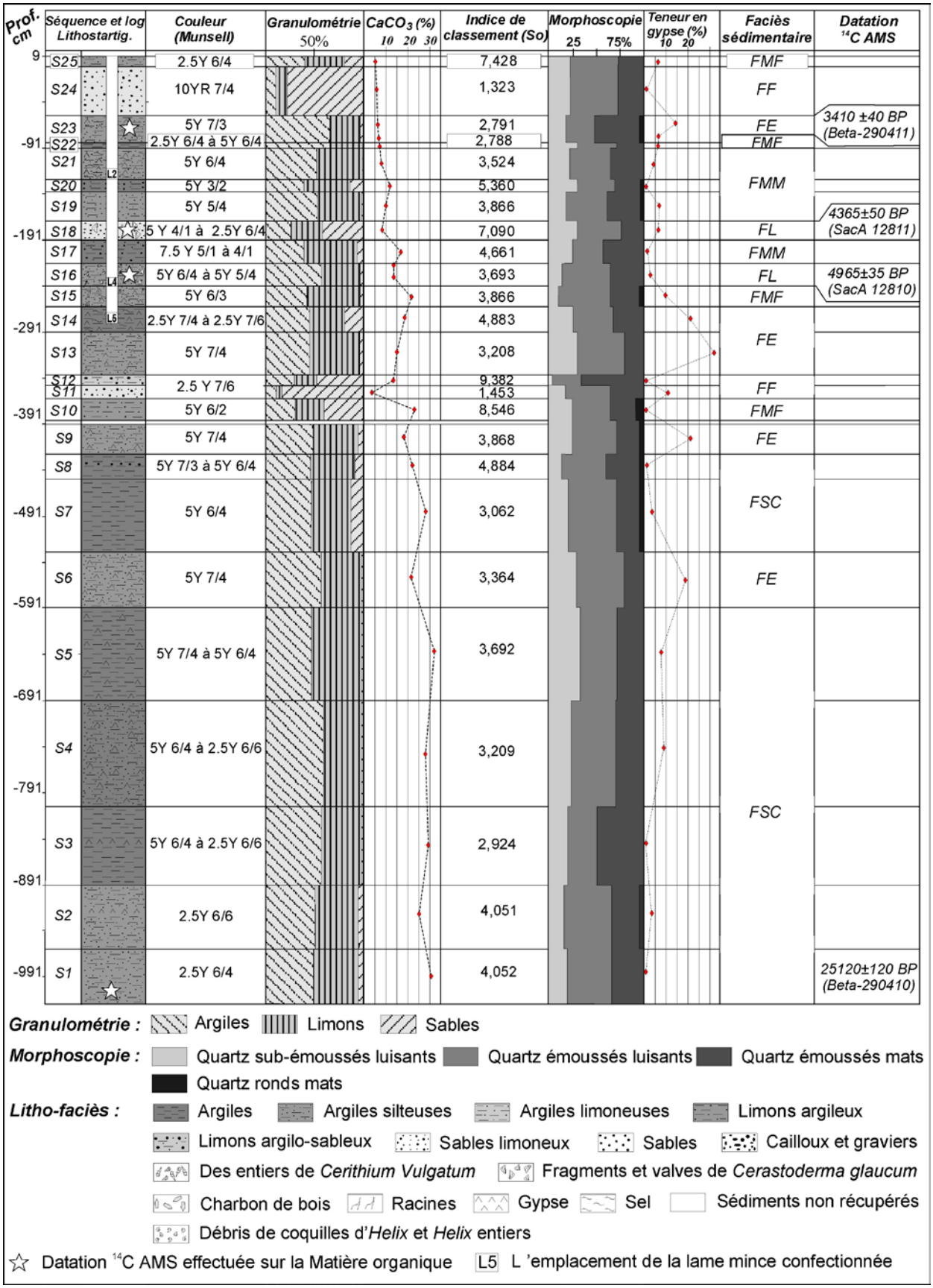


Fig. 35 : Caractéristiques sédimentologiques et datations des remplissages sédimentaires de la carotte C3 du centre de Halq al Minjil

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

La séquence S8-C3 possède un mauvais tri, associé à une distribution granulométrique de type quasi-logarithmique. Des macrocristaux de gypse lenticulaires apparaissent dispersés dans les séquences S1-4-C3 et deviennent plus denses dans la séquence S5-C3. Des taches noires millimétriques marquent la séquence S1-C3. La séquence S5-C3 montre des horizons verdâtres millimétriques et des fractions de charbon de bois de 2 à 3 mm de diamètre. Un lit fin de sables jaunes rougeâtres oxydés s'intercale dans la séquence S8-C3.

Une datation ^{14}C AMS a été effectuée sur la matière organique totale de la séquence S1-C3. Elle a permis de placer la base de la carotte C3 dans **le Pléistocène supérieur**. Elle a donné un âge de **25120±120 BP** (Beta-290410 ; 29560-30290 cal BP/28341-27611 cal BC).

III-1-2- Une composition minéralogique marquée par l'importance des carbonates

Les sept séquences lithostratigraphiques renferment du quartz, du microcline, de l'albite, de l'halite et en moindre importance du gypse. Elles se distinguent du reste des remplissages de la carotte par la présence de la dolomite et/ou de l'ankérite. La calcite est le minéral le plus abondant dans le sédiment. Les minéraux argileux se composent de kaolinite, d'illite, de smectite, de chlorite, d'interstratifiées illite/smectite et chlorite/smectite et du quartz (Tab. 7). L'albite (feldspath Na) et l'orthose (feldspath K) apparaissent dans la séquence S2-C3. Les séquences S1-3 et S5-C3 contiennent peut être de la goethite.

Séquence litho-startig.	Cortège minéralogique des argiles									
	Kaolinite	*Illite*	*Smectite*	*Interstratifiée Illite/smectite*	*Chlorite*	*Interstratifiée Chlorite/smectit*	*Quartz*	*Feldspath Na*	*Feldspath K*	*Goethite*
S8	*	*	*	*	*?		*			
S7	*	*	*	*	*		*			
	*	*	*	*	*		*			
S5	*	*	*	*	(*	ou *)	*			*?
	*	*	*	*	(*	ou *)	*			*?
S4	*	*	*	*	(*	ou *)	*			
S3	*	*	*	*	(*	ou *)	*			*?
S2	*	*	*	*	(*	ou *)	*	*	*?	*?
	*	*	*	*	(*	ou *)				*?
S1	*	*	*	*	(*	ou *)	*			*?

** Phase minéralogique mineure ; ** Phase minéralogique majeure*

Tab. 7 : Minéralogie des argiles du faciès sulfato-carbonaté (FSC) de la base de la carotte C3 de l'ombilic de Halq al Minjil

Analyses de laboratoire : LHG, UMR 7517, CNRS/ULP)

III-1-3- Des concentrations géochimiques hétérogènes

Deux groupes différents de séquences géochimiques se distinguent. Dans le premier groupe, les séquences S3, S7 et S8-C3 montrent d'importantes à moyennes teneurs en SiO_2, Al_2O3, TiO_2, K_2O, P_2O_5 et MgO. Les concentrations en éléments mineurs révèlent une importance relative du vanadium, chrome, nickel, zinc, zirconium et rubidium. Le deuxième groupe, composé des séquences S1, S2, S4 et S5-C3, montre une diminution générale et des faibles teneurs en éléments majeurs et mineurs (V, Cr, Cu et Pb). Les teneurs en Na_2O, Zn, Zr, Rb et Ba et Ni restent importantes. Dans les deux groupes, la teneur en matière et carbone organiques est importante, dépassant 23,5%. Les rapports molaires V/Al, Ca/Al et Fe/Al sont importants dans les séquences inférieures S1, S2 et S4-C3.

III-1-4- Signification morphodynamique et pédologique des sédiments

Les argiles et les argiles silteuses sont des dépôts principalement de crues, mis en place par des flux d'eau à faible capacité de transport. Elles sont issues d'une suspension

uniforme et sont déposées en vrac par excès de charge dans un milieu relativement calme (Fig. 36). Les sédiments de la séquence S7-C3 sont transportés par la suspension graduée. L'importance de la valeur du premier percentile, autour de 309 µm, et la faiblesse de la médiane (1,94 µm) peuvent indiquer un enrichissement plus important en matériaux fins pendant la descente des eaux. L'accumulation des séquences S3-4-C3 s'est effectuée en mode libre proche d'une décantation peu après la réduction de la vitesse du flux. La structure laminaire des remplissages indique des apports temporaires dans l'enclave littorale. L'aspect massif traduit par contre une mise en place par un ou des flux rapprochés. Les quartz émoussés mats, abondants dans les sédiments, expriment des remaniements sur des formations façonnées par le vent, principalement les éolianites du cordon tyrrhénien.

Halq al Minjil enregistre des cycles inondation/exondation et archive les signes d'une évolution post-dépôt des sédiments. Les taches noires de la séquence S1-C3, témoignent d'un milieu hydromorphe favorable à une forte décomposition de la matière organique par oxydation ou par une activité bactérienne (Vizier, 1974, 1984 ; Kaemmerer et Revel, 1989 ; Schütt, 2000). Les minéraux ferromagnésiens (albite, smectite, illite), la goethite et l'intercalation des horizons millimétriques verdâtres indiquent une pédogenèse en milieu réducteur, calme et confiné (Cojan, et Renard, 1999 ; Hamon, 2004).

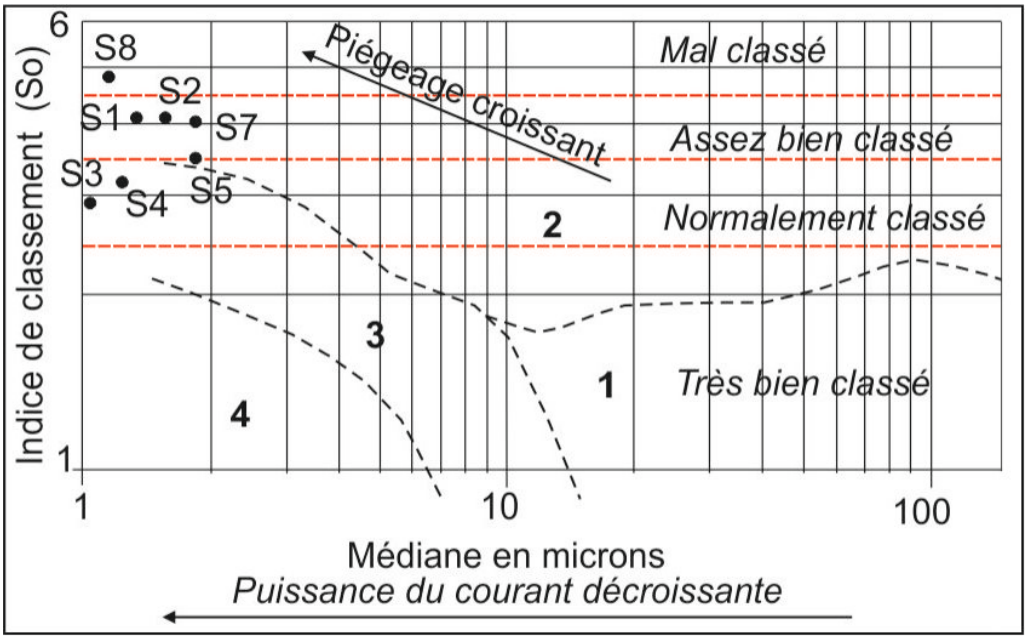


Fig. 36 : Typologie et modes d'accumulation des sédiments du faciès sulfato-carbonaté de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)

Légende : 1 : Accumulation libre ; 2 : Dépôt en vrac ; 3 : Accumulation libre proche de la décantation ; 4 : Décantation totale ; S1, S7 : Séquence lithostratigraphique

L'oxydation du matériel exprime des stades d'émersion avec des remontées périodiques de la nappe, permettant la réoxydation du fer (Vizier, 1974,1984 ; Kervazo et Laville, 1988). Les cristaux de gypse peuvent être de néoformation et/ou remaniés (apports marins et/ou continentaux). Le pompage évaporatique des eaux interstitielles, entraine la néoformation du gypse lenticulaire dans les pores de la frange capillaire (Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). L'halite témoigne de l'assèchement prononcé et/ou prolongé de Halq al Minjil, entraînant la formation d'une couche blanche laminaire, soluble à la surface (Cojan et Renard, 1999). Le charbon de bois dans la séquence S5-C3 traduit une carbonisation des débris végétaux et/ou des incendies, naturels ou anthropiques, locaux ou sur le bassin versant.

Les sept séquences du faciès FSC définissent une série de boue carbonatée, très distinctive du reste des remplissages de l'ombilic de Halq al Minjil. La calcite, la dolomite et/ou l'ankérite sont d'origine détritique. Elles peuvent provenir de l'action des eaux acides et magnésiennes sur les calcaires (Fischesser, 1955). Elles peuvent découler de l'altération des formations carbonatées, surtout les croûtes calcaires, par humidification d'un climat à saisons contrastées. De telles conditions favorisent la dissolution et la mise en solution des carbonates. Les pertes en SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 et CaO dans les séquences basales traduisent-elles des phénomènes de lessivage intense ? Une précipitation diagénétique de calcite et dolomite authigènes est plausible. Elle résulte des changements de la chimie des eaux, effectués par décomposition de la matière organique, l'assimilation biologique du CO_2, ou l'augmentation des températures (Schütt, 2000, Schütt et Thiemann, 2004).

III-2- Le faciès « évaporatique » (FE)

Cinq séquences lithostratigraphiques (S6, S9, S13, S14 et S23) décrivent le faciès « évaporatique ». Elles sont essentiellement issues de la partie médiane de la carotte C3. Elles représentent 18,2% de la sédimentation totale. Les épaisseurs varient de 19 à 46 cm.

III-2-1- Caractéristiques sédimentologiques, calage chronologique et cortège minéralogique du faciès

Du sel diffus, du gypse en cristaux lenticulaires et des rosettes gypseuses sont abondants dans des **argiles et des argiles silteuses laminées** et oxydées. La teneur des sédiments en gypse oscille entre 15 et 32,5%. Celle en carbonate de calcium varie entre de 15 et 19%. La couleur est vert olive pâle (2.5Y 7/4), jaune (2.5Y 7/6) et jaune pâle (5Y 7/4 et 5Y 7/3). La courbe granulométrique est hyperbolique (Fig. 37).

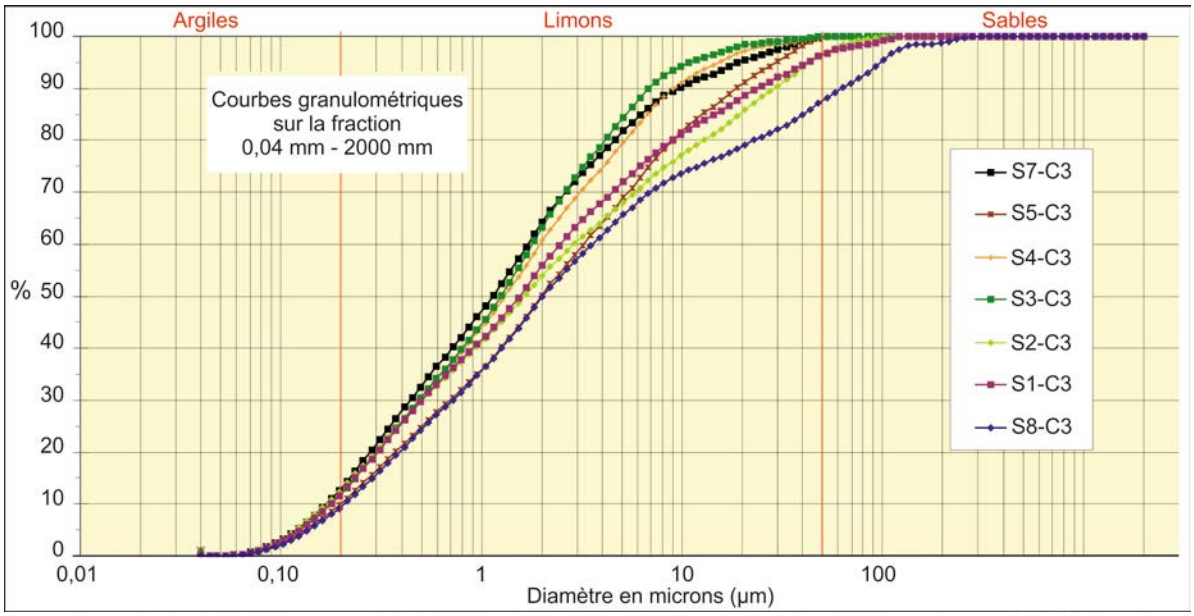


Fig. 37 : Distribution granulométrique des échantillons du faciès « évaporatique » (FE) de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)

Le tri est mauvais à assez bien. La séquence S13-C3 montre des taches de couleur rouille et une forte oxydation. Le grain moyen est dans les silts fins et les argiles granulométriques. La médiane est très faible, inférieur à 2,1 µm.

Les quartz émoussés luisants, picotés dominent (48-52%). **Une datation ^{14}C AMS**, effectuée sur la matière organique totale du sommet de la séquence S23-C3 a donné un âge de **3410±40 BP** (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC). Le quartz, la calcite

et le gypse sont les minéraux les plus prépondérants. Les feldspaths et les argiles sont peu représentés. Une halite abondante caractérise la séquence S23-C3. Les minéraux argileux sont composés de kaolinite, d'illite, de smectite, d'interstratifiée illite/smectite, de chlorite et de quartz.

III-2-2- Des éléments géochimiques moyennement concentrés révélant l'importance des sels

Les résultats d'analyses géochimiques révèlent de faibles à moyennes concentrations en éléments majeurs et mineurs. La silice, le titane, l'alumine et le fer, moyennement concentrés, évoluent généralement en sens inverse de la calcite (Fig. 38).

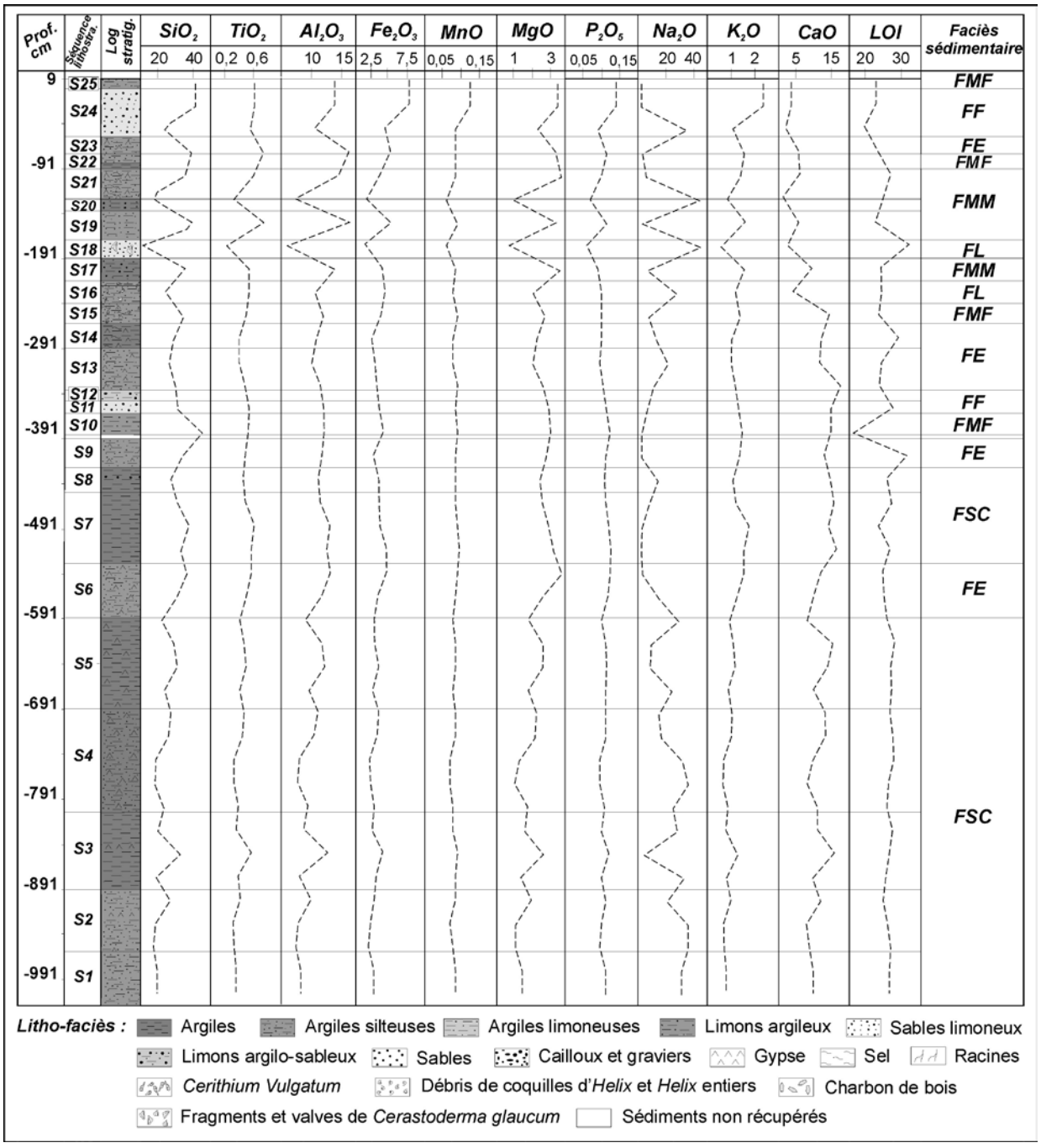


Fig. 38 : Concentration des éléments géochimiques majeurs des remplissages sédimentaires du fond de Halq al Minjil (Carotte C3)

Analyses de laboratoire : E. Dinelli

Le Strontium (Sr) présente un cation fortement engagé dans la chimie des séquences S9, S13, S14 et 23-C3 (1267 à 4583 ppm). La matière et le carbone organiques prennent de l'importance dans les séquences S13-14-C3 (27,19-29,17%). La strate S23-C3 enregistre des pics en Fe_2O_3, MnO, K_2O, P_2O_5, Zn et en Pb. La séquence S9-C3 présente les teneurs les plus élevées en calcite (16,07%), en cuivre (23 ppm) et en baryum (236 ppm). La séquence S13-C3 marque un fort rapport molaire Ca/Al, soit le plus important de la carotte.

III-2-3- Description micromorphologique de la séquence S14-C3 (lame mince L5)

Une lame mince L5 est fabriquée sur la séquence **S14-C3**, entre -271 et -280,5 cm de profondeur. La description micromorphologique révèle la succession suivante, du bas en haut (Fig. 39.1) :

* L5a : un squelette quartzeux de silts et de limons parfois sub-anguleux. Des microcristaux de gypse (10 µm) lenticulaires se dispersent dans une matrice argileuse micritique, oxydée et structurée par des fentes planaires, anastomosées et obliques.

* L5b : le squelette quartzeux devient moins marquant. Le taux et la taille des gypses ont nettement augmenté. Des cristaux lenticulaires, du micron (10 à 250 µm) au centimètre, lités et en poches caractérisent la masse argileuse brune, disséquée et ponctuée d'amas organiques noirs et d'oxyde de fer diffus (L5.2 ; L5.3). Des inclusions micritiques et des altérations de surface marquent les macrocristaux de gypse. Leur organisation oblique et verticale donne un aspect chaotique à la structure du dépôt. Des tests bioclastiques millimétriques ont été observés.

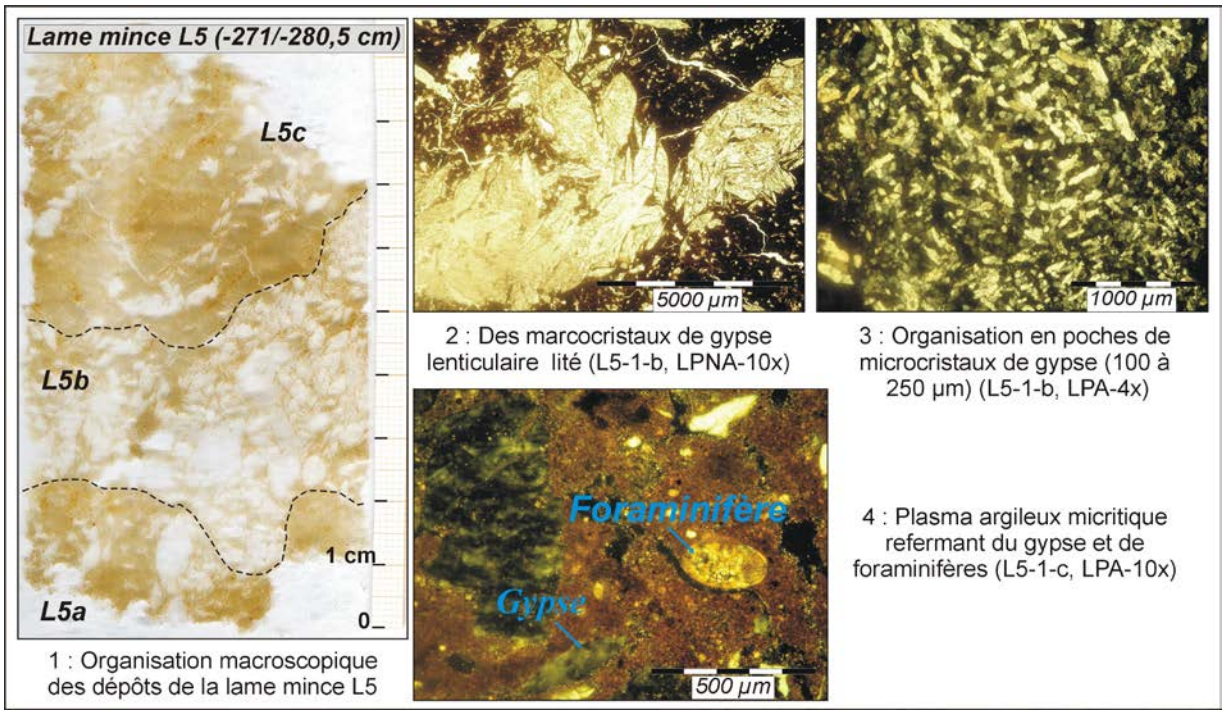


Fig. 39 : Traits micromorphologiques du dépôt « évaporatique » de la séquence lithostratigraphique S14-C3 (Lame mince L5, carotte C3, l'ombilic de Halq al Minjil)

* L5c : un plasma argileux micritique domine une microstructure massive (L5.4). Il contient des silts dispersés, des lits obliques de macrocristaux de gypse et des foraminifères probablement de type *Ammonia* et *Elphidium* (Langlois, 2006). Les fentes de dessiccation et les pores montrent des revêtements micritiques. Des taches diffuses et des amas de matière organique et d'oxyde de fer imprègnent la masse basale.

III-2-4- Implications morphodynamiques et environnement sédimentaire

Les lamines d'argiles et d'argiles silteuses indiquent des submersions temporaires de l'enclave littorale. Le dépôt est maximal à marée haute et surtout lors des crues des oueds al Mjinin et al Manfas as-Sod. Les sédiments sont transportés par la suspension uniforme et sont déposés en mode libre proche d'une décantation dans un milieu relativement calme. Seule l'accumulation des séquences S9 et S14-C3 est effectuée en vrac par excès de charge. Les dynamiques sont généralement lentes.

L'évolution des smectites en illites et la présence de certains minéraux ferro-magnésiens (feldspaths Na et K, albite, smectite, illite), peuvent affirmer un confinement maintenu de Halq al Minjil. L'imprégnation de la matrice en micrite peut indiquer la mobilisation des carbonates dans le bassin. L'incursion micritique et l'altération des surfaces des macrocristaux du gypse lenticulaire expliquent une dissolution chimique dans un milieu lessivé et acide, la mobilisation d'une solution micritique dans la masse et/ou des phénomènes d'épigénie du gypse par la calcite (Regaya, 2000). Le revêtement micritique des fentes traduit la précipitation de la calcite lors de l'évaporation des eaux superficielles et/ou interstitielles, tapissant ainsi les parois des fissures par une micrite dissoute et reprécipité (communication orale d'Olivier Dugué, géologue, Université de Caen).

La formation des « croûtes » de sels pluri-millimétriques, se mêlant aux argiles, témoigne des phases d'émersion et de sécheresse intenses et/ou prolongées. Les microrosettes de gypse et la forte oxydation du dépôt expliquent une certaine battance d'une nappe proche et un milieu aéré (Abichou, 2002). L'inondation consécutive et éventuellement sporadique de l'enclave littorale noie les figures de dessiccation des boues argileuses et forme une nouvelle lamine de décantation. Celle-ci recouvre les « évaporites » déjà cristallisées et les protège contre une dissolution poussée subséquente.

III-3- Le faciès mixte aux influences marines notables (FMM)

Le faciès fluvio-marin aux influences marines notables regroupe quatre séquences lithostratigraphiques (S17, S19-21-C3). Il représente 10% des remplissages sédimentaires de la carotte C3, avec une épaisseur totale de 103 cm.

III-3-1- Caractéristiques sédimentologiques du dépôt

Le dépôt est **argilo-silto-oxydé** dans les séquences S19 et S21-C3 et **limono-argilo-silteux** dans les séquences S17 et S20-C3. Il est modérément calcaire et peu gypseux. Il possède un mauvais à moyen tri et une faible médiane, inférieure à 4,6 µm. Les courbes granulométriques sont hyperboliques. Les couleurs sont vert olive pâle (5Y 6/4), gris olive foncée (5Y 3/2), vert olive (5Y 5/4) et grise (7.5 Y 5/1 à 4/1). La séquence S19-C3 montre des passées limono-sableuses plurimillimétriques et un *Cerastoderma glaucum* connecté à la base. Des cristaux de gypse millimétriques s'intercalent dans la séquence S21-C3. Les quartz émoussés luisants picotés (40-48%) et émoussés mats (28-36%) prédominent.

Le même faciès a été reconnu, à des profondeurs variées, sur les tarières T35, T40, T43, T44 et T46. Le dépôt est généralement fin. Il est composé d'**argiles limoneuses** et de **limons argileux oxydés,** de couleur gris, gris olive et noir. Les épaisseurs varient entre 14 et 95 cm. Des microcristaux de gypse, du sel en état diffus et en filaments s'intercalent dans la masse.

III-3-2- Une association minéralogique relativement homogène

Le quartz, la calcite et l'halite sont les plus abondants dans le dépôt. Le gypse, l'aragonite et les feldspaths (albite et microcline) sont peu représentés. L'albite est absente dans la séquence S17-C3. Les minéraux argileux sont semblables à ceux identifiés dans le

faciès précédent. Le chlorite, présent dans les séquences S17 et S21-C3, est remplacé par l'interstratifiée chlorite/smectite dans les séquences S19 et S20-C3. Les trois séquences S19-21-C3 contiennent probablement de la goethite.

III-3-3- Une composition géochimique hétérogène

La composition géochimique change entre **deux groupes de séquences lithostratigraphiques**. Les séquences S17 et S19-C3, séparées par un niveau lagunaire aux *Cerastoderma glaucum*, montrent les concentrations les plus faibles de la carotte C3 en éléments silici-clastiques. Les teneurs en Na_2O, Sr, Zr et Rb sont importantes (Tab. 8). Les rapports molaires V/Al, Ti/Al, K/Al, Zr/Al (pic de la carotte) et Fe/Al, sont les plus forts de la colonne stratigraphique de la carotte. La teneur de la séquence S17-C3 en Strontium et en carbone et matière organiques, est importante. A l'inverse, les séquences S20 et S21-C3 sont riches en SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, MgO et faibles en CaO et en Na_2O. Les teneurs en V, Cr, Zn et en Rb sont importantes.

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques mineurs (en ppm)										
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb	Cl
S21-C3	93	64	27	4	**81**	**94**	388	194	158	**15**	35,17
S21-C3	**109**	**89**	**32**	**10**	**81**	87	656	158	**204**	12	6,91
S20-C3	87	70	28	8	64	84	492	158	176	14	32,03
S19-C3	58	26	21	0	48	90	223	**204**	126	8	48,93
S17-C3	41	15	15	0	40	76	**1289**	174	69	4	**53,92**

Tab. 8 : Teneurs en éléments géochimiques mineurs du faciès mixte aux influences marines notables de l'ombilic de Halq al Minjil (carotte C3)

Analyses de laboratoire : E. Dinelli

III-3-4- Aspects micromorphologiques du faciès FMM (lame mince L2)

La lame mince L2 est confectionnée sur la séquence **S21-C3**, entre -115 et -124 cm de profondeur. Elle montre **une organisation microséquentielle en doublets de lamines** (Fig. 40). Des lamines d'argiles opaques et brunes, ferro-organiques, fortement oxydées, gypseuses au sommet et d'une microstructure polyédrique et craquelée, se superposent des lamines et des lentilles de silts limoneux. Ces dernières renferment des quartz poly-cristallins émoussés et sub-émoussés, partiellement entourés et/ou emballés dans une matrice fine d'argile micritique. Des fentes de dessiccation et de bréchification inframillimétriques à plurimillimétriques sont matérialisées par des fissures planaires, polygonales, courbes et obliques. Des poches de gypse lenticulaire et pseudohexagonal, perturbent la structure des argiles. Elles montrent des inclusions ferrugineuses et des altérations pelliculaires fines.

III-3-5- Signification morphodynamique et évolution post-dépôt des sédiments

La présence de l'aragonite dans le sédiment atteste **des apports marins notables dans la dépression littorale, occasionnellement ouverte sur le large**. Des courants de marée ont transporté par la suspension uniforme un mélange d'argiles, de silts et de limons. La micro-organisation des sédiments en lamines successives et hétérométriques indique une certaine rythmicité des dynamiques. Les lamines limoneuses et limono-sableuses sont probablement déposées au cours de l'inondation quand la turbulence est forte. Tandis que les argiles sont mises en place pendant la descente des eaux, lorsque la compétence et la vitesse des courants d'eau sont réduites. L'accumulation est en vrac dans les séquences S17 et S19-20-C3 et en mode libre proche d'une décantation dans la séquence S21-C3. Les dynamiques sont généralement faibles. L'aspect moiré et picoté des quartz émoussés

luisants traduit une fine dissolution. Il témoigne d'une corrosion d'origine chimique en raison d'un milieu acide, lessivé et oxydé (Boyé et Nesson, 1970).

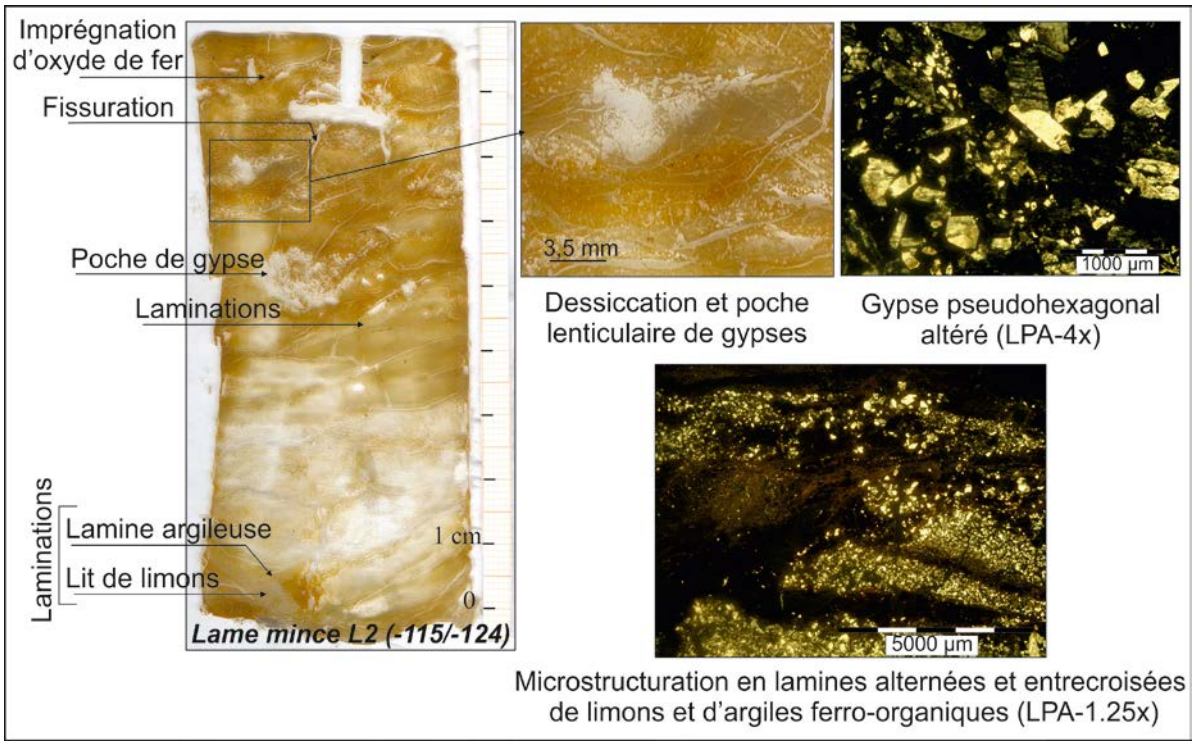


Fig. 40 : Micromorphologie du faciès mixte aux influences marines notables de l'ombilic de Halq al Minjil (Lame mince L2, séquence S21, carotte C3)

Les séquences S17 et S20-C3 de couleur gris et gris olive foncé et riches en matière et carbone organiques, sont typiques **d'un sapropèle**. Elles expliquent l'installation des conditions anoxiques d'un milieu calme et peu battu. De telles conditions sont dues aux faibles brassages et aux circulations limitées des eaux et/ou à une activité biologique importante où les bactéries sulfato-réductrices utilisent le SO_4^{2-} pour décomposer la matière organique (Abichou, 2002).

Les inclusions ferrugineuses, les taches d'oxyde de fer, le gypse, la structure craquelée et prismatique des argiles, témoignent d'une évolution post-dépôt des sédiments, en milieu hydromorphe puis asséché. L'oxydation de la masse argileuse indique un niveau non saturé en eau et un rabattement de la nappe (Vizier, 1974,1984 ; Kervazo et Laville, 1988). L'évaporation des eaux interfoliaires provoque la rétraction et la déshydratation des argiles. Un réseau de fentes de dessiccation se manifeste. Il explique la microstructure craquelée de la masse basale. Les gypses pseudohexagonaux et prismatiques résultent de la réaction des ions de sulfates avec la calcite et la pyrite dans la solution des sols alcalino-acides (Bullock *et al.*, 1985).

III-4- Le faciès fluviatile (FF)

Le faciès fluviatile (FF) regroupe trois séquences (S11-12 et S24), issues de la partie supérieure et médiane de la carotte C3. Il représente 7,7% des remplissages investigués.

III-4-1- Nature sédimentologique et aspects macroscopiques du faciès

Un dépôt relativement grossier de **sables limoneux** et de **limons argilo-sableux** caractérise le faciès fluviatile FF. Il est oxydé et peu à modérément calcaire. Il renferme des débris de coquilles d'*Helix*. Il possède un grain moyen représentatif des silts et des sables

fins et une médiane comprise entre 36 et 211 µm. La couleur est brune très pâle (10YR 7/4) et jaune (2.5Y 7/6). Les teneurs en gypse sont très faibles, inférieures à 1%, hormis celle de la séquence S11-C3 (10,3%). Les séquences S11 et S24-C3 présentent une distribution granulométrique de forme parabolique et un très bon classement des sédiments (Fig. 41). La séquence S12-C3 montre, par contre, un très mauvais tri du matériel et une courbe granulométrique logarithmique. A la loupe binoculaire, le dépôt renferme des amas calciques et ferrugineux noirs et des cristaux de gypse de taille variable. Les quartz émoussés luisants (44-52%) et émoussés mats (24-36%) dominent.

Les caractéristiques sédimentologiques du faciès rappellent celles des remplissages grossiers reconnus surtout sur les tarières T43 et T44. Il s'agit d'une succession de séquences hétérogènes et peu épaisses (10 à 30 cm), composées de **sables limoneux, de limons sableux, de limons argileux et de limons argilo-sableux**. Le dépôt renferme des microcristaux de gypse et du sel en état diffus ou en filaments. Il montre des passées de sables bruns et brun jaunâtres (1 cm) et parfois des horizons fins noirâtres et gris.

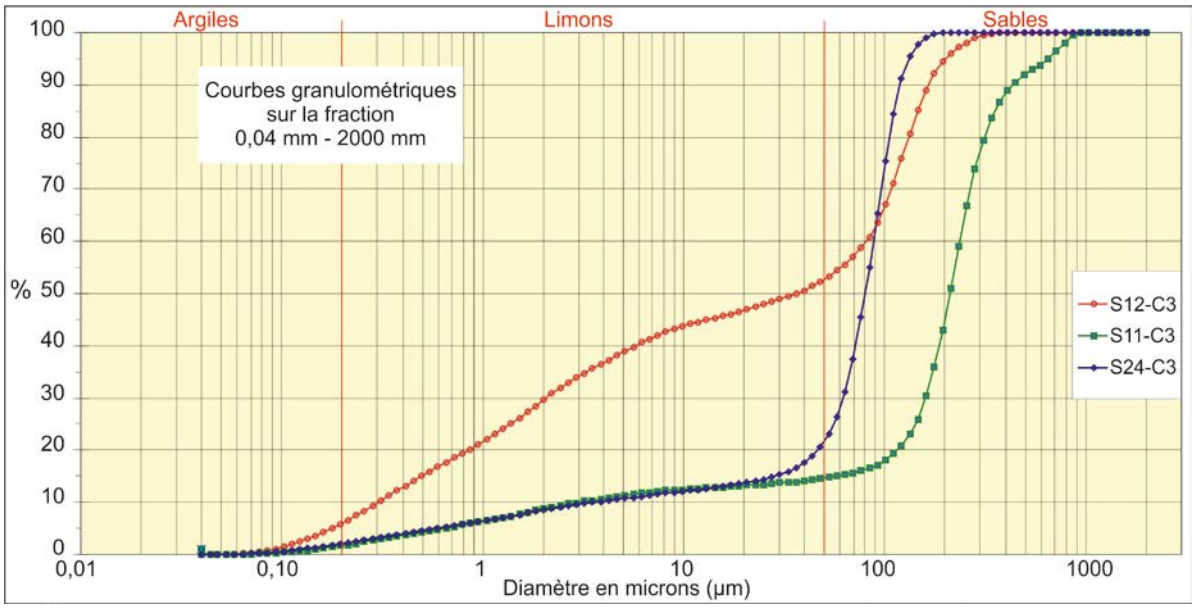


Fig. 41 : Courbes granulométriques sur la fraction 4 µm-2 mm des sédiments du faciès fluviatile reconnu sur la carotte C3 de l'ombilic de Halq al Minjil

III-4-2- Association minéralogique du faciès

Le quartz est la seule phase minérale majeure des sédiments. L'albite, le microcline, la calcite (excepté celle de la séquence S12-C3), l'halite et les argiles sont peu représentés. La séquence S11-C3 renferme de la dolomite et de l'ankérite. Le gypse est présent dans la séquence S24-C3.

Les minéraux argileux sont composés de kaolinite, d'illite, de smectite, d'interstratifiée illite/smectite et du quartz. Les séquences S11 et S24-C3 renferment du chlorite et l'interstratifiée chlorite/smectite. La séquence S12-C3 contient de la goethite.

III-4-3- Faciès géochimique de la séquence S12-C3

La séquence S12-C3 montre les fortes concentrations de la carotte C3 en silice (45%). La présence des alumino-silicates et des alcalino-terreux est notable. Les teneurs en sodium et en matière et carbone organiques (16,7%) sont les plus faibles de la carotte.

Les concentrations en éléments géochimiques mineurs sont moyennes. Le nickel est absent. La teneur en rubidium est très faible. Le dépôt marque des variations minimes des rapports molaires par apport à ceux des séquences sus et sous-jacentes. Le rapport molaire Si/Al annonce un pic dans le profil.

III-4-4- Signification morphodynamique des remplissages fluviatiles

La nature, le classement et la distribution granulométrique des sédiments caractérisent des dépôts, principalement de crues, mis en place par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. Pendant les grandes ou les brèves et les violentes crues des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin (T43, T44), les flux d'eau apportent les sédiments les plus grossiers par la suspension graduée avec un peu de roulement. Au moment de la décrue, l'enrichissement en matériaux fins, issus de la suspension uniforme est plus important. L'accumulation est effectuée en mode libre et en vrac (Fig. 42).

La présence des sédiments terrigènes dans l'ombilic indique **une dynamique active d'épandage fluviatile**. La matière grossière dominante est vraisemblablement issue, en grande partie, des bassins de la rive sud de l'oued al Manfas as-Sod. Les affluents entaillent des terrains au soubassement mio-pliocène de sables et de limons. Les trop-pleins solides livrés par la sebkha al Kalbiyya et évacués par oued al Manfas as-Sod sont essentiellement fins, composés surtout d'argiles et de limons. Les sédiments fluviatiles de la séquence S24-C3, forme le **cône deltaïque actuel** de l'oued al Manfas as-sod.

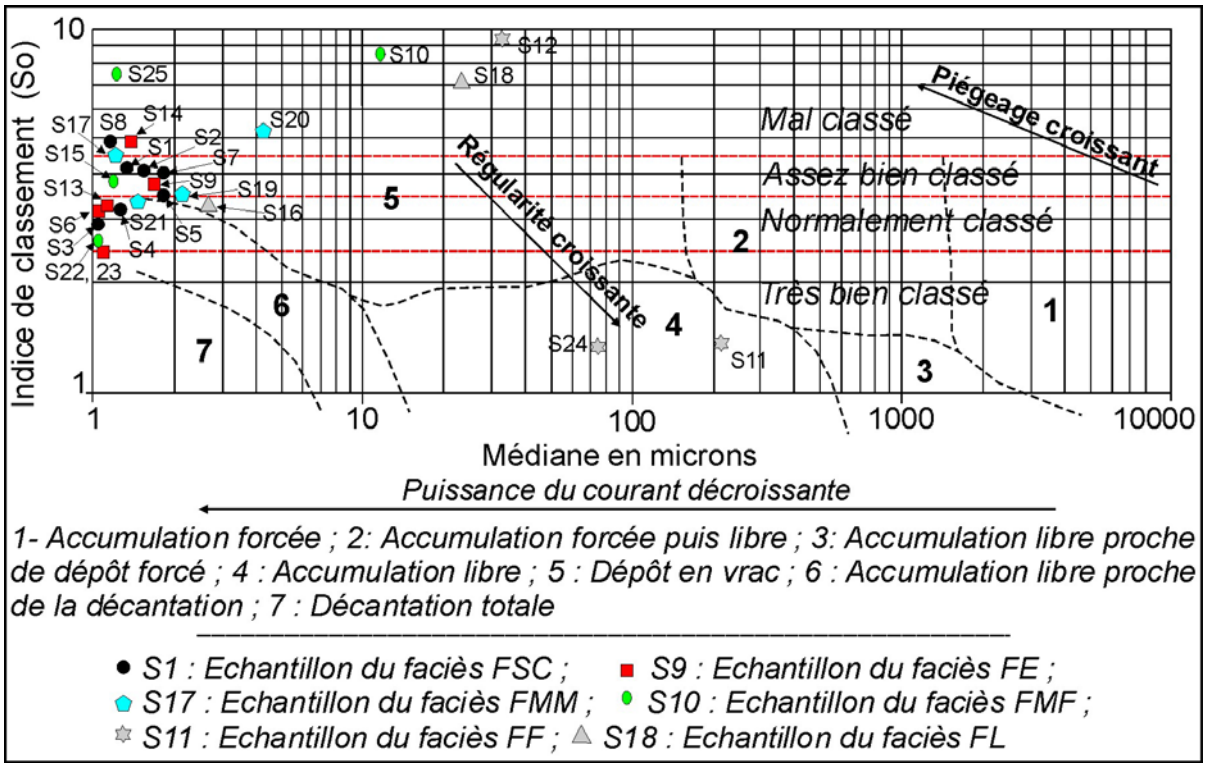


Fig. 42 : Mode d'accumulation des sédiments de la carotte C3 (l'ombilic de la sebkha-lagune Halq al Minjil)

La présence de la calcite, de la dolomite, de l'ankérite dans les séquences S11 et S12-C3 et l'importance de la teneur en silicium témoignent d'une importante mobilisation de la silice et des carbonates dans le bassin. Les rapports relativement importants de Ca/Al et de Fe/Al et le pic du rapport Si/Al (S12-C3) plaident en la faveur d'**une érosion intense dans le bassin versant** (Communication orale d'Enrico Dinelli).

III-5- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)

Quatre séquences lithostratigraphiques (S10, S15, S22 et S25-C3) représentent le faciès fluvio-marin aux influences fluviatiles notables. Elles sont issues de la partie supérieure de la carotte C3 (7% de la matière sondée). Les épaisseurs varient entre 10 et 25 cm.

III-5-1- Caractéristiques sédimentologiques des remplissages

Des **limons argileux compacts** (S10-C3), des **argiles silteuses** (S15 et S25-C3) et des **argiles** (S22-C3), lités, oxydés et non à modérément gypseux caractérisent le faciès FMF. Ils sont de couleur gris olive clair (5Y 6/2), vert olive pâle (5Y 6/3), jaune pâle (5Y 7/3) et brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4). La teneur en $CaCO_3$ est faible à modérée (Tab. 9). La médiane est généralement faible. Les sédiments des séquences S10 et S25-C3 sont mal triés et montrent une distribution granulométrique logarithmique. Les argiles silteuses des séquences S15 et S22-C3 sont normalement à assez bien classées et présentent des courbes granulométriques hyperboliques. Les strates S15, S22 et S25-C3 contiennent des microcristaux de gypse et des débris de coquilles d'*Helix*. Les quartz émoussés mats et émoussés luisants, malpropres et picotés dans la séquence S15-C3, prédominent.

Séquence lithostratig.	Teneur en CaCO3 (%)	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie				Granulométrie			Indice de classement (So)	Grain moyen (Mz)	Médiane (µm)
			SE	EL	EM	RM	< 2	2 à 50	50 à 2000			
S25-C3	5,04	**6,76**	20	**52**	28	0	42	41,2	16,8	7,43	8,151	2,97
S22-C3	7,77	**6,85**	28	**44**	28	0	67,8	32,2	0	2,79	10,259	0,74
S15-C3	**21,84**	**9,99**	8	**56**	32	4	43,7	54,6	1,7	3,87	8,644	2,45
S10-C3	**22,89**	0,66	24	**40**	28	8	30,1	32,3	37,6	8,55	6,76	10,22

Tab. 9 : Caractéristiques sédimentologiques du faciès mixte aux influences fluviatiles notables de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

Les sondages à la tarière à main T40 et T43 ont recoupé des niveaux semblables. Les logs stratigraphiques ont montré des successions de séquences **argilo-limoneuses, limono-argileuses, limono-sableuses et sableuses**, d'une épaisseur de 25 à plus de 120 cm. Des lits fins sableux jaunes et jaune brunâtres oxydés, des horizons fins grisâtres, verdâtres et noirs, des microcristaux de gypse dispersés, des amas friables et des gravillons calcaires et des fragments de coquilles d'*Helix* s'individualisent irrégulièrement dans les dépôts.

III-5-2- Cortège minéralogique des dépôts

Le quartz est la seule phase minérale majeure du faciès FMF, sauf la calcite et l'halite dans la séquence S22-C3 (Tab. 10). Les carbonates sont en minorité et seulement représentés par la calcite. Le gypse, les argiles, l'albite et le microcline sont minoritaires. Les quatre séquences contiennent de la kaolinite, de l'illite, de la smectite, de l'interstratifiée illite/smectite, du chlorite ou chlorite/smectite et du quartz sauf dans la séquence S25-C3. La séquence S15-C3 renferme de l'albite et de l'orthose. La goethite est probablement présente dans la séquence S22-C3.

III-5-3- Composition géochimique des sédiments

Les sédiments possèdent des teneurs moyennes à importantes en éléments géochimiques majeurs et mineurs. Les concentrations en cuivre et en phosphore sont faibles. La séquence S22-C3 montre des fortes teneurs en sodium et en chlore. La séquence S10-C3

présente les concentrations les plus importantes de la carotte C3 en baryum et en matières et carbones organiques. Les rapports molaires V/Al, Ti/Al et Fe/Al sont importants dans la séquence S22-C3. Le rapport molaire Ca/Al est faible.

Séquence lithostratig.	Composition minéralogique du sédiment total						
	Qaurtz	Microcline	Albite	Calcite	Halite	Gypse	Argiles
S25-C3	**	*	*	*	*	*	*
S22-C3	**	*	*	**	**	*	*
S15-C3	**	*	*	*	*	*	*
S10-C3	**	*	*	*	*		*

Séquence lithostratig.	Minéralogie des argiles								
	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiée Illite/smectite	Chlorite	Quartz	Albite	Orthose	Goethite
S25-C3	*	*	*	*	*				
S22-C3	*	*	*	*	*	*			*?
S15-C3	*	*	*	*	*	*	*	*	
S10-C3	*	*	*	*	*	*			

* Phase minéralogique mineure ; ** Phase minéralogique majeure

Tab. 10 : Cortège minéralogique du faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)

Analyses de laboratoire : LHG, UMR 7517, CNRS/ULP

III-5-4- Signification morphodynamique et pédologique des sédiments

Halq al Minjil reçoit des eaux marines et continentales. **Son fond s'exhausse par un colmatage fluviatile prépondérant**. Les sédiments sont transportés par la suspension uniforme (S15, S22 et S25-C3) et graduée (S10-C3). Ils sont déposés en vrac et en mode libre proche de la décantation (S22-C3), par des flux d'eau à plus ou moins faible capacité de transport. Ils correspondent aux dépôts de grandes crues et proviennent en grande partie des trop-pleins de la sebkha al Kalbiyya évacués par l'oued al Manfas as-Sod. L'importance des quartz émoussés mats et ronds mats dans le sédiment témoigne des remaniements sur des dépôts éoliens vraisemblablement tyrrhéniens et/ou sur des formations continentales contenant déjà des sables éolisés. Les sables mio-pliocènes emballent 24% d'émoussés mats et 12% de ronds mats.

Les sédiments enregistrent les signes d'une évolution post-dépositionnelle, des variations bathymétriques et des changements de conditions hydrothermiques. La couleur grise et olive, l'oxydation uniforme de dépôt, le gypse et l'halite indiquent, qu'au moins saisonnièrement, Halq al Minjil passe d'un milieu hydromorphe à un milieu exondé puis complètement asséché. L'existence de l'albite, de l'orthose, des minéraux ferromagnésiens et de la goethite peut traduire l'évolution pédologique des argiles dans un milieu calme, confiné et hydrolysant (Béji Sassi, 1995 ; Cojan, et Renard, 1999).

III-6- Le faciès lagunaire (FL)

Le faciès lagunaire se distingue par son contenu malacologique en *Cerastoderma glaucum*, *Cerithium vulgatum* et *Donax trunculus*. Il est représenté par les séquences S16 et S18-C3, épaisses de 47 cm. Elles définissent deux niveaux distincts de remplissage lagunaire.

III-6-1- Le premier niveau du remplissage lagunaire

III-6-1-1- Caractéristiques sédimentologiques du dépôt

Entre -216/-241 cm de profondeur absolue, le carottage C3 a recoupé **un premier niveau fossilifère**, épais de 25 cm. La séquence lithostratigraphique S16-C3 est composée d'**argiles silteuses**, assez bien classées, modérément calcaires et peu gypseuses. La couleur est verte olive pâle (5Y 6/4). La médiane est très faible. La distribution granulométrique est hyperbolique. La disposition du matériel est horizontale à subhorizontale. Les quartz émoussés luisants (52%), malpropres et picotés, et les grains émoussés mats (36%) l'emportent. On remarque l'association de *Cerastoderma glaucum* et de *Cerithium vulgatum* à la base de l'accumulation et la présence que de *Cerithium vulgatum* au sommet.

Le même faciès a été reconnu sur les tarières T35, T40, T43, T44 et T46. Les profondeurs oscillent entre +71 cm (T40) et -364 cm (T46). Sur la tarière T35, l'épaisseur a atteint 90 cm. Le remplissage montre une forte variation latérale des sédiments. Il est composé de **sables, de sables limoneux, d'argiles limoneuses, de limons sableux, de limons argileux et de limons argilo-sableux.** Ils sont de couleur jaune, gris, gris olive et brun olive. Au nord, à l'amont de la route R.V.E 812, le dépôt renferme des fragments et des petites valves de *Cerastoderma glaucum* associés à des petits *Donax trunculus* souvent connectés. Les *Cerithium vulgatum* sont absents.

III-6-1-2- Assemblage minéralogique et composition géochimique des sédiments

Les minéraux du sédiment total présentent une association majoritaire de quartz, de calcite et d'halite et secondairement de microcline, d'aragonite et de dolomite ou d'ankérite. La phase argileuse est formée de kaolinite, d'illite, de smectite, d'interstratifiée illite/smectite et probablement de goethite (Tab. 11).

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques mineurs (en ppm)										
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	R	Sr	Zr	Ba	Pb	Cl
S18-C3	73	63	28	10	58	59	274	172	178	18	30,26
S17-C3	41	15	15	0	40	76	***1289***	174	69	4	***53,92***
S16-C3	86	62	33	12	91	65	555	106	159	15	11,89

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques majeurs (en %)										
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O5	LOI
S18-C3	39,24	0,75	16,59	5,46	0,08	3,37	6,56	3,45	1,58	0,14	22,8
S17-C3	11,55	0,23	4,25	2,15	0,04	0,71	4,04	44,39	0,58	0,04	32
S16-C3	35,35	0,54	13,66	4,35	0,07	3,58	9,5	7,01	1,55	0,08	24,3

Tab. 11 : Composition géochimique des niveaux lagunaires et de la séquence intermédiaire non fossilifère de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)

Analyses de laboratoire : E. Dinelli

Les teneurs en éléments géochimiques majeurs et mineurs sont moyennes. La concentration en Zn (91ppm) est la plus importante de la carotte C3. Les rapports molaires V/Al, Ti/Al, Zr/Al et Fe/Al indiquent des changements relatifs et une augmentation par apport à ceux des séquences consécutives.

III-6-1-3- Aspects micromorphologiques et calage chronologique du remplissage

Une lame mince L4 a été fabriquée sur la séquence **S16-C3, entre -231 et -236 cm de profondeur**. Elle montre **la succession de quatre séquences millimétriques** (Fig. 43).

* La microséquence basale L4-1 est épaisse de 5 à 7 mm. Elle présente une masse micritique dominée par des limons et des argiles, imprégnés de fer et de matière organique diffuse et en amas noirs et opaques.

* La première microséquence médiane L4-2 est d'une épaisseur de 7 à 12 mm. Elle contient des tests de *Cerastoderma glaucum* subhorizontaux dans une masse basale argilo-limoneuse. Celle-ci est ponctuée d'amas organiques ferriques et/ou magnésiques de couleur noir et rouille. La microstructure est massive. Des gypses lenticulaires altérés et des limons grossiers (50 µm) apparaissent dans la masse.

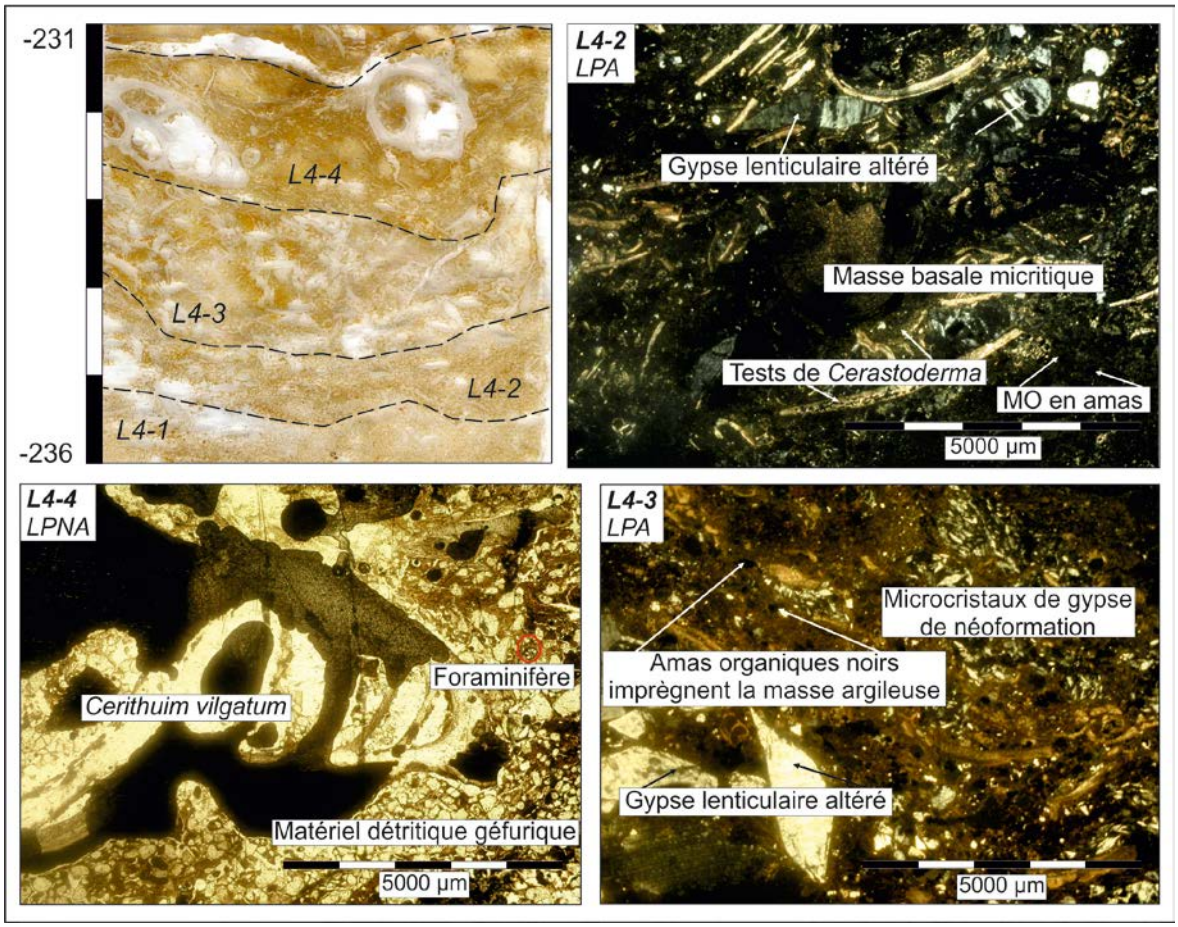


Fig. 43 : Aspects micromorphologiques du premier niveau lagunaire de Halq al Minjil (la séquence lithostratigraphique S16-C3, l'ombilic de la sebkha-lagune)

* La deuxième microséquence médiane L4-3 est épaisse de 10 à 15 mm. Elle renferme des gypses lenticulaires altérés et des tests de *Cerastoderma glaucum* et *de Cerithium vulgatum* dans des lits de limons et d'argiles. Les argiles micritiques montrent des amas organiques noirs. Des microcristaux de gypse lenticulaire, néoformé occupent surtout les vides.

* La microséquence sommitale L4-4 est d'une puissance de 14 à 20 mm. Elle montre un matériel détritique de limons et de sables, riche en fragments et valves de *Cerastoderma glaucum* et en coquilles de *Cerithium vulgatum*. Des foraminifères ont été également reconnus. Les grains de quartz, mal triés (10-50 µ), sont liés par des ponts d'argile. La distribution relative des fractions grossières et fines est dite géfurique (Bullock *et al.*, 1985 ; Fedoroff et Courty, 1992).

Une datation ^{14}C AMS a été effectuée sur **la matière organique** de la base du remplissage lagunaire. Elle a donné un âge de **4965±35 BP** (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3903-3655 cal BC).

III-6-2- Le deuxième niveau du remplissage lagunaire

III-6-2-1- Caractérisation sédimentologique et datation du remplissage

Sur 22 cm d'épaisseur, le carottage C3 a recoupé **un deuxième niveau fossilifère**, **entre -169/-191 cm de profondeur**. La séquence S18-C3 est **limoneuse**, intercalée de lits fins vert brunâtre et de microcristaux de gypse. Il renferme des **fragments et des valves de petits *Cerastoderma glaucum*. Les *Cerithium vulgatum*** sont absents. Le sédiment est mal trié et de couleur gris foncé (5 Y 4/1). Les teneurs en carbonates de calcium et en gypse sont modérées. La courbe granulométrique est subhyperbolique à logarithmique. Les quartz sub-émoussés luisants et émoussés luisants sont picotés et dominants. La médiane est de 24 µm.

Le dépôt est reconnu sur les tarières T35, T40, T43, T44, T46, entre -329 (T46) et +112 cm (T44) de profondeur. Il montre un faciès très hétérogène. Les sédiments sont couramment oxydés et composés d'**argiles limono-sableuses,** de **limons argilo-sableux,** d'**argiles limoneuses, de sables,** de **limons argileux et** de **sables limoneux,** épais de 5 à 48 cm. La couleur est grisâtre, brun olive, vert olive, gris et gris olive. Les laisses malacologiques sont composées de fragments et de valves connectées de ***Cerastoderma glaucum*** et localement au nord de ***Donax trunculus***.

Le calage chronologique du dépôt est assuré par **une datation ^{14}C AMS**. Elle a été effectuée sur la matière organique totale de la partie médiane de la séquence fossilifère S18-C3. L'âge obtenu est de **4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC).

III-6-2-2- Assemblages minéralogique et géochimique des sédiments lagunaires

Le quartz est la seule phase minéralogique majeure de la séquence S18-C3. Le microcline, la calcite, l'halite, le gypse, l'aragonite et les argiles sont peu représentés. La plupart des minéraux argileux reconnus existent. Il s'agit de kaolinite, d'illite, de smectite, d'interstratifiée illite-smectite, du quartz, de l'orthose et de l'albite.

Le dépôt est riche en SiO_2, Fe_2O_3 et MgO. Les teneurs en TiO_2 (0,75%) et en Al_2O3 (16,59%) sont les plus importantes de la carotte C3. Le plomb (18 ppm), le chrome (63 ppm) et le zirconium (172 ppm) sont les éléments mineurs les plus représentés. Exceptés les rapports molaires Si/Al, Fe/Al et Ti/Al, les autres rapports calculés sont faibles.

III-6-2-3- Signification morphodynamique et interprétation environnementale des remplissages lagunaires

Les deux niveaux fossilifères séparés par la séquence S17-C3 permettent de définir deux phases lagunaires. Le caractère des remplissages sédimentaires indique la succession de deux contextes différents de l'hydro-morphodynamique.

La séquence 16-C3 traduit un premier remplissage lagunaire effectué dans un milieu calme à peu agité. La matière fine est issue de la suspension uniforme et déposée en mode libre proche de la décantation sous une tranche d'eau peu profonde. L'intercalation subhorizontale de fragments faunistiques suggère une turbulence épisodique liée peut-être aux courants des grandes marées et/ou des eaux ruisselées.

Les sédiments de la séquence S18-C3 indiquent un dépôt dans un milieu plus agité et moins profond. Ils ont transité par la suspension uniforme et ont été mis en place en vrac par excès de charge. La turbulence est relativement plus forte que celle de la phase lagunaire précédente. Les valeurs du premier percentile et de la médiane peuvent l'attester.

L'intercalation des passées limoneuses atteste les apports intermittents de l'oued al Manfas as-Sod. Les teneurs élevées en éléments alumino-silicatés et ferromagnésiens plaident en faveur d'une certaine hétérogénéité de la provenance de la matière, plus notable que celle de la phase lagunaire précédente. Au nord et à l'amont de la route actuelle RVE 812, les argiles et les limons mêlés aux *Cerastoderma glaucum* et aux *Donax trunculus* définissent un faciès de dessalure et un hydrodynamisme de plus en plus faible.

Dans les deux séquences S16 et S18-C3, les signes d'une évolution post-déposionnelle des sédiments sont multiples. L'interstratifiée illite/smectite témoigne d'une diagenèse et/ou d'une dégradation des argiles, faisant le remplacement progressif de la smectite par une illite de néoformation, par fixation de potassium et de magnésium. Il peut indiquer également le séjour prolongé des sédiments dans un milieu salin (Caillère et Hénin, 1982). L'imprégnation de la matrice en micrite peut indiquer l'origine carbonatée du sédiment (Boujelben *et al.*, 2008). La précipitation du gypse lenticulaire dans les chenaux, les pores et les vides traduisent le retrait des eaux lagunaires et/ou l'évaporation de la tranche d'eau dans la dépression littorale (Gaucher et Burdin, 1974 ; Saaidi, 1988 ; Cojan, 1999 ; Pomel, 2004 ; Lakhdar *et al.*, 2006).

Les deux phases lagunaires de Halq al Minjil **témoignent de deux incursions marines** dans l'enclave littorale **et des variations positives du niveau marin relatif**. Les datations ^{14}C AMS permettent de les placer dans le Flandrien moyen.

IV- DEPOTS DE RIVES DE HALQ AL MINJIL : LITHOSTRATIGRAPHIE, FACIES SEDIMENTAIRES ET IMPLICATIONS MORPHODYNAMIQUES

Un deuxième sondage carotté C1, **profond de 5,47 m** et à la cote 85 cm au-dessus du niveau marin, a été effectué à l'est sur un bourrelet hydroéolien adjacent le rivage actuel de Halq al Minjil (*cf.*, Fig. 33 et 34). Il a recoupé deux ensembles sédimentaires différents. Un dépôt éolien superpose une succession complexe de remplissages variés qui ont comblé les paléofonds et les paléorivages de la sebkha-lagune actuelle.

L'inventaire systématique du remplissage des marges orientale et méridionale de Halq al Minjil a été complété par **seize sondages à la tarière à main de 90 à 316 cm de profondeur** (T15 à T29 ; T41). Les tarières n'ont fait que l'objet d'une description macroscopique. Des analyses granulométriques laser ont été seulement poussées sur cinq échantillons des sédiments de la tarière T29. La description haute résolution des dépôts de **la carotte C1 a permis l'inventaire de vingt-quatre séquences lithostratigraphiques** (Fig. 44). L'analyse granulométrique laser, la morphoscopie des quartz et l'analyse géochimique des sédiments ont permis de regrouper ces séquences en **six grandes catégories de faciès sédimentaires** (FEO, FMF, FMM, FL, FE, FSC). Un à trois échantillons de chaque faciès ont fait l'objet d'une analyse minéralogique du sédiment total.

IV-1- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)

Le faciès mixte aux influences fluviatiles et/ou latérales notables regroupe cinq séquences lithostratigraphiques (S6, S10, S19, S20 et S21-C1). Elles sont de 116 cm d'épaisseur et représentent 21,2% des archives carottées.

IV-1-1- Caractéristiques sédimentologiques et morphoscopiques

Des **argiles, des argiles silteuses et des limons massifs à lités** et oxydés caractérisent le faciès FMF (Fig. 44). Ils sont de couleur jaune pâle (5Y 7/4), vert olive pâle (5Y 6/4), gris sombre (5Y 4/1), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4) et brun olive clair (2.5Y 5/4). Leurs caractéristiques sédimentologiques rappellent celles du faciès FMF de la carotte C3.

Les séquences S6 et S10-C1 présentent un tri moyen à assez bien et des courbes granulométriques hyperboliques à sublogarithmiques. Les autres séquences ont un mauvais tri et montrent la même distribution granulométrique. Des graviers et des concrétions calcaires s'intercalent dans les argiles des séquences S10 et S21-C1. La séquence S19-C1 montre des passées millimétriques de sables rouge jaunâtre.

Les sondages à la tarière à main T29 et T41 ont recoupé des dépôts comparables aux influences fluviatiles et/ou latéraux notables. Les sédiments sont ordonnés en successions de **séquences argilo-limoneuses, limono-argileuses et limono-sableuses**, d'épaisseur oscillant entre 10 et 37 cm.

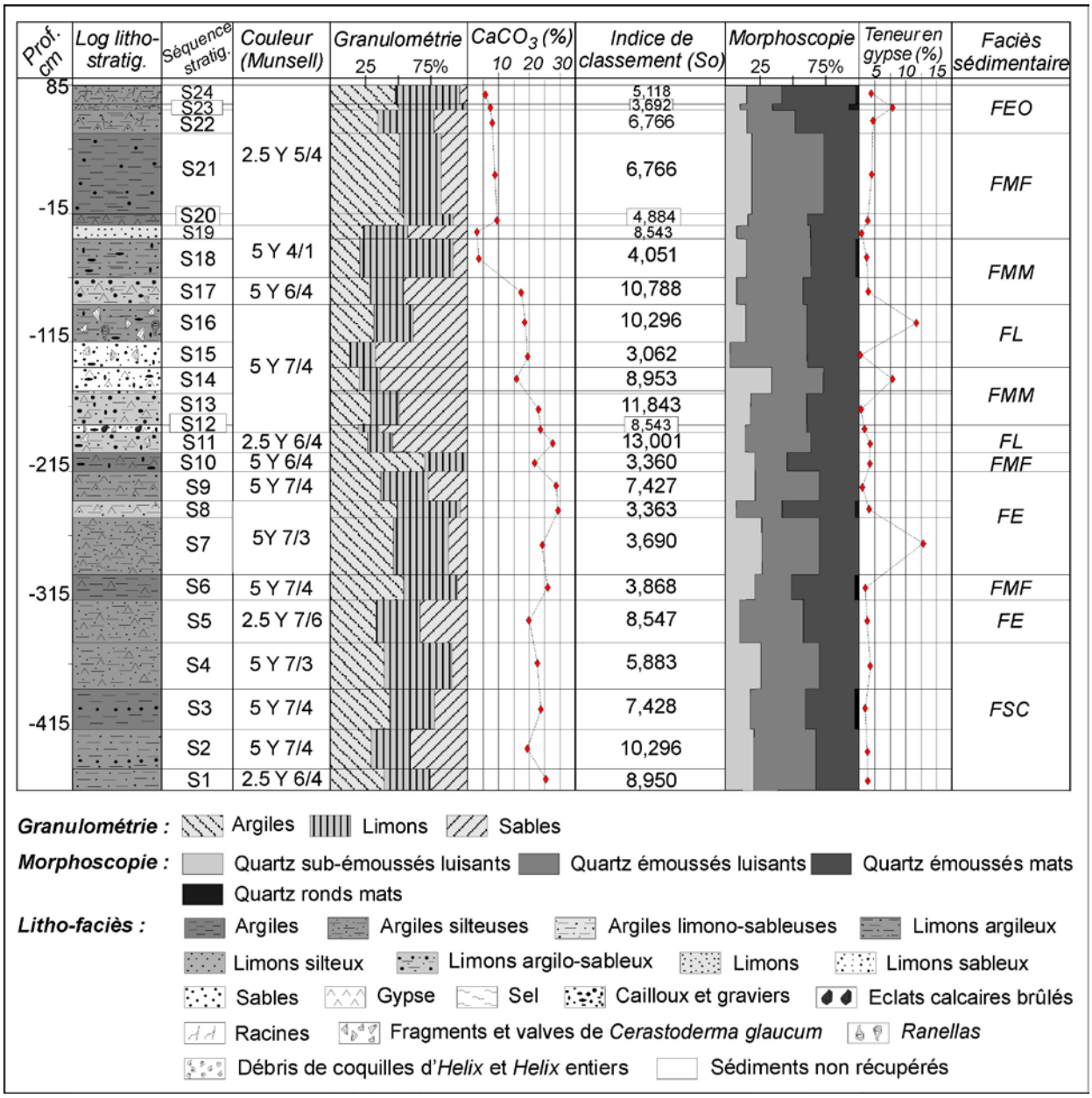


Fig.44 : Caractéristiques sédimentologiques des remplissages des marges orientales de Halq al Minjil : investigation par la carotte C1

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

IV-1-2- Cortège minéralogique et concentration d'éléments géochimiques

Un échantillon de la séquence S20-C1 a fait l'objet d'une analyse minéralogique. Le quartz et la calcite sont abondants. Le microcline, l'albite, le gypse, l'halite et les argiles sont peu représentés.

Le dosage d'éléments géochimiques a montré deux groupes distincts. Le premier groupe rassemble les trois séquences sommitales S19-21-C1. Il se caractérise par une forte à moyenne concentration en éléments mineurs et en cations majeurs alumino-silicatés et alcalino-terreux. La teneur en calcium est faible. La séquence S21-C1 montre les teneurs les plus fortes de la carotte en TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O et de la quasi-totalité des éléments mineurs. Le second groupe rassemble les deux séquences S6 et S10-C1. Exceptés le calcium, la matière et le carbone organiques, il présente de faibles à moyennes concentrations en éléments géochimiques dosés. La séquence S6-C1 montre des fortes teneurs en chrome, baryum et strontium. Les rapports molaires V/Al, Ti/Al, Zr/Al et Fe/Al ont été considérablement changés dans la séquence S21-C1. Les deux groupes présentent une évolution inverse du rapport molaire Ca/Al.

IV-1-3- Implication morphodynamique et signification pédologique des sédiments

Halq al Minjil reçoit des apports marins et/ou continentaux proches et lointains. Les argiles et les limons des séquences S19 et S21-C1 sont issus de la suspension graduée sans roulement. L'intercalation des graviers et concrétions calcaires et des passées sableuses traduit des apports intermittents par des ruissellements, plus ou moins compétents, sur les versants orientaux des buttes d'al Faj-Hanshir al Golla. Le mauvais tri des sédiments peut expliquer un fort enrichissement en matériaux fins pendant la descente des eaux. Les argiles et les argiles silteuses des séquences S6, S10 et S20-C1 sont issues de la suspension uniforme. La turbulence est faible. L'accumulation est en vrac (Fig. 45). Les argiles de la séquence S10-C1 sont déposées en mode libre proche de la décantation. Les dynamiques sont généralement faibles.

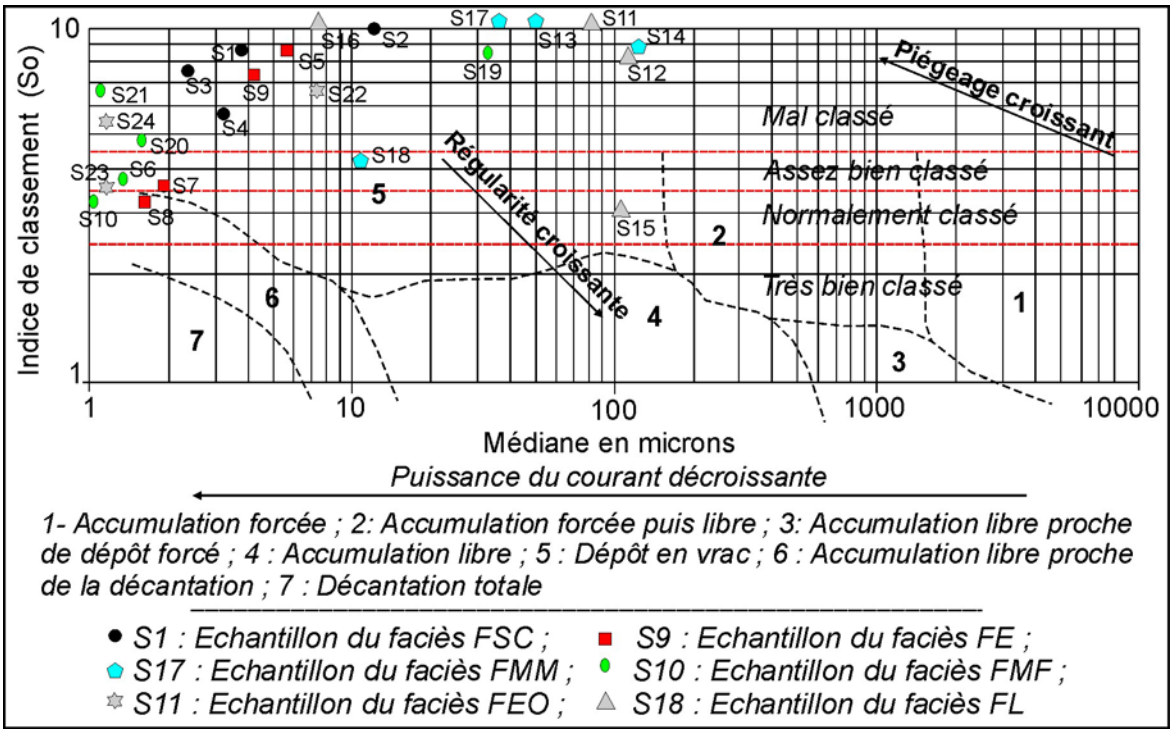


Fig. 45 : Mode d'accumulation et typologie des sédiments de la carotte C1 en fonction du tri et de la médiane granulométriques (bordures est de Halq al Minjil)

L'abondance de la calcite et la forte teneur des séquences S6 et S10-C1 en carbonate de calcium peuvent traduire la mobilisation des carbonates dans le bassin. Elles peuvent aussi témoigner d'une précipitation diagénétique de la calcite authigène (Schütt, 2000, Schütt et Thiemann, 2004). La forte teneur en potassium et en magnésium permet de déceler la présence en abondance d'illites, de chlorites, de smectites et probablement de feldspaths. Le titane et l'alumine sont probablement associés à la kaolinite (Denis, 2000). Ces données plaident en la faveur d'importants apports terrigènes dans la sebkha-lagune.

Le plan d'eau de Halq al Minjil est temporaire et fluctuant. La couleur gris sombre de la séquence S19-C1 et sa désagréable odeur témoignent du confinement du corps d'eau et de l'installation des conditions d'anoxie, vraisemblablement accompagnées d'une intense activité biologique (Abichou, 2002). L'oxydation des dépôts et la précipitation du gypse expliquent l'émersion de l'enclave, la remontée périodique d'une nappe proche de la surface (Kervazo et Laville, 1988) et l'assèchement de la sebkha-lagune.

IV-2- Le faciès « évaporatique » (FE)

Reconnu sur 115 cm d'épaisseur, le faciès « évaporatique » très riche en gypse, regroupe quatre séquences distinctes (S5, S7-9-C1). Elles sont issues de la partie inférieure de la carotte C1, dont les épaisseurs varient entre 12,5 à 45 cm.

IV-2-1- Des séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Des **limons argileux compacts, des argiles limoneuses, des argiles et des argiles silteuses** oxydés et riches en macrocristaux et en microrosettes de gypse, caractérisent le faciès « évaporatique ». Les teneurs en gypse varient entre 20 et 33,3%. Le dépôt est modérément à fortement calcaire. La couleur est vert olive pâle (5Y 6/4), jaune pâle (5Y 7/3), jaune (2.5Y 7/6) et jaune olive (2.5Y 6/6). Les échantillons des séquences S5 et S9-C1 possèdent un très mauvais tri et présentent des courbes granulométriques sublogarithmiques à logarithmiques. Les séquences S7 et S8-C1 sont moyennement à assez bien triés et montrent une distribution granulométrique de forme hyperbolique. La strate S7-C1 renferme des tests de coquille d'*Helix*. Un lit de sables grossiers jaunes oxydés, de 7 mm d'épaisseur, s'intercale dans la séquence S5-C1. Les quartz émoussés luisants (44-52-%), teintés parfois d'oxyde de fer, et les grains émoussés mats (28-40%) dominent.

IV-2-2- Compositions minéralogiques et géochimiques généralement homogènes

Trois échantillons prélevés sur les séquences S5, S7 et S9-C1 ont fait l'objet d'une analyse minéralogique. Les résultats rappellent ceux de l'analyse des sédiments du faciès FE de la carotte C3. Le quartz, la calcite et le gypse sont prépondérants. Le microcline, l'albite et l'halite sont peu représentés. L'halite est abondante dans la séquence S9-C1.

Les dépôts montrent des concentrations moyennes en éléments géochimiques majeurs et mineurs (Fig. 46). Des différences s'observent entre la séquence S5-C1 et les trois autres séquences. La silice, moyennement dosée dans les séquences S7-9-C1, est fortement concentrée dans la séquence S5-C1. La calcite montre une tendance opposée. Excepté le zirconium et le plomb, la concentration des éléments mineurs est faible dans la séquence S5-C1. Les séquences S7 et S8-C1 présentent des fortes concentrations en sodium et **les teneurs les plus importantes de la carotte en matière et en carbone organiques** (26-27,5%). Dans toutes les séquences, le strontium prend de l'importance et enregistre les valeurs les plus élevées de la carotte (711-1331 ppm). La séquence S5-C1 signe de forts rapports molaires Si/Al et Zr/Al. Généralement, les rapports molaires notent des variations notables et des évolutions inverses entre S5-C1 d'une part et S7-9-C1 d'autre part.

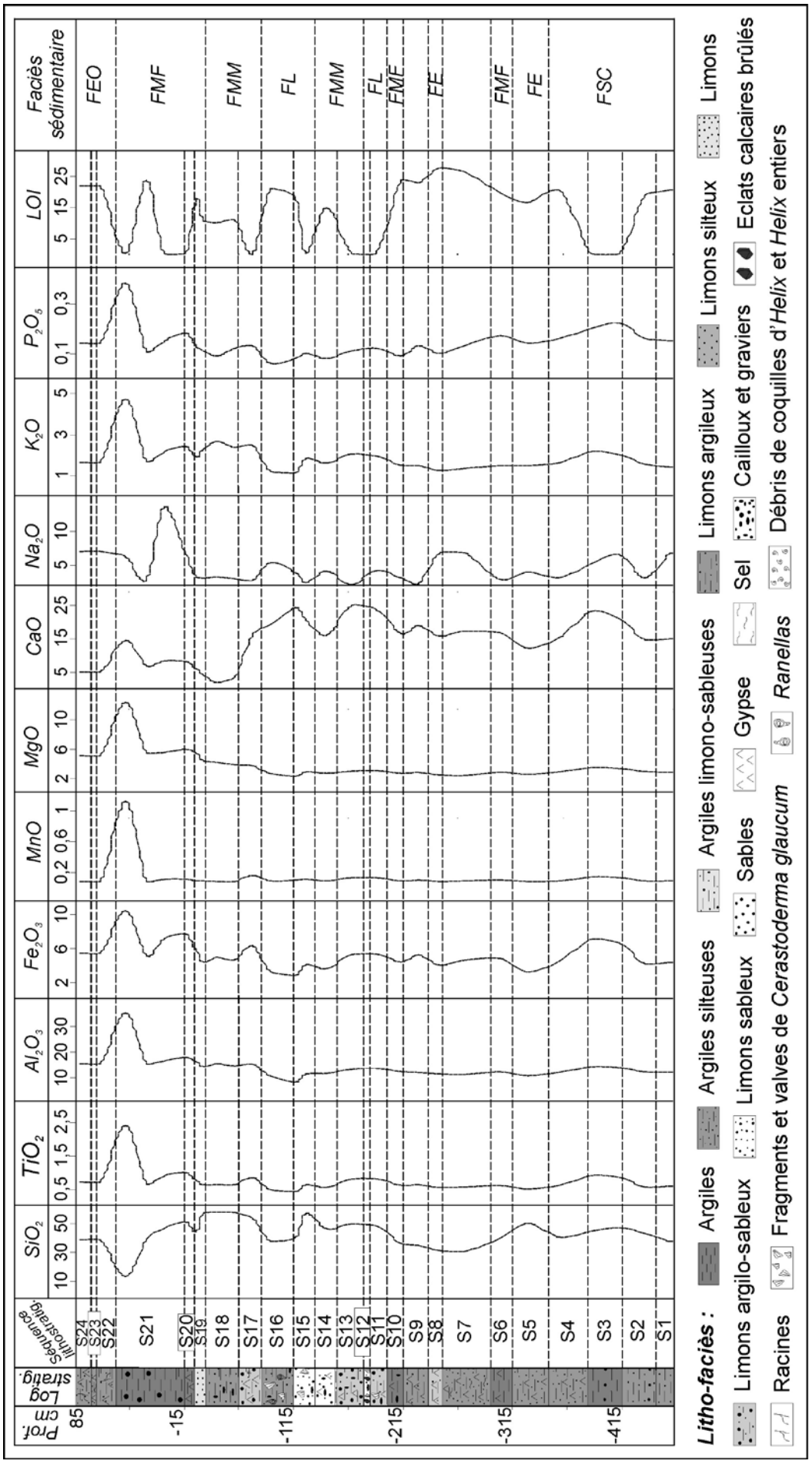


Fig. 46 : Concentration des éléments géochimiques majeurs (en %) des remplissages sédimentaires de la rive est de Halq al Minjil (la carotte C1)
Analyses de laboratoire : E. Dinelli

IV-2-3- Signification morphodynamique et conditions d'évolution post-dépôt des sédiments

Les sédiments, généralement fins, sont des dépôts ruisselés et/ou d'incursion marine, mis en place par des flux d'eau à plus ou moins faible capacité de transport. Les apports sont intermittents et les dynamiques sont couramment lentes. Les matériaux sont issus de la suspension uniforme et sont déposés en vrac par excès de charge quand la turbulence se réduit ou cesse. Seulement, l'accumulation de la séquence S8-C1 est effectuée en mode libre proche de la décantation. Les sables grossiers lités de la séquence S5-C1 témoignent des apports latéraux intermittents par des ruissellements compétents descendant le bas relief d'al Faj-Hanshir al Golla.

Halq al Minjil a connu des cycles inondation/exondation et des rapports restreints avec la mer. L'oxydation des dépôts, la présence des microrosettes de gypse, la précipitation du gypse lenticulaire et de l'halite et l'importance du strontium, de la calcite et du sodium surtout dans les séquences S7 et S8-C1, en attestent. Les fortes teneurs des séquences S7 et S8-C1 en matière et en carbone organiques peuvent être rapportées au développement d'une végétation halophile en domaine du chott. Elles peuvent également découler de l'évolution diagénétique des débris végétaux par l'activité de micro-organismes anaérobies (Vizier, 1974 ; Kaemmerer et Revel, 1989 ; Boulvain, 2006).

IV-3- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)

Quatre séquences (S1-4-C1), de la partie inférieure de la carotte C1, définissent le faciès sulfato-carbonaté. Elles représentent 20,6% des archives compulsées.

IV-3-1- Dépôts aux caractéristiques sédimentologiques distinctes

Des **limons argileux,** des **argiles et** des **argiles silteuses**, **lités et oxydés** caractérisent le faciès sulfato-carbonaté. Ils présentent des caractéristiques sédimentologiques semblables à celles des séquences sulfato-carbonatées de la carotte C3. Le tri est mauvais. Les sédiments des séquences S1 et S2-C1 montrent une distribution granulométrique logarithmique à sublogarithmique (Fig. 47). Les courbes granulométriques des échantillons issus des séquences S3 et S4-C1 sont hyperboliques à subhyperboliques. Les trois séquences S2-4-C3 renferment des lits millimétriques de sables grossiers de couleur jaune ocre et rouille à rougeâtre. Des taches de couleur rouille et noire et des horizons fins verdâtres marquent la séquence S2-C1.

IV-3-2- Minéralogie et géochimie du faciès

L'analyse minéralogique du sédiment total de la séquence S3-C1 a donné une association de quartz et de calcite majoritaires. Le microcline, l'albite, la dolomite et/ou l'ankérite, le gypse, l'halite et les argiles sont peu représentés.

Le faciès montre des fortes à moyennes concentrations en éléments géochimiques dosés. La séquence S3-C1 se distingue par son enrichissement en TiO_2, Fe_2O_3, CaO, Na_2O, P_2O_5 et K_2O et par l'absence de la matière et du carbone organiques. Les éléments mineurs montrent les mêmes tendances de concentration dont la séquence s'enrichie également en V, Cr, Ni, Zn et Cu (Tab. 9). Les rapports molaires Ti/Al, K/Al, Ca/Al et Fe/Al sont notables.

IV-3-3- Mécanismes et conditions de la morphodynamique et d'évolution post-sédimentaire des dépôts

Le caractère hétérogène des remplissages sédimentaires indique des fluctuations des conditions hydro-morphodynamiques et de la géochimie du milieu au moment du dépôt. Les sédiments des séquences S2, S3 et S4-C1 sont transportés par la suspension uniforme. Les

sables grossiers intercalés dans la masse sont principalement des colluvions d'apport latéral. Ils sont mis en place par des filets de ruissellement intermittents mais compétents. Les limons argileux de la séquence S1-C3 sont issus de la suspension graduée. Leur position du coté gauche de l'image CM (Fig. 48) témoigne d'un fort enrichissement en matériaux fins pendant la décrue, ce qui explique la forte hétérogénéité des sédiments. L'accumulation des quatre séquences s'est effectuée en vrac, par excès de charge.

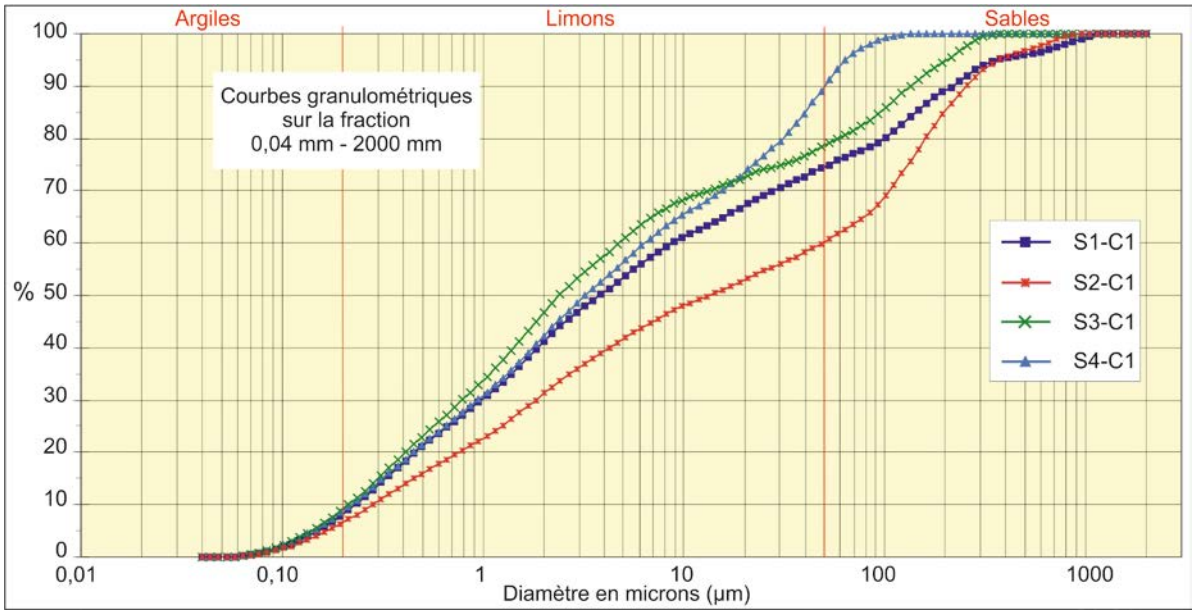


Fig. 47 : Distributions granulométriques des sédiments du faciès sulfato-carbonaté issus de la carotte C1 (rive est de Halq al Minjil)

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques majeurs (en %)										
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
S4-C1	39,9	0,6	11,8	4,49	0,08	2,8	15,23	3,18	1,61	0,16	20,1
S3-C1	44,2	0,89	13,84	7,06	0,13	3,37	22,93	5,27	2,16	0,2	0
	46,3	0,83	13,56	6,62	0,12	3,22	20,6	6,57	1,99	0,22	0
S2-C1	42,5	0,55	11,93	4,11	0,08	2,83	14,45	3,1	1,55	0,16	18,7
S1-C1	37,1	0,57	11,78	4,3	0,08	2,71	14,77	6,8	1,41	0,15	20,4

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques mineurs (en ppm)										
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb	Cl
S4-C1	87	79	28	22	63	60	348	184	190	7	3,81
S3-C1	108	109	41	35	90	60	373	161	250	10	5,75
	107	104	41	42	94	60	345	142	273	10	6,60
S2-C1	81	80	29	20	63	45	294	153	203	10	4,39
S1-C1	86	80	31	23	67	57	330	157	244	10	7,66

Tab. 12 : Caractéristiques géochimiques du faciès sulfato-carbonaté de la carotte C1 (rive est de Halq al Minjil

Analyses de laboratoire : E. Dinelli

La richesse de la partie inférieure de la carotte C1 en $CaCO_3$, calcite, dolomite, et ankérite peut être rapportée à une forte mobilisation des carbonates dans le bassin. Les carbonates détritiques proviennent de l'action des eaux acides et magnésiennes sur les calcaires (Fischesser, 1955). Un climat à saisons contrastées, caractérisé par une forte

pluviosité et une température moyenne élevée, favorise la mise en solution des carbonates (Schütt, 2000). Une origine authigène des calcites et des dolomites est probable. Ceci est possible par l'action des processus diagénétiques de décomposition de la matière organique et de l'assimilation biologique du CO_2 (Schütt, 2000, Schütt et Thiemann, 2004).

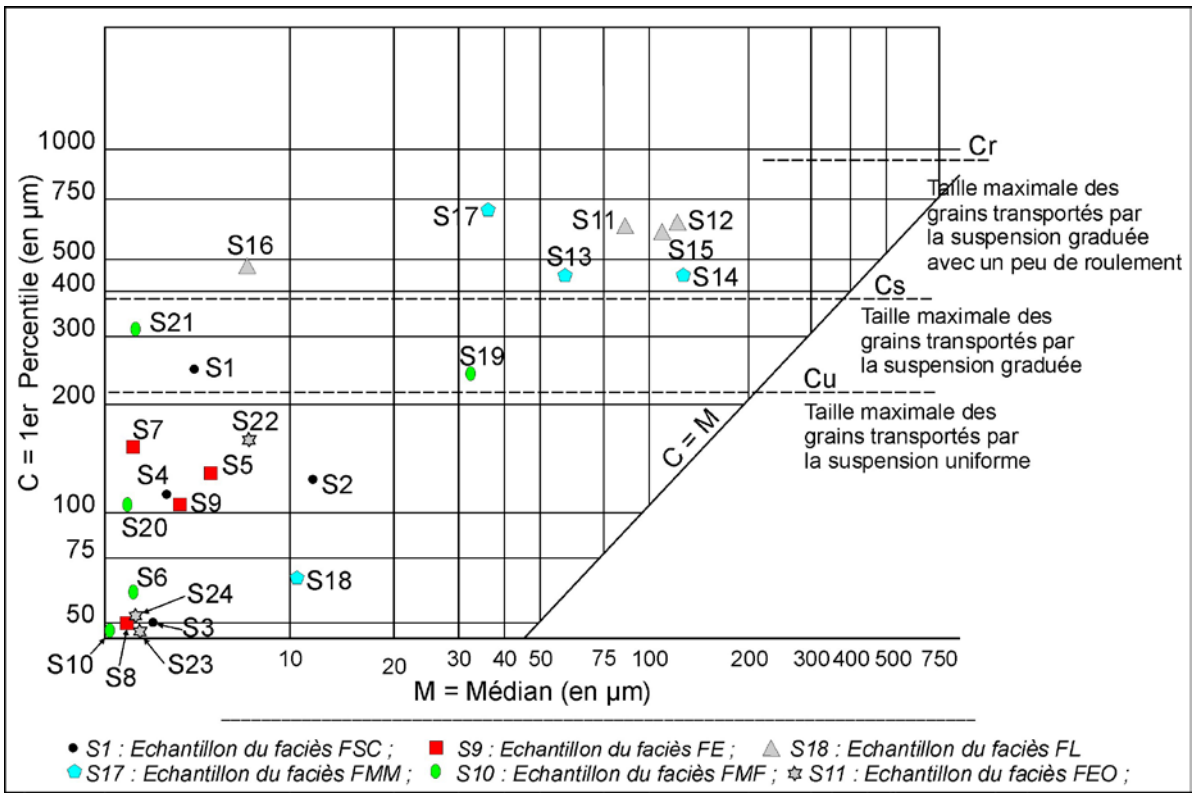


Fig. 48 : Modes de transport des sédiments de la carotte C1 de la rive est de Halq al Minjil

IV-4- Le faciès mixte d'influence marine notable (FMM)

Le faciès mixte d'influence marine notable est reconnu sur 97,5 cm d'épaisseur. Il représente 17,8% de la sédimentation totale. Il est réparti sur quatre séquences des parties médiane et supérieure de la carotte C1 (S13, S14, S17 et S18-C1).

IV-4-1- Caractérisation sédimentologique du faciès : une forte hétérogénéité séquentielle

Le faciès mixte d'influence marine notable montre des fortes hétérogénéités lithoséquentielles des dépôts (Tab. 13). Les séquences S13 et S14-C1, séparent deux niveaux lagunaires. Elles sont respectivement composées de **limons argilo-sableux** et de **limons sableux oxydés**. Le sédiment est mal classé, peu à modérément gypseux et modérément calcaire. La couleur est jaune pâle (5Y 7/4). La distribution granulométrique est subparabolique. La médiane est forte. Des macrocristaux de gypse et des concrétions calcaires se dispersent au sommet des accumulations.

Les séquences S17 et S18-C1 sont composées de **limons argilo-sableux** olives pâles (5 Y 6/4) et de **limons argileux** gris sombres (5Y 4/1). Le dépôt est mal trié, peu à modérément calcaire et peu gypseux. La médiane est modeste. Les courbes granulométriques sont logarithmique et sublogarithmique. Des macrocristaux de gypse, des concrétions calcaires millimétriques et des amas sableux rouge jaunâtres s'intercalent dans le dépôt. Dans les quatre séquences, les quartz émoussés luisants dominent. Les grains émoussés mats sont fortement présents, représentant même 40% des quartz examinés.

Séquence lithostratig.	Teneur en CaCO3 (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie				Granulométrie (µm)			Indice de classement (Trask So)	Médiane (µm)
				SE	EL	EM	RM	< 2	2 à 50	50 à 2000		
S18-C1	1,89	5 Y 4/1	2,69	16	56	28	4	28,1	27,4	44,5	10.297	24,01
S17-C1	17,64	5 Y 6/4	2,67	8	52	40	0	28,1	24	47,9	10.788	37,34
S14-C1	16,17	5 Y 7/4	10,49	24	40	36	0	19,6	16,4	64	8.953	137,90
S13-C1	23,1	5 Y 7/4	0,66	20	44	36	0	27,4	21,1	51,5	11.843	59,62

Tab. 13 : Des caractéristiques sédimentologiques hétérogènes du faciès mixte d'influence marine notable de la carotte C1 (bordure est de Halq al Minjil)
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

IV-4-2- Cortège minéralogique et composition géochimique du faciès

Trois échantillons, prélevés sur les séquences lithostratigraphiques S13, S17 et S18-C1, ont fait l'objet d'une analyse minéralogique. Ils se distinguent du reste des échantillons de la carotte C1 par **la présence de l'aragonite**. Le microcline, l'albite, l'halite et les argiles sont peu représentés. Le quartz et la calcite forment la phase minérale majeure des séquences S13 et S17-C1.

Les résultats d'analyses géochimiques ont montré les teneurs en silicium et en potassium les plus fortes de la carotte, surtout dans les séquences S17 et S18-C1. La séquence S17-C1 enregistre une forte concentration en magnésium (0,15 ppm). La séquence S18-C1 contient la teneur en calcium la plus faible de la carotte. Les éléments géochimiques mineurs sont moyennement concentrés. La séquence S17-C1 se distingue par ses fortes teneurs en Ni, Zn, Ba et Pb. Dans la séquence S18-C1, et contrairement au rapport molaire K/Al, le rapport Ca/Al est le plus faible de la carotte.

IV-4-3- Signification morphodynamique et environnement de sédimentation

Les limons argileux de la séquence S18-C1 sont issus de la suspension uniforme (*cf.* Fig. 48). Les argiles sableux et les limons sableux des séquences S13-14 et S17-C1 ont transité par la suspension graduée avec un peu de roulement. Pendant la submersion, une turbulence suffisante a pu faire remonter les matériaux les plus grossiers. A la descente des eaux, la réduction de la vitesse des flux a apporté des matériaux fins au dépôt (limons et argiles). L'accumulation est en vrac. Les concrétions calcaires, très abondantes dans les sédiments, sont vraisemblablement issues d'apports latéraux provenant de l'érosion des formations à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène (Boujelben, 2002).

Halq al Minjil a connu d'importants échanges avec la mer (importance du sodium, du potassium et précipitation de l'aragonite). Mais, **le plan d'eau est temporaire ou fortement fluctuant**. Le caractère vaseux et gris sombre et la mauvaise odeur de la séquence S18-C1 caractérisent **un sapropèle gypso-organique**. Sa formation est vraisemblablement conditionnée par la circulation limitée des eaux et l'importance de la décomposition de la matière organique par l'activité des bactéries sulfato-réductrices en milieu anoxique (Abichou, 2002 ; Schütt, 2004). L'oxydation de la matière et la précipitation du gypse sur les rivages témoignent de l'émersion et d'une remontée périodique d'une nappe proche (Vizier, 1984 ; Kervazo et Laville, 1988).

IV-5- Le faciès lagunaire

A deux profondeurs différentes, le sondage carotté C1 a traversé quatre séquences (S11, S12, S15, S16-C1) aux *Cerastoderma glaucum*, *Cerithium vulgatum* et foraminifères.

Elles montrent des changements significatifs des caractéristiques sédimentologiques et définissent deux phases distinctes de sédimentation lagunaire.

IV-5-1- La première sédimentation lagunaire

Le remplissage, **épais de 20,5 cm**, est réparti sur deux séquences S11 et S12-C1.

IV-5-1-1- Propriétés sédimentologiques

Les séquences S11 et S12-C1 se composent de **limons argilo-sableux oxydés** et de **limons sableux**, de couleur brun jaunâtre clair (2.5 Y 6/4) et jaune pâle (5 Y 7/4). Elles sont fortement à modérément calcaires et peu gypseuses. Elles renferment des amas calcaires friables et des cristaux de gypses. Les sédiments sont mal triés et montrent une distribution granulométrique de forme sublogarithmique. La médiane est forte (84,8-123,6 µm). La séquence S11-C1 emballe des **petits fragments de *Cerastoderma glaucum***. La strate S12-C1 montre des **éclats calcaires brûlés**, des **fragments et des valves de *Cerastoderma glaucum*** et des **tests de coquilles d'*Helix***. Les quartz émoussés luisants picotés et émoussés mats dominent. Le même dépôt lagunaire a été reconnu sur les tarières T17, T18, T22, T27, T28 et T41. Les profondeurs oscillent entre +1,00 m (T41) et -1,89 m (T28) par apport au niveau zéro de la mer. Les épaisseurs varient entre 19 et 35 cm.

IV-5-1-2- Association minéralogique et concentrations d'éléments géochimiques

Un échantillon de la séquence S11-C1 a présenté une association minéralogique composée de quartz et de calcite majoritaires associés secondairement aux feldspaths, **aragonite**, halite, gypse et argiles.

La géochimie a montré une nette évolution des teneurs en éléments majeurs et mineurs (Tab. 14). Les concentrations en alumino-silicates et alcalino-terreux sont fortes à moyennes, à l'exception du rubidium, du strontium et du plomb. Les rapports molaires V/Al, Ti/Al, K/Al et Fe/Al sont importants.

Séquence lithostratig.	Eléments géochimiques majeurs (en %)										
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
S12-C1	35,5	0,6	14,47	4,04	0,07	3,67	6,82	6,3	1,4	0,1	27,03
S11-C1	18,01	0,33	5,85	2,37	0,04	0,95	3,02	43,52	0,85	0,05	25
Eléments géochimiques mineurs (en ppm)											
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Pb
S12-C1	87	70	28	8	64	84	492	158	27	176	14
S11-C1	58	26	21		48	90	223	204	21	126	8
Rapports molaires											
	Si/Al	Ti/Al	Fe/Al	Mn/Al	Mg/Al	Ca/Al	Na/Al	K/Al	LOI/Al	V/Al	Zn/Al
S12-C1	2,166	0,047	0,369	0,007	0,289	0,636	0,610	0,152	3,529	11,411	8,382
S11-C1	2,719	0,064	0,535	0,010	0,185	0,697	10,427	0,228	8,074	18,764	15,470

Tab. 14 : Le premier remplissage lagunaire de la carotte C1 de la rive est de Halq al Minjil : une forte concentration des éléments géochimiques dosés

Analyses de laboratoire : E. Dinelli

IV-5-1-3- Signification morphodynamique, contexte et environnement de la sédimentation

Les deux séquences S11 et S12-C1 reconstituent **un premier remplissage fossilifère typiquement lagunaire effectué dans un milieu intertidal**. La matière hétérogène est issue de la suspension graduée avec quelques grains roulés. Elle marque un fort enrichissement en particules fines pendant la descente des eaux dans la lagune. L'accumulation est effectuée en vrac par excès de charge après la réduction de la vitesse des courants à plus ou moins forte capacité de transport. Les amas calcaires friables dispersés dans la masse indiquent des rabattements de la nappe (communication orale de Patrick Le Gouée, pédologue, GEOPHEN) et/ou des apports latéraux intermittents par des ruissellements compétents sur les versants. Sans exclure la part du façonnement éolien, l'aspect picoté des quartz émoussés luisants explique une corrosion par dissolution physico-chimique dans un milieu acide (Boyé et Nesson, 1970). **Les cailloux calcaires brulés sont probablement remaniés sur les sites préhistoriques** des bordures de Halq al Minjil.

Le développement quantitatif des fragments et des valves de *Cerastoderma glaucum* dans la séquence 12-C1, témoigne d'**un milieu biocénotique plus productif** et moins agité que celui de la séquence S11-C1. La présence exclusive des *Cerastoderma glaucum* peut traduire **une ouverture progressive de Halq al Minjil sur le large** (Carbonel *et al.*, 1981).

IV-5-1- La deuxième sédimentation lagunaire

Deux séquences lithostratigraphiques différentes (S15 et S16-C1), épaisses de 48 cm, représentent la deuxième sédimentation lagunaire. Celle-ci est séparée du premier remplissage lagunaire par un dépôt non fossilifère d'influence marine notable.

IV-5-1-1- Deux séquences aux caractéristiques sédimentologiques et malacologiques différentes

Dans l'ordre chrono-séquentiel, le matériel est composé de **limons sableux** oxydés et de **limons argileux**, modérément calcaires et mal à normalement classés. La couleur est jaune pâle (5 Y 7/4). La teneur en gypse varie entre 0,5 et 19%. Le grain moyen est dans les silts grossiers et fins. Des concrétions calcaires rougeâtres, de taille millimétrique, s'intercalent dans la masse. La séquence S15-C1 contient **des valves et des fragments de *Cerastoderma glaucum*** qui s'associent dans la séquence S16-C1 à **des fragments et à des entiers de gastéropodes du *Ranella gigantea*** d'environ 15 mm de longueur. Les sédiments de la séquence S15-C1 montrent une distribution granulométrique parabolique et possèdent une forte médiane (112,3 µm). Au contraire, ceux de la séquence S16-C1 présentent une courbe logarithmique et une très faible médiane (7,6 µm).

Le même remplissage lagunaire est reconnu sur les tarières T17, T18, T22, T27, T28 et T41. Des **sables limoneux,** des **limons sableux** et des **argiles limoneuses aux *Cerastoderma glaucum*** ont été recoupés entre +187 cm (T41) et -169 cm (T28) de profondeur par apport au niveau zéro marin. Les épaisseurs varient entre 30 et 43 cm.

IV-5-1-2- Cortège minéralogique et composition géochimique des sédiments

Un échantillon prélevé sur la séquence S16-C1 a montré l'association de la calcite, de l'aragonite, de l'halite, du gypse, du microcline et des argiles. Le quartz est le seul minéral majeur du dépôt. La séquence S15-C1 a révélé des teneurs moyennes à importantes en éléments géochimiques majeurs et mineurs. La séquence S16-C montre les concentrations les plus faibles de la carotte en K_2O, P_2O_5, V, Cr, Ni, Zn, Pb et Rb. Ses teneurs en CaO, Na_2O, LOI et Sr sont par contre relativement importantes. Les rapports

molaires Si/Al et le Ca/Al de la séquence S16-C1 sont les plus forts de la carotte, ainsi que le rapport K/Al de la séquence S15-C1.

IV-5-1-3- Morphodynamique et conditions de mise en place du remplissage lagunaire

Les sédiments sont charriés par la suspension graduée avec des particules grossières issues du transport par roulement. Ils ont été mis en place, dans un milieu intertidal peu à relativement agité, par des flux d'eau à plus ou moins forte capacité de transport. L'accumulation est effectuée en vrac. Sur l'image CM (*cf.*, Fig. 48), l'échantillon de la séquence S16-C1 présente une valeur de C importante (493,6 µm) et une médiane très faible (7,62 µm). Il indique une turbulence très forte pendant la submersion de la lagune et un enrichissement en matériaux fins plus important lors la descente des eaux.

Dans la séquence S16-C1, les *Ranella gigantea*, occupant couramment les eaux profondes (Piccenetti *et al.*, 1990), n'ont qu'une signification locale et sont vraisemblablement remaniés et non *in situ*. Leur présence est contraire aux exigences écologiques des *Cerastoderma glaucum*, fréquentant surtout les zones inter à infratidales (Carbonel *et al.*, 1981).

L'importance relative des éléments alumino-silicatés dans la séquence S15-C1 permet de déceler la présence des minéraux phylliteux (illite, smectite, kaolinite,) hérités et/ou néoformés, dans un milieu hydrolysant (Baize, 2000 ; Saaidi, 1988). L'importance du calcium, du sodium et du magnésium peut expliquer l'abondance des sels dans le sédiment (chlorures, sulfates ou carbonates) et la formation des gypses (Horchani, 1994). La forte teneur en strontium l'explique (Boujelben *et al.*, 2008). L'importance des rapports Si/Al et de Ca/Al peut témoigner d'une importante mobilisation du calcium et de la calcite dans le bassin (Communication orale d'Enrico Dinelli).

IV-6- Le faciès éolien

Dans sa partie supérieure, le sondage carotté C1 a recoupé un **faciès éolien du bourrelet hydroéolien de la rive est de Halq al Minjil**. Il représente 6,7% de la sédimentation. Il est disposé en trois séquences lithostratigraphique (S22, S23 et S24-C1).

IV-6-1- Des caractéristiques sédimentologiques homogènes

Le faciès éolien se compose de **limons argileux** (S22-C1) et d'**argiles silteuses** (S23-24-C1), **polyédriques à massifs** et mal et à assez bien classés. Les sondages à la tarière à main T17, T18, T22 et T25 ont recoupé une à trois séquences du même faciès dont **les épaisseurs varient de 50 à 85 cm**. Le sédiment est modérément calcaire et peu à modérément gypseux. La couleur est brun olive claire (2.5 Y 5/4). Les quartz émoussés mats prédominent (48-56%). Les grains ronds mats et émoussés luisants picotés représentent respectivement 8 et 36% des quartz examinés (Fig. 49.1). Le grain moyen est dans les silts fins (7,2-8,9 µm). La médiane est inférieure à 7,4 µm. Les courbes granulométriques sont hyperbolique à logarithmique (Fig. 49.2). Des lits fins gypseux, des filaments verticaux et horizontaux de sel blanc et des racines s'intercalent dans l'accumulation.

IV-6-2- Des phases minéralogiques et une composition géochimique non différenciées

Le quartz et le gypse constituent la phase minéralogique majeure des deux séquences S22 et S24-C1. La calcite, le microcline, l'albite (absent dans la séquence S24-C1), l'halite et les argiles sont peu représentés.

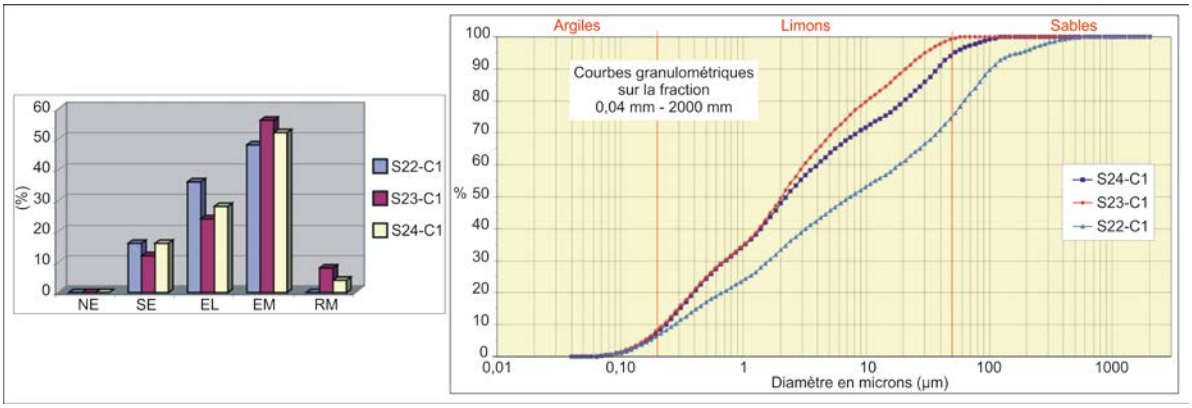


Fig. 49 : La morphoscopie du quartz et la distribution granulométrique des échantillons du dépôt éolien du sommet de la carotte C1

Le faciès éolien se caractérise par ses fortes à moyennes concentrations en alumino-silicatés et en éléments alcalins. Il montre un enrichissement relatif en MgO (5,03%), Na_2O (7,08%) et LOI (21,69%) et une très faible teneur en CaO (4,98%). Les éléments mineurs révèlent des concentrations élevées en Cr, Ni, Zn et Rb. La teneur en vanadium est nulle. Une corrélation positive peut être établie entre le magnésium, le sodium et le strontium. Les rapports molaires Si/Al, Ti/Al, K/Al, Zr/Al et Fe/Al sont moyens et marquent des changements de valeurs par apport à ceux du faciès sous-jacent. Le rapport Ca/Al est très faible.

IV-6-3- Interprétation morphodynamique et contexte de mise en place des sédiments

Les limons argileux et les argiles silteuses sont d'origine éolienne (64% de quartz émoussés mats et ronds mats, redressement des courbes granulométriques). Ils ont été arrachés sur le fond desséché de l'enclave littorale par les vents actifs des secteurs ouest et nord-ouest. Leur nature sodique et magnésienne et leur richesse en sels renseignent sur l'état de surface de Halq al Minjil et sur les conditions minéralo-chimiques ayant régnées lors du dépôt. Un caractère chloruré, sulfaté, sodique et alcalin du fond exondé et desséché de Halq al Minjil a favorisé la floculation des argiles et des limons et la pulvérisation d'une surface très vulnérable à l'exportation éolienne (Belkhouja, 1972 ; Hachicha *et al.*, 1987). L'absence des grains ronds mats dans la séquence S22-C1 et l'importance générale des émoussés luisants peuvent témoigner de la courte histoire du transport éolien. Le picotement des émoussés luisants est peut-être le résultat d'actions physico-chimiques d'une dissolution antérieure et/ou de chocs des grains entraînés par le vent (Boyé et Nesson, 1970).

La teneur importante du carbone et de la matière organiques et la présence des racines dans la masse prouvent le rôle, largement invoqué dans les études géomorphologiques, d'une végétation halophile dans le piégeage des agrégats éolisés, la fixation et la formation de l'édifice hydroéolien (Jauzein, 1967 ; Perthuisot et Jauzein, 1975 ; Coque, 1979 ;…). Ainsi, la formation des nebkas et leur coalescence ont largement contribué au dégagement du bourrelet hydroéolien.

La superposition de trois séquences lithostratigraphiques différentes traduit, d'un point de vue cyclique et sur la durée, l'arrêt ou l'atténuation de l'action éolienne et un changement des conditions sédimentologiques et physico-chimiques de dépôt. Les lits fins gypseux et les filaments de sel témoignent d'une cristallisation et/ou une redistribution des sels dans la masse. Dans la frange capillaire, les sulfates présents dans l'eau interstitielle et

dans les fentes et les pores, peuvent être précipités donnant lieu à ces formes gypseuses (Perthuisot, 1971 ; Gaucher et Burdin, 1974 ; Hachicha *et al*., 1987).

CONCLUSION DU CHAPITRE

Au Pléistocène, la genèse et la configuration morphologique de l'enclave littorale de Halq al Minjil sont la résultante des facteurs complexes : tectonique distensive, subsidence lente et continue, morphodynamisme littoral et sédimentation marine et éolienne.

Les remplissages sédimentaires du fond et des rives de la sebkha-lagune Halq al Minjil sont très variés. Ils illustrent à des échelles de temps variées, des changements de la provenance de la matière, des mécanismes sédimentaires et pédologiques, des états de surface, des conditions et des environnements sédimentaires. Au strict point de vue hydrologique, Halq al Minjil est un milieu complexe connaissant une recharge périodique et/ou occasionnelle due aux incursions marines et/ou aux apports terrigènes. La sédimentation semble plus dépendre des apports proches, latéraux et continentaux que de l'hydrodynamisme marin. Il s'agit essentiellement des apports lointains de l'oued al Manfas as-Sod. D'où le potentiel intéressant qu'offrent les archives sédimentaires pour l'étude de l'évolution des rapports amont/aval, bassin versant/dépression et al Kalbiyya/Halq al Minjil.

Les cinq mètres de la partie inférieure de la carotte C1 présentent une stratigraphie semblable à celle de la carotte C3. Des corrélations spatio-temporelles sont réalisables. Bien que riche en marqueurs paléoenvironnementaux (mollusques, « évaporites »…), la chronostratigraphie des remplissages de l'enclave littorale permet la reconstitution des différentes phases holocènes du fonctionnement de Halq al Minjil dans ses relations avec les différents facteurs du contrôle. Les séquences éoliennes des parties supérieures de la carotte C1 et des tarières T17, T18, T22 et T25 traduisent des ruptures dans le fonctionnement hydrologique du système littoral. Elles expliquent des changements de tendances morphogéniques et d'évolution des environnements.

CHAPITRE V :
DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE

L'enclave littorale de Halq al Minjil est remplie de sédiments d'âge, de nature et d'origine variés (fluviatile, marine, éolienne, mixte). Ils témoignent de la complexité du fonctionnement d'un système à l'interface terre/mer. La répartition spatiale et l'organisation chronostratigraphique des différents faciès expliquent la succession et la juxtaposition de multiples processus, conditions et environnements sédimentaires. Leur corrélation spatio-temporelle, appuyée sur les résultats d'analyses multiparamètres et sur la réalisation de quatre datations ^{14}C AMS, a permis d'établir une échelle litho-chronostratigraphique de synthèse, de définir des unités sédimentaires et de reconstituer l'évolution des dynamiques.

Les remplissages sédimentaires de Halq al Minjil s'organisent en quatorze unités sédimentaires. Celles-ci reconstituent la répartition spatio-temporelle des sédiments, des processus et des milieux sédimentaires. Elles mettent en évidence des changements importants de dynamiques et d'environnements. Elles reconstruisent l'évolution du système paralique en précisant les différents stades du remplissage et du fonctionnement hydrologique. Pendant l'Holocène, Halq al Minjil a fonctionné en système de sebkha, lac temporaire-sebkha, lagune, sebkha-lagune et lagune-sebkha, au gré des changements du rapport terre/mer, des dynamiques, des environnements et des facteurs de contrôle.

Ce chapitre présente le cadre et les problèmes méthodologiques de corrélation spatio-temporelle des faciès, de définition des unités sédimentaires et d'interprétation hydromorphologique et chrono-environnementale des remplissages inventoriés. Il analyse les dynamiques sédimentaires et étudie les phases majeures de sédimentation qui se sont succédées depuis le Pléistocène supérieur terminal et pendant tout l'Holocène. Il caractérise également les systèmes et les stades du fonctionnement hydrologique de l'enclave littorale.

I- CADRE ET PROBLEMES METHODOLOGIQUES DE L'INTERPRETATION CHRONO-ENVIRONNEMENTALE ET HYDROMORPHOLOGIQUE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES

Le changement de l'organisation latéro-verticale des faciès interprète des phases distinctes de fonctionnement, à des échelles de temps variées, en fonction des cycles d'apports éolien, marin et/ou continental et d'évolution post-déposionnelle. La corrélation spatio-temporelle des faciès permet d'établir une échelle litho-chronostratigraphique de synthèse et de définir des unités sédimentaires, reconstituant les différents stades d'évolution de Halq al Minjil et les systèmes holocènes de son fonctionnement hydrologique.

I-1- Corrélations spatio-temporelles des faciès et définition des unités sédimentaires

Le calage des phases de sédimentation et la corrélation des faciès se sont appuyés sur l'exploitation des jalons bio-lithostratigraphiques et la réalisation des datations ^{14}C AMS.

I-1-1- Calage chronologique des remplissages sédimentaires

Le contrôle chronologique des remplissages du fond de Halq al Minjil est assuré par **cinq datations ^{14}C AMS**. Elles ont été effectuées sur la matière organique des niveaux

lagunaire, « évaporatique » et fluvio-marin de la carotte C3 (Tab. 15). L'échantillon SacA-12812 a donné un âge erroné car plus ancien que celui des niveaux litho-chronostratigraphiques sous-jacents.

Deux datations radiométriques au ^{14}C, ont été réalisées sur des *Cerastoderma glaucum* des niveaux lagunaires des carottes C1 et C3. Elles ont donné des âges surprenants. L'âge obtenu au sommet du deuxième niveau lagunaire de la carotte C1 remonte au Pléistocène (LRAE-C1-D1). Il est plus ancien que celui des sédiments lagunaires immédiatement inférieurs (LRAE-C3-D1). Un remaniement d'une malacofaune plus ancienne ne peut être exclu, de même que le risque d'effet réservoir ^{14}C et de contamination. Ailleurs et en terme de corrélation, une datation ^{14}C (LRAE-1) effectuée sur les *Helix* d'une formation de sables bruns pédogénisés du cours aval de l'oued Lahmar-Ghuirga a été retenue. La même formation comble aujourd'hui les bordures orientales et les graus septentrionaux de Halq al Minjil.

Référence	Matière	Profondeur absolue (m)	Age radiocarbone conventionnel (BP)	$\delta^{13}C$	Age calibré 2 sigma (BP)	Age calibré 2 sigma (BC)	Observation
Beta-290411	Matière organique	-0,58	3410 ±40	---	3731-3562	1782-1613	
SacA-12812	Matière organique	-1,26	4425 ± 35	-24,6	5070-4871	3121-2922	Erronée
SacA-12811	Matière organique	-1,78	4365±50	-16,6	5054-4838	3105-2889	
SacA-12810	Matière organique	-2,36	4965±35	-29,5	5749-5604	3800-3655	
Beta-290410	Matière organique	-10,16	25120±120	---	30290-29560	28341-27611	
LRAE-C3-D1	*Cerastoderma glaucum*	-2,28	2850±179	---	3445-2691	1496-742	Erronée
LRAE-C1-D1	*Cerastoderma glaucum*	-1,11	30775±2924	---	41530-30155	39581-28206	Erronée
LRAE-1	*Helix*	-----	3874±201	---	4839-3823	2890-1874	

Tab. 15 : Datations ^{14}C AMS et radiométriques des remplissages sédimentaires du fond de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Les datations ^{14}C AMS ont permis de caler les différents stades de sédimentation depuis le Pléistocène terminal (25120±120 BP) jusqu'au Flandrien supérieur (3410±40 BP). Néanmoins, l'absence de datations sur les parties médianes des carottes C1 et C3 n'a pas permis le calage précis des niveaux lithostratigraphiques de la transition Pléistocène-Holocène et ceux de l'Holocène inférieur. Cela a rendu difficile l'estimation des rythmes de la sédimentation. Un autre problème réside dans la datation des sédiments mis en place au cours les trois derniers millénaires. Les tarières ont permis d'inventorier l'archive sédimentaire d'âge holocène supérieur-historique mais elles ne s'appuient sur aucune datation absolue. Ainsi, nous avons tenté d'établir des rapports entre les niveaux non datés, le cadre chronologique général de l'hydrosystème et les contextes morphoclimatiques régionaux.

Dans le cadre du projet sur le Capsien de Hirgla, une série de datations ^{14}C AMS a été réalisée sur des fragments d'œuf d'autruche et de *Cerastoderma glaucum* et sur un bioapatite animal de sept niveaux d'occupations épipaléolithiques du site SHM-1 (Mulazzani *et al.*, 2007, 2008 ; Mulazzani, 2010 ; Saliège *et al.*, 2013). Elle a permis de caler la chronologie de deux générations de dépôts hydroéoliens des bordures occidentales de Halq al Minjil, séparés par ces niveaux d'occupation (Tab. 16).

I-1-2- Marqueurs bio-lithostratigraphiques, corrélation des faciès et définition des unités sédimentaires

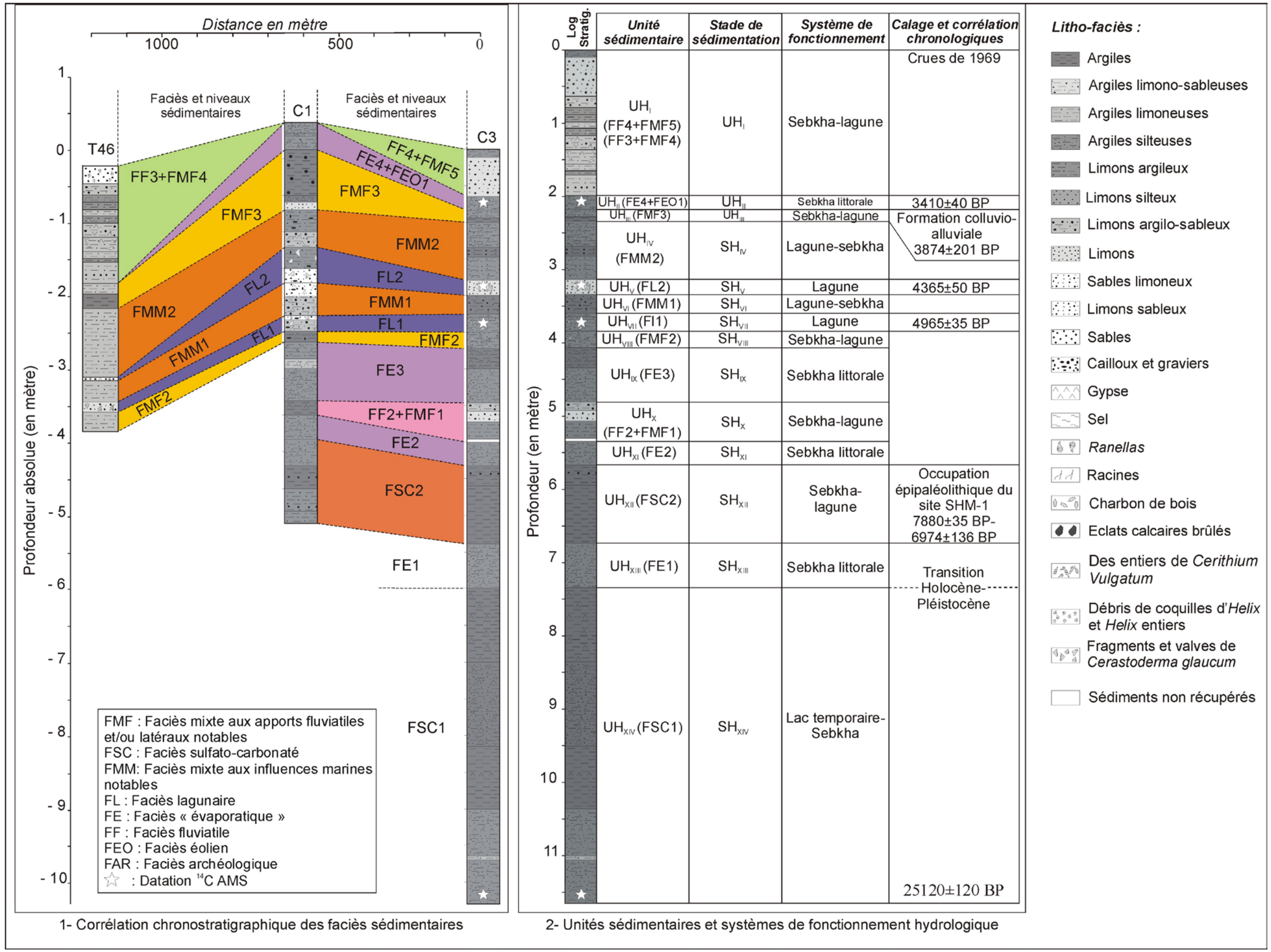
A la différence du complexe sédimentaire de la sebkha al Kalbiyya, celui d'Halq al Minjil a livré **un nombre assez varié de marqueurs bio-stratigraphiques (*Cerastoderma glaucum*, *Cerithium vulgatum*, *Donax trunculus*, foraminifères)**. Il a montré le **développement séquentiel et condensé de certains minéraux** (évaporites, carbonates : aragonite, dolomite, ankérite). Ces données aident à établir la corrélation

latérale des faciès et à restituer la chronostratigraphie de la sédimentation, des dynamiques et des paléoenvironnements.

Cerastoderma glaucum									
N°labo. SMA	N° Labo	US	Niv.	Sond.	^{13}C ‰	Cerast. $\delta^{18}O$ ‰	Age BP	Cal BC 1σ	Cal BC 2σ
-	ENEA-861	237	1	7	-0,24	-0,96	8220±40	6885-6575	7001-6485
-	ENEA-840	515	1	5	-0,9	-	7870±30	6412-6235	6499-6106
-	ENEA-841	529	1	5	-0,3	1,16	7870±30	6412-6235	6499-6106
-	Pa 2471	238	2	7	-1,53	0,6	7595±80	6194-5948	6319-5812
-	ENEA-863	230	2	7	0,38	0,87	7720±70	6290-6052	6402-5972
-	ENEA-864	230	2	7	0,385	-	7750±40	6317-6100	6394-6015
-	ENEA-839	490	2	5	-1,4	-	7330±40	5885-5695	5974-5620
-	ENEA-837	481B	3	5	0,55	0,51	7920±40	6459-6263	6585-6186
-	-	406	4	5	-2,49	0,013	-	-	-
-	ENEA-838	440	4	5	-0,4	0,34	7220±40	5780-5600	5878-5514
-	ENEA-836	310	5	5	-1,07	2,04	7520±40	6065-5869	6186-5774
-	-	383	5	5	-1,216	-1,07	-	-	-
-	ENEA-834	214	6	3	1,1	-	7420±40	5973-5783	6052-5683
-	ENEA-835	305	6	5	1,26	-0,08	7160±40	5713-5546	5813-5469
-	ENEA-666	13 sommet	6	4	-	-	6986±76	5592-5386	5687-5280
-	ENEA-667	13 base	6	4	-	-	6993±79	5600-5393	5697-5284
-	ENEA-865	213	7	3	0	1,17	7450±40	5997-5807	6086-5703
-	Pa 2470	304	7	5	-1,25	2,31	7175±45	5727-5550	5831-5474
-	ENEA-668	217	7	3	-	-	7206±56	5768-5574	5874-5488
-	ENEA-866	12	7	4	0,35	0,98	6840±30	5454-5287	5529-5187
Œuf d'autruche									
N°labo. SMA	N°labo. Locean	US	Niv.	Sond.	^{13}C ‰		Age BP	cal BC1σ	cal BC 2σ
SacA 23655	P1072	529	1	5	-10,35	-	7880±35	6768-6651	7019-6638
SacA 23650	P1067	490	2	5	-9,87	-	7735±30	6599-6507	6637-6485
SacA 23653	P1070	451	3	5	-9,87	-	*7005±30*	*5974-5846*	*5984-5810*
SacA 23648	P1065	419	4	5	-9,76	-	7635±30	6493-6445	6566-6432
SacA 23649	P1066	440	4	5	-9,87	-	7715±30	6590-6505	6627-6471
SacA 23651	P1068	310	5	3	-10,04	-	6835±35	5738-5673	5784-5644
SacA 23652	P1069	305	6	5	-10,48	-	6855±30	5769-5708	5805-5666
SacA 23654	P1071	304	7	5	-9,39	-	*4320±30*	*3007-2893*	*3013-2891*
Bioapatite animale									
N°labo. SMA	N°labo. Locean	US	Niv.	Sond.	^{13}C ‰		Age BP	cal BC1σ	cal BC 2σ
SacA 23663	P1080	305	6	5	-9,63	-	6625±30	5615-5534	5623-5492

Tab. 16 : Datations ^{14}C des niveaux d'occupation épipaléolithique du site SHM-1 sur la rive centre-est de Halq al Minjil (Saliège et al., 2013)

Les carottes C1 et C3 et la tarière T46 présentent les colonnes stratigraphiques les plus complètes et les plus variées. Elles permettent la définition des principales phases du remplissage sédimentaire à la croisée de l'évolution fini-pléistocène et holocène des environnements et des dynamiques. La corrélation spatio-temporelle des faciès a permis de proposer un découpage en niveaux chronostratigraphiques et **une succession de quatorze unités sédimentaires**. Elle a permis également d'établir **l'échelle chrono-lithostratigraphique locale de Halq al Minjil** (Fig. 50). Les limites stratigraphiques des unités sont données par l'apparition ou la disparition des biomarqueurs ou par un changement rigoureux du faciès sédimentologique, minéralogique et géochimique. Chaque unité correspond à une discontinuité et à une phase de sédimentation et d'installation d'un système particulier de fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil.



1- Corrélation chronostratigraphique des faciès sédimentaires

2- Unités sédimentaires et systèmes de fonctionnement hydrologique

Fig. 50: Echelle litho-chronostratigraphique de Halq al Minjil : corrélation des faciès, unités sédimentaires et systèmes du fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil

I-2- Définir les systèmes du fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil

Placée dans un domaine paralique (Guelorget et Perthuisot, 1983), Halq al Minjil est sous l'influence des dynamiques marines et/ou continentales. Les implications hydrologiques des différents faciès sédimentaires indiquent des changements du fonctionnement du site à différentes échelles de rythmicité.

Des particularités morphologiques, hydrologiques, sédimentaires et biologiques aident à la définition d'un type de fonctionnement. Halq al Minjil a connu l'installation de cinq systèmes hydrologiques de type lagune, sebkha littorale, lac temporaire-sebkha (voir p. 66), sebkha-lagune et lagune-sebkha. On propose des définitions succinctes de quatre systèmes sur la base des critères hydromorphologiques, sédimentaires et malacologiques.

I-2-1- Le système lagunaire

La lagune, comme classiquement définie, est une étendue d'eau marine salée ou saumâtre peu profonde, séparée de la mer par une flèche de sable ou un cordon littoral, perméable ou échancré (Encyclopédie de Géographie, 1992 ; Joly, 1997 ; Brunet *et al.*, 2003 ; Encyclopedia of Geomorphology, 2006). Elle subit les influences des apports continentaux et des précipitations qui en font soit un milieu en voie de dessalure, soit au contraire en sursalure suivant l'importance de l'évaporation.

Halq al Minjil, enclavée en arrière du cordon tyrrhénien discontinu, est une lagune sous l'influence marine, à bathymétrie variable et temporairement inondée en périodes de crues des oueds. **Elle est à forte prolifération biocénotique**. Les sédiments contiennent des *Cerastoderma glaucum*, des *Cerithium vulgatum, des Donax trunculus* et des foraminifères.

I-2-2- Le système de sebkha littorale

La sebkha littorale définit un système abrité en derrière du cordon littoral, alimentée par les oueds et la mer à l'occasion de tempêtes ou de hautes mers des vives-eaux. Le plan d'eau est souvent sursalé. L'évaporation, durant des sécheresses estivales intenses ou prolongées, concentre les sels en croûtes superficielles et en boues salées (Perthuisot, 1975 ; Brunet *et al.*, 2003).

De moins en moins profonde, Halq al Minjil correspond à un bassin de décantation, confiné, temporairement ou occasionnellement inondé. **Ses communications avec la mer sont courtes et restreintes**. **Son trait le plus original est la forte abondance des sels** (chlorures et sulfates), concentrés en croûte à la surface ou en cristaux dans la frange capillaire de la boue argileuse et argilo-silteuse. Guidé par une évaporation intense, le régime hydrologique tend au semi-endoréisme temporaire.

I-2-3- Les systèmes mixtes : sebkha-lagune et lagune-sebkha

Les systèmes mixtes traduisent **la juxtaposition synchronique ou l'alternance dans le temps et dans l'espace de deux milieux de sebkha et de lagune temporaires** (Cojan et Renard, 1999). En effet, rien ne particularise spécialement une sebkha-lagune à une lagune-sebkha, si ce n'est que le bilan hydrique. Celui-ci est principalement commandé soit par les apports continentaux ou les échanges marins dont le rapport de l'hydrodynamisme est à la faveur des dynamiques continentales ou marines. Les régimes hydrologiques dépendent du bilan momentané qui s'établit entre les apports et les prélèvements par évaporation.

I-2-3-1- La sebkha-lagune

La sebkha-lagune, relativement confinée, est au moins saisonnièrement **sous l'influence prépondérante des apports et du morphodynamisme continentaux**. Les

apports marins, limités aux parties méridionales de Halq al Minjil, sont généralement faibles, occasionnels ou épisodiques. Les sédiments déposés sont d'origines fluviatile, fluvio-marine d'influences fluviatiles notables et fluvio-marine sulfato-carbonaté, où s'intercalent des gypses et des fines croûtes de sel. Le remplissage est très hétérogène et très sensible aux variations du régime hydrique et aux fluctuations du climat.

I-2-3-2- La lagune-sebkha

La lagune-sebkha ou la lagune temporaire est un système en communication moins restreinte avec la mer et moins confiné que le précédent, recevant des apports complémentaires d'eaux continentales. La sédimentation est fluvio-marine, sableuse ou boueuse aux influences marines notables à aragonite. **L'hydrodynamisme marin l'emporte**. En saison sèche et surtout dans la partie amont de l'enclave littorale, le plan d'eau fluctuant et peu profond peut être desséché. La surface peut être couverte d'un plancher blanc de sel. Ceci est dû à la faiblesse d'amplitude des marées ou à l'étroitesse et/ou à une éventuelle fermeture des passes. La lagune-sebkha de courte durée de vie, ne favorise pas la production biocénotique.

Pendant chaque stade ou système de fonctionnement hydrologique, Halq al Minjil évolue sous le contrôle conjugué des facteurs hydrodynamiques marins et/ou continentaux, eustato-climatiques, tectoniques et anthropiques.

II- HALQ AL MINJIL DE 25120±120 BP A 4965±35 BP : DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Les parties médianes et inférieures des carottes C1 et C3 révèlent la succession de quatre catégories de faciès sédimentaires (FSC, FE, FF et FMF). Leur corrélation permet de reconstituer **sept phases de sédimentation** ($SH_{XIV-VIII}$). Halq al Minjil a connu l'installation d'un **stade de lac temporaire-sebkha et trois stades de sebkha-lagune séparés par trois systèmes de sebkha-littorale**.

II-1- Le stade lac temporaire-sebkha SH_{XIV} et le stade sebkha-lagune SH_{XII}

Durant le Pléistocène terminal et depuis environ 30000 BP, le niveau marin était à 5 m au-dessous du niveau actuel de la mer (Paskoff et Sanlaville, 1983). Le niveau sulfato-carbonaté FSC1, riche en sels, calcite, dolomite et ankérite (*cf.*, Fig. 50), caractérise seulement la partie inférieure de la carotte C3. Il indique **l'installation d'un système pré-holocène de lac temporaire-sebkha SH_{XIV}**, en arrière du cordon tyrrhénien. Des séquences homogènes d'**argiles** et d'**argiles silteuses, épaisses de 4,3 m**, comblent le fond. Des flux d'eau continentaux à plus ou moins faible capacité de transport ont permis l'accumulation en vrac et en mode libre proche de la décantation de matériaux fins issus de la suspension uniforme. L'homogénéité des remplissages traduit des changements minimes des mécanismes et des conditions de la morphodynamique et suggère des régimes hydrologiques peu à non contrastés.

A l'Holocène inférieur et durant la première moitié de l'Holocène moyen, le niveau marin s'élevait et se rapprochait de sa position actuelle avant la culmination transgressive holocène (Paskoff et Sanlaville, 1983). Le deuxième niveau **FSC2** des parties médianes et inférieures des carottes C1 et C3 signe **l'installation du premier stade de sebkha-lagune SH_{XII}**. Dans l'ombilic, **des argiles épaisses de 105,5 cm** sont issues de la suspension uniforme et graduée et sont mises en place en vrac par excès de charge. Sur les bordures orientales, **des argiles, des argiles silteuses et des limons argileux** fluvio-marins prennent place dans un milieu peu agité, sans changement sensible de la morphodynamique. Ils sont intercalés de lits sableux millimétriques et oxydés. Les dynamiques sont relativement plus

actives. A l'occasion des précipitations locales, les apports latéraux sur les versants sont non négligeables.

Durant les deux stades, **Halq al Minjil a connu d'importants et fréquents apports fluviatiles**. **L'évacuation des trop-pleins lointains de la sebkha al Kalbiyya vers la mer** par l'intermédiaire de l'oued al Manfas as-Sod **est certaine**, justifiée par l'apport élevé en argiles de déversement et en $CaCO_3$. Le plan d'eau a beaucoup varié, soumettant aux variations des précipitations, des apports et de l'évaporation. Les carbonates dans le sédiment (calcite, dolomite et ankérite) exigent au moins saisonnièrement la dissolution et le transport des calcaires dissous dans une colonne d'eau, des flux soutenus par une importante pluviométrie annuelle. La précipitation diagénétique des sels (gypse et halite), sous forme de croûtes fines d'halite et de cristaux de gypse, implique la diminution du niveau de l'eau et l'émersion de la sebkha-lagune par évaporation. La charge des eaux marines et continentales en sels augmente en général la quantité des sels précipités.

II-2- Les stades sebkhas-lagunes SH_X et SH_{VIII}

Les deux stades sebkhas-lagunes SH_X et SH_{VIII} sont annoncés par la mise en place des faciès fluviatile FF2 et fluvio-marin aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables FMF1 et FMF2, des parties médianes des carottes C1 et C3.

Durant les deux stades, Halq al Minjil est le siège d'un remplissage hétérogène dont les **apports fluviatiles sont prépondérants**. **Sur les bordures orientales**, des **argiles** et des **argiles silteuses épaisses de 33 cm** (S6, S10-C1) sont issues de la suspension uniforme et sont déposées en vrac et en mode libre proche d'une décantation. Les dynamiques sont relativement lentes et les apports latéraux sont intermittents. **Au débouché de l'oued al Manfas as-Sod**, les **sables limoneux** et les **limons argilo-sableux** (S11-12-C3), **épais de 16 cm en moyenne**, sont principalement des dépôts de crues, mis en place en vrac par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. Ils correspondent aux sédiments d'épandage alluvionnaire. Ils expliquent **la progradation et l'aggradation alluviales d'un modelé de cône deltaïque** à l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod. La turbulence est forte et permet de remonter les matériaux grossiers d'autant plus loin vers le centre de la sebkha-lagune. L'enrichissement en matériaux fins est fort pendant la descente des eaux. **Les dynamiques sont généralement plus actives**.

En périodes sèches de l'année, l'émersion puis l'assèchement de Halq al Minjil se terminent par **l'installation d'un milieu de sebkha asséchée**. L'évaporation entraîne la cristallisation du gypse dans la frange capillaire des bordures (S6, S10-C1) et de l'halite en surface dans l'ombilic (S10, S12 et S15-C3). Ceci aboutit à l'établissement d'un gradient de concentration des sels depuis les rives jusqu'à l'ombilic, associé à une exondation progressive de la sebkha-lagune.

II-3- Les stades sebkhas littorales SH_{XIII}, SH_{XI} et SH_{IX}

Le fonctionnement de Halq al Minjil en systèmes de sebkha littorale est signalée par la mise en place de trois niveaux « évaporatiques ». Ils sont marqués par des fortes teneurs en gypse et en halite (**FE1, FE2 et FE3**). Ils traduisent de nouvelles tendances hydro-morpho-pédogéniques. **Le fonctionnement d'une sebkha littorale s'exprime génériquement par l'alternance**, au moins saisonnièrement, **de deux phases :**

**** La première phase*** **correspond à la submersion fluvio-marine de Halq al Minjil** par les marées surtout de vive-eau et les crues des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. Les apports terrigènes allogènes sont prépondérants et très chargés en carbonates et en sels dissous ou résiduels. Des **argiles** et des **argiles silteuses** sont transportées en suspension uniforme et sont déposées en vrac et en mode libre proche de la décantation sous une faible

tranche d'eau. **Les dynamiques sont relativement lentes**. **Sur les bordures**, le faciès est plus hétérogène. L'enclave est comblée d'**argiles,** d'**argiles limoneuses** et de **limons.** Ils expliquent les mêmes mécanismes de la morphodynamique. **Les apports latéraux sont de plus en plus marquants**. Des sables grossiers mêlés aux débris de coquilles d'*Helix* (S5, S7-C1) sont mis en place par des ruissellements actifs sur les versants orientaux du bas relief d'al Faj-Hanshir al Golla et du cordon tyrrhénien.

**** La seconde phase*** **correspond à l'exondation progressive puis l'assèchement total intense et/ou prolongé de la sebkha** sur une longue durée de l'année. Une évaporation, forte et persistante, concentre les sels dissous dans les eaux de crues, marines (évaporites d'eau libre) et interstitielles (évaporites capillaires). Elle finit par **la précipitation de grandes quantités de sels dans les sédiments** (près de 30% de sulfates de calcium et de sodium). Elle est certainement soutenue par la réduction des apports hydriques dans la sebkha. Cette réduction est liée à la déficience et à l'irrégularité de la pluviométrie ou à la faiblesse ou à l'atténuation des entrées marines, associées à une isolation intermittente de Halq al Minjil de la mer. Le développement occasionnel d'une plage sableuse en devant de la falaise tyrrhénienne entraine la fermeture des goulets.

Aux nouveaux apports marins ou continentaux, la submersion de la sebkha littorale forme des nouvelles lamines sédimentaires. Celles-ci recouvrent les gypses, les protègent contre une dissolution poussée subséquente et empêchent par conséquent la formation d'une croûte de sels massive.

II-4- Essai de calage et de corrélation chronologiques

La base de la carotte C3 date de 25120±120 BP. La sédimentation sufato-carbonatée dilatée (plus de 4 m), recouvre la période pléistocène terminale-pré-holocène. Halq al Minjil a fonctionné en système de lac temporaire-sebkha (SH_{XIV}). Ce système est corrélable à l'optimum lacustre saharien de la fin du Pléistocène supérieur vers 13000-10000 ans BP (Abichou, 2002). Il est contemporain de l'apparition, à partir de 12000 BP, des premiers indices d'humidité favorisant l'extension des plans d'eau (Brun, 1991) et de la reprise de l'humidité pré-holocène responsable de la fixation des dunes dans le Golfe de Gabès vers 10530+/-349 ans BP (Ballais, 1991).

L'âge fini-pléistocène-début holocène du stade sebkha littorale SH_{XIII} est probable. Il est vraisemblablement contemporain de l'assèchement climatique, établi dans la chronologie tunisienne régionale pendant la transition Pléistocène-Holocène (Coudé et *al.* 1983 ; Brun, 1991, Ballais, 1991 ; Karray, 1990, 1993 ; Abichou 2002 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008).

Le premier stade sebkha-lagune SH_{XII} date de l'Holocène inférieur. Il est plausible de le corréler avec l'optimum climatique à la fois hydrique et thermique atteint vers 8500 BP (Brun, 1991). Sa contemporanéité de l'occupation épipaléolithique des bordures de Halq al Minjil est très crédible. Le calage chronologique des sept niveaux d'occupation du site SHM1 a donné un âge compris entre **7880±35 BP** (8780-8587 cal BP/7019-6638 cal BC) et **6625±30 BP** (7572-7459 cal BP/5623-5492 cal BC ; Mulazzani et *al.*, 2007 ; Mulazzani, 2010, Saliège et *al*., 2013).

Le stade sebkha littorale SH_{XI} est sûrement d'âge holocène moyen. Il est postérieur aux sociétés épipaléolithiques du dit SHM1, dont la fin de l'occupation date de **6625±30 BP**. Ballais (1991) parle d'une phase sèche vers 7500- 7000 BP. Mais Il est tentant de faire correspondre **le stade sebkha littorale SH_{IX}** à l'aridification du climat placée vers **5800-5880+/-50 BP** (Abichou, 2002). **Le système sebkha-lagune SH_X est probablement installé après 6625±30 BP et avant 5800-5880+/-50 BP**. Le niveau FMF2 vient en dessous

du premier dépôt lagunaire daté à 4965±35 BP (SacA 12810 ; 3903-3655 cal BC). **Le stade sebkha-lagune SH_{VIII} est d'âge flandrien moyen**.

III- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL ENTRE 4965±35 BP ET 3874±201 BP

Vers 4965±35 BP (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC), Halq al Minjil a connu l'installation d'un premier système de lagune à production biocénotique (SH_{VII}). Les parties moyennes et supérieures des carottes C1 et C3 révèlent l**a succession de cinq unités sédimentaires** ($UH_{VII-III}$). Celles-ci remontent à la deuxième moitié de l'Holocène moyen. Elles mettent en évidence l'installation de **deux stades lagunaires** (SH_{VII}, SH_V), **deux stades de lagune-sebkha** (SH_{VI}, SH_{IV}) et **un stade de sebkha-lagune** (SH_{III}). Elles expriment des variations eustato-climatiques et des changements de dynamiques et d'environnements.

III-1- Les stades lagunaires SH_{VII} et SH_V

Les niveaux lagunaires **FL1** et **FL2** à *Cerastoderma glaucum* et *Cerithium vulgatum* annoncent **l'installation de deux phases lagunaires** qui montrent des différences de sédimentation et de la morphodynamique.

III-1-1- Le premier Stade lagunaire SH_{VII}

L'installation du premier épisode lagunaire est signalée par le niveau sédimentaire **FL1** aux mollusques côtiers, aux foraminifères et à l'aragonite (S16-C3, S11-12-C1). Progressivement installée, **la lagune est relativement ouverte sur le large**, hydrolysante et peu profonde. De l'ombilic aux rivages, le remplissage montre un granoclassement, des variations et des discontinuités latérales des sédiments.

Sur les bordures et en milieu intertidal (C1, T17, T18, T22, T27, T28 et T41), l'enclave littorale a connu **un remplissage limono-argilo-sableux et limono-sableux épais de 19 à 35 cm**. Les sédiments sont charriés par la suspension graduée avec un peu de roulement, par des courants de marée et/ou de seiches à plus ou moins forte capacité de transport. Ils sont déposés en vrac dans un milieu peu à relativement agité. La rétraction du plan d'eau est marquée par la précipitation des sels et l'oxydation du matériel. L'intercalation des passées limoneuses aux concrétions calcaires atteste les apports intermittents des eaux ruisselées et des crues occasionnelles des oueds al Manfas as-Sod et al Mjanin.

Dans l'ombilic (C3, T35, T46), **la lagune est un milieu euxinique**, peu profond et calme à peu agité. Elle est le siège d'**un remplissage fin d'argiles silteuses, épaisses de 25 à 90 cm**. Les sédiments sont issus de la suspension uniforme et sont déposés en mode libre proche de la décantation. Une forte turbulence épisodique liée probablement aux grandes marées, aux tempêtes et/ou aux courants forts, n'est pas à exclure. **Les dynamiques sont généralement lentes**. A mesure que l'on s'éloigne vers le nord, les conditions hydrodynamiques sont de plus en plus faibles. La lagune est sous une influence continentale prépondérante et reçoit les apports notables de l'oued al Mjinin (T40, T43, T44). Des argiles, des limons et des sables se mêlent aux *Cerastoderma glaucum* et aux *Donax trunculus*.

III-1-2- Le deuxième stade lagunaire SH_V

Le niveau lagunaire **FL2** et ses laisses malacofaunistiques annoncent **une nouvelle incursion marine** dans l'enclave littorale et **l'installation d'un nouveau stade lagunaire**. Les sédiments et leurs modalités de répartition rappellent ceux de la phase lagunaire

précédente SH_{VIII}. **Dans l'ombilic** (C3, T40, T43, T44, T46), des **limons**, des **argiles limono-sableux** et des **limons argilo-sableux**, **épais de 5 à 43 cm**, sont déposés dans un milieu anoxique, peu à relativement agité.

Sur les bordures de la lagune (C1, T17, T18, T22, T27, T28 et T41), les remplissages sont plus hétérogènes. **Les épaisseurs varient de 30 à 48 cm**. Des **limons sableux**, des **limons argileux**, des **sables limoneux** et des **argiles limoneuses** colmatent la zone intertidale. L'hydrodynamisme est plus fort. Les apports latéraux et le remaniement hydrique sur les formations pléistocènes des bordures orientales de la lagune sont importants (nodules et concrétions calcaires).

III-1-3- Calage et essai de corrélation chronologiques

Sur la rive est de Halq al Minjil et en arrière du cordon littoral, les remplissages lagunaires FL1 et FL2 s'emboîtent dans les dépôts littoraux eutyrrhéniens et dans les formations continentales à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur (T12, T13, T15, T16, T17, T18). **La datation ^{14}C AMS**, effectuée sur des *Cerastoderma glaucum* du milieu de la séquence S16-C3, a donné un âge de **4965±35 BP** (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC). Elle permet de **placer le premier stade lagunaire dans le Flandrien moyen**. On ne sait pas encore la durée du stationnement des eaux marines dans l'enclave littorale. Mais la fin de ce premier stade est marquée par le dysfonctionnement de la production biocénotique et l'installation d'un système de lagune-sebkha de moins en moins sous l'influence directe de la mer.

La deuxième datation ^{14}C AMS, effectuée sur les débris et les valves de *Cerastoderma glaucum* du sommet de la séquence S18-C3, place la fin du fonctionnement lagunaire de Halq el Minjil vers **4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3105-2889 cal BC). Elle permet d'**attribuer le deuxième stade lagunaire à la limite supérieure du Flandrien moyen** documenté par Perthuisot (1976) et Paskoff et Sanlaville (1983). Ce stade lagunaire se rapporte également à **une seconde pulsation flandrienne** que Ben Ouezdou (1987) a daté de 4210±250 BP (2931-1564 cal BC), dans le golfe de Gabès.

Les premiers constats géomorphologiques et géoarchéologiques faits dans le cadre du projet sur le Capsien de Hirgla (Mulazzani *et al.*, 2007 ; Boujelben *et al.*, 2008), ont permis de corréler l'occupation épipaléolithique du site SMH-1 du centre-ouest de Halq al Minjil avec les niveaux lagunaires FL1 et FL2. Néanmoins, les datations ^{14}C AMS nouvellement obtenues et confrontées aux données morphosédimentaires et paléoanthropologiques ont remis en cause les corrélations établies.

III-2- Les stades lagunes-sebkhas SH_{VI} et SH_{IV}

Deux niveaux fluvio-marins aux influences marines notables (FMM1 et FMM2) ont enseveli les dépôts lagunaires. Ils sont marqués par l'absence d'une malacofaune marine et lagunaire, la présence de l'aragonite et le développement du gypse et de l'halite. Ils indiquent l'arrêt du fonctionnement lagunaire et l'installation de deux stades de lagune-sebkha SH_{VI} et SH_{IV}.

III-2-1- Le premier stade lagune-sebkha SH_{VI}

Le premier niveau **FMM1** aux influences marines notables s'interpose entre les deux niveaux lagunaires FL1 et FL2. Il annonce **l'évolution de Halq al Minjil en système de lagune-sebkha** peu protégée des dynamiques marines. **Dans l'ombilic** (C3, T35, T40, T43, T44, T46), Halq al Minjil s'apparente à un milieu euxinique, anoxique, généralement calme et peu battu. Elle est le siège d'une **sédimentation fine de limons argilo-silteux, épaise de 25 à 35 cm**. Les sédiments sont transportés par la suspension uniforme et sont déposés en vrac par excès de charge par des flux d'eau à plus ou moins faible capacité de transport. La

lagune-sebkha est soumise à des turbulences épisodiques et reçoit des apports terrigènes irréguliers et réduits des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin.

Sur les bordures, le remplissage est plus hétérogène, composé de **séquences limono-argilo-sableuses, argilo-limono-sableuses et limono-sableuses**. Les sédiments, **épais de 45 cm**, sont issus de la suspension graduée avec un peu de roulement. Ils sont déposés en vrac dans un milieu plus agité, par des courants de seiches et/ou des ruissellements à plus ou moins forte capacité de transport. Les traces d'émersion et de variation du niveau d'eau sont plus marquées (gypse et halite). Les apports latéraux sont notables sur les versants orientaux dont la charge est à l'origine de la progradation des rivages de la lagune-sebkha. La fin du fonctionnement de la lagune-sebkha est signalée par une nouvelle incursion marine dans l'enclave de Halq al Minjil et par la reprise progressive des environnements et des processus de la production biocénotique du stade lagunaire SH_{VII}.

III-2-2- Le second stade lagune-sebkha SH_{IV}

Le deuxième niveau fluvio-marin aux influences marines notables **FMM2** recouvre le remplissage lagunaire FL2. Il annonce la fermeture progressive de la paléolagune SH_V et **la réinstallation d'un nouveau stade de lagune-sebkha** défavorable à la prolifération des *Cerastoderma glaucum* et des *Cerithium vulgatum*.

Un remplissage fin et plus ou moins dilaté (**78-95 cm**), d'**argiles silteuses** et de **limons argilo-silteux**, **comble le fond**. Les matériaux sont transportés par la suspension uniforme et sont déposés en vrac et en mode libre proche de la décantation dans un milieu relativement calme. **Les dynamiques sont généralement lentes**. Les conditions de confinement, d'anoxie et d'évolution post-dépôt des sédiments sont parfois interrompues par **des dynamiques d'épandage fluviatile** brusque et avancé vers le centre de la lagune temporaire.

En milieu intertidal, la sédimentation est caractérisée par un mélange de sédiments fluvio-marins et d'apports latéraux. Il s'agit de **limons argilo-sableux** et de **limons silteux et argileux**, **épais de 55 cm**, renfermant des nodules et des concrétions calcaires. Le matériel est issu de la suspension uniforme et graduée avec un peu de roulement. Il est mis en place en vrac, par excès de charge. L'exondation et l'assèchement progressifs de la lagune laissent s'installer une sebkha et déclencher les processus de précipitation du gypse sur les bordures et de l'halite dans le centre de la sebkha temporaire. La présence de boules sableuses millimétriques en surface n'exclue pas des faits de transport et de remaniement éoliens.

III-2-3- Essai de calage chronologique

Le niveau FMM1 sépare les deux niveaux lagunaires FL1 et FL2. **Le stade lagune-sebkha SH_{VI} est d'âge flandrien moyen**. Il est installé entre **4965±35 BP** et **4365±50 BP**.

Une formation de sables bruns détritiques comble les bordures de Halq al Minjil. Elle ensevelit le niveau FMM2. Elle est à l'origine de la progradation des rivages de la lagune-sebkha. **Une datation radiocarbone ^{14}C** a été effectuée sur les *Helix* de cette formation dans le cours aval de l'oued Lahmar-al Ghuirga. Elle a donné un âge de **3874±201 BP** (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC). **Le deuxième stade lagune-sebkha SH_{IV} est alors postérieur à 4365±50 BP et antérieur à 3874±201 BP**. Il est installé à **la transition Flandrien moyen-Flandrien supérieur**. Il est relativement court et correspond à une sédimentation rapide dans le bassin. Il est vraisemblablement contemporain de la régression marine du Flandrien supérieur signalée ailleurs en Tunisie

(Paskoff et Oueslati, 1988, Bhiret el biban, 4000-2400 BP ; Abichou, 2002, sebkha-lagune d'el Melah, 4000-3500 BP).

III-3- Le stade sebkha-lagune SH_{III}

Le niveau fluviomarin aux apports fluviatiles notables **FMF3** affirme la poursuite de la fermeture de la lagune-sebkha SH_{IV} et l'accroissement des apports terrigènes dans l'enclave littorale. Il témoigne de **la réinstallation d'un nouveau stade de sebkha-lagune (SH_{III})** de plus en plus sous les influences continentales.

III-3-1- Remplissages et dynamiques sédimentaires

Halq al Minjil est le siège de dépôts fins principalement des crues allogènes et des grandes marées de vive-eau. Des **argiles,** des **argiles silteuses** et des **limons sableux lités colmatent l'ombilic sur 22 à 120 cm d'épaisseur** (C3, T40, T43). Ils sont issus de la suspension uniforme par des flux d'eau à faible capacité de transport. L'accumulation est libre proche de la décantation. **Les dynamiques sont généralement lentes**. **Sur les bordures**, le remplissage est également fin et marque un changement de la morphodynamique. **Des argiles et des limons**, **épais de 83 cm**, renferment des graviers et des cailloux calcaires et des sables grossiers (C1, T29, T41). Ils correspondent à un mélange de sédiments fluvio-marins et d'apports latéraux. Ils indiquent **la domination des dynamiques relativement actives** dans les zones intertidales et supratidales. Les argiles et les limons sont transportés par la suspension uniforme et graduée sans roulement. Ils sont déposés par accès de charge dans un milieu relativement à peu agité.

Sur les bordures orientales et occidentales (T12, T13, T15, T16, T17), **la formation terrigène de sables bruns fossilise le niveau FMM2**. Elle comble environ le tiers de la précédente lagune-sebkha SH_{IV} et **colmate les graus septentrionaux** qui, jadis, assuraient la communication lagunes flandriennes/mer. Elle a ensuite subi une pédogenèse active de type brun-isohumique (voir chapitre VIII). Au moins saisonnièrement, Halq al Minjil passe d'un milieu confiné, anoxique et hydromorphique, à un milieu non saturé en eau et à forte battance de la nappe, à un milieu exondé et asséché.

III-3-2- Chronologie

La chronologie du stade sebkha-lagune SH_{XII} est encore imprécise. Ce stade date la limite inférieure du Flandrien supérieur. Il est vraisemblablement contemporain de la formation des « *sables bruns* » (3874±201 BP) et antérieur au dépôt évaporatique FE4 sus-jacent (3410±40 BP).

IV- FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DE HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE SUPERIEUR

Seul le niveau « évaporatique » FE4, issu de la partie supérieure de la carotte C3, permet de reconstituer le fonctionnement de Halq al Minjil durant la Protohistoire. Il faut signaler que **les remplissages historiques n'ont été reconnus que sur la partie supérieure de la même carotte** et n'en présentent que 6,2% de la matière sondée (64 cm). Sa faible représentation est en relation avec les phénomènes de remaniement ou d'érosion de sédiments ou encore avec une lacune sédimentaire. Celle-ci est liée à la position du sondage carotté à l'aval du front du cône protohistorique de l'oued al Manfas as-Sod, soit dans une zone à l'abri des dynamiques d'épandage. Cependant, sept sondages à la tarière à main (T31, T35, T40, T41, T43, T44, T46) ont montré, dans leurs parties supérieures, la succession des séquences lithostratigraphiques fluviatiles et fluvio-marines aux apports fluviatiles notables. Elles sont épaisses de 85 à 180 cm et attribuées à la période historique.

Dans le détail, plusieurs événements sont archivés dans les sédiments et doivent être soulignés. Mais et en absence de datations absolues, toute attribution chronologique précise reste floue et délicate. **Deux phases d'évolution hydro-morphosédimentaire** se distinguent : l'Holocène supérieur antéhistorique et l'Holocène supérieur historique.

IV-1- Halq al Minjil à l'Holocène supérieur antéhistorique : la réinstallation d'un stade de sebkha littorale (SH_{II})

Le niveau « évaporatique » **FE4** indique une interruption assez nette des dynamiques et des contextes environnementaux précédents. Il atteste **le rétablissement d'un système de sebkha côtière au début de l'Holocène supérieur**.

IV-1-1- Dynamique hydrosédimentaire

Halq al Minjil est temporairement inondée et connait des cycles submersion/exondation. Un remplissage fin d'**argiles** et d'**argiles silteuses**, litées et riches en sels, **comble l'enclave littorale sur environ 20 cm d'épaisseur**. Les matériaux sont issus de la suspension uniforme pendant les inondations fluviales et/ou les submersions marines, à l'occasion des houles, des tempêtes ou des marées d'ampleur inhabituelle. Ils sont déposés en mode libre proche d'une décantation dans un milieu relativement calme par des flux à plus ou moins faible capacité de transport. **Les dynamiques sont généralement lentes**. Les apports latéraux sont non négligeables.

En périodes d'émersion et de sécheresses, la forte saturation des sédiments en gypse et leur caractère halithique, confie à Halq al Minjil le cachet d'une sebkha supratidale, marquée par l'activation des processus de précipitation des sels. Un tel contexte favorise la floculation des argiles et le prélèvement éolien sur un fond desquamé et asséché.

IV-1-2- Essai de calage et de corrélation chronologiques

La datation ^{14}C AMS, effectuée sur la matière organique totale du sommet du remplissage évaporatique FE4, a donné un âge de **3410±40 BP** (Beta 290411 ; 3731-3562 cal BP/1782-1613 cal BC). **Le stade sebkha littorale SH_{II} remonte au début de l'Holocène supérieur**. Il est tentant de le corréler à la régression marine du Flandrien supérieur, accompagné d'un **abaissement du niveau marin relatif à quelques dizaines de centimètre** au-dessous de sa position actuelle (Paskoff et Oueslati, 1988 ; Abichou, 2002).

IV-2- Halq al Minjil à l'Holocène supérieur historique-l'Actuel : l'installation du système sebkha-lagune SH_I

Durant les temps historiques et jusqu'à l'Actuel, Halq al Minjil fonctionne en système de sebkha-lagune. Son évolution est complexe. Elle témoigne du développement de l'érosion des sols sur les terrains qui l'entourent et pose le problème de l'origine de la matière *in situ*. **Une intervention anthropique déterminante dans le système morphogénique** du bassin versant est de plus en plus pesante par apport aux périodes précédentes de l'Holocène.

IV-2-1- Dynamique hydrosédimentaire

Les parties supérieures de la carotte C3 et des tarières T31, T35, T40, T41, T43, T44 et T46 sont caractérisées par une sédimentation hétérogène et des apports terrigènes et allogènes prépondérants. L'intrusion des eaux marines se limite à la partie méridionale de la sebkha-lagune. **Dans l'ombilic**, le remplissage montre la succession rapide des séquences fluvio-marines d'**argiles,** d'**argiles limoneuses** et de **limons, parfois organiques** (sapropèle) Elles sont entrecoupées par des niveaux fluviatiles argileux à sableux. **L'épaisseur atteint 180 cm**. Des flux d'eau marins et/ou continentaux, à plus ou moins

faible capacité de transport, sont parfois dotés de débits capricieux. Ils sont responsables du transport des sédiments par la suspension graduée et uniforme dans un milieu peu à relativement agité. L'accumulation est en vrac par excès de charge et en mode libre proche de la décantation.

A l'exutoire des oueds al Mjinin et al Manfas as-Sod, l'exhaussement du fond est commandé par un colmatage fluviatile notable. Les **sables limoneux** et les **argiles silteuses** sont les dépôts de grandes ou brèves et violentes crues. Ils sont issus de la suspension uniforme et graduée avec un peu de roulement. Ils sont déposés en vrac et en mode libre après la réduction de la vitesse et de la compétence des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport.

IV-2-2- Dynamique éolienne

L'exondation puis l'assèchement de la sebkha-lagune par une évaporation intense et/ou prolongée favorise l'action du vent. Aujourd'hui, **la déflation éolienne est périodiquement efficace**. Sur le fond desséché et desquamé de la sebkha temporaire, surtout de la partie septentrionale de la dépression littorale, les éléments fins à moyens sont repris sur de courtes distances par des vents relativement actifs. Des nebkas occupent aujourd'hui les bordures de Halq al Minjil.

CONCLUSION DU CHAPITRE

La complexité des remplissages et des dynamiques ne présente que des réponses hydro-morphosédimentaires aux changements des environnements, des agents et des processus morphogéniques. Halq el Minjil a connu **la succession d'au moins quatorze phases majeures de sédimentation et stades de fonctionnement hydromorphologique** en relation avec la variation des événements hydro-climatiques, eustatiques et des activités humaines qui se sont combinés à des degrés d'importance variable. D'autres facteurs sont certainement intervenus. Le schéma du fonctionnement holocène de Halq al Minjil **reconstitue** cinq types de milieux paraliques qui se sont succédés dans l'enclave littorale. On a distingué **les systèmes lac temporaire, lagune, sebkha littorale, lagune-sebkha et sebkha-lagune**. **Ce dernier système a fonctionné sur une longue durée de l'histoire holocène de Halq al Minjil**. Les différents stades de fonctionnement hydrosédimentaire ont trouvé des corrélations avec la stratigraphie régionale.

CHAPITRE VI :
MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS DE LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL

Sur les bordures de Halq al Minjil, des modelés hydroéoliens de natures et d'âges différents (dunes, bourrelet, guataya, nebkhas,) viennent étendre les archives et les héritages morphosédimentaires. Au centre-ouest de l'enclave littorale et à l'aval du pont construit sur la route RVE 812, une petite éminence se présente comme un îlot de dune hydroéolienne (Fig. 51). Elle porte le site épipaléolithique SHM-1 (Mulazzani *et al*., 2007 ; Mulazzani, 2010). Elle précède également un cordon formé d'un bourrelet et de trois alignements de dunes isolées et séparées par des bas fonds temporairement envahis par les eaux marines et continentales. L'étude multiscalaire de la nature, du contenu et de l'organisation microséquentielle des dépôts permet d'apprécier les conditions et les mécanismes d'édification et d'évolution du modelé. En fonction de l'intérêt géomorphologique et paléoenvironnemental de l'édifice mais également en raison de considérations géoarchéologiques (reconstitution des paysages vécus par les peuplements épipaléolithiques), **un sondage carotté C2,** situé à la cote 3,77 m au-dessus du niveau marin **et profond de 6,01 m**, a été réalisé sur la dune.

Le chapitre proposera d'abord une étude multiscalaire d'une forme typique de bordures de sebkha et précisera les conditions et les mécanismes de mise en place et d'évolution des édifices hydroéoliens. Puis, il étudiera les héritages hydroéoliens de Halq al Minjil : localisation, caractéristiques morphosédimentaires, contexte de mise en place et essai d'attribution chronologique.

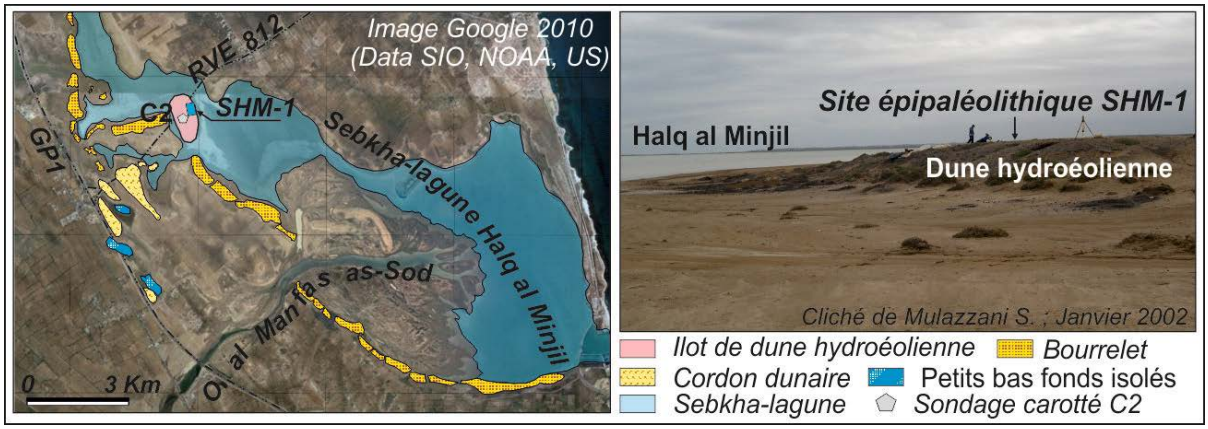


Fig. 51 : Croquis de localisation de la dune hydroéolienne de la rive centre-ouest de Halq al Minjil

I- CONSTRUCTION HYDROEOLIENNE DE LA RIVE CENTRE-OUEST DE HALQ AL MINJIL : ETUDE MULTISCALAIRE D'UN MODELE TYPIQUE DE BORDURES DE SEBKHA

Le log de la carotte C2 a montré une intéressante stratigraphie faisant intervenir déflation éolienne, colluvionnement, épandage, pédogenèse et forçages anthropiques. Le décryptage de l'enregistrement sédimentaire des dynamiques hydromorphologiques et environnementales est rendu possible par des analyses sédimentologiques (granulométrie laser, teneurs en $CaCO_3$ et en gypse, calcimétrie, géochimie, minéralogie,) et micromorphologiques. A la différence des carottes C1 et C3, la carotte C2 présente **une**

faible variation des provenances des sédiments (Fig. 52) et montre **la superposition de dix-sept séquences lithostratigraphiques** très distinctes. Les séquences génétiquement liées sont regroupées en **trois grandes catégories de faciès**. Il s'agit des faciès éolien, archéologique et d'épandage fluviatile. Le calage chronologique des dépôts est obtenu par des datations radiocarbone et archéologique disposées sur les niveaux d'occupation épipaléolithique du site SHM-1 (*cf.*, Tab. 16 ; Mulazzani *et al.*, 2007, Saliège *et al.*, 2013).

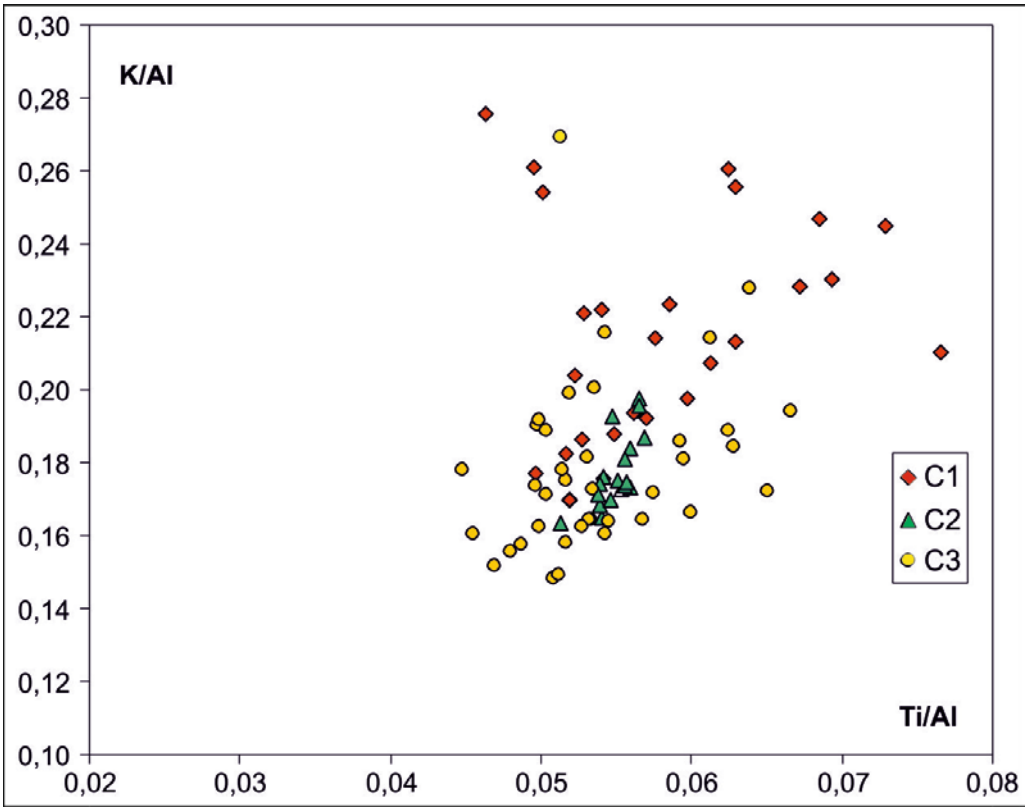


Fig. 52 : En fonction des rapports molaires K/Al et Ti/Al, les provenances des sédiments dans la carotte C2 sont beaucoup moins variées que dans les carottes C1 et C3
Analyses de laboratoire : E. Dinelli

I-1- Le faciès éolien (FEO) : nature, processus et dynamiques de formation des dunes de bordures de sebkha

L'édifice éolien occupe des positions privilégiées dans le paysage, dans le sens opposé des directions des vents dominants. Le dépôt se distingue par des nuances ténues de couleurs et par la dominance d'une seule provenance de sédiments avec des quartz émoussés mats et ronds mats prépondérants. Le faciès éolien rassemble sept séquences lithostratigraphiques, épaisses de 137 cm et issues de la partie supérieure de la carotte C2. Les caractères morphosédimentaires des dépôts et la répartition des éléments géochimiques et des minéraux montrent **des différences de détail entre deux ensembles éoliens superposés** (Tab. 17). Entre +2,82 et +2,77 m d'altitude, ces ensembles sont séparés par un niveau d'occupation épipaléolithique.

I-1-1- Le premier ensemble éolien

Le premier ensemble de base groupe deux séquences S10 et S11-C2 entre +2,77 et +2,35 m d'altitude. Il représente environ 31% de l'accumulation éolienne.

I-1-1-1- Caractéristiques sédimentologiques peu différenciées du dépôt

Le dépôt est composé de **limons argilo-sableux** et de **limons sableux**, fortement à modérément calcaires et non gypseux. Le grain moyen est dans les silts grossiers. La médiane est forte. Les sédiments de la séquence S10-C2 sont mal triés et montrent une distribution granulométrique sublogarithmique (Fig. 53). Les matériaux de la séquence S11-C2 sont assez bien classés et présentent une courbe granulométrique subparabolique à parabolique. Sur la fraction sableuse des échantillons, les courbes granulométriques sont redressées. La couleur est brun jaunâtre claire (2.5Y 6/4) et brun jaunâtre (10YR 5/4). Du sel blanchâtre, diffus et en filaments, des cristaux et des amas gypseux de taille millimétrique, friables et vermiformes se dispersent dans la masse. La séquence S10-C2 renferme des amas calcaires millimétriques et des débris de coquilles d'*Helix*. L'analyse morphoscopique montre quelques quartz ferrugineux et une nette dominance des grains émoussés mats (52-56%).

Séquence lithostartig.	Teneur en CaCO3 (%)	Couleur Munsell	Teneur en gypse (%)	Morphoscopie					Granulométrie			Indice de classement (So)	Moyenne (Mz)	Médiane (µm)
				NE	SE	EL	EM	RM	< 2µm	2 à 50 µm	50 à 2000 µm			
Deuxième ensemble éolien														
17-C2	7,14	2.5 Y 6/3	**6,67**	0	16	40	**44**	0	45	**55**	0	3.523	8,959	2,26
16-C2	7,14	2.5 Y 6/4	**6**	4	12	36	**48**	0	36,2	**56,7**	7,1	3.691	8,016	3,21
15-C2	5,67	2.5 Y 6/4	1,34	0	8	40	**52**	4	**49,9**	**49,9**	0,7	3.523	9,137	1,84
14-C2	4,62	2.5 Y 6/4	**5,31**	0	16	40	**44**	0	30,8	30,8	**38,4**	10.787	6,67	10,26
13-C2	5,88	2.5 Y 6/4	2,62	0	24	28	**44**	4	15,5	16,2	**68,3**	4.883	4,517	**147,40**
Premier ensemble éolien														
11-C2	**19,32**	10 YR 5/4	0,64	0	12	28	**56**	4	15,3	13,2	**71,5**	3.692	4,383	**163,00**
10-C2	**26,46**	2.5 Y 6/4	0	0	12	32	**52**	4	20	27,5	**52,5**	6.767	5,504	56,88

Tab. 17 : Deux ensembles éoliens superposés présentent des caractéristiques sédimentologiques différentes (carotte C2, rive centre-ouest de Halq al Minjil)
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

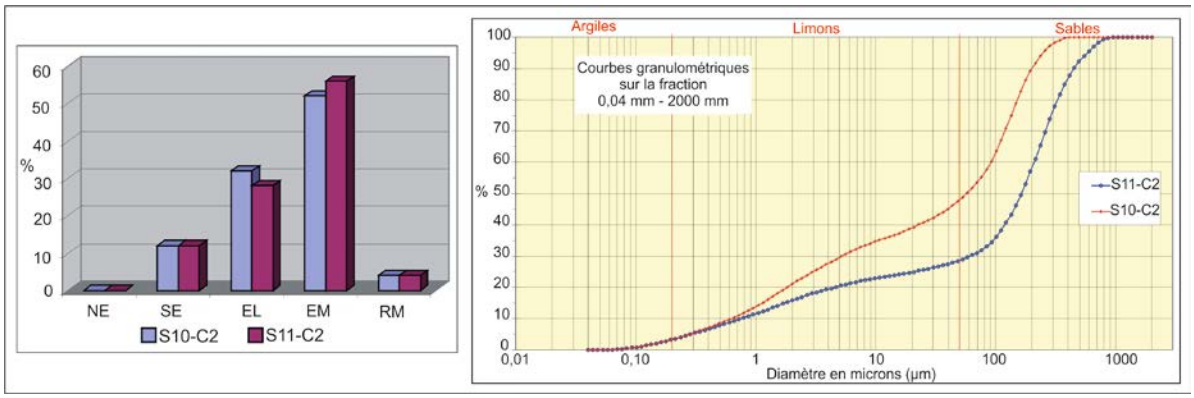


Fig. 53 : Morphoscopie et distribution granulométrique des sédiments du premier ensemble éolien de la carotte C2 (rive centre-ouest de Halq al Minjil)

I-1-1-2- Association minéralogique et composition géochimique

Le quartz et la calcite sont les minéraux les plus abondants de la séquence S10-C2. Le microcline, l'halite, le gypse et les argiles sont peu représentés. La phase argileuse est formée d'une association de kaolinite, d'illite, de smectite, de kaolinite et des interstratifiées illite-smectite et kaolinite-smectite. La séquence S11-C2 n'a fait que l'objet de l'analyse

minéralogique des argiles. Elle contient les mêmes minéraux argileux avec probablement les feldspaths Na (albite) et K (orthose).

Seuls les éléments géochimiques de la séquence S10-C2 ont été dosés. Ils montrent des moyennes concentrations en TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O et LOI. Les teneurs en SiO_2, MnO, CaO et P_2O_5 sont importantes. Le magnésium est faiblement présenté (2,42%). Exceptés les faibles teneurs en Rb et en Sr (31 et 252 ppm) et le fort dosage en Cu (25 ppm), les éléments mineurs sont moyennement concentrés. Les rapports molaires Ti/Al, K/Al et Ca/Al, sont les plus forts de la carotte.

I-1-1-3- Signification morphodynamique et environnement sédimentaire

Les limons argilo-sableux et les limons sableux, riches en quartz émoussés mats et relativement en ronds mats, sont le produit d'une activité éolienne. Le modeste tri et la texture grossière des sédiments, renseignent sur **l'efficacité morphologique** d'arrachement et du transport **des vents des secteurs est et nord-est**. L'importance des limons et des sables ne permet pas d'établir un rapport direct entre le niveau d'énergie des vents et les sédiments fins du fond de la sebkha-lagune, dominé d'argiles et de silts. La forte cohésion physico-chimique des argiles de Halq al Minjil rend parfois ardue leur mobilisation éolienne. Dans ce cas, seuls les sables, souvent dégagés en dessous des toits des lamines d'argiles craquelées, seront plus facilement entraînés par le vent. En effet**, la provenance de la matière grossière est variée et suggère la contribution des environs immédiats de Halq al Minjil**.

La minéralogie et la géochimie du dépôt sont dans une certaine mesure liées au milieu sédimentaire de l'accumulation éolienne. Néanmoins, l'abondance des minéraux interstratifiés et la présence des minéraux ferromagnésiens (feldspaths, smectite, et illite) semblent dépendre des apports éoliens plutôt que de l'évolution pédologique et physico-chimique des sédiments en place. L'importance relative des rapports molaires Ti/Al et V/Al par apport à ceux des séquences sous-jacentes, indique probablement un changement dans la provenance du sédiment.

Le sel et les cristaux gypseux contenus dans l'accumulation peuvent avoir une origine éolienne. Mais également, la forme vermiculaire du gypse et la répartition diffuse et en filaments des sels témoignent d'une origine pédologique post-sédimentaire. Elles traduisent la mise en œuvre des processus diagénétiques de concentration des saumures interstitielles et/ou celles d'une frange capillaire exploitée par les racines d'une végétation halophile. Il en résulte des formes variées d'accumulation gypseuses et salines (Perthuisot, 1971 ; Gaucher et Burdin, 1974). Les amas calcaires friables de la séquence S10-C2 indiquent des remaniements de surface ou/et le transfert et la précipitation des calcaires dans une séquence riche en carbonates (26,4% de $CaCO_3$). La séquence est probablement soumise à une certaine battance d'une nappe proche dans un contexte d'alternance des périodes chaudes et humides (Regaya, 1992, 2000).

I-1-2- Le deuxième ensemble éolien

Cinq séquences lithostratigraphiques (S13-17-C2) décrivent **le deuxième ensemble éolien**. Par leurs caractéristiques, chaque séquence, de 5 à 38 cm d'épaisseur, montre des dynamiques particulières de mécanismes de mise en place et d'évolution post-dépôt.

I-1-2-1- Des séquences lithostratigraphiques aux caractéristiques sédimentologiques différentes

L'accumulation, généralement plus fine que celle du premier ensemble éolien, montre une forte variation lithoséquentielle. Du bas en haut se superposent des **limons**

sableux, des **limons argileux**, des **argiles silteuses compactes**, des **limons argilo-silteux** et des **argiles limoneuses**. Ils sont peu à modérément gypseux. Ils renferment inégalement des filaments de sels et des amas friables et des cristaux millimétriques, lenticulaires et vermiformes de gypse. La couleur est brun jaunâtre claire (2.5Y 6/4) et jaune terne (2.5Y 6/3). Exceptée la forte médiane de la séquence S13-C2 (147,4 µm), celle des autres séquences est très faible, ne dépassant pas 10,2 µm. Le tri est mauvais dans les séquences S13 et S14-C2 mais assez bien dans les trois séquences sommitales. Le grain moyen est dans les silts fins. La distribution granulométrique des échantillons des séquences S13 et S14-C2 est subparabolique. Les courbes granulométriques du reste des échantillons sont logarithmique et hyperbolique. A la binoculaire, des fibres gypseuses et des quartz ferrugineux ou teintés d'oxyde de fer ont été observés. Les grains émoussés mats (44-52%) prédominent (Fig. 54). Les quartz ronds mats ne sont présents que dans les séquences S13 et S15-C2 (4%). La séquence S13-C2 renferme un lit fin de sables grossiers jaune brunâtre. Des débris de coquilles d'*Helix* apparaissent dans la séquence S14-C2.

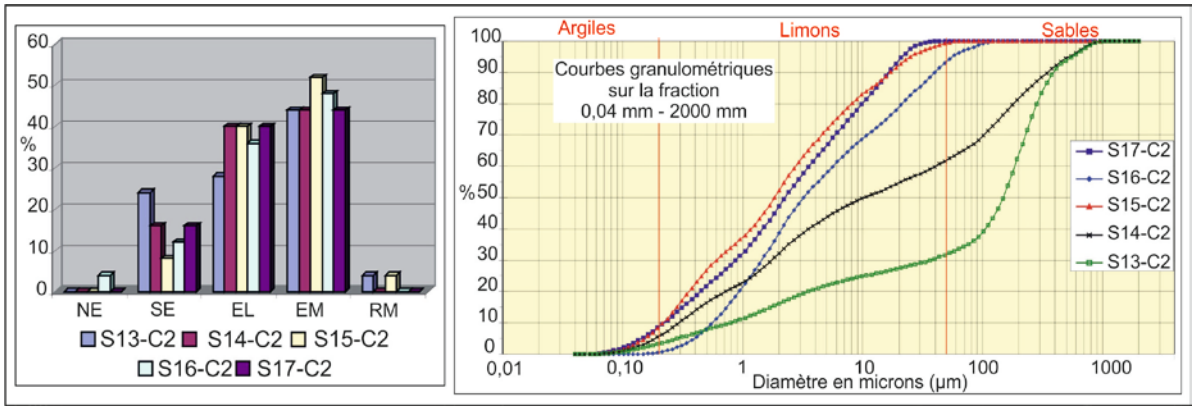


Fig. 54: Morphoscopie des sables et distribution granulométrique des sédiments du deuxième ensemble éolien du sommet de la carotte C2 (rive centre-ouest de Halq al Minjil)

I-1-2-2- Un cortège minéralogique et une composition géochimique homogènes

Les trois séquences S13, S15 et S17-C2 ont fait l'objet d'analyses minéralogique et géochimique. Excepté le gypse dans la séquence S17-C2, le quartz est la seule phase minérale majeure des dépôts. La calcite, le gypse, l'halite et les argiles sont peu représentés.

Les éléments géochimiques dosés se répartissent uniformément dans l'ensemble éolien. La séquence S15-C2 présente des variations minimes. La série présente des fortes proportions en alumino-silicatés et en alcalino-terreux. Exceptées pour le CaO (4,34-5,72%), les teneurs en TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO et K_2O sont les plus fortes de la carotte. Elles s'associent à des fortes concentrations en V, Cr, Ni, Zn, Zr, Rb et Pb. Ces éléments sont peu abondants dans la séquence S13-C2. Les rapports molaires V/AL, Ti/Al, K/Al, Fe/Al sont importants. Par contre les rapports Si/Al et de Ca/Al sont les plus faibles de la carotte.

I-1-2-3- Des propriétés micromorphologiques très hétérogènes

Trois lames minces L10, L11 et L12 ont été fabriquées sur les niveaux limono-sableux, limono-argileux et limono-argilo-silteux des séquences lithostratigraphiques **S16, S14 et S13-C2**. Elles montrent une grande diversité des microfaciès.

I-1-2-3-1- La lame mince L12 (S13-C2)

Entre +2,90 et +2,83 m de profondeur, il est possible de distinguer du bas en haut la superposition de trois « microséquences » :

- la première microséquence L12-a, **d'une épaisseur de 2,4 à 3 cm**, montre un litage subhorizontal à entrecroisé de limons sableux contenant des quartz émoussés et arrondis et des cristaux de gypse (Fig. 55.1). Les grains de quartz sont entourés ou partiellement liés par des ponts de liaison argileux. Le plasma est peu abondant. Des lamines fines (1 à 2 mm) et des micro-poches d'argiles micritiques, brun jaunâtres s'intercalent dans les limons sableux. Elles présentent un squelette fin de quartz inégalement répartis, quelques vides et chenaux souvent discontinus et des amas et des ponctuations (20 à 600 µm) marrons foncés, noirs et rouilles. Un débris végétal a servi de support à des précipitations micritiques. Une paillette millimétrique (3 mm) de matière organique et des excrétas de terriers ont été observés dans la partie médiane et sommitale de la séquence. Les phénomènes de brassage des sédiments et les systèmes de dessiccation sont faibles.

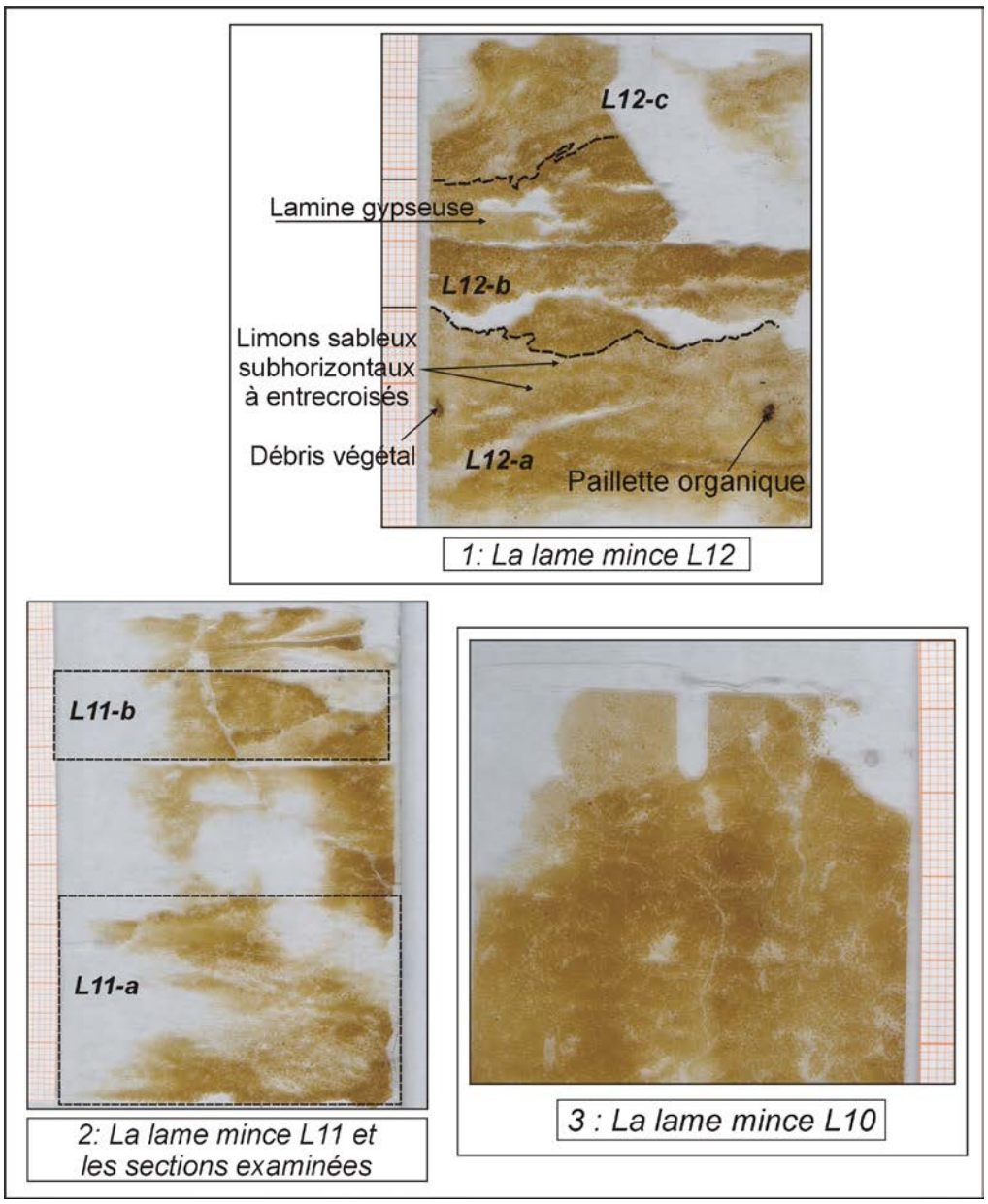


Fig. 55 : Lames minces confectionnées et données micromorphologiques préliminaires sur le deuxième ensemble éolien de la partie supérieure de la Carotte C2

- la deuxième microséquence L12-b, **épaisse de 1,8 à 3 cm**, est composée d'argiles limoneuses micritiques brun jaunâtre. La masse est jalonnée de pores et de chenaux dont

certains d'origine biologique (terriers et traces de tissus végétaux), mais sans donner d'agrégats complètement séparés. Elle montre des cristaux lenticulaires, de taille variable jusqu'à environ 644 µm et des horizons finement lités de gypse et des amas organiques noirs et rouillés. La microstructure est craquelée. Des lits fins (2 à 3 mm) horizontaux et sinueux de quartz sub-émoussés à arrondis, parfois denses, s'intercalent dans les argiles. Les grains de limons et de sables y sont liés par un plasma micritique peu abondant. Des excrétas de terriers occupent les discontinuités.

- **la troisième microséquence L12-c** est **épaisse de 1,7 à 2,2 cm**. Elle présente des lamines détritiques (3 à 5 mm) de sables et de limons, sub-obliques à entrecroisés. Les quartz mal triés sont entourés ou liés par des ponts d'argile. La distribution fins/grossiers est dite géfurique (les éléments grossiers sont liés par des amas de fraction fine ; Bullock *et al.*, 1985 ; Fedoroff et Courty, 1992). A chaque lamine succède un lit fin d'argiles brun jaunâtre à rares éléments clastiques et à fentes planaires, courbes, obliques et polygonales. Le fond matriciel est imprégné de micrite et teinté d'amas inframillimétriques noirs et rouille. Des microcristaux de gypse lenticulaire occupent surtout les vides et les fentes de dessiccation. A la fermeture des poches de gypse apparaît de l'anhydrite de lessivage (Discussion avec Olivier Dugué ; Géologue, Université de Caen).

I-1-2-3-2- Les lames minces L11 et L10 (S14, S16-C2)

Deux parties sont conservées de la lame mince L11, entre +3,078 à +3,113 m et +3,135 à +3,15 m de profondeur absolue. Elles révèlent **un fond matriciel d'argiles limoneuses** brunes, dominé par une micrite jaunâtre à rares éléments clastiques et quelques amas inframillimétriques rouille. Des grains de sables arrondis et sub-émoussés se dispersent dans la masse. La microstructure est feuilletée à craquelée (Fig. 55.2). A la base, la lame mince montre un dispositif d'amoncellements d'agrégats développés horizontalement et séparés par des fentes de dessiccation et des chenaux planaires. Au sommet, le dispositif passe à un matériel plus dense interrompu par des fentes et des chenaux discontinus, sans donner des agrégats entièrement séparés. La masse renferme d'abondants gros cristaux du gypse lenticulaire (1,5 mm). Ils sont parfois altérés. Ils se dispersent chaotiquement ou s'organisent en lits horizontaux et verticaux. Certains cristaux se développent le long des filaments et des traces de racines végétales et occupent les vides et les fissures.

La lame mince L10 présente sur 5,3 cm d'épaisseur (+3,65/+3,597 m) une matrice fine plus homogène. Celle-ci est composée d'argiles limoneuses, micritiques et teintées de taches et de filaments rouille, ferrugineux ou ferromagnésiens (Fig. 55.3). Le squelette fin inégalement réparti est composé de quelques quartz arrondis et sub-émoussés avec du gypse lenticulaire (55 à 1200 µm). La microstructure est prismatique. Des réseaux étroits, sinueux et dentelés de fissures séparent des prismes jalonnés de pores et de vides recouverts par des gypses de néoformation. Des fentes de dessiccation montrent la présence des poussières.

I-1-2-4- Significations morphodynamiques et environnement sédimentaire du dépôt éolien

L'hétérogénéité des caractéristiques sédimentologiques **des cinq séquences** lithostratigraphiques du deuxième ensemble éolien, indique **la superposition des dynamiques et des conditions différentes de la morphogenèse éolienne**. Elle témoigne également des modifications de la compétence morphologique du vent, conditionnées par la variation des circonstances propices à l'action éolienne. Elle peut provenir des changements de la nature sédimentologique des sédiments dans leurs sources de provenance.

Le fort pourcentage des grains émoussés luisants explique des remaniements sur des formations façonnées par l'eau. La faible présence et parfois l'absence des quartz ronds mats marquent une simple reprise des quartz, sans changement sensible d'aspect de grains éolisés (Cailleux et Tricart, 1959). L'usure par le vent est très lente à acquérir sur de petites distances à partir du fond de Halq al Minjil. L'intercalation d'un lit de sables grossiers dans la séquence S13-C2 explique des remaniements et des apports par ruissellement.

L'homogénéité des caractéristiques minéralogique et géochimique de l'ensemble éolien, traduit la persistance des mêmes provenances du matériel et des mêmes mécanismes et conditions de dépôt et d'évolution des sédiments. La forte teneur en sodium, magnésium et potassium indique un environnement sédimentaire très salin (Horchani, 1994). L'abondance de silicium correspond en grande partie aux quartz, fournis à l'érosion éolienne. Le phosphate, la matière et le carbone organiques sont des composantes organiquement produites dans le sédiment (Schütt et Thiemann, 2004). Mais leurs quantités relativement importantes semblent dépendre d'une augmentation des taux d'érosion et du transport éoliens plutôt que de différents processus de décomposition de la matière en place. A la différence du premier ensemble éolien, la diminution marquante du calcium est surtout liée à la précipitation des sulfates et des chlorures (Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). La baisse du ratio Ca/Mg et du rapport molaire Ca/Al explique la précipitation des sulfates de calcium (Communication orale d'Enrico Dinelli, géochimiste, CIRSA, Italie)

A l'échelle microscopique, le gypse altéré peut avoir une origine éolienne. Son existence dans les discontinuités physiques, revêtant les pores, les vacuoles, les chenaux et les craquelures confirme par contre sa néoformation par une diagenèse précoce (Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). Dans la frange capillaire, l'évaporation des eaux interstitielles sulfatées donne naissance à des cristaux lenticulaires de gypse (Gaucher et Burdin, 1974). L'augmentation de leur taille dans la séquence L12-c peut expliquer la formation des poches lenticulaires dans la masse basale argileuse (Bullock *et al.*, 1985). Les filaments et les taches rouille, imprégnant les fonds matriciels, correspondent à des fibres et des taches diffuses d'oxyde de fer et ferro-manganiques. Ils traduisent une précipitation par évaporation et par processus d'oxydo-réduction, avec vraisemblablement une activité biologique importante (Kaemmerer et Revel, 1989 ; Abichou, 2002).

Les amas noirs et diffus ressemblent à une matière organique déposée par le vent et/ou décomposée par oxydation ou par une activité bactérienne (Schütt, 2000). L'anhydrite (L12), peut être précipitée en saumures ou être le produit d'une diagenèse par déshydratation des gypses. Celle-ci est commandée, dans la frange capillaire, par des températures élevées et une forte évaporation (Schütt, 2000, 2004). Dans la microséquence L12-c, l'organisation du matériel en lamines de sables et de limons surmontant des argiles micritiques relativement denses, témoigne **des phénomènes de lessivage et de percolation des eaux** dans les séquences à texture aérée. Un tel phénomène entraîne les argiles vers la base, le tassement et la défloculation du matériel. La présence **des excrétas d'animal** et **des racines** explique **les actions de bioturbation** et traduit **le rôle des terriers et de la végétation dans la redistribution et la réorganisation structurale du matériel éolien**.

I-1-3- Interprétation morphosédimentaire d'ensemble et essai d'attribution chronologique des ensembles éoliens

Les deux ensembles éoliens superposés certifient **deux phases holocènes d'accumulation éolienne**. Ils correspondent à deux générations de dépôts d'un bourrelet hydroéolien longeant les bordures occidentale et méridionale de Halq al Minjil. Les différences sédimentaires constatées s'expliquent par le changement de la nature des sédiments dans leurs sources de provenance, des compétences éoliennes et des

environnements dépositionnels. Les niveaux « évaporatiques » identifiés sur les carottes C1 et C3, sont les plus convenables à la fourniture de la matière éolisée.

Le premier ensemble éolien paraît un indicateur du **renforcement de l'aridité** qui a marqué vraisemblablement le début de l'Holocène (Brun, 1991 ; Ballais, 1991, Karray, 1993 ; Abichou, 2002 ; Zerai, 2006…). Il présente le soubassement du site épipaléolithique SHM-1, daté entre la première moitié du **VIIe millénaire cal BC** et la deuxième moitié du **VIe millénaire cal BC** (Mullazzani *et al.*, 2007 ; Mullazzani, 2010 ; Saliège *et al.*, 2013).

Le deuxième ensemble éolien vient en dessus du précédent et fossilise les niveaux d'occupation épipaléolithique. Il marque **depuis l'Holocène moyen** et dans des conditions d'irrégularité des dynamiques, la **continuité du fonctionnement des processus éoliens de surélévation et d'évolution de l'édifice**. L'organisation stratigraphique en séquences différentes indique **des ensembles éoliens polyphasés**. Néanmoins, la granulométrie des sédiments explique que les vents actifs de l'Holocène moyen étaient moins puissants que ceux de l'Holocène inférieur, mettant en mouvement un mélange d'éléments plus grossiers. Aujourd'hui, la présence de **nebkas** sur l'édifice témoigne de la continuité de la mise en œuvre des processus éoliens responsables de la surélévation du bourrelet.

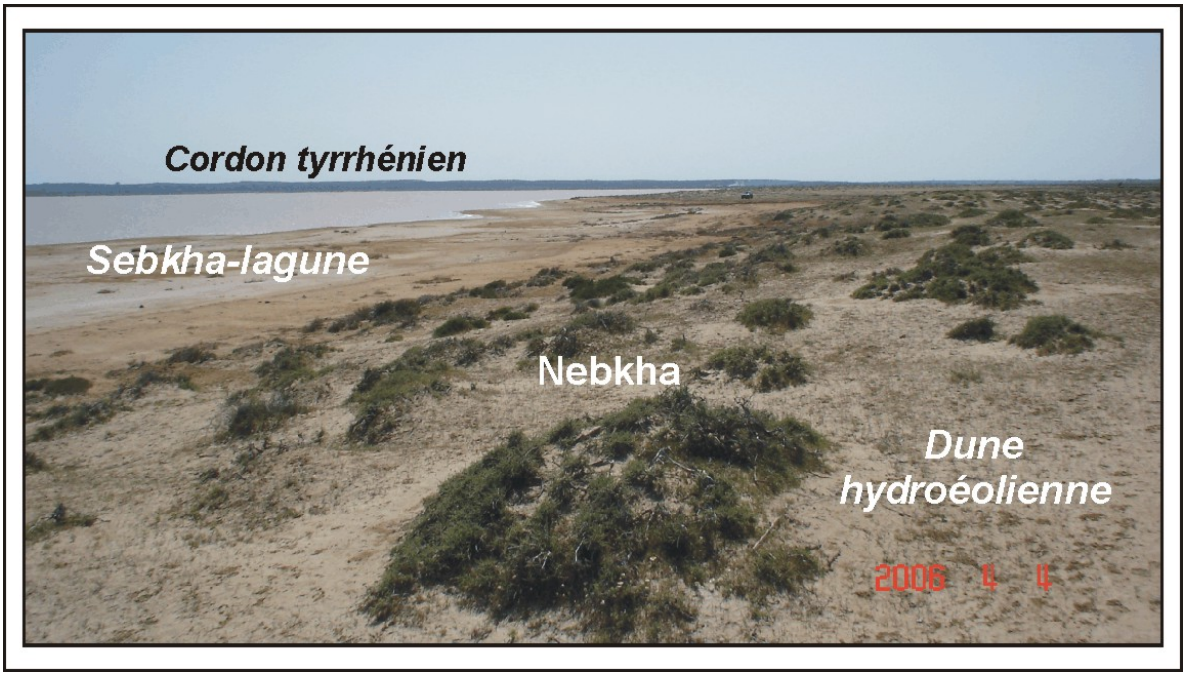
I-1-4- Genèse et évolution de la construction hydroéolienne : essai de synthèse

La dune hydroéolienne de la rive centre-ouest de Halq al Minjil est **l'aboutissement de l'interaction de la morphogenèse et de la pédogenèse**. Les traits micromorpho-stratigraphiques de l'accumulation traduisent des périodes d'apport éolien interrompues ou croisées par des périodes de stabilité et d'évolution pédologique. **Les microséquences, comme entité de base d'observation, ont permis de détailler les mécanismes, de reconstituer les dynamiques et d'en préciser l'évolution**.

En périodes d'assèchement de Halq al Minjil, des mécanismes physico-chimiques permettent aux sulfates et aux sodiums de floculer les colloïdes en leur faisant perdre toutes consistances. Les argiles et les limons se craquèlent en lamelles puis en micropolyèdres et s'agglomèrent en pseudo-sables (Belkhouja, 1972). Les petites mottes d'argiles se comportent comme des sables, très sensibles au vent. Parfois, la forte cohésion physico-chimique des argiles rend difficile leur mobilisation éolienne (S10 et S11-C2). Seuls les sables dégagés en dessous des toits de lamines argileuses craquelées, se prêtent à la déflation éolienne. Le transport des agrégats, des limons et des sables s'accomplit par saltation, reptation, ou par une véritable déflation éolienne et tourbillons (Khattali, 1996).

La position géomorphologique de l'accumulation sur les bordures immédiates de la sebkha-lagune s'explique par le double effet de la contre pente et de la végétation halophile (Jauzein, 1967 ; Coque, 1979 ; Karray, 1993 ; Bourgou et Oueslati, 1994). Les traces de tissus végétaux (la microséquence L12-b) permettent d'affirmer que l'édifice éolien dérive d'un cortège de formes élémentaires. Des nebkas derrière des touffes de chénopodiacées, abondantes et coalescentes (surtout des *Halocnemum strobilaceum)*, concourent à la genèse, l'étalement et la surélévation du modelé (Pl. 1).

La microstratification oblique et entrecroisée des dépôts (*cf.*, L12-c) indique des changements de directions et du régime des vents (Weisrock, 1982). Les vents soufflent surtout des secteurs nord-est et est. La lamination horizontale (L11) se développe sur la face au vent lorsque les particules ne sont pas éjectées (Cojan et Renard, 1999).



Pl. 1 : Des Halocnemum strobilaceum concourent à la genèse, l'étalement et la surélévation de la dune hydroéolienne devançant le bourrelet des bordures ouest de Halq al Minjil

Dès le dépôt, les sédiments sont soumis, selon des circonstances particulières, à l'action des processus pédologiques. Ces derniers se déclenchent en présence de l'eau agissant, comme agent principal des réactions physico-chimiques, et de l'influence directe de la température (Schütt, 2004). La percolation des eaux pluviales dans le dépôt meuble et aéré entraîne progressivement la dissolution des sels, la défloculation et le lessivage du matériel (Hachicha *et al.*, 1987 ; Hachicha, 1991) et un gradient granulométrique décroissant (*cf.*, L12-c). Des lamines de sables et de limons passent à des lits d'argiles micritiques, prismatiques à massives. L'évaporation laisse échapper l'eau de la porosité et le sédiment se tasse. Le dessèchement engendre les fentes de retrait, le craquelage et la compaction des limons (*cf.*, L11). Le plasma argilo-micritique est le siège primordial des processus pédo-diagénétiques. Ceux-ci sont affirmés par l'agrégation élémentaire du fond matriciel, l'apparition des chenaux, des vides et des vacuoles (*cf.*, L10) entraînant des microstructures prismatiques et craquelées. Ces processus sont parfois discontinus ou interrompus par l'atténuation ou l'arrêt de la pédogenèse. La microstructure massive et l'aspect secondaire et incomplet des microagrégats du sommet de lame L11, peuvent l'affirmer. Ces processus sont parfois rythmés par le développement de l'activité biologique des racines et des terriers. La bioturbation, figurée par des chenaux fins (*cf.*, L12-a), cause parfois la réorganisation ou l'homogénéisation de la partie superficielle du dépôt (Cojan et Renard, 1999).

Dans la frange capillaire, les variations de l'ambiance hydrothermique (dissolution/recristallisation) et de la chimie des eaux interstitielles, contrôlent les processus d'une diagenèse précoce (Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). De tels mécanismes entraînent la réduction de la calcite (S14 et S17-C2) et la précipitation du gypse lenticulaire revêtant les pores, les chenaux et les craquelures (*cf.*, L10, L11, L12-b, L12-c). Il en résulte la perturbation et la désagrégation fine du fond matriciel et le changement même de la composition minéralogique et chimique initiale de l'accumulation éolienne (Cojan et Renard, 1999). La déshydratation poussée du gypse, sous l'effet des températures élevées, donne de l'anhydrite (*cf.*, L12-c). Une nouvelle phase de déflation éolienne marque la rupture et/ou le ralentissement de la pédogenèse.

Les caractères de la microstratigraphie ont évoqué une complexité du fonctionnement des processus de sédimentation et d'évolution post-dépôt des sédiments (rythme saisonnier, alternance ou simultanéité). Il révèle des discontinuités des dynamiques sédimentaires et pédologiques. Le milieu de sédimentation est souvent instable et les états d'équilibre sont rarement atteints. Des variations de conditions dans l'environnement sédimentaire entraînent la mise en œuvre, le maintien, l'atténuation ou l'arrêt des mécanismes morphogéniques et/ou pédogéniques.

I-2- Les faciès archéologique et d'épandage fluviatile

I-2-1- Le faciès archéologique (FAR): marque d'atténuation ou d'arrêt de la morphogenèse éolienne

Entre +2,77 et +2,82 m de profondeur, une discontinuité de la sédimentation éolienne est marquée par **un niveau d'occupation anthropique**. Il s'agit de la limite ouest du site épipaléolithique SHM-1 (Mullazzani, 2010), dont le premier ensemble éolien est le soubassement. Le dépôt archéologique est **épais de 5 cm**. Il est composé de **sables limoneux** gris noirâtres (2.5YR 3/1), peu gypseux (moins de 3%) et modérément calcaires (9%). Il contient des graviers et des **petits éclats calcaires brûlés** et des débris de coquilles d'*Helix*. Les sables classés montrent une prédominance des quartz émoussés mats (plus de 53%) et des émoussés luisants (37%). Les caractéristiques sédimentologiques du dépôt rappellent celles de l'ensemble éolien de base.

Sur le site d'occupation, à quelques mètres à l'est du sondage carotté C1, trois tarières à main **T38, T39 et T42** ont été effectuées. L'objectif est de suivre l'organisation, le contenu et l'étendue des dépôts archéologiques et l'évolution latérale des dépôts. Elles ont montré l'épaississement du **niveau archéologique de 40 à 127 cm**, entrainant la superposition de deux à quatre séquences épaisses de 5 à 62 cm. Le dépôt archéologique est formé de **limons sableux** et de **sables limoneux noirs** (5YR 2.5/1) et gris (5YR 5/1). Il renferme des débris de coquilles d'***Helix***, de ***Cerastoderma glaucum*** et de ***Cerithium vulgatum***. Il contient des **fragments d'argile cuite**, des **éclats calcaires retouchés**, des **graviers et des cailloux brûlés**, des tâches et des horizons de sels blanchâtres. Des lits fins millimétriques de limons et de sables argileux de couleur jaune rougeâtre (5YR 7/8) s'intercalent dans la masse. Ils traduisent des périodes d'abandon du site et de reprise de l'activité éolienne dirigeant la construction hydroéolienne. L'équipe archéologue du projet de recherches pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla reconstitue **sept phases d'occupation épipaléolithique** allant **de IVe au Ve millénaire BP** (Mulazzani *et al.*, 2007 ; Mulazzani, 2010 ; Saliège *et al.*, 2013). Au-dessus des sédiments archéologiques, viennent les dépôts du deuxième ensemble éolien de 38 à 70 cm d'épaisseur.

I-2-2- Le faciès d'épandage fluviatile (FF): substrat de la construction hydroéolienne

La partie inférieure et médiane de la carotte C2 révèle la succession de neuf séquences détritiques (S1-9-C2). Elles définissent le **faciès d'épandage fluviatile sur plus de 400 cm** d'épaisseur (FF1). Elles correspondent à un **dépôt de défluviation fluviatile** mis en place en milieu fluvio-deltaïque. Des sédiments hétérométriques, calcaires et riches en concrétions calcaires les distinguent du reste de la sédimentation. Ils offrent un potentiel intéressant pour l'analyse des mécanismes et des conditions de la morphodynamique d'un dépôt caractéristique d'une **zone d'épandage vraisemblablement d'âge pléistocène supérieur terminal**.

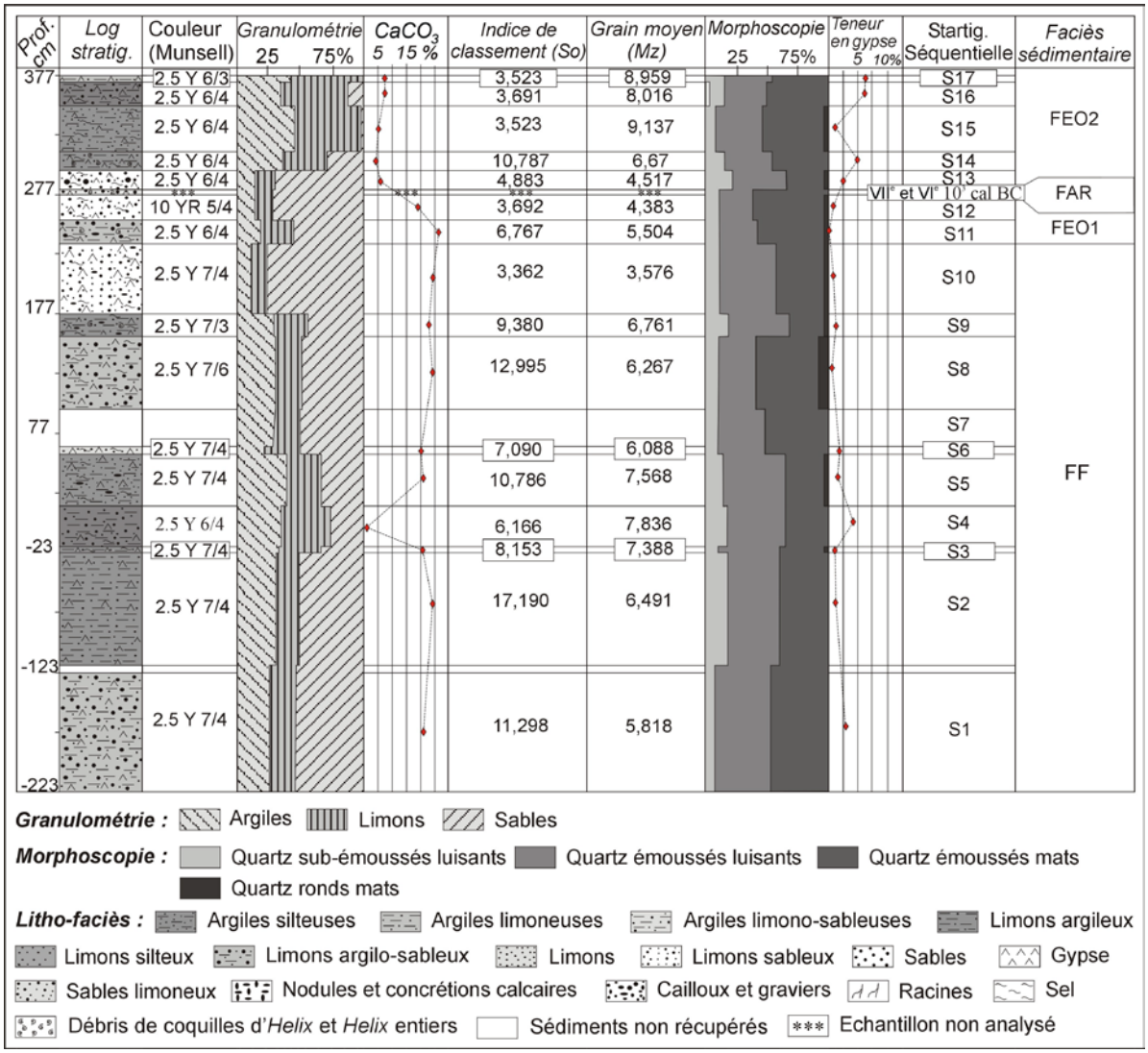


Fig. 56 : Caractéristiques sédimentologiques des remplissages de la carotte C2 de la rive centre-ouest de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

I-2-2-1- Des séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes

Le dépôt est hétérométrique, modérément calcaire et peu à non gypseux. Il est composé de **limons argilo-sableux**, de **limons argileux**, de **limons argilo-silteux**, d'**argiles**, d'**argiles silteuses** et de **limons sableux compacts** (Fig. 56). La couleur est jaune pâle (2.5Y 7/4), brun jaunâtre claire (2.5Y 6/4), jaune (2.5Y 7/6) et jaune claire (2.5Y 7/3). Le tri est généralement moyen à mauvais. La distribution granulométrique des sédiments est logarithmique. La courbe granulométrique des échantillons des séquences S4 et S9-C2 est de forme subparabolique. Le grain moyen est dans les silts fins. Celui de la séquence S9-C2 est représentatif des sables très fins. La médiane est inférieure à 38,07 µm.

Des horizons fins et discontinus de couleur noir et verdâtre et des taches noires marquent les séquences S1, S2, S5 et S9-C1. Des amas gypseux friables et des cristaux de gypse parfois vermiculaires, se dispersent dans la masse. Des concrétions calcaires millimétriques (7 mm) et des débris de coquilles d'*Helix* s'intercalent dans les séquences S5 et S8-C2. La séquence S2-C2 montre des traces d'oxydation. A la binoculaire, s'individualisent des plaquettes calciques millimétriques et des dragées de quartz

ferrugineux de taille millimétrique. L'aspect émoussé luisant et émoussé mat des grains, prédomine. Les quartz des séquences S2-4-C2 sont malpropres et teintés d'oxyde de fer.

I-2-2-2- Assemblage minéralogique et concentrations géochimiques relativement homogènes

Le quartz et la calcite sont les minéraux prépondérants des sédiments. La dolomite ou l'ankérite, l'halite, le gypse et les argiles sont peu représentés. Les minéraux argileux se composent de kaolinite, d'illite, de smectite, d'interstratifiée illite/smectite et de chlorite. Seules les séquences S3, S4 et S8-C1 montrent l'interstratifiée chlorite/smectite. Le quartz de la phase argileuse est seulement présent dans les sept séquences de base. Probablement, les strates S2-3, S6 et S8- 9-C2 contiennent du feldspath Na et K. Les deux séquences S6 et S7-C2 renferment de la goethite.

Les neuf séquences montrent des concentrations équivalentes en éléments majeurs et des concentrations dominantes en alumino-silicates et en alcalino-terreux (plus de 74% de SiO_2, Al_2O_3, CaO et MgO). Les teneurs en éléments mineurs sont variables, mais généralement moins fortes que celles de la partie sommitale de la carotte, exception faite pour le cuivre et le baryum. Le strontium montre des fortes concentrations dans les séquences S2, S4 et S5-C2 (2871 ppm). Les valeurs du rapport molaire Ca/Al sont variables et sont les plus fortes de la carotte. Le rapport Si/Al est élevé dans les séquences S7 et S9-C2.

I-2-2-3- Signification morphodynamique et milieu sédimentaire des dépôts

L'hétérogénéité des dépôts renseigne sur la variation des dynamiques, des mécanismes et des environnements sédimentaires. Les sédiments de la séquence S9-C2 sont issus de la suspension de fond et du roulement (Fig. 57). L'accumulation est forcée puis libre. Les matériaux grossiers sont déposés pendant les grandes ou brèves et violentes crues avant accumulation libre de décrue (Losson et Corbonnois, 2006). Des écoulements peu contrastés et à forte capacité de transport ont permis un bon tri hydrodynamique.

Les échantillons des séquences S1-2 et S7-C2 sont transportés par la suspension graduée avec un peu de roulement par des écoulements contrastés et à plus ou moins forte capacité de transport. Les matériaux des séquences S3, S5, S6 et S8-C2 correspondent à des dépôts de crues, issus de la suspension graduée sans roulement. Ils montrent un fort enrichissement en particules fines qui est dû à la décantation pendant la décrue et à la réduction des vitesses d'écoulements. Seuls les limons argilo-silteux de la séquence S4-C2 sont issus de la suspension uniforme. Pendant de petites crues, les flux d'eau n'ont apporté que les sédiments les plus fins. L'accumulation est généralement en vrac, par excès de charge.

Le déclenchement des processus de vertification dans la séquence S1-C2, indique une pédogénèse en milieu réducteur et/ou une forte battance saisonnière d'une nappe proche (Lespez, 1999, Hamon, 2004). Les taches et les horizons fins et discontinus de couleur noire des séquences S2, S5 et S9-C2 peuvent indiquer une forte décomposition de la matière organique en milieu hydromorphe par une activité bactérienne (Schütt, 2000). Les amas et les concrétions calcaires millimétriques sont vraisemblablement remaniés sur les formations à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur (Karray, 1993).

La composition minéralogique et géochimique homogène de la sédimentation traduit une seule provenance prépondérante de la matière. Les sédiments proviennent exclusivement de **l'érosion des sols dans le bassin versant**. Le contenu du dépôt en silicates et en carbonates évolue grossièrement en sens inverse. L'importance des silicates détritiques est surtout la conséquence des processus mécaniques d'érosion ou de transport

par des écoulements excessifs sur les formations alluviales du bassin versant. La forte teneur en carbonates (calcite, dolomite et ankérite) exige par contre la solution et le transport (Schütt, 1998). La mise en solution et la mobilisation des carbonates dans le bassin versant (rapport molaire Ca/Al important) supposent des fortes actions des eaux pluviales acides et magnésiennes sur les calcaires. De telles actions seraient favorisées par l'humidification d'un climat à saisons contrastées permettant la mise en solution des carbonates (Fischesser, 1955 ; Schütt, 2000). La dolomite peut être également le produit d'une évolution diagénétique. La précipitation des eaux affluentes hydrogéno-carbonatées conduit à la formation de calcite magnésienne qui par une diagenèse précoce peut se transformer en dolomite voire en magnésite (Cojan et Renard, 1999).

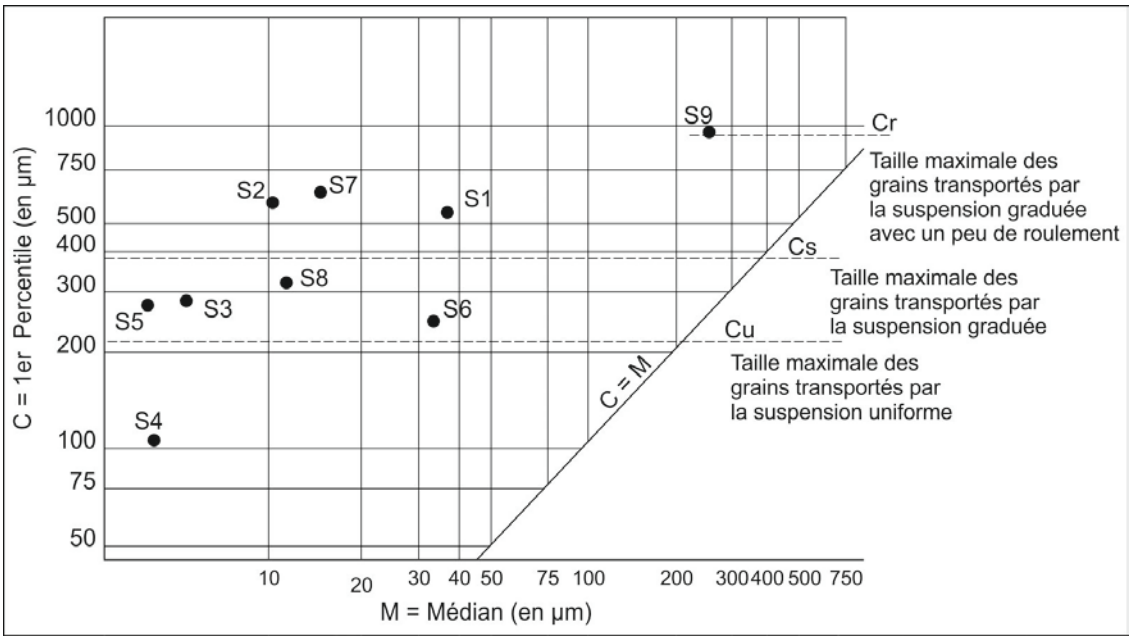


Fig.57 : Modes de transport d'échantillons des dépôts d'épandage fluviatile de la carotte C2 (Image CM)

Les dépôts dilatés de la base de la carotte C2 traduisent d'**importantes dynamiques d'épandage et d'alluvionnement au débouché d'un oued dans la sebkha-lagune Halq al Minjil**. Ils constituent le soubassement de la dune hydroéolienne et correspondent vraisemblablement aux sédiments d'**un ancien cône deltaïque**. Leur position morphologique dans le paysage peut traduire une **déviation du cours aval de l'oued al Manfas as-Sod** avant d'avoir son exutoire actuel **ou une défluviation de l'un des défluents de l'oued**, jadis fonctionnel dans un lointain passé.

I-2-2-4- Essai de calage chronologique

Les dépôts fluviatiles FF1 de la base de la carotte C2 viennent sous le premier ensemble éolien de la dune de la rive centre-ouest de Halq al Minjil, attribué au début de l'Holocène inférieur. Ils renferment des amas et des concrétions calcaires remaniés sur les formations détritiques du Pléistocène supérieur (Karray, 1993, Boujelben, 2002). Ces données permettent de leur accorder un âge relatif du **Pléistocène supérieur terminal**. Les dépôts sont probablement contemporains, à partir de 12000 BP, de l'apparition des premiers indices d'humidité, d'une reprise des écoulements des oueds et de l'extension des plans d'eau (Brun, 1999).

II- MODELES HYDROEOLIENS DE BORDURES DE HALQ AL MINJIL

Aussi bien sur les bordures que dans le centre de la dépression littorale, on dénombre aujourd'hui au moins trois générations de constructions hydroéoliennes. Elles permettent de saisir la place des vents dans la morphogenèse holocène, d'en soustraire les phases du changement des tendances morphogéniques et de préciser l'évolution de la morphologie de l'enclave littorale depuis les dix derniers millénaires.

L'étude des sédiments éoliens est rendue possible par la réalisation des sondages carottés C1 et C2 et d'une série de sondages à la tarière à main (T17, T18, T22, T25 T30, T33, T34, T37, T47). Quelques analyses sédimentologiques ont permis de caractériser la matière éolienne et d'en préciser les processus et les contextes sédimentaires. Les modelés sont décrits et replacés dans le cadre de l'évolution de Halq el Minjil et une esquisse de la genèse et de l'évolution post-dépôt des dunes hydroéoliennes est proposée.

II-1- Bourrelet et dunes des rives occidentale et méridionale de Halq al Minjil : des constructions hydroéoliennes polyphasées

Sur les bordures occidentale et méridionale de Halq al Minjil, un bourrelet et des dunes localisées marquent timidement le paysage (Fig. 58).

II-1-1- Le bourrelet occidental et méridional : superposition de deux générations de dépôts éoliens

II-1-1-1- Localisation et caractéristiques morphosédimentaires

De Hanshir al Foqqa'iyya au Sud à l'extrémité septentrionale de l'enclave littorale, une construction éolienne en forme de croissant longe les bordures occidentale et méridionale de Halq al Minjil. Il s'agit d'un bourrelet surbaissé de 4 m de hauteur maximum et de plus de 120 m de largeur moyenne. Le tracé est discontinu. Des ravins ont ouvert des brèches de tailles variables. Ils ont édifié des petits cônes deltaïques de quelques centaines de mètres carrés de superficie, à leurs débouchés dans la sebkha-lagune. L'embouchure de l'oued al Manfas as-Sod forme la discontinuité la plus marquante au déterminant de l'édifice.

Les caractéristiques sédimentologiques des sédiments de l'édifice éolien rappellent celles de la dune qui le précède au centre-ouest de la dépression littorale. Le bourrelet est également la résultante de la superposition de deux générations de dépôts éoliens déposés en deux phases différentes de l'Holocène. Les deux ensembles éoliens précédemment décrits sur la carotte C2 présentent des limons sableux, des limons argilo-silteux et des argiles silteuses, brun jaunâtre clair, peu à modérément calcaires, refermant du gypse et des débris de coquilles d'*Helix*. Parfois, des lits fins de sables et d'argiles s'intercalent dans la masse. Les quartz montrent une prédominance de l'aspect émoussé mat (44-52%) et émoussé luisant (28-40%).

II-1-1-1- Essai d'attribution chronologique et contexte de mise en place

Le bourrelet résulte des mêmes processus et conditions de mise en place et d'évolution que ceux de la dune hydroéolienne du centre-ouest de Halq al Minjil (*cf.*, chapitre précédent). Il est vraisemblablement contemporain d'un système de fonctionnement hydromorphologique de type sebkha ou sebkha-lagune soumise à des fortes fluctuations du niveau d'eau et à une évaporation intense et/ou persistante.

Les deux ensembles éoliens de l'édifice reposent sur les formations à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène supérieur (Karray, 1993 ; Boujelben, 2002). **L'âge holocène inférieur du premier ensemble éolien FEO1** est indiqué par les niveaux

d'occupation épipaléolithique sus-jacents (Mulazzani *et al.*, 2007 ; Mulazzani, 2010 ; Mulazzani *et al.*, 2013). **Il est antérieur au VIIe millénaire cal BC et vraisemblablement contemporain du stade sebkha littorale SH_{XIII}.**

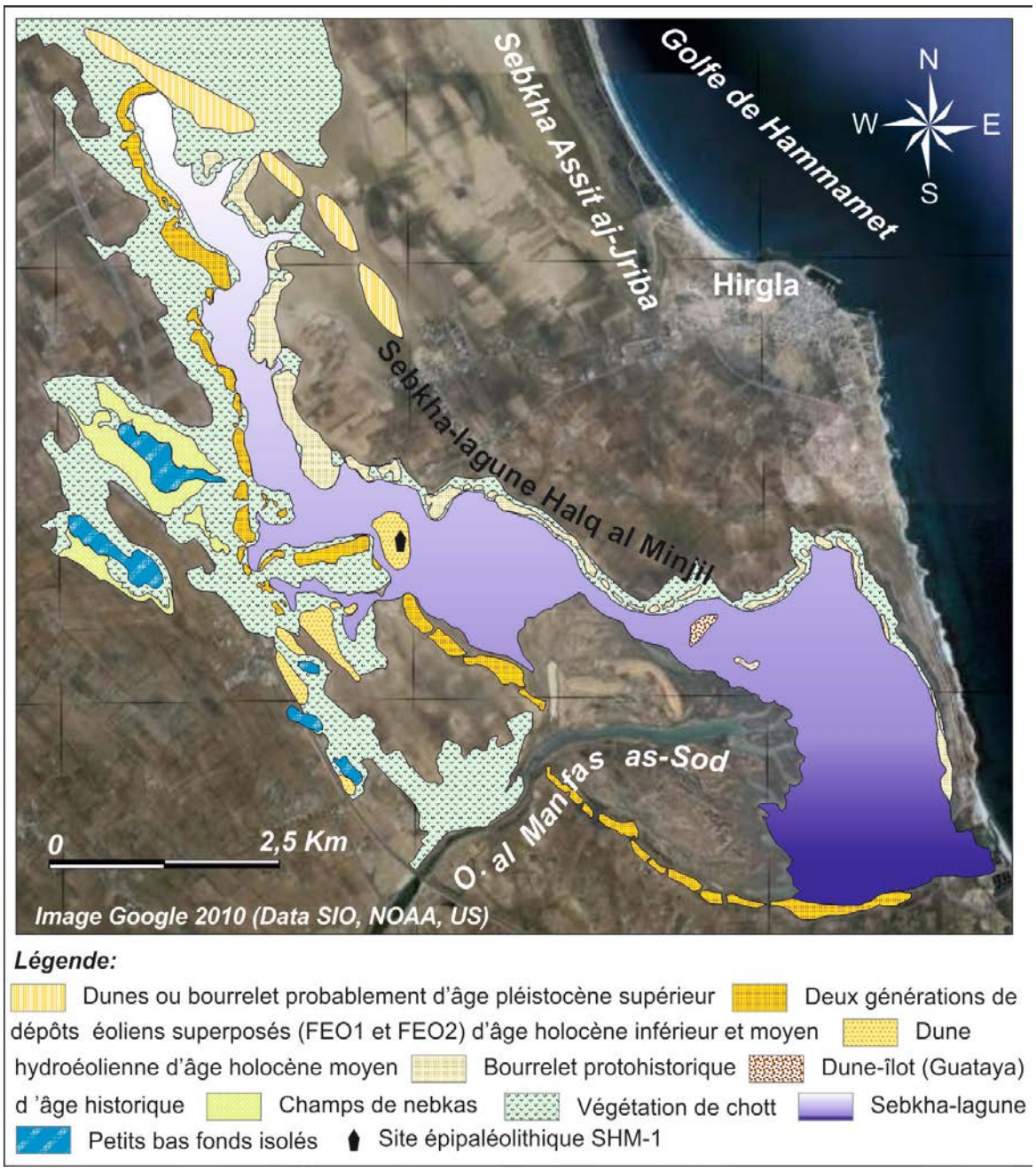


Fig. 58 : Constructions hydroéoliennes holocènes des bordures de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Le deuxième ensemble éolien FEO2 est postérieur au VIe millénaire cal BC. **Il est contemporain de l'installation du stade sebkha littorale SH_{XI}** au début de l'Holocène moyen. **L'édification du bourrelet hydroéolien va du début de l'Holocène inférieur à la première moitié de l'Holocène moyen**. Depuis et à nos jours, l'édifice n'a pas cessé de culminer et de s'étendre dans un contexte favorisant l'éolisation. Ceci est attesté par la présence des nebkas fonctionnelles. Le bourrelet hydroéolien des bordures ouest et méridionale de Halq al Minjil est polyphasé.

II-1-2- Les dunes hydroéoliennes du centre-ouest de Halq al Minjil: un cordon dunaire à peine marqué dans le paysage

II-1-2-1- Position morphologique et caractéristiques sédimentologiques

En arrière du bourrelet précité et tout le long de la route RVE 812 reliant le village de Hirgla à la GP1 se dégage une succession de quatre alignements de dunes isolées. De petites constructions hydroéoliennes, à peine marquées dans le paysage, s'édifient sur les bordures occidentales de petits bas fonds fermés. Elles correspondent à des reliefs surbaissés, subméridiens et allongés sur quelques centaines de mètres.

L'inventaire des archives éoliennes a été permis par la réalisation de trois sondages à la tarière à main (T30, T33 et T37), profonds de 207 à 285 cm. Quelques séquences lithostratigraphiques ont fait l'objet d'une analyse sédimentologique détaillée. L'objectif est d'apprécier les processus de transport et d'accumulation et de permettre une corrélation latérale avec les formations semblables. Le faciès éolien, de 50 et 96 cm d'épaisseur est composé d'argiles silteuses (T30) de limons, de limons sableux et de limons argileux (T37). Les sédiments renferment des sels blanchâtres et du gypse diffus et en cristaux, structurés parfois en lits très fins. La tarière T33 montre un faciès grossier de sables et de limons sableux riches en taches et en lamines de sel et en cristaux de gypse avec quelques fragments de coquilles d'*Helix*. La couleur est jaune olive (2.5Y 6/6), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4) et brun olive clair (2.5Y 5/4). Le tri est mauvais à moyen. La distribution granulométrique des sédiments est logarithmique à subparabolique. Le grain moyen est représentatif des argiles granulométriques et des sables fins. La médiane varie entre 1,65 µm (S1-T30) et 311,3 µm (S8-T37). Les quartz émoussés mats (32-52%) et émoussés luisants (16-32%) prédominent. Les grains ronds mats sont rares et ne dépassent pas 4%. Le dépôt éolien repose sur des limons argileux, des limons sableux et des limons d'épandage fluviatile de couleur brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4), brun olive clair (2.5Y 5/4) et noir brunâtre (2.5Y 3/1).

II-1-2-2- Essai d'attribution et de corrélation chronologiques

Le modeste tri et la texture grossière des sédiments expliquent l'efficacité morphologique des vents peu sélectifs et actifs des secteurs est et nord-est. Les différences granulométriques séquentielles tiennent surtout à la nature des sédiments mis à la disposition du vent dans les bas fonds endoréiques. La stratigraphie ne permet pas de distinguer aisément les deux ensembles éoliens précédemment décrits. Les caractéristiques sédimentologiques des différentes séquences lithostratigraphiques rappellent surtout celles du deuxième ensemble éolien du bourrelet et de la dune des bordures occidentales de Halq al Minjil. Pourtant, toute attribution chronologique reste délicate à établir. **Le cordon d'alignement de dunes isolées est probablement postérieur à l'Holocène moyen**.

II-2- Le bourrelet hydroéolien des rives orientales de Halq al Minjil : contribution à la configuration morphologique actuelle de la sebkha-lagune

II-2-1- Localisation et caractéristiques morphosédimentologiques de l'édifice

Sur les rives orientales de Halq al Minjil, une construction surbaissée et discontinue, en forme de S inversé définit une morphologie de bourrelet. Elle est à peine marquée dans le paysage et beaucoup plus développée à l'amont de la route RVE 812. Son altitude varie entre 1,3 et 2,3 m et sa largeur va de 40 à 200 m. L'accumulation éolienne est reconnue sur la partie supérieure de la carotte C1, entre 0 et 37 cm de profondeur (FEO3). Le matériel diffère de celui du bourrelet des rives ouest de Halq al Minjil. Brièvement, le dépôt fin est composé de limons argileux et d'argiles silteuses, mal à assez bien classés, modérément calcaires et peu gypseux. Il renferme des racines et du gypse lenticulaire et diffus. La

couleur est brun olive clair (2.5 Y 5/4). L'aspect émoussé mat des quartz domine (48-56%). A Sidi al Khafi (centre-est de l'enclave littorale), la mise en culture du bourrelet a estompé la morphologie de l'édifice.

II-2-2- Chronologie et signification morphodynamique des sédiments

La présence du bourrelet sur les rives orientales de Halq al Minjil témoigne de l'activité des vents des secteurs ouest et nord-ouest, avec peut-être des vents secondaires des secteurs sud et sud-est. Les faibles dimensions du bourrelet surtout dans le bassin méridional de Halq al Minjil (le milieu lagunaire actuel) sont probablement liées à la morphologie étroite et allongée de l'enclave littorale engendrant une faible extension des surfaces propices à la déflation. Elles dépendent également du régime hydrologique de la sebkha-lagune. Généralement à sec en été, le bassin méridional est largement envahi par les eaux marines et continentales surtout en hiver et, à l'occasion des tempêtes, il se transforme en véritable lagune.

L'accumulation éolienne enfouit le deuxième niveau lagunaire FL2 d'âge flandrien moyen (SacA, 12811 ; 4365±50 BP ; 5054-4838 cal BP/3105-2889 cal BC). Il est plausible de la corréler au faciès « évaporatique » FE4 de la partie supérieure de la carotte C3 qui a annoncé l'installation du système de la sebkha littorale SH_{II}. Une datation ^{14}C AMS du sommet du dépôt « évaporatique » a donné un âge de 3410±40 BP. Le bourrelet s'est installé au Flandrien supérieur. Il peut correspondre aux placages éoliens du bassin versant de l'oued Sbeïtla dans la Tunisie centrale (Zerai, 2006). Il est probablement contemporain des premières générations de lunettes et de la tendance sèche du climat post-néolithique, reconnues dans le bassin Kébir Miliane en Tunisie septentrionale (Bourgou, 1993) et sur les bordures de Sebkhet el Moknine et Sebkhet el Jem dans le Sahel central et méridional (Brahim, 2005).

II-3- D'autres modelés typiques mais très localisés

II-3-1- La dune îlot ou guataya de l'ombilic de Halq al Minjil

II-3-1-1- Forme et extension

Dans la partie méridionale de l'enclave littorale de Halq al Minjil, une construction hydroéolienne en îlot s'engage dans le centre de la sebkha-lagune actuelle (*cf.*, Fig. 58). Elle est appelée guataya, chez la population locale. Il s'agit d'une dune allongée nord-est/sud-ouest, sur environ 139 m de largeur et 435 m de longueur. Son altitude est d'environ 2 m. Les versants dissymétriques montrent une pente forte du coté sud.

II-3-1-2- Faciès sédimentaire

Un sondage à la tarière à main T47, profond de 310 cm, situé à la cote 1,64 m au-dessus du niveau marin, a été effectué sur le retombé sud-ouest de la dune. Il a recoupé trois faciès de type lagunaire, éolien et fluvio-marin d'influence fluviatile notable. Le faciès éolien est composé d'argiles et d'argiles silteuses, modérément calcaires (8-10,3% de $CaCO_3$) et peu à modérément gypseuses (4,5-7,5%). L'épaisseur est de l'ordre de 120 cm. La couleur est gris clair (2.5Y 7/2), vert olive pâle (5Y 6/3), brun jaunâtre clair (2.5Y 6/4) et brun olive clair (2.5Y 5/4). Le dépôt contient du sel blanc en taches ou lité et des microcristaux de gypse de couleur jaune pâle. Les séquences S11 et S15-T47 referment des racines. Des horizons fins noirâtres (1-2 mm) s'intercalent dans la séquence S12-T47. La strate S13-T47 renferme des fragments de coquilles d'*Helix*. Les quartz émoussés luisants (44-48%) et émoussés mats prédominent. Les ronds mats sont rares ou inexistants, variant entre 0 et 4%. Le tri est moyen à assez bien. La distribution granulométrique est hyperbolique. La médiane est très faible, inférieure à 1,6 µm.

II-3-1-3- Signification morphodynamique et chronologie

La morphologie et la position de la construction dans le centre de la sebkha-lagune implique l'origine hydroéolienne de l'édifice. La guataya témoigne du rôle capital d'une végétation halophile qui a poussé sur un fond exondé puis a piégé des agrégats éolisés et possiblement les sédiments de colmatage fluvio-marin. Les vents efficaces semblent souffler des cotés ouest et nord-ouest et secondairement des secteurs sud et sud-est. La prédominance des quartz émoussés luisants les explique. Elle se conjugue avec la rareté des grains ronds mats pour signifier un transport éolien sur de très petites distances à partir du fond asséché et floculé de Halq al Minjil, sans changer sensiblement l'aspect de grains éolisés (Cailleux et Tricart, 1959).

Le dépôt éolien vient au-dessus des niveaux lagunaires flandriens. Il est vraisemblablement d'âge préromain. **Il est contemporain du bourrelet hydroéolien des rives orientales de Halq al Minjil, installé au Flandrien supérieur**.

II-3-2- Le Bourrelet des marges nord et nord-orientales de Halq al Minjil

Au nord de la localité d'al Aribat, un bourrelet allongé sud-est/nord-ouest sur environ 5 km, marque les marges septentrionale et nord-orientale de Halq al Minjil. Vallonné par de larges ravins en travers, il présente une morphologie d'alignement de dunes enchainées, d'environ 120 à 370 m de largeur et 0,5 à 1,5 km de longueur. Les altitudes varient entre 2,4 m et 6,75 m. L'édifice barre l'écoulement de l'oued al Mjinin vers la sebkha-lagune (*cf*., Fig. 63). Le matériel est composé de limons sablo-argileux et de sables limoneux bruns jaunâtres. Il renferme des fragments de coquilles d'*Helix*, du gypse et de sel.

La position et l'orientation de l'édifice pose le problème de l'origine de la matière éolisée et des vents responsables de sa mise en place. La mise en culture de la construction hydroéolienne (céréaliculture) a fortement estompé la dissymétrie des versants qui peut aider à estimer la direction des vents actifs. Le bourrelet s'interpose entre le Dhra tyrrhénien d'Assit aj-Jriba à l'est et le bourrelet oriental de Halq al Minjil à l'ouest. Des cailloux et des galets calcaires brulés et des tessons de poterie romaine (IVe-Ve siècle ap. J-C) occupent la surface au nord-ouest d'al Aribat. L'accumulation éolienne est probablement d'âge holocène inférieur.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Les archives sédimentaires sondées par la carotte C2 montrent des changements chronostratigraphiques des sédiments éoliens. Elles expliquent la complexité du fonctionnement hydroéolien de Halq al Minjil, dont la dynamique a été contrôlée par le jeu antagonique du morphodynamisme marin et continental et du surcreusement éolien. Elles expliquent des fluctuations holocènes des dynamiques et des conditions locales aux moments de préparation, de transit et de dépôt des sédiments par les vents.

Les niveaux d'occupation épipaléolithique du site SHM-1 ont permis de distinguer deux générations de dépôts éoliens du bourrelet de la rive occidentale de la sebkha-lagune. Ils calent deux grands moments de la morphogenèse éolienne. Ils sont d'âge holocène inférieur et moyen

Une multitude de formes et de formations hydroéoliennes marque les bordures de la sebkha-lagune Halq al Minjil. On dénombre au moins trois générations de constructions hydroéoliennes disposées sur les bordures orientale, méridionale et occidentale et dans le centre de la dépression littorale. Elles attribuent aux vents une grande place dans la morphogenèse holocène surtout depuis l'Holocène moyen. Les différentes positions

morphologiques des constructions et de dépôts éoliens indiquent des changements de directions des vents actifs durant l'Holocène. L'évolution post-dépôt des sédiments éoliens témoigne, à des rythmes indéfinis mais probablement saisonniers, l'atténuation ou l'arrêt de la mise en œuvre des processus de sédimentation éolienne.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Au milieu du Golfe de Hammamet, Halq al Minjil est une sebkha-lagune de barrage. Elle est d'origine double tectonique et hydromorphologique. Elle est enclavée en arrière d'un cordon tyrrhénien, dans une dépression littorale empruntant la partie limitrophe d'un paléobassin subsident depuis le Langhien.

Trois sondages carottés et une série de sondages à la tarière à main ont apporté des précisions quant à la stratigraphie et la répartition spatiale du complexe sédimentaire du fond et des rives de l'enclave littorale et des modelés hydroéoliens de bordures. L'analyse lithoséquentielle haute résolution des dépôts et les analyses de laboratoire engagées ont mis en évidence, à différentes échelles de temps, des changements significatifs des provenances de la matière, des mécanismes dépositionnels et post-sédimentaires, des dynamiques et des environnements. Elles ont permis d'établir une typologie de sept faciès regroupant des séquences génétiquement liées. La succession parfois rapide et la juxtaposition latérale des faciès ont renseigné sur la modification des situations hydrologiques, des dynamiques et des environnements sédimentaires et sur la complexité du fonctionnement du système côtier.

Halq al Minjil est un système complexe sous double influence marine et continentale. Les faciès fluviatile (FF) et mixte d'influence fluviatile notable (FMF) prédominent. Les faciès sulfato-carbonaté (FSC), lagunaire (FL) et éolien (FEO) sont les plus distinctifs des archives sédimentaires. Ils expliquent des environnements, des tendances morphogéniques et des conditions climato-eustatiques particuliers ayant marqués l'histoire holocène de la dépression littorale.

La répartition spatiale des sédiments sur l'ensemble de la sebkha-lagune a montré des variations locales et des discontinuités latérales. Ceci est en rapport avec le morphodynamisme, la morphologie du bassin, les sources de matière, le milieu de sédimentation et le caractère de l'évolution post-dépôt de sédiments. Sur les bordures, la part des apports proches et latéraux par ruissellement dans la dynamique de comblement de la dépression est importante. Au-delà des rivages, Halq al Minjil reçoit des apports marins et fluviatiles lointains par le biais des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin.

Des marqueurs bio-stratigraphiques et minéralogiques ont permis sur les carottes C1 et C3 et la tarière T46 d'établir des corrélations spatio-temporelles des faciès et une échelle lithostratigraphique de synthèse. Ils ont permis de définir quatorze unités litho-chronostratigraphiques et de reconstituer la paléogéographie et les stades holocènes de fonctionnements hydrologique et hydroéolien. Halq al Minjil a fonctionné en cinq systèmes hydromorphologiques de types lac temporaire-sebkha, sebkha-lagune, sebkha littorale, lagune et lagune-sebkha. Le système sebkha-lagune a caractérisé une grande partie de l'histoire holocène de l'enclave littorale.

Sur les bordures occidentales, deux générations de dépôts éoliens se superposent. Elles ont donné place, au début de l'Holocène inférieur et durant la première moitié de l'Holocène moyen, à un bourrelet et à des alignements de dunes séparées. Un bourrelet et une dune (guataya) hydroéoliens préromains marquent timidement les marges orientales et le centre de la dépression littorale. Ils attribuent aux vents du secteur ouest une grande place dans la morphogenèse de la région, depuis le Flandrien supérieur.

TROISIEME PARTIE :

LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES, FONCTIONNEMENT ET DYNAMIQUES MORPHOSEDIMENTAIRES

CHAPITRE VII : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES ET CONTEXTE PRE-HOLOCENE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

CHAPITRE VIII : AMPLEUR ET VARIETE DES DEPOTS HOLOCENES DANS LE SYSTEME FLUVIAL : PRESENTATION DES COUPES SIGNIFICATIVES

CHAPITRE IX : LES MODELES HOLOCENES DU SYSTEME FLUVIAL : ETUDE DE SYNTHESE ET INTERPRETATION D'ENSEMBLE

INTRODUCTION

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil est marqué par l'ampleur de ses héritages géomorphologiques et par la multiplicité des caractères morphométriques et formationnels d'une variété de modelés pléistocènes et holocènes. En outre, l'essentiel des paysages géomorphologiques actuels est le résultat d'une évolution morphogénétique principalement historique. Ces données posent les problèmes de l'ambiguïté de la morphogenèse holocène et de l'origine des dépôts historiques, épais et variés surtout dans les fonds des oueds tributaires de la sebkha al Kalbiyya.

Le système fluvial offre de bonnes opportunités pour l'étude des formes et dépôts continentaux holocènes des marges nord du Sahel septentrional tunisien. Le décryptage du message morphogénique et environnemental des sédiments des fonds de vallées et des plaines, apportera quelques éléments de réponse à la question scientifique qui a fait l'objet de multiples réflexions et controverses, depuis les années 1960 (Vita-Finzi, 1969). Elle concerne l'ampleur et la complexité de la morphogenèse holocène et ses facteurs, et surtout ceux de l'Holocène historique où le signal climatique et le forçage anthropique s'interagissent.

Cette partie de la thèse décrira le fonctionnement et l'évolution des dynamiques du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. Elle présentera le cadre orohydrographique et géologique du système fluvial. Elle étudiera l'agencement et les particularités formationnelles des héritages pléistocènes. Le but est de mieux comprendre le contexte pré-holocène du déroulement de l'activité érosive. Cette partie cherchera ensuite les caractères morphosédimentaires des dépôts holocènes, leurs particularités spatiales et leur signification morphodynamique. Elle proposera enfin un schéma stratigraphique de synthèse et elle exposera la géographie et les caractéristiques d'ensemble des formes holocènes.

CHAPITRE VII :
HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES ET CONTEXTE PRE-HOLOCENE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil s'organise en trois bassins versants, hétérogènes mais interdépendants et hydrologiquement connectés. Il s'agit du bassin immédiat de la sebkha al Kalbiyya, celui de Halq al Minjil et, entre les deux, s'interpose le bassin de l'oued al Manfas as-Sod. Cette organisation est la résultante de la topographie et de la tectonique plio-quaternaire, qui furent avec l'hydrographie, les composantes principales d'un cadre physique particulier qui a inégalement dirigé l'évolution géomorphologique pléistocène puis holocène. L'étude morpho-sédimentologique et stratigraphique des héritages pléistocènes aide à comprendre le contexte pré-holocène de l'évolution des dynamiques et du fonctionnement du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil durant l'Holocène.

Dans ce chapitre, on abordera d'abord les données orohydrographique et structurale pour comprendre l'agencement, la répartition spatiale et les particularités morphosédimentaires des héritages géomorphologiques. Puis, dans une démarche chronostratigraphique, les dépôts fluviatiles et les formes pléistocènes seront présentés. On présentera sommairement, les mécanismes et les conditions de leur mise en place en revenant surtout sur les hypothèses proposées. Les dépôts et les modelés hydroéoliens pléistocènes ont été étudiés dans les deux premières parties de la thèse. Leur mise ne place est en rapport étroit avec la dynamique des sebkhas à proprement dites (*cf.*, chapitre 3 et 6).

I- CADRE OROHYDROGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil s'inscrit dans une topographie molle et une structure géologique simple. L'étude du cadre oro-hydro-structural permet la compréhension du contexte de fonctionnement et d'évolution du système.

I-1- Un Système fluvial cerné par une topographie molle, mais contrastée et possédant un réseau hydrographique peu développé

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil laisse vite apprécier la faiblesse de son relief. Il montre la prédominance d'une topographie de plaines, bordée par des collines basses (Fig. 59). L'examen hydro-morphométrique des cartes topographiques a montré des contrastes notables.

I-1-1- Le relief collinaire : des contrastes topographiques peu marqués

Le système fluvial est cerné par une boucle d'alignements collinaires distincts.

I-1-1-1- Les collines des bordures centre-est et méridionale : un relief sectionné, à forte densité de drainage

Entre Shat Maryam au centre-est et Krousiyya au sud, les collines forment une longue échine (environ 59 km), composée de trois crêtes principales.

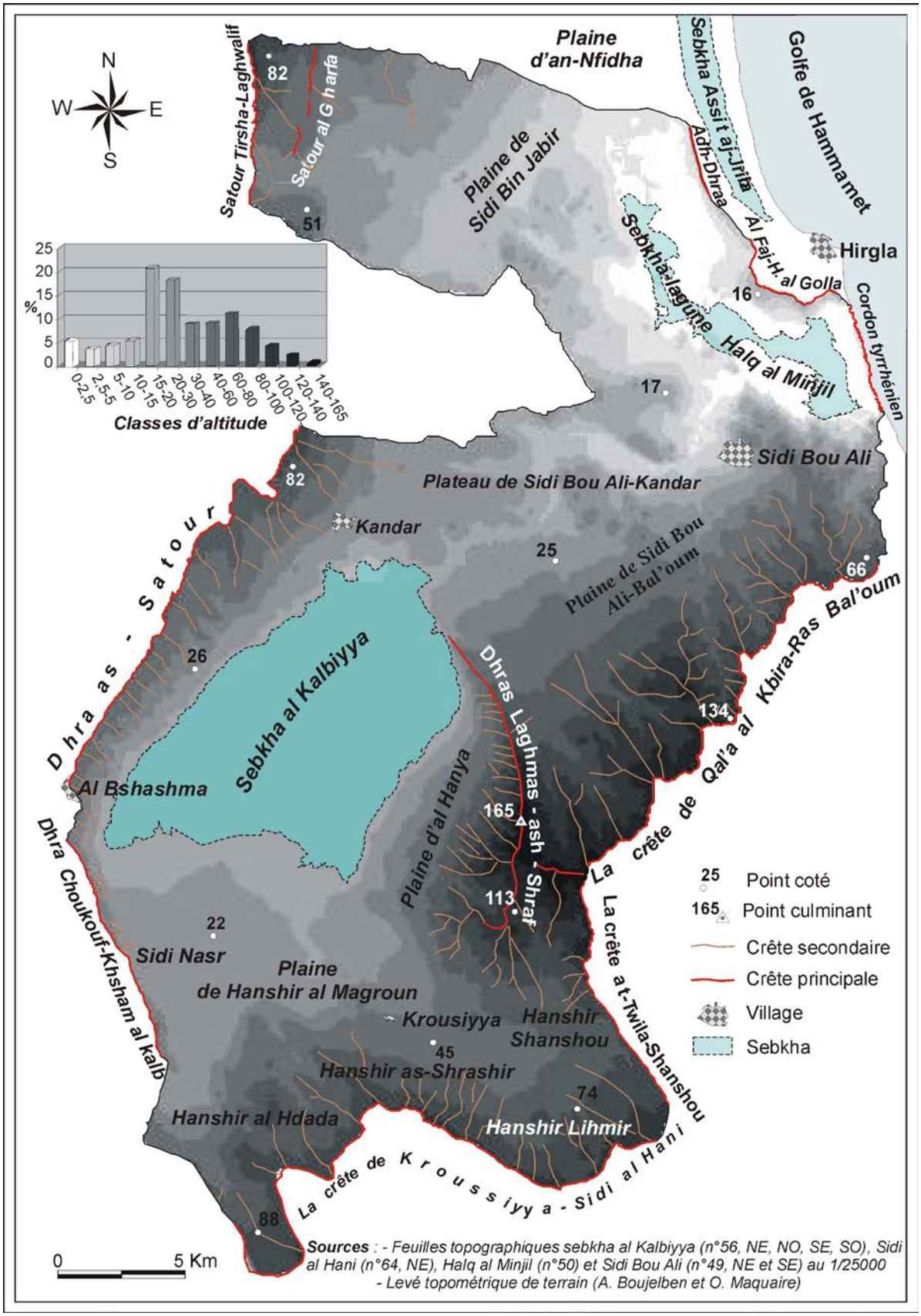


Fig. 59 : Croquis topographique du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

I- 1-1-1-1- Les hauteurs cloisonnées de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum

La crête de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum sépare le bassin de l'oued el Manfas as-Sod au nord des bassins de Laya-Hammam et Salah Bou Giddida au sud. Elle s'abaisse de l'ouest (156 m) à l'est (60 m). Les versants septentrionaux sont remarquablement disséqués à Sidi ad-Dahir. Ici, les interfluves gardent une forme triangulaire dont les pointes sont orientées vers l'amont pente.

A l'est du bassin de l'oued as-Souriyya, les drains serrés et incisés ont donné aux versants un aspect cloisonné. L'oued Lahmar-al Ghuirga et les affluents de la rive droite de l'oued al Manfas as-Sod drainent des bassins allongés et à forte densité de drainage (Fig. 60). Excepté l'oued as-Souriyya qui se déverse directement dans le cours principal de l'oued al Manfas as-Sod, les autres affluents se perdent dans la plaine d'al Boura-al Qal'a.

I- 1-1-1-2- La crête allongée at-Twila-Shanshou

La crête at-Twila-Shanshou limite le bassin d'al Kalbiyya au sud-est. Elle culmine à 112 m. Elle est parcourue par les principaux affluents du bassin amont de l'oued Lakhdar-Bou Ghorbal. Les oueds Salah Bou Giddida et al Kouz montrent les plus fortes densités de drainage. Ils parcourent des versants courts et relativement pentus (10% environ) dominant rapidement les talwegs.

I- 1-1-1-3- La crête méridionale de Krousiyya- Sidi al Hani

La crête de Krousiyya-Sidi al Hani limite le bassin d'al Kalbiyya au sud. Les altitudes diminuent de l'est (121m) à l'ouest (48 m). A Hanshir Lihimir, les versants sont disséqués. Les affluents de la rive gauche de l'oued Lakhdar-Bou Ghorbal parcourent des bassins allongés et à forte à très forte densité de drainage. A Hanshir Kroussiyya, la dissection s'accentue. Les oueds drainent des petits bassins de forme ramassée à l'amont. A Hanshir al Hadada, la topographie est aérée. Les Dhras Sidi Salah, al Haddada et ash-Shrachir sont des larges interfluves qui descendent lentement vers la sebkha.

I-1-1-2- Dhras Laghmas-ash-Shraif : une topographie de dissection poussée

La crête des Dhras Laghmas-ash-Shraif sépare les bassins d'al Kalbiyya à l'ouest et celui de l'oued al Manfas as-Sod à l'est. Elle culmine à 165 m. En forme de croissant, elle présente une concavité tournée vers l'ouest. Les versants occidentaux sont fortement disséqués par un réseau dense de petits oueds. Ils sont souvent réduits à des interfluves effilés. Les ruptures des pentes sont brutales. Les bassins des oueds Lahmar, al Gharig et ach-Shraif ont une très forte densité de drainage et présentent une forme ramassée à l'amont. Les versants orientaux sont moins pentus. Les affluents de la rive gauche de l'oued Lahmar-al Ghuirga sont faiblement encaissés.

I-1-1-3- L'alignement surbaissé des Dhras as-Satour-Choukouf-Khsham al Kalb

L'alignement des Dhras as-Satour- Khsham al Kalb longe la rive occidentale d'al Kalbiyya et montre des contrastes. Au sud, Dhra Choukouf-Khsham al Kalb correspond à des croupes surbaissées (moins de 48 m) et discontinues. Les versants doux sont parcourus sur des petites distances par des oueds à peine encaissés. A Sidi Nasr, l'oued al Fakka a ouvert une brèche large d'environ 230 m. Au nord, Dhra as-Satour, culminante à 64 m en moyenne, montre de petites crêtes parallèles, aiguës et surplombées par des corniches. Les versants sont souvent parcourus par des drains d'ordre 1 et 2. Les oueds an-Nakhlat, Sidi Ahmed, Nfayid al Gayid et al Hallouf, possèdent une moyenne à forte densité de drainage.

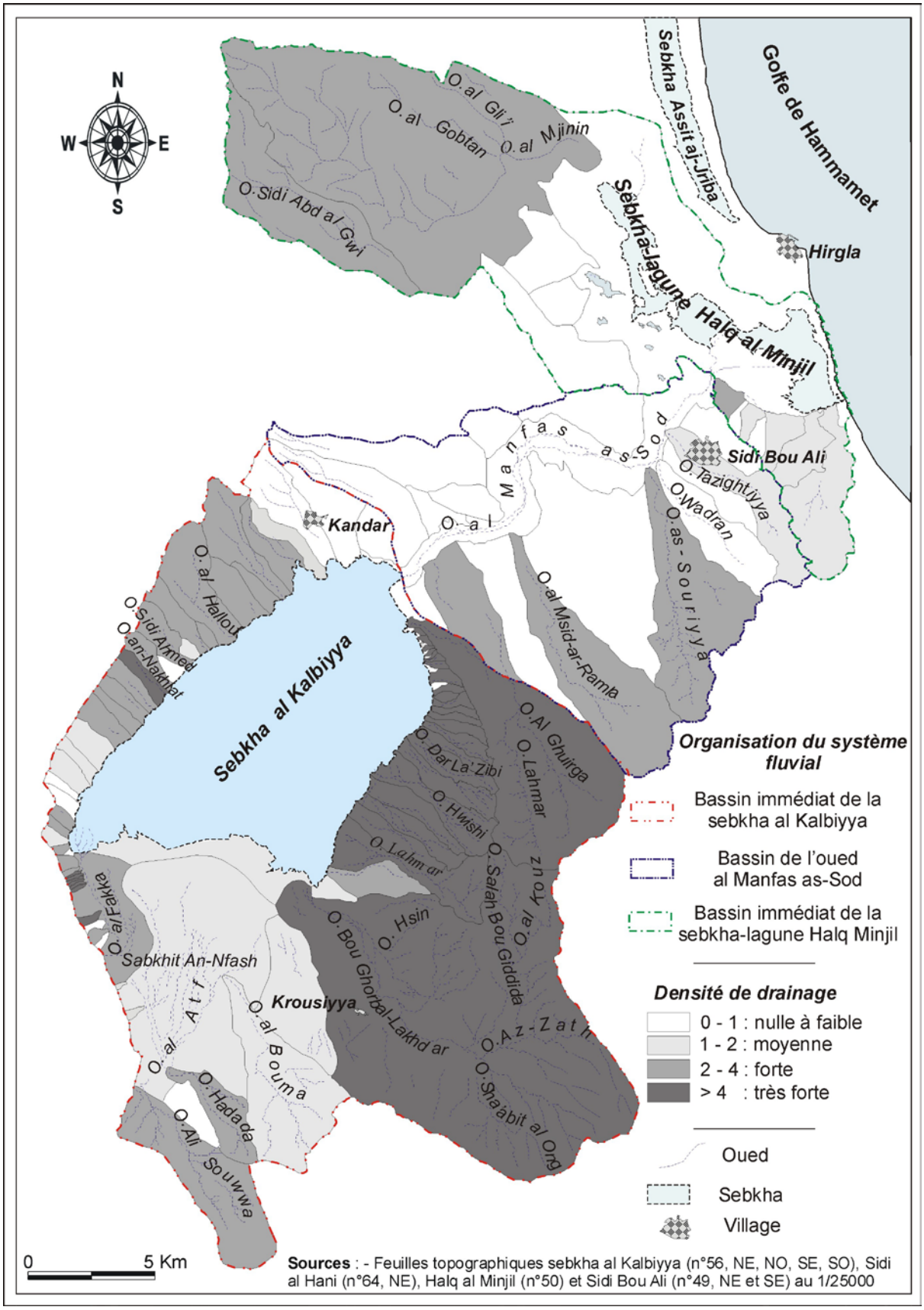


Fig. 60 : Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil : organisation hydrographique et densité de drainage

I-1-1-4- Le relief bas et accidenté de l'extrême nord-ouest du système fluvial

Deux alignements de crêtes parallèles bordent le système fluvial au nord-ouest. Une première crête s'élève entre Satour Tirsha au sud (57 m) et Laghwalif au nord (129 m). Sous l'effet d'une dissection poussée, elle passe à l'est à des petites collines isolées. Une seconde crête forme le Satour al Ghorfa-sidi Bou Nawwara. Elle culmine à 87 m au nord et présente des pentes moyennes d'environ 10%. L'ensemble est parcouru par les affluents amont de l'oued al Mjinin au nord et par ceux de la rive gauche du cours aval de l'oued Sidi Abd al Gwi au sud. Les deux oueds alimentent Halq al Minjil du nord-ouest et confluent dans la plaine de Sidi Bin Jabir. L'oued Sidi Abd al Gwi prend sa source sur les versants oriental et méridional du Jbel Fadhloun à l'ouest de l'hydrosystème.

I-1-2- Les plaines : unité topographique caractéristique du paysage de « piémonts » et de bordures des sebkhas

Les plaines constituent la forme topographique la plus fréquente. Elles occupent les « piémonts » et surtout les zones basses de bordures des sebkhas.

I-1-2-1- La plaine de Sidi Bou Ali-Bal'oum

Entre Sidi Bou Ali à l'est et Bal'oum à l'ouest, la plaine révèle des contrastes topographiques. A l'ouest de l'oued as-Souriyya, la plaine est une vaste surface régulière, puis légèrement incisée et peu bombée à l'est du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga. Entre la rive droite de l'oued as-Souriyya et les premières collines de Sidi Bou Ali, la plaine est étroite et irrégulière. Elle est faiblement incisée par des vallons et les cours moyens des oueds as-Souriyya, Wadran et Tazightiyya. Au niveau de l'isohypse 40 m, la plaine se termine par une rupture de pente et passe au plateau de Sidi Bou Ali.

I-1-2-2- Les plaines intérieures de Hanshir al Magroun et d'al Hanya

Sur la rive orientale d'al Kalbiyya, la plaine d'al Hanya présente une surface légèrement bombée avec une inclinaison régulière vers l'ouest et une pente oscillant entre 3,5 et 1,5%, ce qui explique la difficulté du drainage notamment à l'aval. Au sud-est, cette plaine est limitée par les croupes allongées des Dhras ar-Rommane, az-Zmenka et ash-Shrashir. Au Sud d'al Kalbiyya, la plaine de Hanshir al Magroun occupe la zone basse de débordement de l'oued al Ataf. Les affluents de l'oued dessinent un chevelu de bras à écoulement hésitant. La plaine est parsemée de marécages nommés Sabkhet an-Nfash.

I-1-2-3- La plaine de Sidi Bin Jabir

La plaine de Sidi Bin Jabir s'interpose entre les versants orientaux de Satour al Gharfa-sidi Bou Nawwara et les bordures septentrionales de Halq al Minjil. Elle descend doucement vers l'est dont la pente est moins de 1%. L'oued al Mjinin et ses affluents s'écoulent difficilement. A la hauteur des Manzals Dar Bilwa'ir et al Mahatta, la plaine passe à un plateau doucement vallonné et parsemé de monticules et de buttes, à moins de 25 m d'altitude et aux sommets encroûtés.

I-1-3- Le plateau bas et laniéré de Sidi Bou Ali-Kandar

Le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar occupe la partie septentrionale du bassin de l'oued al Manfas as-Sod. La surface est fortement disséquée par des vallons en berceau, ainsi que par la vallée évasée et encaissée (20 m) du cours principal de l'oued al Manfas as-Sod. A l'ouest, la même surface est réduite à des longues lanières. A Hanshir Zambra et Dowwar Labyar, des buttes et des monticules parsèment la vallée d'al Manfas-as Sod. A son extrémité orientale, le plateau enveloppe la dépression littorale de Halq al Minjil.

L'entaille majeure de l'oued al Manfas as-Sod est le trait essentiel du plateau. Il relie al Kalbiyya et Halq al Minjil sur 18,7 Km de longueur. Il se fraye un chemin sinueux dans une vallée large d'environ 300 à 1520 m. L'encaissement varie entre 20 m à l'amont et 5 m au bord de la sebkha littorale. L'oued al Manfas as-Sod est le collecteur local des eaux des hauteurs Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum. Il est surtout l'évacuateur des trop-pleins de la sebkha al Kalbiyya vers la mer à travers Halq al Minjil. Ces fonctions lui accordent une signification aussi locale que régionale et expliquent l'ampleur de son entaille qui remonte probablement au Pléistocène moyen (Karray, 1993 ; Boujelben, 2002). La rive gauche de l'oued est presque dépourvue de tout affluent.

I-2- La lithostratigraphie : Prédominance des terrains superficiels récents, meubles et peu hétérogènes

Les affleurements géologiques sont surtout tendres. Les terrains cénozoïques n'occupent que 10% de la surface. Le reste est masqué par les dépôts quaternaires.

I-2-1- Les sédiments oligo-mio-pliocènes des Dhras as-Satour-Khsham al Kalb et de Satour al Ghorfa

C'est seulement aux Dhras as-Satour-Khsham al Kalb et à Satour al Ghorfa que les formations les plus anciennes affleurent. Elles sont d'extension spatiale très réduite et datent de l'Oligocène, de l'Aquitanien, du Vindobonien et du Mio-Pliocène.

√ **L'Oligocène**, l'équivalent de la formation Korbous, s'allonge sur une bande étroite tout le long de l'amont versant du Dhra as-Satour et forme l'ossature du Satour al Ghorfa (Fig. 61.1). Le faciès est marqué par un grès carbonaté à faune abondante et par des alternances d'argiles gypseuses et de sables quartzeux (Castany, 1952a ; Ghanmi *et al.*, 2004). Les bancs gréseux sont mis en relief et les couches argileuses et sableuses sont érodées, d'où la morphologie en lignes aiguës de Dhra as-Satour. Des accidents décrochants et méridiens affectent la série.

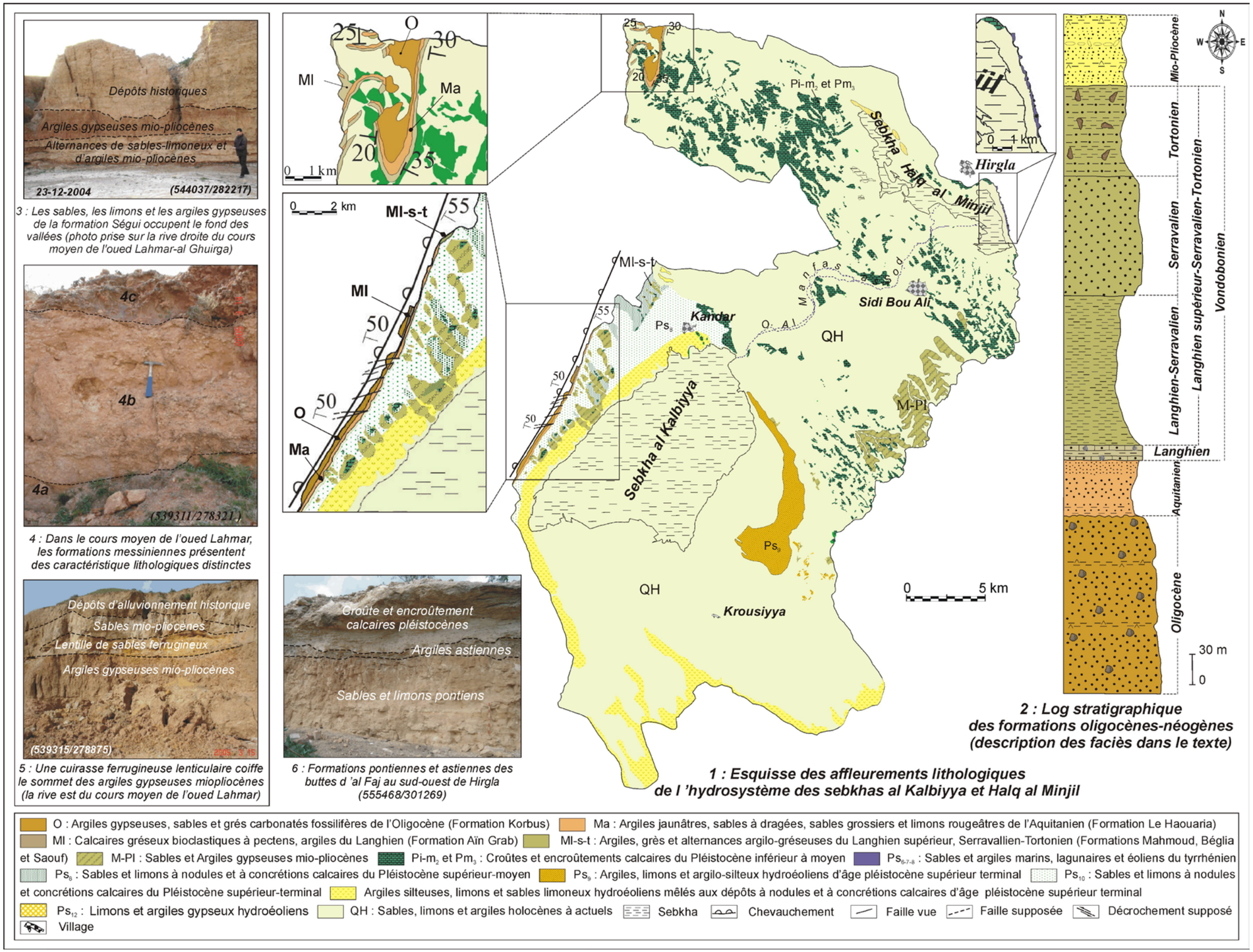
√ **L'Aquitanien** (les formations el Haouaria, Fortuna et Messiouta), n'affleure que sur les versants du Satour al Ghorfa. Le matériel continental est composé d'argiles, de sables grossiers à dragées et de limons (Ghanmi *et al.*, 2004).

√ Vient ensuite **le Vindobonien**, composé de deux étages marins : le Langhien et le Langhien supérieur Serravallien-Tritonien.

* <u>*Le Langhien*</u> est l'équivalent de la formation Aïn Ghrab. Il est le deuxième étage cénozoïque le plus représenté. A Dhra as-Satour, il vient directement en discordance angulaire sur l'Oligocène. Ceci semble dû aux mouvements pré-burdigaliens, limitant la transgression burdigalienne (Castany, 1952a). Le faciès est composé d'assises calcaires gréseux et bioclastiques, intercalées d'argiles.

* <u>*Le Langhien supérieur Serravallien-Tortonien*</u> n'affleure qu'à al Blalma. Il commence par les argiles à microfaunes du Langhien-Serravalien (la formation Mahmoud, Fig. 61.2). Il passe ensuite à des grés massifs de la formation Beglia (Serravalien). La partie supérieure montre des alternances argilo-gréseuses et des couches de lignite lacustres et/ou continentales et des argiles à huîtres des zones littorales (Castany, 1952b ; Tagorti, 1990).

√ Enfin, les dépôts de <u>*la phase terminale du Miocène et du Pliocène*</u>. A l'est de Dhra as-Satour, le Vindobonien supérieur passe à un ensemble détritique de limons et de sables et de sables grossiers à dragées. Il est d'âge Miocène supérieur-Pliocène (la formation Ségui ; Castany, 1952a ; Burollet, 1956).



3 : Les sables, les limons et les argiles gypseuses de la formation Ségui occupent le fond des vallées (photo prise sur la rive droite du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga)

4 : Dans le cours moyen de l'oued Lahmar, les formations messiniennes présentent des caractéristique lithologiques distinctes

5 : Une cuirasse ferrugineuse lenticulaire coiffe le sommet des argiles gypseuses miopliocènes (la rive est du cours moyen de l'oued Lahmar)

6 : Formations pontiennes et astiennes des buttes d 'al Faj au sud-ouest de Hirgla (555468/301269)

2 : Log stratigraphique des formations oligocènes-néogènes (description des faciès dans le texte)

1 : Esquisse des affleurements lithologiques de l 'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

O : Argiles gypseuses, sables et grés carbonatés fossilifères de l'Oligocène (Formation Korbus) Ma : Argiles jaunâtres, sables à dragées, sables grossiers et limons rougeâtres de l'Aquitanien (Formation Le Haouaria)
MI : Calcaires gréseux bioclastiques à pectens, argiles du Langhien (Formation Aïn Grab) MI-s-t : Argiles, grès et alternances argilo-gréseuses du Langhien supérieur, Serravallien-Tortonien (Formations Mahmoud, Béglia et Saouf) M-PI : Sables et Argiles gypseuses mio-pliocènes Pi-m_2 et Pm_3 : Croûtes et encroûtements calcaires du Pléistocène inférieur à moyen $Ps_{6\text{-}7\text{-}8}$: Sables et argiles marins, lagunaires et éoliens du tyrrhénien
Ps_8 : Sables et limons à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur-moyen Ps_9 : Argiles, limons et argilo-silteux hydroéoliens d'âge pléistocène supérieur terminal Ps_{10} : Sables et limons à nodules et concrétions calcaires du Pléistocène supérieur-terminal Argiles silteuses, limons et sables limoneux hydroéoliens mêlés aux dépôts à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène supérieur terminal
Ps_{12} : Limons et argiles gypseux hydroéoliens QH : Sables, limons et argiles holocènes à actuels Sebkha Chevauchement Faille vue Faille supposée Décrochement supposé Village

Fig. 61 : Les formations géologiques superficielles du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil : Prédominance des terrains récents, meubles et hétérogènes
***Sources** : Cartes géologiques de Sebkha al Kalbiyya, Sidi al Hani et Sidi Bou Ali au 1/50000 ; Images SPOT de 1996 et 2000 ; Clichés aériens missions 88 Tu 828 et 829 ; Travaux de terrain*

Des assises d'argiles et des conglomérats s'intercalent dans la masse. Ces formations composent les petits reliefs triangulaires des bordures occidentales d'al Kalbiyya. Localement, elles sont recouvertes en concordance par le Quaternaire encroûté et plissé. A Dhra Choukouf-Khsham al Kalb, des argiles gypseuses alternent avec des sables limoneux lités. Vers l'est, le Mio-Pliocène passe sous les alluvions quaternaires de la cuvette et constitue le substrat de la sebkha (Amari et Bédir, 1989).

I-2-2- Les formations mio-pliocènes des collines de Qal'a al Kbira-al Bal'oum et de Kroussiyya

Le Mio-pliocène (la formation Ségui) n'affleure que localement au sud-est et dans la partie est du versant septentrional de la crête de Qal'a al Kbira, là où la croûte calcaire est démantelée. Des sables et des limons oxydés, localement gréseux et des argiles parfois gypseuses apparaissent dans les fonds de vallées et à la faveur des carrières (Fig. 61.3). Dans le fond de l'oued Lahmar-Ghuirga, des argileuses rubéfiées et riches en gypse deviennent plus fréquentes. Dans le cours moyen de l'oued Lahmar, le dépôt épais de 2,5 m est distinctif. Il s'agit peut-être du Missinien (Fig. 61.4). Des grés graveleux et cailloutis, des galets et des sables grossiers rubigineux, succèdent à des argiles gypseuses. Localement, des lits de sables ferrugineux développés parfois sous forme de lentilles plus ou moins épaisses, coiffent les argiles (Fig. 61.5).

I-2-3- Les formations pontiennes et astiennes des collines de Sidi Bou Ali et de Hirgla

Aux alentours de Halq al Minjil, des couches continentales pontiennes viennent au-dessous des dépôts marins ou lagunaires astiens (Castany, 1952a ; Barrot. 1972, Mahmoudi, 1986 ; Tagorti, 1990). Il s'agit des sables et des limons oxydés, parfois grésifiés, épais de 2,5 à 4 m (Fig. 66.6). Ils montrent l'intercalation des lignites et des argiles d'épaisseur centimétrique. Viennent ensuite les argiles astiennes, marines ou lagunaires, décimétriques et à forte concentration des concrétions calcaires blanches et des fibres végétales noires. Localement, il apparait des bancs décimétriques de silts gréso-carbonatés emballant des galets calcaires. Toutes les formations sont coiffées par une croûte calcaire saumonée.

******

En résumé, les affleurements géologiques sont jeunes, peu étendus et réduits à l'Oligo-Néogène. Les formations d'âge mio-pliocène dominent. Les contrastes lithologiques sont limités. Une prédominance sablo-argileuse forme le substratum. Trois binômes se dégagent à l'ouest entre (1) les grés et les argiles oligocènes, (2) les calcaires gréseux Langhiens et les argiles du Langhien-Serravalien et (3) les grés serravaliens et les argiles gréseuses et les argiles du Serravallien-Tortonien

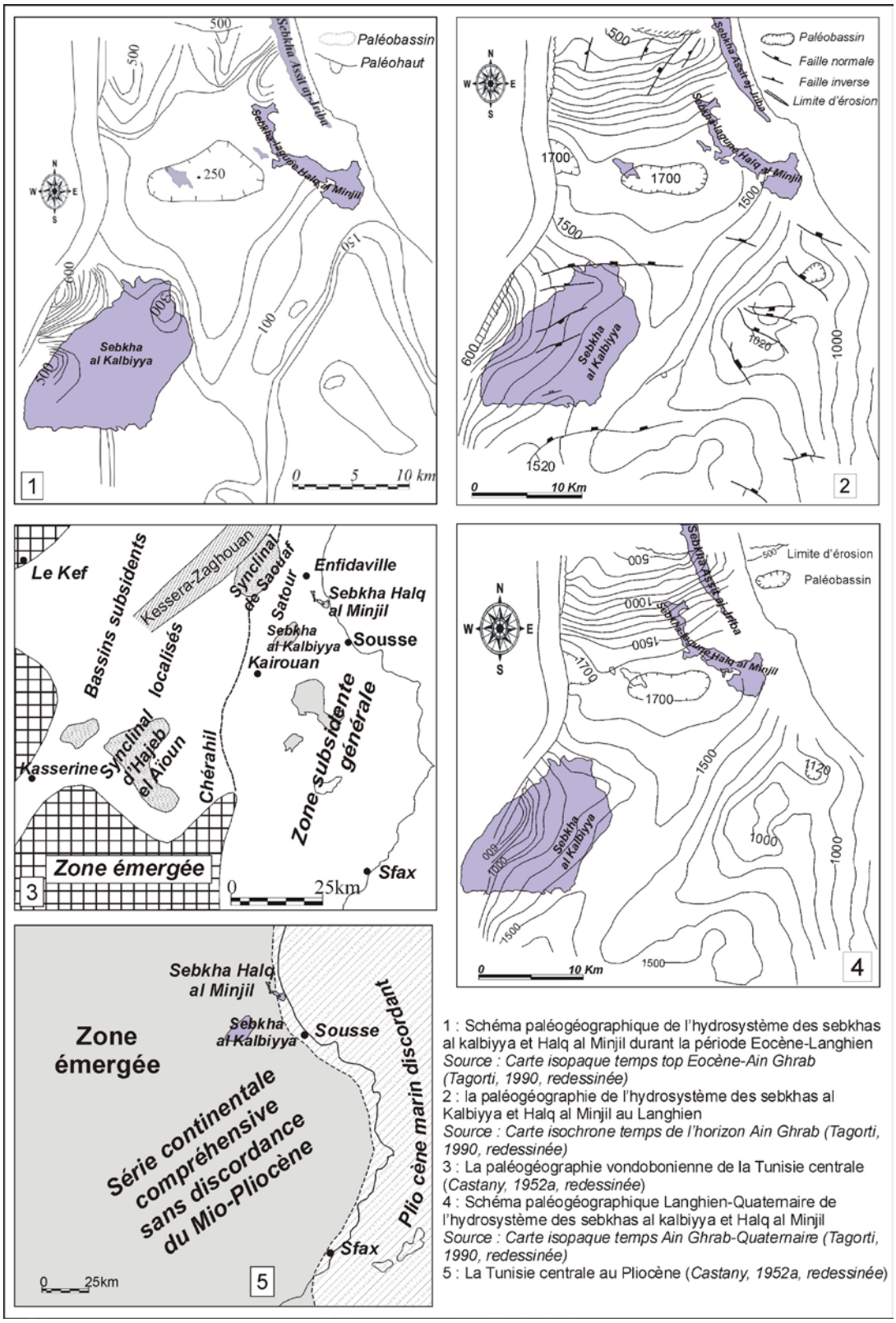
I-3- Paléogéographie, orogenèse et étapes de Structuration de l'hydrosystème

Les données conjuguées de la paléogéographie, de l'orogenèse et de la paléofracturation profonde permettent de dégager les principales phases de la structuration du système fluvial et de l'hydrosystème en général. L'histoire géologique de la région se confond avec celle de la Tunisie orientale (Castany, 1947a, 1947b, 1952a ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990 ;).

I-3-1- La phase pré-orogénique du Nummulitique supérieur

Le faciès à faune abondante de base exprime une paléogéographie oligocène de plateforme transgressée par une mer peu profonde (Castany, 1952). Après, les argiles gypseuses, les grès et les sables rubéfiés expliquent une régression à la fin du cycle nummulitique et la formation des reliefs éloignés qui alimentent, en dépôts détritiques,

l'hydrosystème en voie d'affaissement (Castany, 1947b et 1952a). Durant cette période, le diastrophisme est peu intense (Castany, 1952a). Des fractures est-ouest ont affecté les terrains paléogènes et crétacés profonds. Elles sont à l'origine de l'affaissement de la partie la plus à l'est, prévenant l'aire déprimée de l'hydrosystème (Fig. 62.1 ; Tagorti, 1990).



1 : Schéma paléogéographique de l'hydrosystème des sebkhas al kalbiyya et Halq al Minjil durant la période Eocène-Langhien
Source : Carte isopaque temps top Eocène-Ain Ghrab (Tagorti, 1990, redessinée)
2 : la paléogéographie de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil au Langhien
Source : Carte isochrone temps de l'horizon Ain Ghrab (Tagorti, 1990, redessinée)
3 : La paléogéographie vondobonienne de la Tunisie centrale (*Castany, 1952a, redessinée*)
4 : Schéma paléogéographique Langhien-Quaternaire de l'hydrosystème des sebkhas al kalbiyya et Halq al Minjil
Source : Carte isopaque temps Ain Ghrab-Quaternaire (Tagorti, 1990, redessinée)
5 : La Tunisie centrale au Pliocène (*Castany, 1952a, redessinée*)

Fig. 62 : Histoire paléogéographique Eocène-Pliocène de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil (D'après Castany, 1952a et Tagorti, 1990)

I-3-2- La phase aquitanienne : une orogenèse a complètement modifié les structures antérieures

La phase aquitanienne est caractérisée par un diastrophisme intense. C'est la phase de plissement atlasique actif qui a donné à l'Atlas tunisien son cadre définitif (Castany, 1952a). Les plis SW-NE apparaissent et de nombreux bassins fragmentés et des cuvettes synclinales s'individualisent (Tagorti, 1990). Toute la Tunisie orientale est affectée d'un mouvement de subsidence le long d'une ligne Zaghouan-Batène-Cherahil-Nara, à la faveur d'une grande flexure sub-méridienne. Celle-ci est aujourd'hui à l'origine des grandes fractures observées dans la région (Castany, 1947b, 1952a).

L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, émergé, a connu une sédimentation détritique intense. Des déformations anté-burdigaliennes de faibles rayons l'ont affecté, donnant lieu à une surface ondulée et subsidente. Elles expliquent la lacune du Burdigalien et l'apparition de discordance sur Dhra as-Satour (Castany, 1952a).

I-3-3- La phase miocène marine : une subsidence accentuée annonçant l'installation des aires déprimées au Vindobonien

Au Vindobonien, les calcaires gréseux, les argiles et le grès signent le retour de la mer sur la plateforme ondulée et subsidente. Un épaississement progressif de la formation Aïn Ghrab est enregistré dans la partie nord et est de l'hydrosystème (Tagorti, 1990).

Le rôle conjugué d'une fracturation de bord à vergence nord et ouest et de la subsidence, est à l'origine de l'installation des aires déprimées accueillant les sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. **Depuis le Langhien, l'emplacement actuel de Halq al Minjil et le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar ont occupé une paléostructure synclinale subsidente** qui se retrouve de 1500 à 1700 m de profondeur (Fig. 62.2 et 3). Elle est limitée au sud par des failles normales est-ouest, à l'ouest par l'axe fracturé d'as-Satour et à l'est par les accidents environ N160 (Tagorti, 1990). Ceci explique l'épaississement des niveaux mio-pliocènes, détectés dans les courbes isopaques du Tertiaire en subsurface (Fig. 62.4) ainsi que l'exhaussement de la partie ouest et nord ouest de l'hydrosystème en lien avec la flexure subméridienne de Dhra as-Satour (Tagorti, 1990).

I-3-4- La phase majeure de plissement mio-plio-quaternaire et l'établissement de l'hydrosystème

Au début de Missinien, une émersion générale s'est produite, la côte exceptée, avec régression marine correspondant au Mio-pliocène. La transgression marine pliocène s'était localisée à proximité de la côte actuelle (Fig. 62.5). Le complexe détritique provient du démantèlement de la Dorsale et ses avant-monts (Castany, 1947 et 1952). Dans la partie est de l'hydrosystème, les apports détritiques sont moins grossiers. Ceci est en rapport avec l'origine lointaine de la matière et la subsidence générale signalée au cours du Miocène moyen. Mais, des mouvements positifs ont interrompu cette subsidence. Ils expliquent l'épaisseur réduite de Miocène au sud-est de l'hydrosystème, en direction de Sousse (Castany, 1947b et 1952a).

Au Mio-Pliocène, les plis, esquissés par les mouvements aquitaniens et précisés au Vindobonien, s'amplifient et s'élèvent. C'est **la phase maxima de plissement** de l'Atlas tunisien. Elle s'est poursuivie durant le Pléistocène inférieur, dans un contexte décrochant de compression, **donnant naissance aux plis et à la gouttière synclinale de l'hydrosystème** (Castany, 1952a ; Burollet, 1956 ; Amari et Bédir, 1989).

*****

Pour résumer, deux stades de sédimentation et de mouvements orogéniques sont relayés et ont parfois interféré. **La fracturation et la subsidence ont influé, depuis le Miocène inférieur, la géologie de l'hydrosystème**. Ils ont prévenu la création des aires déprimées accueillant le complexe endoréique et lagunaire des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. Ces deux facteurs vont également contrôler la morphostructure quaternaire de l'hydrosystème, la genèse et le façonnement des sebkhas et leur système fluvial.

I-4- Le rôle de la tectonique pléistocène dans le façonnement de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

Le rôle d'une tectonique pléistocène dans la structuration de la plateforme sahélienne est admis (Castany, 1952a ; Kamoun *et al.*, 1980 ; Kamoun, 1981a, 1981b ; Martinez et Paskoff, 1984 ; Bédir, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1990 ; Tagorti, 1990). Dans l'hydrosystème, les arguments de terrain (pli, décrochements,) et les indices indirects (ruptures de pente, tracés préférentiels des talwegs,…) de cette tectonique sont nombreux.

I-4-1- Les régimes tectoniques pléistocènes : ampleur et manifestations associées

Aussi bien dans le Sahel tunisien que dans l'hydrosystème, la **tectonique pléistocène plissée et cassante s'est exprimée par deux régimes décrochants** : compressif pour l'un et distendit pour l'autre (Coque, 1962 ; Jauzein, 1967 ; Martinez et Paskoff, 1984 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990).

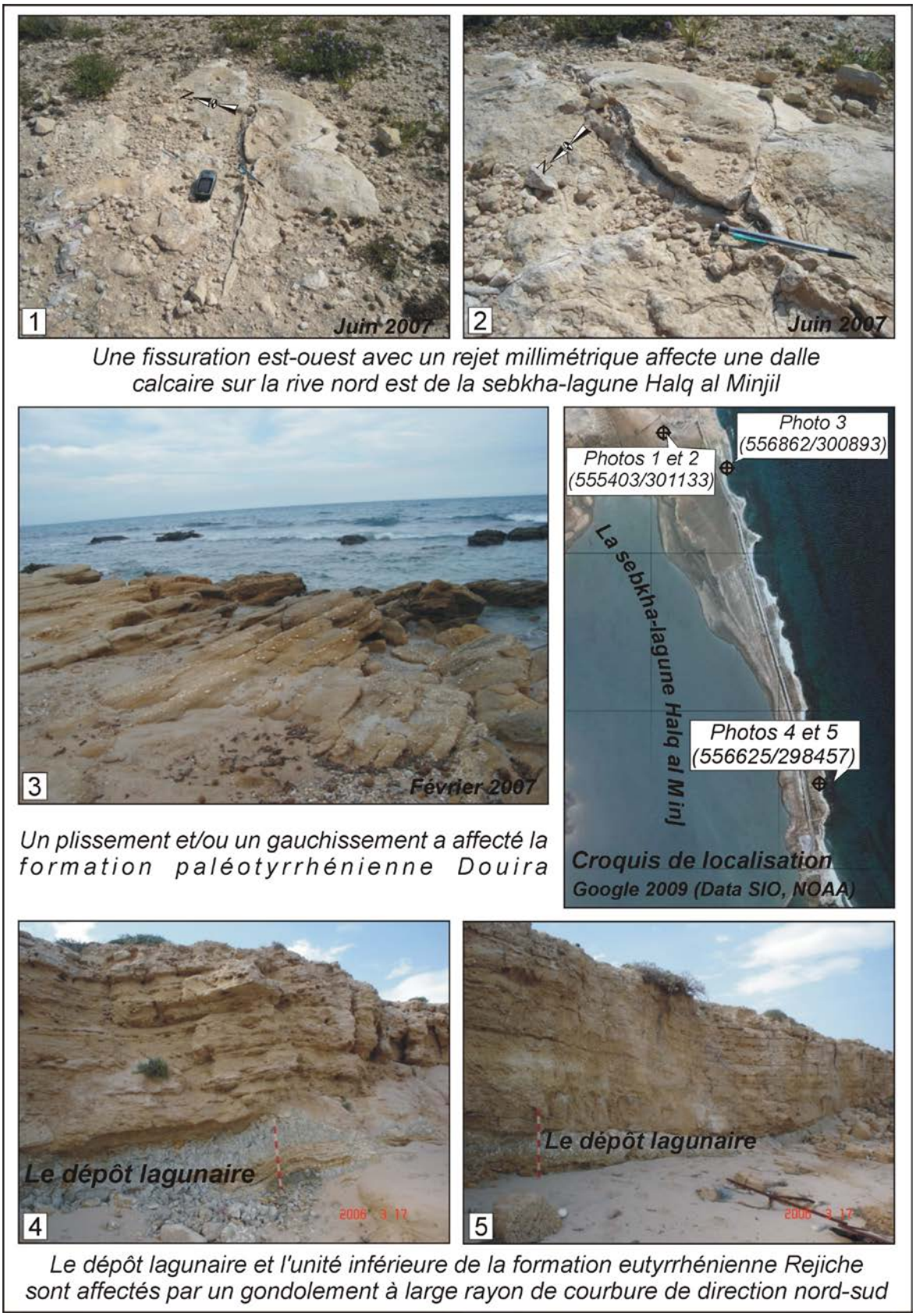
I-4-1-1- Le régime compressif décrochant dit « post-villafranchien »

La phase ultime de plissement plio-quaternaire s'est terminée avec le Quaternaire ancien (Castany, 1947b, 1952a ; Amari et Bédir, 1989). Le Pléistocène inférieur est marqué par des plissements dans un régime décrochant de compression, associé à un rejeu de failles anciennes et à des mouvements de failles décrochantes (Amari et Bédir, 1989). Dans l'hydrosystème, **la série continentale est plissée dans son ensemble sans discontinuité orogénique**, y compris les dépôts anciens à nodules et à concrétions calcaires et les croûtes calcaires du Pléistocène inférieur à moyen. **Ces dépôts**, là où ils affleurent, **dessinent de vastes bombements à grand rayon de courbure**. **Les dalles calcaires portent les signes d'un système de fissuration complexe**. Elles montrent deux principales orientations sud-sud-ouest/nord-nord-est à subméridienne et est-ouest (Pl. 2.1 et 2.2). Des rejets millimétriques à centimétriques ont été observés. Ce système de fissuration, rapporté un peu partout dans le Sahel tunisien (Castany, 1952a ; Burollet, 1956 ; Jauzein, 1967 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990), découle d'une action de réajustement post-tectonique (Castany, 1952a) et/ou d'un rejeu de failles anciennes (Amari et Bédir, 1989). Il résulte aussi des décrochements marqués par la prédominance des cisaillements horizontaux le plus souvent sénestres et à faibles rejets de 1 à 10 cm au maximum (Tagorti, 1990).

I-4-1-2- Le régime distensif décrochant du Tyrrhénien

Depuis le Quaternaire moyen, le Sahel tunisien est soumis, en phase de relaxation, à **un régime de décrochement distensif** (Martinez et Paskoff, 1984). L'enregistrement tectonique de cette phase de contraintes est **marqué clairement dans les dépôts tyrrhéniens de la section littorale de Hirgla**. Au pied de la pointe rocheuse, qui limite vers le nord le premier paléograu septentrional, le premier dépôt marin de la formation Rejiche repose en discordance angulaire sur les grés paléotyrrhéniens (Pl. 2.3). Une phase de plissement et/ou de gauchissement a affecté la formation Douira dans l'intervalle du temps qui la sépare des formations postérieures. Localement, sur les coupes révélées par la falaise, l'unité marine et dunaire inférieure de la formation Rejiche ainsi que le dépôt lagunaire sus-jacent sont affectés par un gondolement à large rayon de courbure (Pl. 2.4 et 2.5). Dans cette

unité, des diaclases orientées nord-sud à sud-sud-ouest/nord-nord-est sont nombreuses (Tagorti, 1990, Oueslati, 1993).



Pl. 2 : Manifestations tectoniques pléistocènes associées aux régimes décrochants compressifs et distensifs

Cette phase distensive a repris le réseau des failles héritées du « post-villafranchien » et a commandé l'association des jeux sénestres N00-20 et N160-180 et dextres N80-90. Elle a été responsable **des failles subméridiennes et des décrochements normaux dextres affectant la gouttière synclinale d'al Kalbiyya-Hirgla**. Ces accidents limitent les bordures des dépressions d'al Kalbiyya et de Halq al Minjil et aboutissent à une subsidence locale (Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990).

I-4-2- Les tracés préférentiels des axes d'écoulement, les anomalies de drainage et les ruptures de pentes : indices d'un tectonolinéament pléistocène probable

Dans le système fluvial, les principaux oueds présentent **des talwegs rectilignes et des tracés souvent orientés sud-est/nord-ouest à subméridienne et est-ouest**. Ils montrent parfois une certaine régularité d'intervalles bien visible (Fig. 63). **Ces directions préférentielles témoignent d'une incidence indirecte de tectonolinéaments**. **Elles coïncident même partiellement aux plans de linéaments et de failles**, établi par les géologiques et les géomorphologues dans la région (Lamti, 1988 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990 ; Karray, 1990c ; Boujelben, 2002).

Sur la rive est de la sebkha al Kalbiyya, **le cours amont de l'oued Lahmar montre une brusque déviation de tracé**. Dirigé nord-sud sur une longueur de 2 km, le cours change de direction suivant un angle droit vers l'ouest, **sans doute en rapport avec une anomalie géologique (lithologique et/ou structurale)**.

En dépit de la faible énergie du relief, des ruptures de pentes rectilignes et marquantes assurent la transition rapide des bas versants aux plaines. Les plus notables sont celles qui longent les pieds des collines de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum et Laghmas-ash-Shraif. **Ces ruptures sont probablement associées à des tectonolinéaments**. Une faille normale probable longe le pied des Dhras laghmas-ash-Shraif (Haller, 1983, *in* Karray, 1993). Au sud-ouest d'al Kalbiyya et précisément **au niveau du raccordement des oueds al Alem et al Atf, les directions et les figures complexes des drains** sont régies par la planéité topographique et **suggèrent un contrôle tectonique**. Ceci est d'autant plus possible, qu'à ce niveau, les données de subsurface montrent un nœud tectonique où s'entrecoupent les accidents de premier ordre : nord-sud de Dhra as-Satour et ENE-SSW du couloir Kairouan-Hirgla (Bédir, 1995 ; Lamti, 1988).

I-5- Structures et relief morphostructural: témoins d'une tectonique de faible intensité et d'un substrat homogène

La faible énergie de la topographie, l'hétérogénéité relative de la lithologie et l'intensité limitée des mouvements orogéniques ont donné au système fluvial un simple cachet morphostructural (Fig. 64). Les binômes géologiques font presque défaut. Les alternances de couches d'inégale résistance se développent sauf entre les croûtes calcaires quaternaires et les sables et les argiles mio-pliocènes et/ou les sables et les limons du Pléistocène ancien.

I-5-1- Les anticlinaux de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum et de Kroussiyya-Sidi al Hani

On distingue deux plis bordiers, composés du Mio-Pliocène continental. **Le premier pli** est celui de **l'anticlinal de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum**. Il est ample, déjeté vers le nord et orienté ouest-sud-ouest/nord-nord-est. Sur le flanc septentrional, les croûtes calcaires sont démantelées.

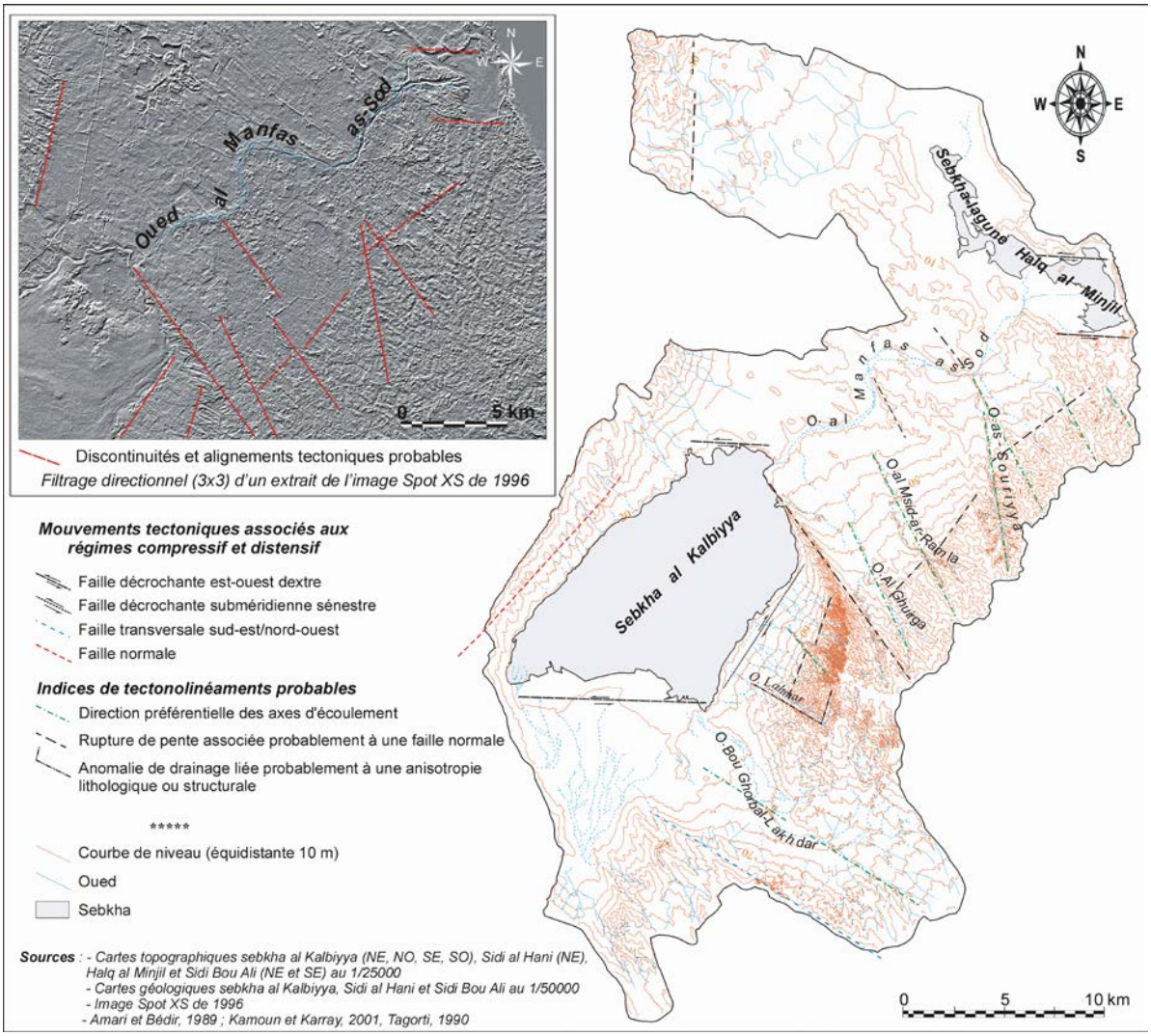


Fig. 63 : Accidents tectoniques et indices des tectonolinéaments pléistocènes dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

Des « **pseudo-chevrons** » se dégagent à la faveur de la superposition des croûtes sur les sables et les argiles mio-pliocènes ou les limons et les sables à nodules et concrétions calcaires pléistocènes. Les ruz empruntent les principaux affluents de l'oued al Manfas as-Sod. Entre le sommet du pli encroûté et les pseudo-chevrons, le travail de ces ruz a donné lieu à une dépression monoclinale qui peut correspondre à une « **pseudo-demi-combe de flanc** ».

Le second pli est celui de **l'anticlinal de Kroussiyya-Sidi al Hani**. Il est séparé du pli précédent par le synclinal de l'oued Laya-Hammam. Il est orienté ouest-sud-ouest/nord-nord-est. Il est légèrement déversé vers le sud-est. **Le flanc méridional est affecté par une fracture est-ouest** qui concrétise en subsurface une faille normale (Amari et Bédir, 1989). Au milieu, l'anticlinal est tranché par une faille transversale sud-est/nord-ouest responsable du léger basculement de la partie ouest du pli (Kamoun et Karray, 2001).

I-5-2- La structure monoclinale de Dhra as-Satour

L'alignement de Dhra as-Souatir représente une structure monoclinale, exprimée par un jeu de faille, normale N25 (Castany, 1952a ; Amari et Bédir, 1989). Le flanc occidental est effondré sous le Quaternaire de la plaine de Ktifa-Metbasta. Sur le flanc oriental, **une distension a favorisé l'installation de la sebkha al Kalbiyya**. L'Oligocène et

le Langhien apparaissent sous la forme d'un **hog-back**. En contrebas, se dessine un **couloir monoclinal** étroit, façonné dans les formations Mahmoud, Béglia et Saouf, recouvertes par les dépôts pléistocènes. La structure est affectée par une série de failles décrochantes, dirigées est-ouest. Au centre-ouest d'al Kalbiyya, des ruz (oueds an-Nakhlat, Sidi Ahmed) ont façonné des **chevrons et des « pseudo-chevrons** », modelés dans les grés pliocènes et les argiles vindoboniennes ou dans les croûtes pléistocènes et le complexe mio-pliocène.

I-5-3- La gouttière synclinale d'al Kalbiyya-Hirgla

Entre les anticlinaux orientaux et le monoclinal occidental, s'interpose la gouttière synclinale d'al Kalbiyya-Hirgla. Elle appartient au vaste sillon mio-plio-quaternaire reliant la plaine kairouanaise au golfe de Hammamet (Castany, 1952a ; Karray, 1993). L'analyse des fracturations de surface et de subsurface, a révélé un jeu combiné des accidents normaux à vergence est et ouest avec des failles décrochantes est-ouest dextres et subméridiennes sénestres (Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990).

Ce système de failles a concrétisé en surface les limites d'al Kalbiyya et de Halq al Minjil. Il a découpé la gouttière en trois compartiments. **Du sud-ouest au nord-est, se succèdent la cuvette subsidente d'al Kalbiyya, le plateau exhaussé de Sidi Bou Ali-Kandar et la cuvette subsidente de Halq al Minjil**. L'épaisse sédimentation quaternaire, particulièrement dans les cuvettes, a estompé les rejets de failles. Le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar se présente sous la forme d'un compartiment de **val encroûté et exhaussé**.

I-5-4- Le pli anticlinal de l'extrême nord-ouest de l'hydrosystème

Un petit anticlinal méridien, serré et légèrement déjeté vers l'est, marque l'extrême nord-est de l'hydrosystème. Le flanc occidental est tranché par un réseau de failles transversales. La faille normale N25, ayant affecté Dhra as-Satour au sud, complique ici la morphologie du relief. L'érosion a pu exploiter la voûte calcaire gréseuse langhienne et a permis le dégagement d'une **combe étroite**. A l'est et au sud, la combe est cernée par **le crêt de Satour al Gharfa** qui s'est modelé dans les calcaires gréseux de la formation Aïn Ghrab. A l'ouest, les crêts sont découpés en panneaux.

****

Pour récapituler, le paroxysme tectonique mio-plio-quaternaire a offert à l'hydrosystème une **structure simple et récente**. Le relief est conforme. L'érosion a suffisamment profité de la faible résistance des couches, mais les formes structurales sont peu nombreuses. Exception faite à l'ouest, ces formes se dégagent à la faveur des « faux binômes », là où les croûtes calcaires quaternaires scellent les formations meubles mio-pliocènes et/ou pléistocènes.

II- LES HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES : DISPOSITIFS MORPHO-SEDIMENTOLOGIQUES ET CHRONOSTRATIGRAPHIE

La morphologie dissymétrique du système fluvial, les caractéristiques géologiques et l'organisation hydrographique sont responsables d'une différence d'ampleur et de diversité du modelé pléistocène. Deux générations de croûtes calcaires et trois formations détritiques à nodules et à concrétions calcaires, marquent principalement les rives méridionales et orientales des bassins d'al Kalbiyya, l'oued al Manfas as-Sod et Halq al Minjil.

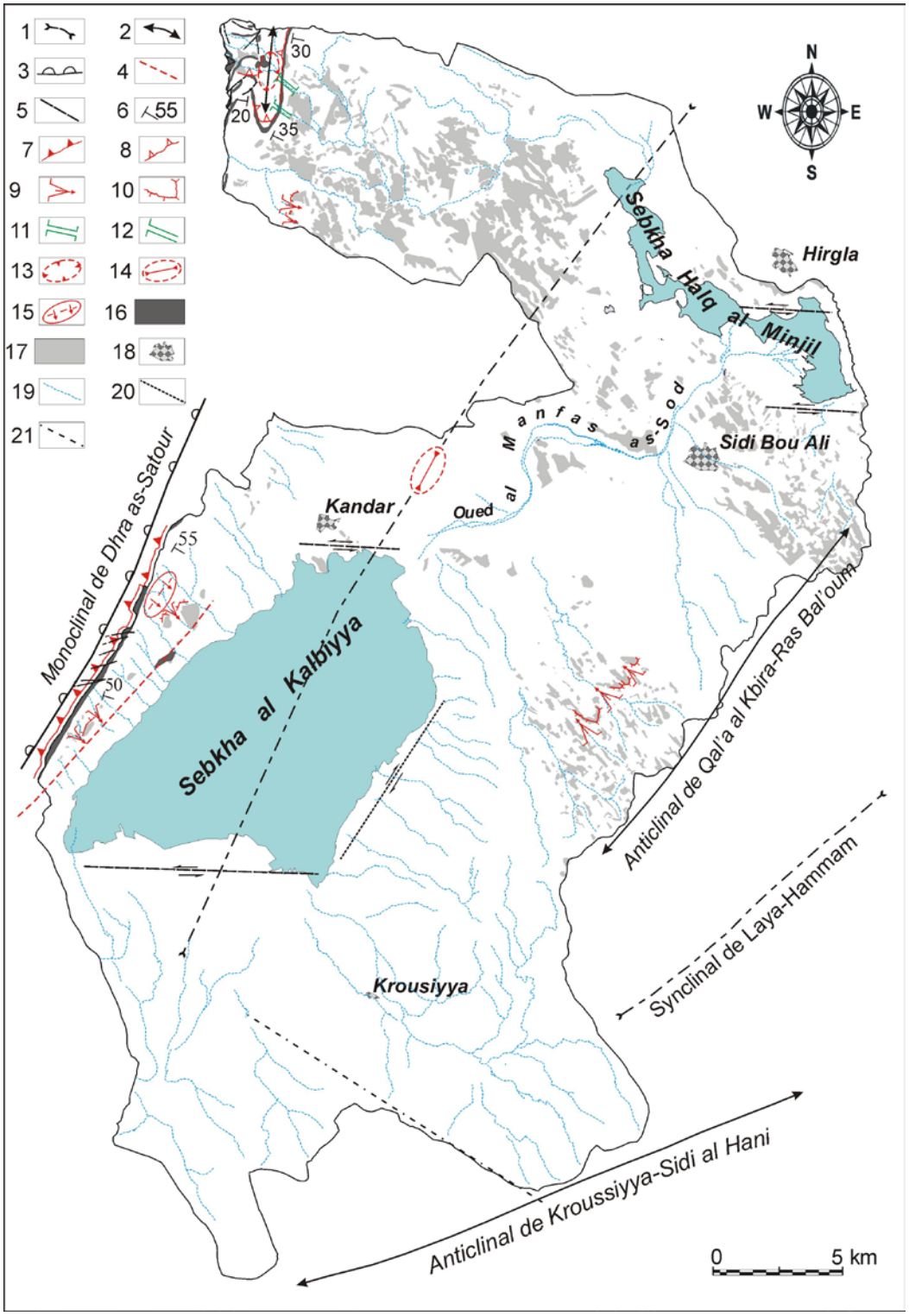


Fig. 64 : Structure et relief morphostructural de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

***Sources** : Cartes géologiques de Sidi Bou Ali, al Kalbiyya et Sidi al Hani (n° 49, 56 et 72) ; Amari et Bédir, 1989 ; Kamoun et Karray, 2001, Tagorti, 1990.*

***Légende** :* 1 : Gouttière synclinale ; 2 : Pli anticlinal ; 3 : Chevauchement ; 4 : Faille normale ; 5 : Faille décrochante est-ouest dextre ; 6 : direction et valeur de pendage ; 7 : Hog-back ; 8 : Crêt ; 9 : Ruz ; 10 : Pseudo-chevron ; 11 : Cluse ; 12 : Demi-cluse ; 13 : Combe ; 14 : Val ; 15 : Couloir monoclinal ; 16 : Surface substructurale dégagée dans les calcaires et les grès néogènes ; 17 ; Pseudo-surface substructurale dégagée dans les croûtes pléistocènes ; 18 : Village ; 19 : Cours d'eau ; 20 : Faille décrochante subméridienne sénestre ; 21 : Faille transversale sud-est/nord-ouest

II-1- La première génération de dépôt détritique à nodules et à concrétions calcaires (QP1)

II-1-1- Répartition spatiale et caractéristiques morpho-sédimentologiques

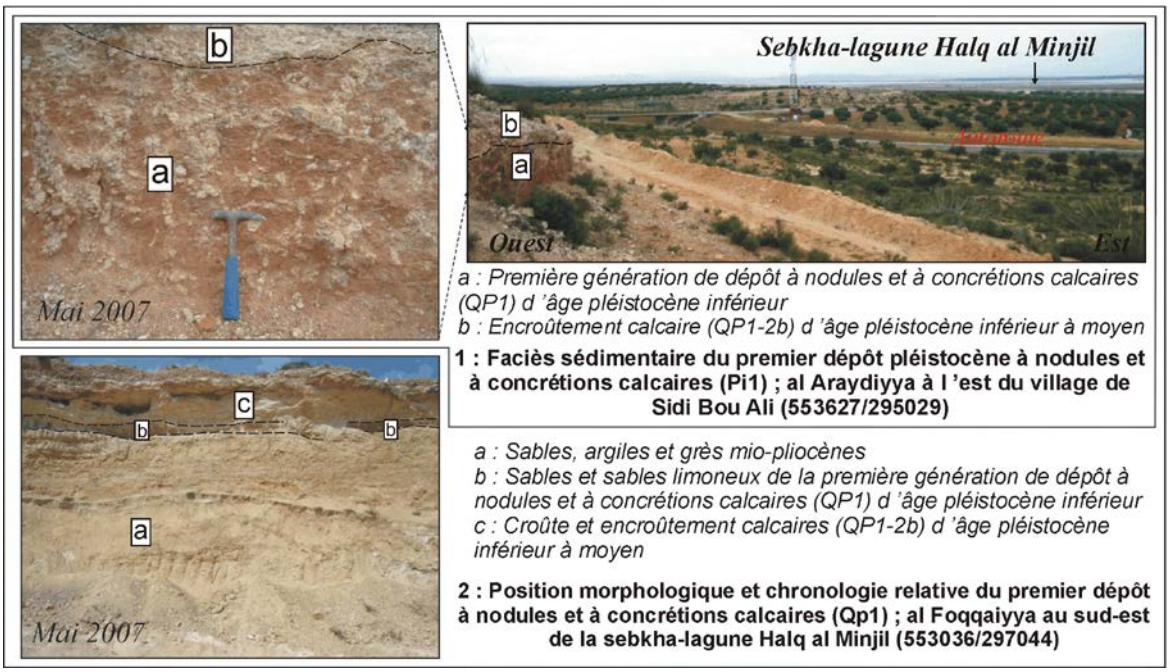
Une première génération de dépôt à nodules et à concrétions calcaires est observée localement sur le versant septentrional de la crête de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum et dans les collines à l'est du village de Sidi Bou Ali. Elle est souvent scellée par un niveau de croûte et d'encroûtement calcaires. Le dépôt est composé de **sables grossiers et de sables limoneux parfois compacts**. Il est de couleur rouge (10Y 5/8), modérément calcaire et très bien trié. Il est caractérisé par une forte concentration de nodules et de concrétions calcaires. La structure est horizontale ou faiblement inclinée. Des tubules calcaires de tailles centimétriques (2-7 cm) se dispersent dans le sédiment. L'épaisseur moyenne apparente est de **130 cm** (Pl. 3.1).

II-1-2- Chronologie, signification morphodynamique et paléoenvironnementale

Les sables grossiers rubéfiés traduisent le démantèlement du substrat mio-pliocène et des apports longitudinaux et/ou latéraux notables. Les nodules et les concrétions calcaires expliquent des phénomènes de remaniement de surface. Ils peuvent aussi avoir une origine physico-chimique (dégazage de CO_2) et biochimique *in situ* (Adam, 2003 ; Ducassou, 2003). Ils indiquent la mise en œuvre des processus du transfert et de redistribution des calcaires dans un milieu soumis à un rabattement d'une nappe proche dans un contexte d'alternance de périodes chaudes et humides (Cojan et Renard, 1999 ; Regaya**,** 1992, 2000 ; Schütt, 2000 ; Abichou, 2002). Le dépôt rouge tranche avec les argiles brunes et les sables jaunes mio-pliocènes sous-jacents. Sa position morphologique affirme son antériorité par apport aux croûtes et encroûtements calcaires du Pléistocène inférieur à moyen (Boujarra et Gammar, 1993 ; Karray, 1993). **Un âge pléistocène inférieur est probable** (Pl. 3.2).

II-2- Les croûtes et les encroûtements calcaires

Les croûtes et les encroûtements calcaires sont les seules formations quartenaires dures qui forment l'ossature du système fluvial. Deux générations ont pu être distinguées.



Pl. 3 : Faciès sédimentaire et chronostratigraphie de la première génération de dépôt pléistocène à nodules et à concrétions calcaires (QP1)

II-2-1- Les croûtes et les encroûtements calcaires du Pléistocène ancien à moyen (QP1-2)

II-2-1-1- Répartition spatiale

Des encroûtements calcaires et une croûte en dalle ou feuilletée affleurent sur des larges étendues du plateau de Sidi Bou Ali-Kandar. Elles sont localement observées sur les rives sud et sud-ouest de la sebkha-lagune Halq al Minjil. Sur les collines de Qal'a al Kbira, une croûte démantelée prend la forme de lanières chapotant les sommets d'interfluves ou encore une forme triangulaire à sommet orienté vers l'amont pendage. Dans les plaines, cette croûte n'apparait que localement (fond du cours aval des oueds ar-Ramla et Lahmar-al Ghuirga, Hanshir Awlad Ali,). Elle s'ennoie sous les formations d'âge pléistocène supérieur et holocène. Sur les bordures occidentales d'al Kalbiyya, la croûte biseautant les niveaux mio-pliocènes, apparaît en vestiges exigus. A Sidi Ahmid et Bir aj-Jdid, elle scelle les premiers versants dominant la sebkha. Elle s'incline vers l'est (10°) et présente une forme triangulaire.

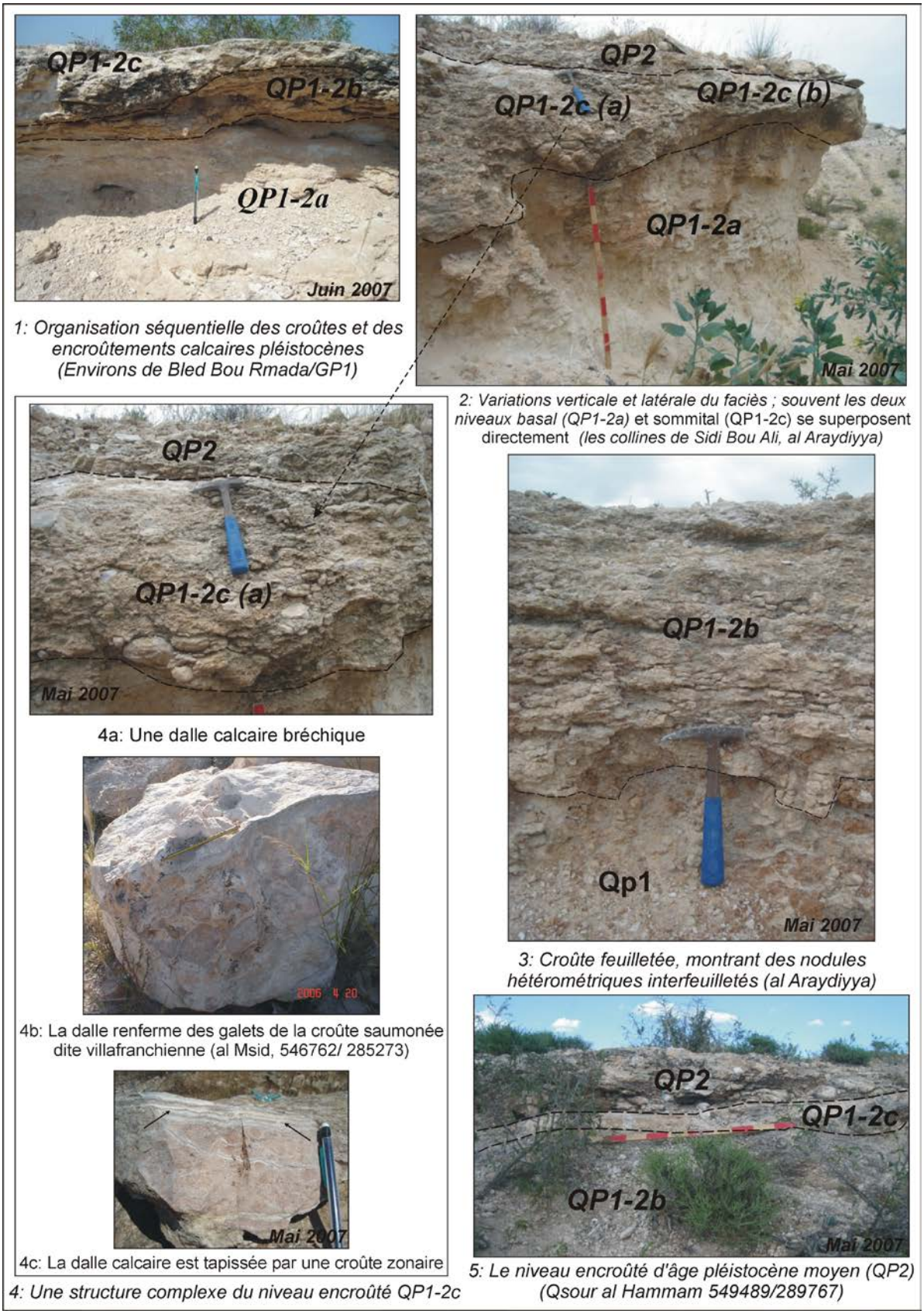
II-2-1-2- Organisation séquentielle, morphologie et faciès sédimentaires

La croûte et les encroûtements calcaires présentent **une organisation au moins en trois niveaux distincts** par leurs états d'induration, leurs structures et textures (Pl. 4.1). Souvent les niveaux basal et sommital se superposent directement (Pl. 4.2).

* **Le niveau basal (QP1-2a)**, d'épaisseur apparente de **1 à 2,1 m**, correspond à **un encroûtement carbonaté** blanc (5YR 8/1). Il présente une matrice pulvérulente riche en amas friables et nodules calcaires centimétriques (Pl. 4.2). Les nodules sont indurés, de couleur blanc (7.5YR 8/0), blanc rosâtre (5YR 8/2) et gris clair (5YR 7/1) et parfois mêlés à des galets d'argiles. Localement, des tubules calcaires verticaux sous forme de chandelles et de colonnes, centimétriques et de couleur blanc (2.5Y 8/0), sont fréquents.

* **Le niveau médian (QP1-2b)** est moins épais (**30-60 cm**). Il se distingue par sa structure feuilletée et sa stratification horizontale ou faiblement ondulée. Il caractérise une **croûte calcaire feuilletée**, plus indurée que le niveau précédent. Localement, elle montre des nodules et des cailloux hétérométriques interfeuilletés (Pl. 4.3). La couleur est blanc rosâtre (5YR 8/2) et gris rosâtre (5YR 7/2). Par endroits, la croûte est découpée en fuseaux ou en queues de poissons, dont les bords sont tapissés par une pellicule rubanée centimétrique.

* **Le niveau supérieur (QP1-2c)** de **15 à 60 cm** d'épaisseur, est une **dalle calcaire** compacte. Elle est de couleur rose (5YR 8/4) à saumon et possède une structure complexe. Sur un même site, les variations latérales du faciès sont remarquables. Une première dalle calcaire est brèchique ou conglomératique (Pl. 4.2 ; QP1-2c, a). Elle renferme des brèches calcaires faiblement usées ou des galets, des cailloux et des graviers calcaires, émoussés et saumonés dans une matrice fine et massive (Pl. 4.4a et 4.4b). Celle-ci est découpée par des fissures anastomosées, secondairement remplies de carbonate. La dalle passe latéralement à une autre dalle massive de boue homogène, saumonée, parfois picotée en noir (Pl. 4.2 ; QP1-2c, b). Elle renferme des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers. Elle porte les marques de fentes de dessiccation et montre des horizons fins et rubéfiés. Au sommet, la dalle est tapissée par une pellicule rubanée centimétrique (5-15 cm), formée d'une alternance de lits fins clairs et sombres (Pl. 4.4c), propres aux croûtes zonaires à structure stromatolitique.



Pl. 4 : Les croûtes et les encroûtements calcaires pléistocènes : faciès et stratigraphie

Sur la rive sud de Halq al Minjil, les croûtes en dalle et feuilletées couronnent un alignement de buttes culminantes de 7 à 24 m (Fig. 65). Ces dernières sont les **vestiges de paléo-surfaces d'érosion et de glacis d'ablation dénudés**, façonnés dans les dépôts mio-pliocènes, probablement au Pléistocène inférieur. En surface, les formations encroûtées montrent une variété de microformes karstiques et témoignent d'une évolution sous l'effet de différents processus de désagrégation mécanique et d'altération (décalcification complexe). Des marmites centimétriques à décimétriques, des discontinuités anastomosées et planaires et une desquamation de la patine carbonatée de la croûte zonaire ont été observées.

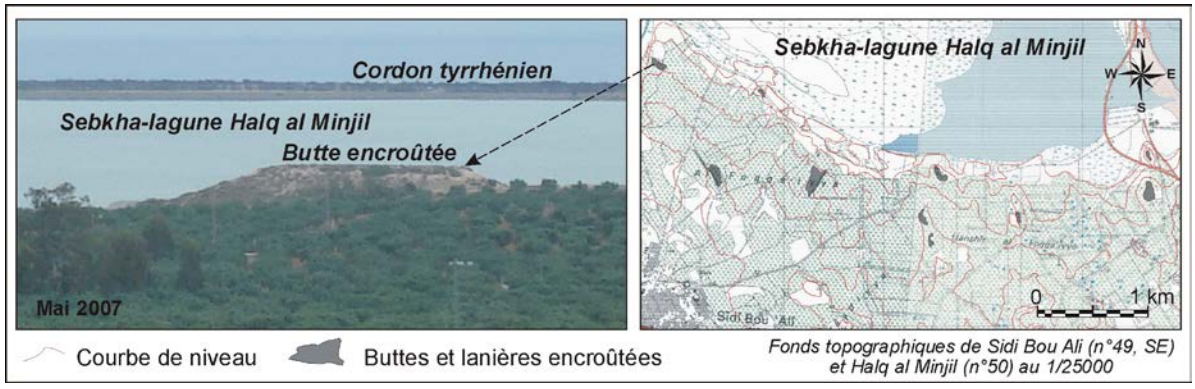


Fig. 65 : Vestiges de glacis d'ablation encroûté déconnecté et réduit à des buttes et des lanières de plus en plus effilées sur les marges méridionales de la sebkha lagune Halq al Minjil

II-2-1-3- Essai d'attribution chronologique

Les croûtes et les encroûtements calcaires viennent parfois en discordance sur les argiles et les sables mio-pliocènes et ravinent les sables rouges du Pléistocène inférieur (QP1). Au sud du village de Hirgla, les dalles calcaires disloquées sont surmontées par les formations tyrrhéniennes. Les galets saumonés dans les dalles témoignent des remaniements sur une croûte saumonée ancienne, dite villafranchienne (Coque, 1962 ; Jauzein, 1967 ; Barrot, 1972 ; Brahim, 2005). Les formations encroutées sont déformées. Elles ont subi la phase compressive anté-tyrrhénienne (Kamoun, 1981 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990). Des sites préhistoriques occupent des surfaces encroûtées à Sidi ad-Dhahir, à Knana et sur les deux rives de la vallée de l'oued al Manfas as-Sod. Au sud-ouest de Halq al Minjil et précisément à Cha'bit Dar Hej, une forte concentration de pièces lithiques atériennes et épipaléolithiques ou néolithiques a été enregistrée (Site SHM-31, 80000-7000 BP ; Mulazzani, 2010 ; Fig. 66). Les données plaident en la faveur d'**un âge pléistocène ancien à moyen des trois niveaux encroûtés** (QP162a-b-c). Ils sont l'équivalent des dalles calcaires des environs de Sousse (Boujarra et Gammar, 1993).

II-2-2- Un niveau encroûté d'âge pléistocène moyen (QP2)

II-2-2-1- Extension et caractéristiques morpho-sédimentologiques

A la confluence des oueds al Msid et Sha'bit al warrad, sur la rive centre-est de Halq al Minjil, à Araydiyya et Qsour al Hammamet (Pl. 3.5), s'étend **un niveau encroûté** distinct des formations calcaires précédentes. Il paraît discontinu, moins résistant et selon les endroits structuré en feuillets, en dalle conglomératique ou brèchique. Il renferme des cailloutis calcaires et des fragments de croûte non à peu usés, dans une matrice sableuse et sablo-limoneuse. Il est de couleur gris clair (5YR 7/1) et gris rosâtre (5YR 7/2) à rose (5YR 7/3). Il est localement couronné par une carapace millimétrique saumonée et montre des fissures verticales et subhorizontales. L'épaisseur est de **20 à 40 cm en moyenne**.

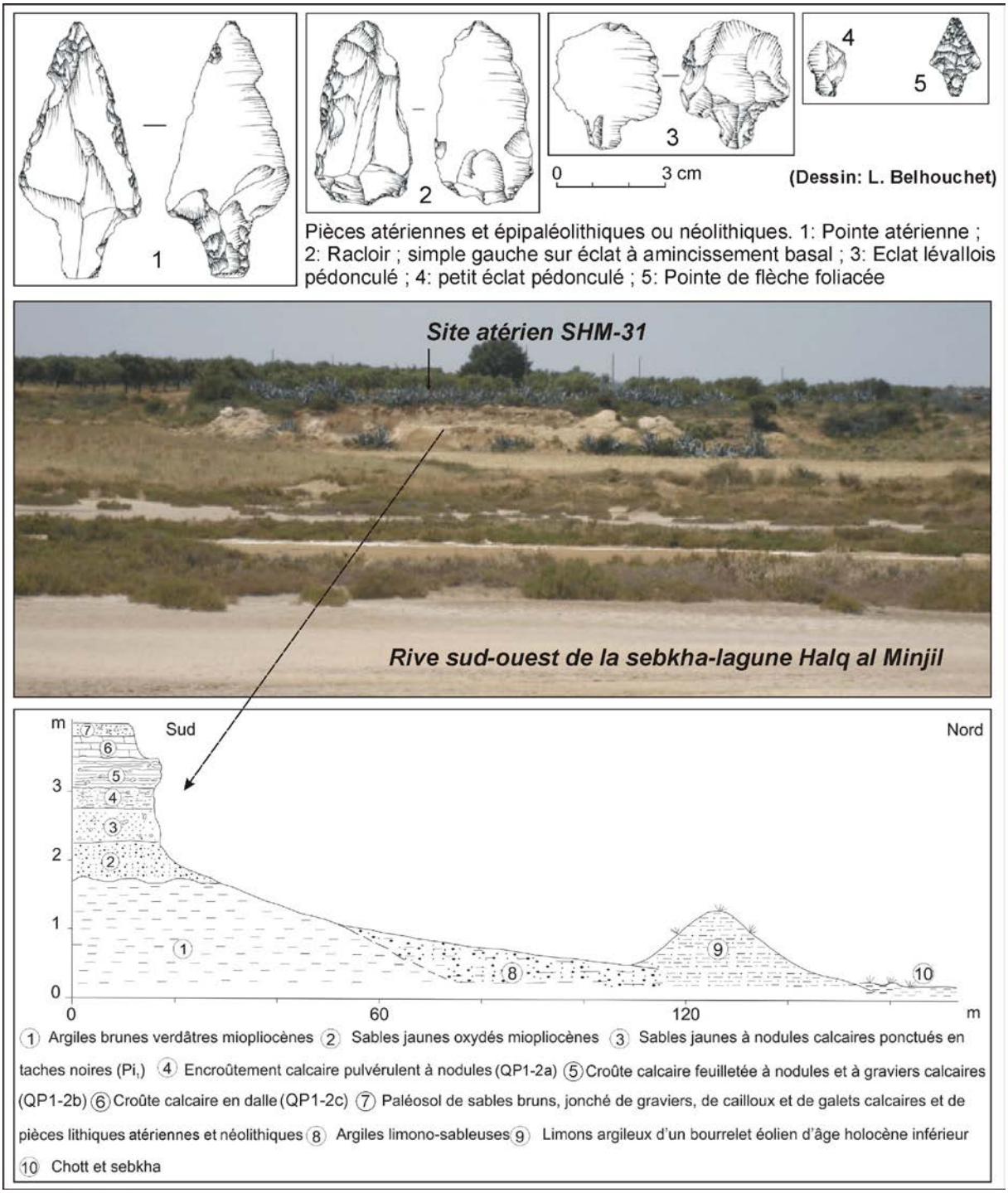


Fig. 66 : Eléments géomorphologique et archéologique pour une attribution chronologique relative des formations encroûtées des bordures sud-est de Halq al Minjil

II-2-2-2- Chronologie relative

Le niveau calcaire QP2 superpose les croûtes et les encroûtements calcaires du Pléistocène inférieur à moyen. Il est l'équivalent du niveau calcaire feuilleté emboîté dans la croûte en dalle des environs de Sousse. Elle est placée **entre le Pléistocène moyen et le Tyrrhénien** (Boujarra et Gammar, 1993).

II-3- Deux nouveaux dépôts à nodules et à concrétions calcaires (QP3e, QP3g): l'enchaînement des processus de nodulation au Pléistocène supérieur

Deux autres dépôts à nodules et à concrétions calcaires, dilatés (plus de 8 m), ont marqué l'évolution géomorphologique du système fluvial au Pléistocène supérieur. Ils sont principalement développés dans les fonds de vallées du bassin de l'oued al Manfas as-Sod.

*II-3-1- Un deuxième dépôt d'extension spatiale réduite (***QP3e***)*

Le deuxième dépôt à nodules et à concrétions calcaires QP3e apparaît sur les versants de la crête de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum avant de s'enfouir sous les formations postérieures. Il forme une nappe alluviale discontinue dans le fond de quelques sections de vallées des oueds al Msid, ar-Ramla et as-Souriyya (Fig. 67.1). L'épaisseur apparente est inférieure à **2,5 m**. Le matériel est **sableux et sablo-limoneux**, de couleur rouge clair (10R 6/8 et 2.5YR 6/8) et jaune rougeâtre (7.5 YR 6/8), bien trié et modérément calcaire (10-12% de $CaCO_3$). Il renferme des tubules carbonatés verticaux et des nodules et des concrétions calcaires sphériques et aplaties (2-4 cm). Des lits caillouteux, épais de 5 à 10 cm, sont parfois observés dans l'accumulation.

*II-3-2- Un troisième dépôt à nodules et à concrétions calcaires (***QP3g***) témoigne d'importantes dynamiques d'aggradation*

Le troisième dépôt à nodules et à concrétions calcaires QP3g forme pratiquement le substrat de toutes les formations holocènes. Il vient sur les croûtes calcaires et ravine les sables et les argiles mio-pliocènes et la formation concrétionnée antérieure (Fig. 67.2). Il gagne en extension sur les plaines de Sidi Bou Ali-Bal'oum et Sidi Bin Jabir, le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar, au pied de Dhra as-Satour et sur les collines de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum et Krousiyya. Il est modelé en **cônes d'épandage et cône-glacis**. Dans les vallées moyennes des oueds as-Souriyya et al Msid, la sédimentation se présente en **nappes alluviales et colluvio-alluviales** épaisses de **30 à plus de 800 cm**. Localement, elle est étalée en forme d'**une terrasse d'accumulation** de largeur et de longueur réduites. Le talus de raccordement, souvent estompé, est d'ordre décimétrique (Fig. 67.3). **Le dépôt est sablo-limoneux**, jaune rougeâtre (7.5YR 7/6) et jaune brunâtre (10 YR 6/6), modérément calcaire et très bien trié. Il renferme des petits nodules et concrétions calcaires arrondies et aplaties. Par endroits, le matériel devient compact. Des lits d'argiles brunes, épais de 5 à 30 cm, s'intercalent dans le dépôt.

II-3-3- Contexte de mise en place et d'évolution post-dépôt

Le système fluvial était le siège d'importantes dynamiques de colluvionnement et d'aggradation et de progradation alluviales. Dans les deux dépôts, la fraction grossière prédomine (plus de 87% de sables). Elle indique la domination des dynamiques relativement actives. Les tubules, les nodules et les concrétions calcaires, appelés chez les fellahs « ***Tafezza*** » (du mot français tufeuse), traduisent des phénomènes de remaniement de surface et/ou une évolution post-dépôt des sédiments. Celle-ci explique la remise en œuvre des processus physico-chimiques et biochimiques de nodulisation et de concrétionnement reconnus au Pléistocène inférieur (QP1), dans un contexte d'alternance des périodes chaudes et subhumides à humides (Cojan et Renard, 1999 ; Regaya**,** 1992, 2000 ; Schütt, 2000 ; Abichou, 2002).

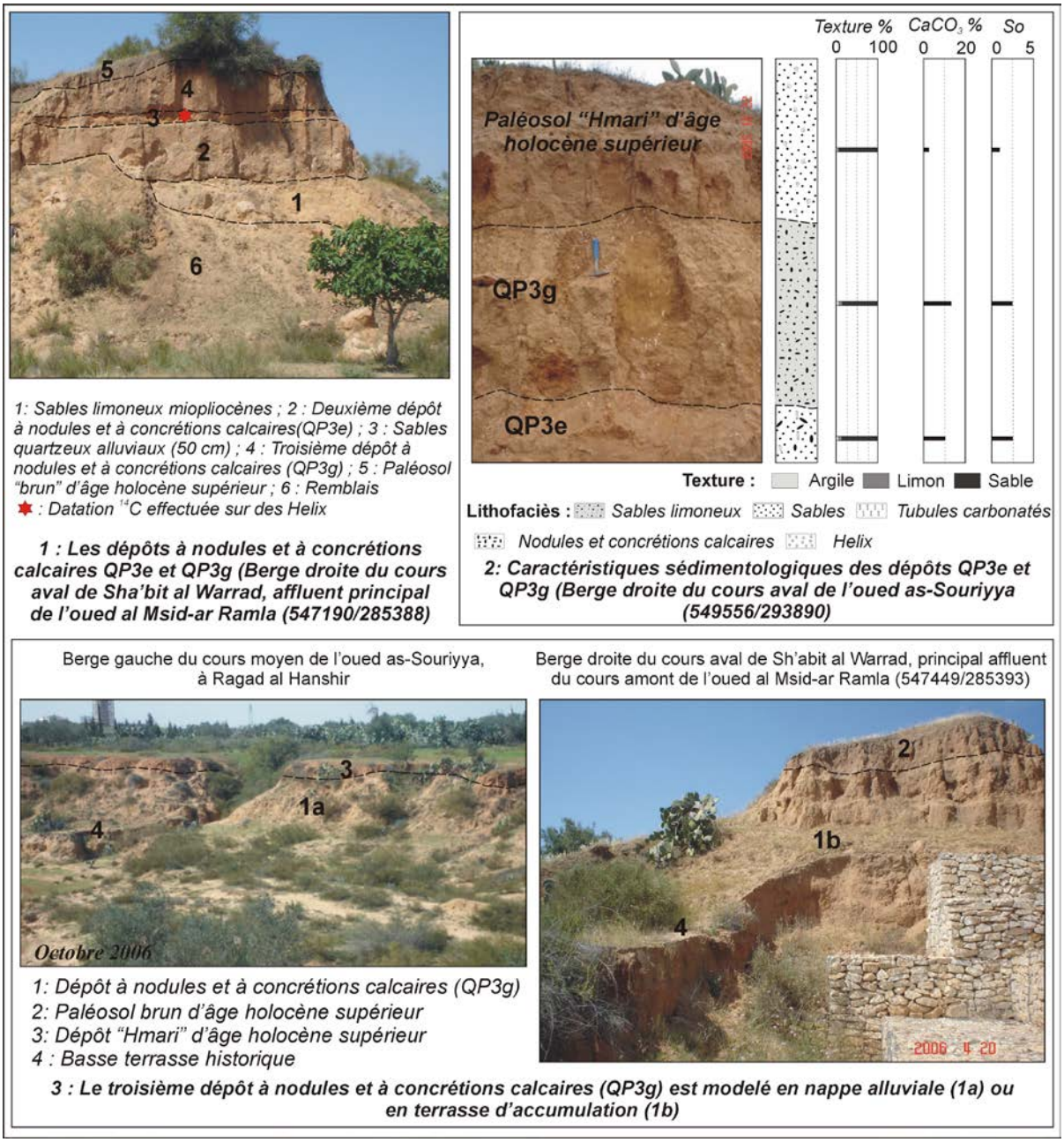


Fig. 67 : Les dépôts à nodules et à concrétions calcaires QP3e et QP3g : faciès sédimentaires et chronostratigraphie

II-3-4- Chronologie relative

Les deux dépôts à nodules et à concrétions calcaires s'emboîtent dans les croûtes calcaires. Sur la rive occidentale de la sebkha al Kalbiyya, Karray M. R. (1993) a identifié des sables roux à concrétions calcaires associant des éclats fini-acheuléens à moustériens. Sur la berge droite du cours aval de Sha'bit al Warrad, affluent principal du cours amont de l'oued al Msid-ar Ramla, une séquence alluviale sablo-quartzeuse, épaisse de 50 cm et riche en *Helix*, sépare les deux dépôts QP3e et QP3g (Fig. 67.1). **Une datation radiocarbone ^{14}C**, effectuée sur les *Helix*, a donné **un âge aberrant** dépassant la limite de la méthode carbone 14 (Tab. 18). A la terminaison septentrionale de Draa Laghmas, le deuxième dépôt QP3e vient en dessous de l'accumulation hydroéolienne de la lunette d'al Kalbiyya, daté à 30000±150 ans BP (35018-34483 cal BP/33069-32534 cal BC ; Kamoun, 2001). **La sédimentation QP3e est d'âge pléistocène supérieur-moyen**. **Le troisième dépôt QP3g** a

été précédé par une phase de pédogénèse puis d'érosion, ravinant l'accumulation précédente QP3e. Il **est vraisemblablement d'âge pléistocène supérieur terminal**.

Référence	Type d'échantillon	Profondeur (m)	Age BP	Cal BC 2σ	Observation
LRAE-4	Helix	2,2	47373±46797	Hors échelle calibration	Age erroné

Tab. 18 : Datation radiométrique ^{14}C des Helix d'une séquence alluviale séparant les deux dépôts à nodules et concrétions calcaires QP3e et QP3g

CONCLUSION DU CHAPITRE

Une lithologie peu contrastée, dominée de sables et d'argiles mio-pliocènes, très propice à l'érosion, caractérise l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. Deux phases de sédimentation marine et continentale sont relayées à deux stades orogéniques. L'orogenèse aquitanienne a marqué une rupture avec les structures antérieures et a annoncé l'installation des aires déprimées. La phase ultime de plissement mio-plio-quaternaire est responsable de la structuration de l'hydrosystème. Il a abouti à la mise en place d'une structure plissée simple qui porte les reflets d'une fracturation profonde. Depuis le Pléistocène inférieur, le paroxysme orogénique est suivi de deux régimes décrochants de compression et de distension. La tectonique tyrrhénienne a contrôlé de près le façonnement du système fluvial. L'érosion a profité des données lithologiques mais sans donner naissance à une variété de modelés morphostructuraux (Karray, 1993 ; Boujelben, 2002).

Durant le Pléistocène, des formations hydriques hétérogènes et parfois dilatées ont marqué la morphologie des fonds de nombreuses vallées et les plaines. Elles sont à l'origine de la construction des nappes, des terrasses et des cônes d'épandage ou des cône-glacis. Aujourd'hui, ces modelés ne marquent pas le paysage et se trouvent enfouis sous les sédiments holocènes. Dans le plateau de Sid Bou Ali-Kandar, les dépôts hydriques, paraissant limités, se sont opposés à des formations carbonatées de croûte très étendues. Toutefois, ces formes et formations témoignent de la complexité du fonctionnement pléistocène du système fluvial. En même temps, des modelés hydroéoliens et littoraux marquent les bordures des sebkhas et la côte sud de Hirgla (*cf.*, chapitre 3 et 6). Ces héritages géomorphologiques permettent d'établir une chronostratigraphie pléistocène et de prendre en compte des discontinuités spatio-temporelles des dynamiques, de la morphogenèse et de la pédogenèse. Ils permettent également d'apprécier le rôle des facteurs climatiques, eustatiques et tectoniques (Tab. 19).

Période			Dépôts	Formes	Stratigraphie		Localisation	Age absolu (ans BP)	Paléoclimats et eustatisme	Tecto-nique
Pléistocène	Supérieur	Terminal	Argiles et limons gypseux	Dunes ou bourrelet	QP3i		Halq al Minjil		Climat semi-aride	Régime décrochant distensif
			Remplissage argilo-sulfato-carbonaté (FSC)	Nappe alluviale/Terrasse d'accumulation/cône d'épandage/cône-glacis	QP3h/SH$_{XIV}$		Halq al Minjil	25120±120	Climat plus humide que l'Actuel mais qui n'a pas dû dépasser le stade de la semi-aridité	
			Troisième dépôt à nodules et à concrétions calcaires		QP3g		Système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil			
				Lunette/Placage et voile éoliens de sommets d'interfluve	QP3f		Al Kalbiyya	30000±150	Aridification du climat	
			Deuxième dépôt à nodules et à concrétions calcaires	Nappe alluviale	QP3e		Système fluvial		Climat chaud et subhumide à humide	
		Le tyrrhénien	Néotyrrhénien (formation Chebba)		QP3d		Littoral sud de Hirgla	Vers 80000	Niveau marin relatif de + 2-3 m	Tendance plus chaude
			Eutyrrhénien (formation Rejiche)	Plage et éolianite	QP3c	Rejiche II/QP3c^3		Vers 100-120000	Pulsation transgressive (+ 10 m) puis regressive	
				Lagune inter-Rejiche		QP3c^2			Continentalisation et régression	
				Plage et éolianite		Rejiche I/QP3c^1			Pulsation transgressive	
			Blocs gréseux et galets de croûte calcaire		QP3b				Régression et continentalisation	
			Paléotyrrhénien (formation Douira)	Plage	QP3a			>120000	Transgression marine	
	Moyen		Croûte calcaire	Pseudo-chevron, glacis encroûté, surface substructurale	QP2		Système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil		Cycles climatiques qui vont du sub-humide vers le semi-aride puis l'aride	Régime décrochant compressif
	Inférieur		Croûtes et encroûtements calcaires		QP1-2	QP1-2c				
						QP1-2b				
						QP1-2a				
			Premier dépôt à nodules et à concrétions calcaires	Nappe alluviale	QP1				Climat chaud et humide	

Tab. 19: Schéma chronostratigraphique des héritages géomorphologiques pléistocènes

CHAPITRE VIII :
AMPLEUR ET VARIETE DES DEPOTS HOLOCENES DANS LE SYSTEME FLUVIAL : PRESENTATION DES COUPES SIGNIFICATIVES

Les contrastes lithologiques et les oppositions orohydrographiques sont remarquables dans le système fluvial et entre ses compartiments. Ils sont, avec les variations climatiques et les impacts morphodynamiques locaux et anthropiques, à l'origine d'une différenciation spatio-temporelle des caractéristiques morphométriques et formationnelles des héritages géomorphologiques holocènes. Des différences de nature, d'âge et d'agencement de sédiments sont bien constatées entre trois espaces du système fluvial. Dans les cours amont et moyen des principaux affluents de la rive droite de l'oued al Manfas-as-Sod et dans les oueds tributaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil, prédominent des dépôts grossiers, emboîtés et superposés d'âge holocène ancien à historique. Dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya, trois générations de dépôts historiques, généralement fins, s'emboîtent. Les dépôts holocènes préhistoriques sont ici en nappes alluviales. Dans les plaines et sur les bordures bases des sebkhas, se superposent des dépôts fins à moyens, notamment d'âge protohistorique et historique.

Dans ce chapitre on fera l'étude morpho-sédimentologique des formes et des formations holocènes des trois espaces différents du système fluvial. On décrira 15 coupes offertes par les berges des oueds et les carrières et un sondage à la tarière à main (Fig. 68). Une telle étude s'est heurtée aux problèmes d'investigation géomorphologique et du calage chronologique.

I- PROBLEMES ET METHODES D'ETUDE DES FORMES ET DES FORMATIONS HOLOCENES

L'étude des formes et des formations holocènes demande d'abord une prospection systématique du système fluvial afin de trouver les coupes les plus significatives. Elle nécessite ensuite des analyses de laboratoire et l'établissement d'une chronologie relative et absolue afin d'apprécier les dynamiques et les rythmes de l'érosion et de comprendre le fonctionnement holocène du système. Cette étude s'est heurtée à quelques problèmes.

I-1- Les problèmes d'investigation géomorphologique

La prospection du terrain et le choix des sites d'investigation géomorphologiques ont connu et posent des problèmes. Les sites sont rares en quelques compartiments du système fluvial. Ceci tient d'abord à l'**opposition orohydrographique et géologique entre et à l'intérieur des bassins versants**. La rive nord du bassin de l'oued al Manfas as-Sod, faute de sa planéité et du faible encaissement des vallées, n'a pas livré d'importantes coupes.

En outre, **le système fluvial est un milieu géré et fortement transformé** par les pratiques agricoles et l'exploitation des carrières (Boujelben, 2002 ; Boujarra *et al.*, 2006). L'ancien aménagement des rives des cours moyens des oueds al Msid- ar Ramla et as-Souriyya, a rendu parfois difficile la distinction entre les terrasses aménagées et morphoclimatiques. Les talus sont souvent estompés, végétalisés ou plantés en cactus (Pl. 5). Rappelons par ailleurs que dans le bassin amont de l'oued al Mjinin (Blad Grimit et adh-Dhaybiyya) et sur les bordures ouest et sud-est d'al Kalbiyya (as-Satour, Nfayid al Gayid, Krousiyya), les habitants et les fellahs nous ont interdit l'accès aux parcelles et aux fonds des oueds et nous ont ordonné d'arrêter l'investigation géomorphologique**.** Nous

gardons de très bons souvenirs de l'époque où nous nous rendions aux centres de la garde nationale à Kandar et Sidi al Hani.

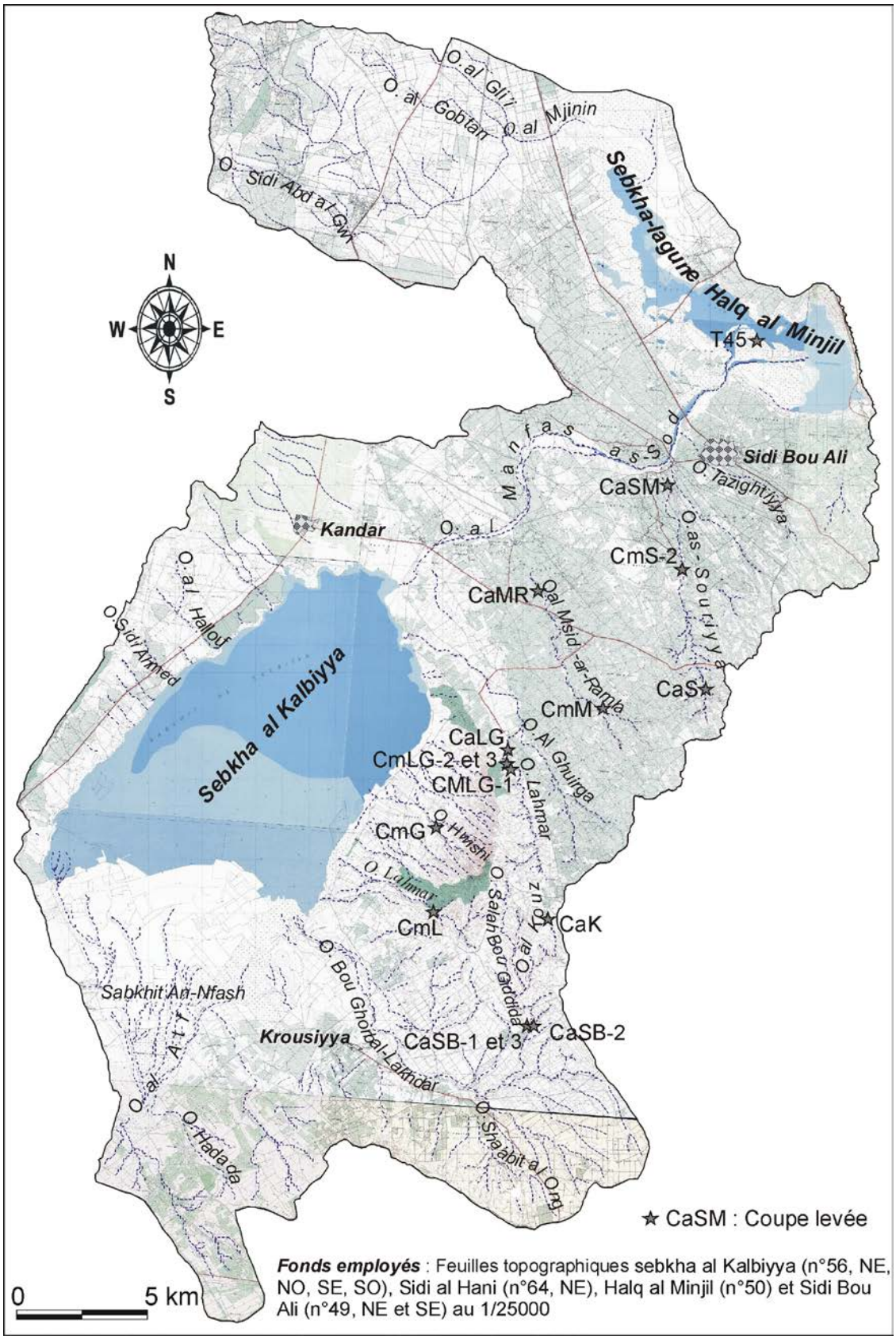


Fig. 68 : Croquis de localisation des coupes levées et du sondage à la tarière à main effectué dans le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil



Pl. 5 : Modifications des paysages de la vallée de l'oued as-Souriyya (rive sud de l'oued al Manfas as-Sod) par une forte emprise anthropique des milieux

Conséquemment, l'examen attentif des remblaiements alluviaux holocènes a été essentiellement réalisé dans des sections de vallées et de plaines les moins remodelées et les plus « accessibles ». Il s'agit précisément de celles des sous bassins de la rive droite de l'oued al Manfas-as-Sod et des bordures orientales d'al Kalbiyya. Les archives sédimentaires sont examinées sur les berges des oueds et dans les carrières. Au débouché de l'oued al Manfas as-Sod, le travail est complété par un sondage à la tarière à main.

I-2- Des analyses de laboratoire s'appuient principalement sur la granulométrie laser des sédiments

Le faciès sédimentaire et la morphodynamique sont caractérisés à partir de la description macroscopique de sédiments et **l'analyse granulométrique laser de 66 échantillons**. **Le tamisage à sec de la fraction sableuse** a porté sur **une dizaine d'échantillons**. Ces analyses n'ont pas été effectuées en continu et sur la totalité des coupes. Trois à six échantillons analysés ont permis de se faire une idée sur les caractéristiques et la signification morphodynamique des sédiments ou des niveaux semblables d'une coupe. Lorsque les déterminations étaient possibles, la médiane, le grain moyen, le tri, le premier percentile, la couleur *Munsell*, les teneurs en $CaCO_3$ et en gypse, la morphoscopie des quartz et le contenu malacologique et végétal, ont permis d'apprécier les agents et le mode de transport et d'accumulation des sédiments, le milieu de dépôt et les conditions de son évolution (Rivière et *al.*, 1977 ; Rosique et *al.*, 2000; Lespez et *al.*, 2005 ; Losson et Corbonnois, 2006). **Les analyses minéralogiques et géochimiques** ont porté seulement **sur trois formations** jugées à grande signification morphopédogénique et climatique.

I-3- Le contrôle chronologique reste limité

Le contrôle chronologique reste limité en raison du faible nombre des datations absolues. **Trois datations radiocarbones ^{14}C ont été effectuées sur les *Helix*** de trois niveaux alluviaux (Tab. 20). En dépit des problèmes d'incrédibilité chronologique de ces gastéropodes (Goodfriend, 1987 ; Rahmani, 2004), leur choix est dicté par la carence des moyens techniques et financiers et par la mauvaise conservation, voire l'absence du charbon de bois, qui est généralement considéré comme le matériel le plus fiable et le moins coûteux pour l'obtention de datation. **Seule la datation de l'échantillon LRAE-1 a été retenue**. Elle présente une certaine cohérence avec l'âge relatif des dépôts datés, appuyé par leur position morphologique dans le paysage et la présence des vestiges archéologiques et des céramiques datables. Les deux datations des échantillons LRAE-2 et LRAE-T2 sont erronées. Les dépôts calés, vraisemblablement d'âge holocène inférieur à moyen, ont donné des âges beaucoup plus récents que ceux des accumulations protohistoriques et historiques sus-jacentes.

Les vestiges archéologiques datables sont formés exclusivement de céramique romaine. Les industries lithiques préhistoriques sont moins abondantes et ne sont observées qu'aux sommets des interfluves encroûtés. Leur contribution chronologique est faible.

Référence	Type d'échantillon	Profondeur (m)	Age radiocarbone conventionnel (BP)	Age calibré BP	Age calibré BC-AD
LRAE-1	*Helix*	3,3	3874±201	4839-3823	2890-1874 BC
LRAE-2	*Helix*	1,1	1289±228	1627- 736	323-1214 AD
LRAE-T2	*Helix*	2,5	391±156	661-250	1289-1700 AD

Tab. 20: Datations radiométriques ^{14}C des niveaux alluviaux du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Hal al Minjil

II- LES COUPES DES COURS AMONT ET MOYEN DES AFFLUENTS DE L'OUED AL MANFAS-AS-SOD : DES DEPOTS PRE ET PROTOHISTORIQUES BIEN DEVELOPPES

Les cours amont et moyen des principaux affluents de la rive droite de l'oued al Manfas-as-Sod se caractérisent par des dépôts holocènes variés et une présence particulière des dépôts de l'Holocène pré et protohistorique.

II-1- La coupe CaS du cours amont de l'oued as-Souriyya

La coupe CaS a été levée sur la berge droite du cours amont de l'oued as-Souriyya (*cf.*, Fig. 68 ; 550854/286382). Elle a permis de caler les dépôts historiques d'une basse terrasse qui s'emboîte dans une nappe alluviale d'âge pléistocène supérieur terminal et dans les formations d'une terrasse holocène antéhistorique.

La coupe révèle, du plus ancien au plus récent, la succession suivante (Fig. 69.1) :

1- **une nappe alluviale de limons silteux à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène supérieur terminal** (QP3g). L'épaisseur apparente est de 60 cm. Le dépôt est de couleur jaune rougeâtre (5YR 7/8), très mal classé, modérément calcaire et possède une distribution granulométrique de type sublogarithmique.

2 : **dépôts holocènes d'une terrasse d'accumulation antéhistorique**, haute de 2,5 m en moyenne et large de 5 à plus de 7 m. l'accumulation est formée de deux membres aux caractéristiques sédimentologiques différentes.

2a : **le premier membre basal** ravine la formation précédente. Il est observé presque dans toutes les coupes des affluents de l'oued al Manfas-as-Sod et dans les coupes des cours aval des oueds tributaires d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Il s'agit d'**un paléosol isohumique, à pseudomycélium** et de couleur foncée, qui correspond au support édaphique le plus étendu et le plus exploité du Sahel tunisien, depuis l'Antiquité (Boujarra et Mrabet, 1999 ; Brahim, 2001, 2005 ; Boujelben, 2002). Il constitue un repère chronostratigraphique facilitant la corrélation des dépôts et des coupes. Ce paléosol a bénéficié de plusieurs études morphopédologiques et il a été couramment indiqué sous le nom «*paléosol ou sables bruns*» (Goddas, 1962 ; Donnay, 1963 ; Belkhouja *et al.*, 1973 ; Boujarra et Mrabet, 1999). Les fellahs locaux lui attribuent, conformément à sa couleur brune foncée à noire, l'appellation « *Ardh kahla* » (terre noire en arabe).

Le dépôt est composé de **sables limoneux** bruns foncés (7.5YR 5/6), non à peu calcaires et non gypseux. Il est bien trié et possède une médiane « moyenne » (160,4 µm) et un grain moyen dans les sables fins. Il présente une distribution granulométrique de forme parabolique et montre la prédominance des quartz émoussés luisants (44%) et émoussés mats (24%). Les grains ronds mats représentent 12%. L'épaisseur est de 40 cm et présente des fortes variations latérales. A 350 m de la source de l'oued as-Souriyya, l'accumulation est noire (5YR 2.5/1) et dépasse **3 m de puissance**.

2b : **le second membre sommital** présente des **sédiments alluvio-colluviaux**, **épais de 1,8 m** et de couleur jaune rougeâtre (7.5 YR 6/8). Il vient souvent sur le paléosol brun. Il est appelé chez les fellahs **« *Hmari* » (rougeâtre) ou « *Ardh Aïtha* »** (sol léger). Il est composé de **sables** très bien classés et non calcaires et renferme des cailloux et des graviers calcaires. La distribution granulométrique est de forme parabolique. Le grain moyen est dans les sables fins. La médiane est forte (235,1 µm). L'aspect émoussé luisant (52%) et émoussé mat (28%) des quartz, domine. Les grains ronds mats représentent 6%.

3- **dépôts de la basse terrasse historique**, dominant le talweg actuel de **1,6 m**. Le modelé atteint 14 m de largeur et peut se réduire à un simple liséré moins de 2 m. L'accumulation s'emboîte dans les dépôts à nodules et à concrétions calcaires pléistocènes (QP3g). Elle montre l'alternance des limons sableux, des sables limoneux et des sables.

Les limons sableux (3a, 3d et 3f) sont très mal triés, peu à modérément calcaires et peu à non gypseux. La couleur est jaune rougeâtre (7.5YR 7/8 et 6/8). L'épaisseur est de 15 à 30 cm. Les courbes granulométriques sont paraboliques. La médiane comprise entre 129,9 et 234,6 µm. Des graviers calcaires et des coquilles d'*Helix* se dispersent dans le sédiment.

Les sables limoneux (3b, 3e et 3h) sont de couleur jaune (10 YR 7/6) et jaune rougeâtre (7.5YR 6/8) et très bien classés avec une médiane qui varie entre 111 et 330 µm. Les teneurs en $CaCO_3$ et en gypse sont faibles. **L'épaisseur va de 15 à 35 cm.** La courbe granulométrique est de forme parabolique.

Les sables caractérisent les séquences 3c et 3g. Ils emballent des concrétions calcaires, des coquilles d'*Helix* et des galets, des cailloux et des graviers gréseux et calcaires. **L'épaisseur est de 15 cm en moyenne**. La couleur est jaune rougeâtre (7.5YR 7/8). Les sédiments, très bien classés, possèdent une très forte médiane et un grain moyen dans les sables moyens. La teneur en $CaCO_3$ est faible. La courbe granulométrique est parabolique. La séquence 3c contient des **tessons de céramique antique** (Fig. 69.2a) :

1 : bord d'amphore romano-africaine ; type : Africaine IIA/Bonifay 22A1 ; Chronologie : Fin du IIe s. ap. J.-C. - première moitié du IIIe s. ap. J.-C. ;
2 : fragment d'anse de la période antique ;
3 et 4 : fragments de panse d'amphore de l'époque antique ;

Un tesson a été daté. **Le remblaiement est postérieur au IIe s. ap. J.-C.**

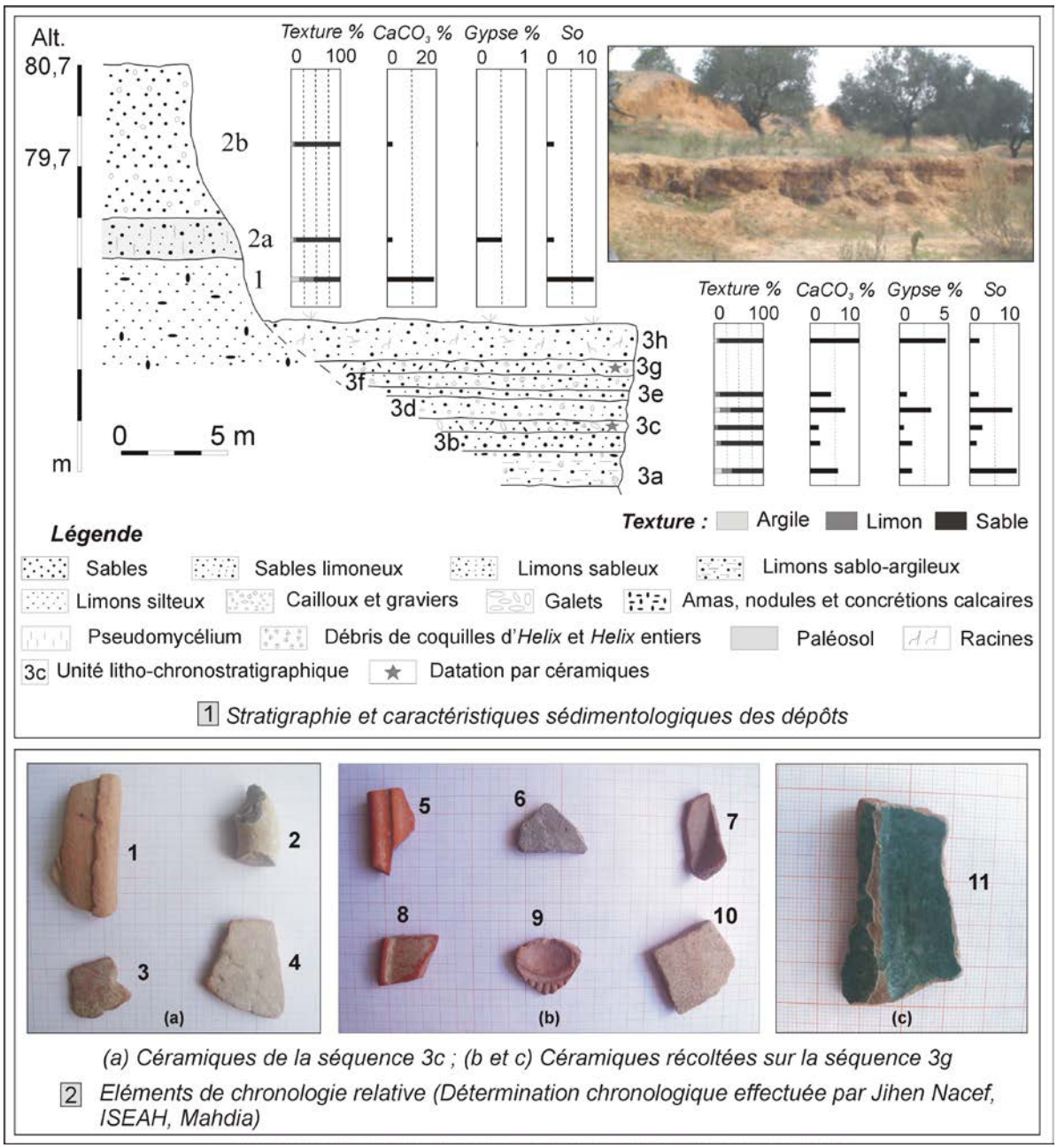


Fig. 69 : La coupe CaS, levée sur la rive droite du cours amont de l'oued as-Souriyya
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

La séquence 3g renferme également des tessons de poterie romaine et islamique (Fig. 69.2b et c). **Quatre morceaux de céramiques** recouvrent une fourchette d'âge allant de **IIe-IIIe s. ap. J.-C. à l'époque hafside** (XIIIe-XVIe s. ap. J.-C.). Les pièces récoltées sont :

5 : un bord d'une marmite ; Type : Hayes 184/Bonifay culinaire type 7A (Bonifay, 2004) ; Chronologie : IIe-IIIe s. ap. J.-C.

6 : un fragment de panse d'amphore de la période antique.

7 : un fragment de fond de marmite ; Type : Hayes 184/Bonifay culinaire type 7 ; Chronologie : IIe-IIIe s. ap. J.-C.

8 : un fragment de bord de couvercle ; Type : Hayes 182/Bonifay culinaire type 6 ; Chronologie : IIe-IIIe s. ap. J.-C.

9 : un fragment de lampe ; Type : Bonifay lampe type 17 ; Chronologie : IIIe s. ap. J.-C.

10 : un fragment de panse d'amphore de la période antique.

11 : une forme ouverte : plat ? ; Chronologie : éventuellement de l'époque hafside

II-2- La coupe CmM du cours moyen de l'oued al Msid-ar-Ramla

Une coupe CmM en travers a été levée sur la rive droite du cours moyen de l'oued al Msid-ar-Ramla (*cf.*, Fig. 68 ; 546993/285679). Elle a permis d'avoir une idée d'ensemble sur la stratigraphie des dépôts pléistocènes-holocènes, de caractériser les dépôts d'une terrasse holocène antéhistorique et d'affirmer l'âge holocène des sables bruns et de la formation « *Hmari* » (Fig. 70).

De l'est à l'ouest et de bas en haut, la coupe montre la succession suivante (Fig. 70.1) :

1 : **sables rouge clair** (10Y 6/8), compacts et qui renferment des nodules, des concrétions et des tubules calcaires de grande taille. L'épaisseur apparente est d'**environ 60 cm**. Il s'agit de la formation QP1 du Pléistocène inférieur (cf., chapitre 6) ;

2 : **croûte et encroûtement calcaires** scellant le sommet de l'interfluve de Sidi Dhaher. On distingue :

2a : un **encroûtement calcaire pulvérulent**, blanc à blanc rosâtre (5YR 8/1 à 8/2) et d'épaisseur moyenne **de 50 cm**. Il repose sur le dépôt sous-jacent sans passage progressif ;

2b : **une croûte calcaire feuilletée**, épaisse de **50 cm en moyenne**, de couleur rose (5YR 8/4) et qui renferme des cailloux et des graviers calcaires. Elle passe latéralement sous une croûte en dalle. **Elle correspond au niveau encroûté QP1-2b**, placé entre le Pléistocène inférieur et moyen (*cf.*, Tab.19) ;

3- **limons sableux** jaune rougeâtre (7.5YR 7/8) à nodules et à concrétions calcaires de taille millimétrique. **Ils correspondent à la formation nodulaire QP3g du Pléistocène supérieur terminal**, d'une épaisseur apparente de **110 cm**. Ils s'emboitent dans les dépôts anciens et constituent le soubassement des formations holocènes.

4- **dépôts en terrasse d'accumulation holocène antéhistorique**. La terrasse, large de **20 à 100 m** environ et haute de **2,5 à 3,5 m**, présente une extension longitudinale continue. L'accumulation s'emboite dans la formation pléistocène (3). Du plus ancien au plus récent on trouve :

4a : un dépôt **sablo-limoneux**, épais de **60 cm en moyenne,** bien triés, peu calcaires et non gypseux. Il contient des débris d'*Helix* et des gravillons calcaires. La courbe granulométrique est parabolique. Le grain moyen est dans les sables fins ;

4b : un dépôt **limono-sableux** jaune rougeâtre (7.5YR 7/6), épais **de 50 cm en moyenne,** très mal classé et modérément calcaire. Il renferme des graviers et des gravillons calcaires et des débris de coquilles d'*Helix*. La courbe granulométrique est parabolique. La médiane est forte (234 µm). Les quartz émoussés luisants et émoussés mats prédominent ;

4c : des **sables brun foncé** (7.5YR 3/2) **à noir** (5YR 2.5/1), épais de **30 cm** en moyenne. **Il s'agit du paléosol brun** dont les caractéristiques sédimentologiques sont semblables à celles du membre basal **(**2a) de la coupe précédente: **Une datation ^{14}C** effectuée sur des fragments de coquilles d'*Helix* a donné **un âge erroné de 1289±228 BP** (LRAE-2 ; 1627- 736 cal BP/323-1214 cal AD). La position stratigraphique des dépôts et la présence de la céramique romaine au sommet de la terrasse établissent, sans doute, un âge plus ancien qui remonte à l'Holocène préhistorique ;

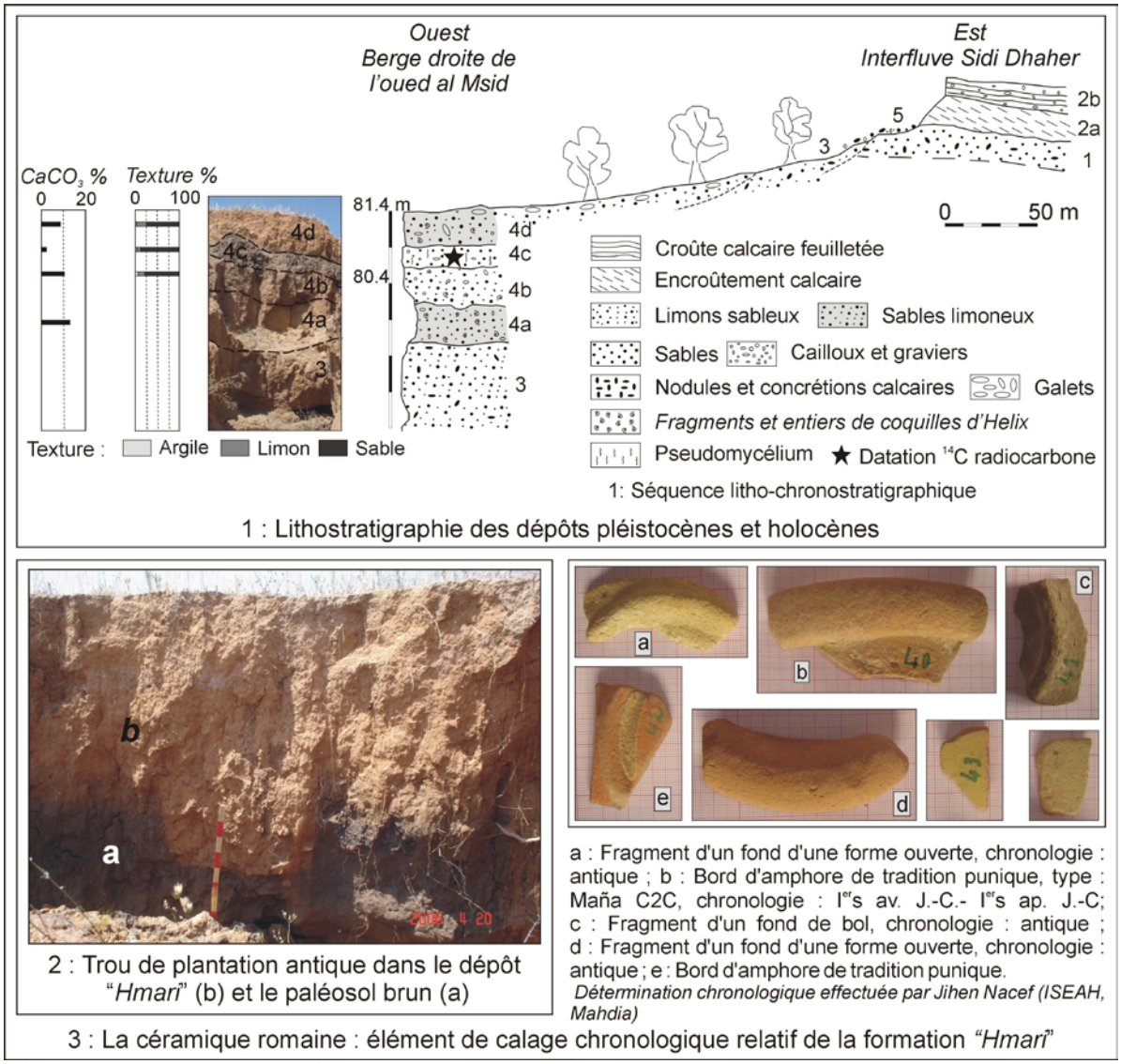


Fig. 70 : La coupe transversale CmM levée sur la rive droite du cours moyen de l'Oued al Msid-ar-Ramla : agencement morpho-stratigraphique des formations pléistocènes-holocènes

4d : des **sables limoneux de la formation « *Hmari* »**. Ils sont de couleur jaune rougeâtre (7.5YR 7/8), épais de **50 cm** et referment des quartz malpropres et teintés d'oxyde de fer. L'âge holocène antéhistorique du dépôt est prouvé par deux indices de datation relative. Le premier consiste en **des trous de plantation antiques** taillés dans le paléosol brun et la formation « *Hmari* » (Communication orale de A. Mrabet ; Fig.70.2). Le second est révélé par **un champ de tessons de poterie romaine** étalé au sommet de la terrasse sur la berge ouest de l'oued, à environ 350 m à l'amont de la coupe (Fig. 70.3) ;

Le paléosol brun et la formation « *Hmari* » présentent presque les mêmes caractéristiques minéralogiques (Tab. 21). Les propriétés géochimiques sont différentes (Tab. 22). La formation « *Hmari* » est moins riche en aluminium, calcium, magnésium, manganèse et fer, sous forme d'hydroxydes ;

5 : une **formation de pente** composée de **sables limoneux** jaunes rougeâtres, caillouteux renfermant des nodules calcaires et des fragments de croûte calcaire.

Dépôt	Minéraux du sédiment total						Minéraux de la fraction < 2 µm						
	Quartz	Microcline	Albite	Calcite	Hématite	Argile	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiée illite/smectite	Chlorite	Quartz	Goethite
Formation "Hmari"	XX	X	X	X		X	X	X	X	X		X	
Sables bruns	XX	X	X	X	X?	X	X	X	X	X	X	X	X

xx : Phase minéralogique majeure ; x : Phase minéralogique mineure

Tab. 21 : Composition minéralogique du paléosol brun et de la formation « Hmari »
Analyses de laboratoire : HGS, UMR 7517, CNRS/ULP

Dépôt	Perte 110°C	Perte 1000°C	Concentration géochimique en % dans le sédiment séché à 110 °C									
			SiO_2	Al_2O_3	FeO_3	MgO	K_2O	CaO	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	MnO
Formation "Hmari"	6,22	11,5	50,1	20,9	10,07	2,27	2,16	0,46	1,03	0,13	0,135	0,077
Sables bruns	6,37	11,64	48,6	21,7	10,09	2,49	2,2	0,81	1,119	0,14	0,198	0,084

Tab. 22 : Composition géochimique du paléosol brun et de la formation « Hmari »
Analyses de laboratoire : HGS, UMR 7517, CNRS/ULP

II-3- La coupe CmS-2 du cours moyen de l'oued as-Souriyya

La coupe CmS-2 a été levée sur la rive droite du cours moyen de l'oued as-Souriyya (*cf.*, Fig. 68 ; Fig. 71 ; 549934/290858). Son intérêt réside dans son caractère synthétique. Elle réunit les dépôts les plus caractéristiques des fonds de vallées du bassin de l'oued al Manfas-as-Sod. Elle montre **l'emboîtement de trois générations de terrasses d'accumulation** et **une quatrième terrasse de culture aménagée**, très localisée.

II-3-1- Les dépôts de la première terrasse

La première terrasse d'accumulation est d'âge holocène antéhistorique. C'est la terrasse la plus élevée et la plus développée de la vallée. Sa surface se situe entre **4,5 et 10 m** au-dessus du lit de l'oued. Sa largeur varie entre **11 et 45 m environ**. L'accumulation révèle la succession de **trois membres de dépôts** différents et inégalement développés sur les deux berges de l'oued. De bas en haut:

1- un **premier membre sablo-limoneux à nodules et à concrétions calcaires** de couleur brun jaunâtre (10YR 6/6) et d'une épaisseur apparente de **4 m**. Il correspond au dépôt QP3g du Pléistocène supérieur terminal qui forme sur la rive est de l'oued la première nappe colluvio-alluviale de la terrasse holocène antéhistorique. A 130 m à l'aval de la coupe, la nappe prend d'ampleur et **dépasse 7 m** d'épaisseur ;

2- **un deuxième membre d'âge holocène antéhistorique, d'épaisseur totale 377 cm**. Il montre la superposition de **quatre séquences différentes** qui forment une deuxième nappe sédimentaire. Le dépôt se caractérise par la prédominance des sables limoneux (2b, 2d), des limons (2c) et puis des sables (2a). Les sédiments sont de couleur jaune brunâtre (10YR 6/6) et jaune rougeâtre (7.5 YR 6/6). Ils sont très bien à assez bien triés, modérément calcaires et non gypseux. Ils possèdent une distribution granulométrique de forme parabolique et un grain moyen dans les silts grossiers et les sables fins. La médiane va de 75,8 à 234,5 µm. Les séquences 2b et 2c montre des taches noires et blanchâtres. Des graviers et des cailloux calcaires et des cailloux gréso-ferrugineux, se dispersent dans la matrice sableuse de la séquence 2a. Sur la rive est, les limons silteux compacts de la séquence 2c, épais de 110 cm, forment **une terrasse de culture aménagée**. Elle est large de 5 m en moyenne et perchée de 1,5 à 2 m au dessus du lit actuel de l'oued ;

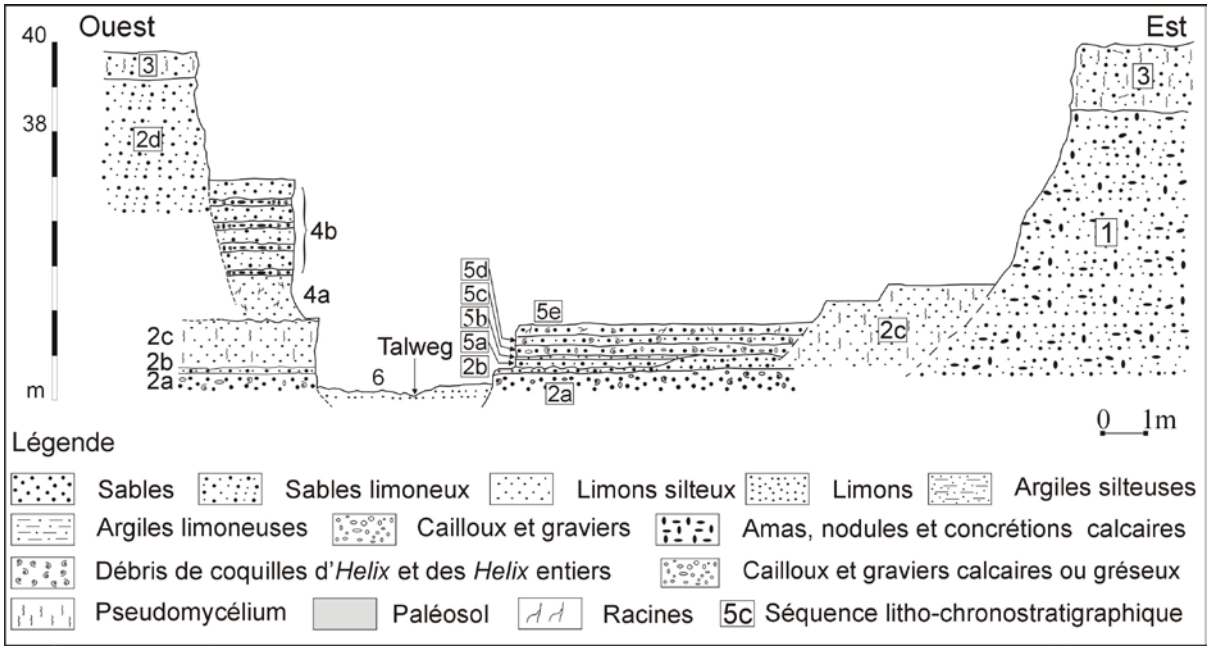


Fig. 71 : La coupe CmS-2 levée dans le cours moyen de l'oued as-Souriyya à l'est de Ragad al Hanshir

Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

3 : un **troisième membre sablo-limoneux à pseudomycélium,** déposé sur les deux rives de l'oued au sommet de l'accumulation de la terrasse. Son épaisseur est moins de **1,5 m**. Ses caractéristiques sédimentologiques rappellent celles du paléosol brun des coupes précédentes. La couleur brun foncé (10YR 3/3) montre des éclaircissements locaux.

II-3-2- L'accumulation de la deuxième terrasse

La deuxième terrasse correspond à **une haute terrasse historique** dégagée sur la rive ouest de l'oued, **en position perchée, à 1.5 m** au-dessus du talweg actuel. Elle atteint **3,2 m de hauteur** et s'emboîte dans les dépôts de la terrasse antéhistorique. La talus de raccordement est faible, moins de 1,5 m. La largeur est variable mais inférieure à 15 m. L'accumulation montre la superposition de deux séquences différentes :

4a : une première séquence jaune brunâtre (10YR 6/6), épaisse de **1 m,** ravinant la formation préhistorique 2c. Elle est composée de **limons silteux** mal classés, modérément calcaires et non gypseux. Le grain moyen est dans les silts grossiers. La médiane est faible (70,11 µm). La courbe granulométrique est sublogarithmique. Les quartz émoussés luisants malpropres et picotés l'emportent (52%) ;

4b : une deuxième séquence épaisse de **220 cm**, caractérisée par l'alternance **des lits sablo-limoneux** jaune brunâtre (10YR 6/6) avec des lits **sableux** brun (7.5YR 5/6). Dans l'ensemble, le dépôt est très bien trié et modérément calcaire. La médiane comprise entre 177 et 233,5 µm. Les courbes granulométriques sont paraboliques.

II-3-3- Les dépôts de la troisième terrasse

La troisième terrasse correspond à une **basse terrasse historique** qui s'emboîte dans les membres antéhistoriques de la rive est de l'oued. Elle présente une extension longitudinale discontinue. Elle domine le talweg actuel de 1 à 2 m et présente une largeur variable entre 1 et 5 m. De bas en haut, les dépôts, généralement grossiers, se présentent comme suit :

5a : **sables limoneux** lités, épais de **20 cm**, peu calcaires et non gypseux. Ils sont brun jaunâtres (10YR 5/6), très bien triés et présentent une distribution granulométrique de forme parabolique. Le grain moyen est dans les sables très fins. La médiane est « moyenne » (111,2 µm). Des horizons noirs, discontinus et millimétriques s'intercalent dans les sédiments ;

5b : **limons silteux** oxydés, épais de **7 cm**, mal classés, modérément calcaires et de couleur brun jaunâtre foncé (10YR 4/4). La courbe granulométrique est logarithmique. Le grain moyen est dans les silts fins. La médiane est très faible (16,64 µm). Les quartz émoussés luisants (52%) et émoussés mats (28%) prédominent ;

5c : **sables grossiers** jaune brunâtre (10YR 6/6), épais de **20 cm** et très bien triés. Ils renferment des graviers et des cailloux calcaires et des fragments et des coquilles d'*Helix*. Ils montrent des passées d'argiles de moins de **2 cm** d'épaisseur. Le grain moyen est dans les sables moyens. La médiane est très forte (526,6 µm) ;

5d: **sables limoneux** de couleur jaune brunâtre (10YR 6/6) et épais de **20 cm**. Ils présentent les mêmes caractéristiques sédimentologiques que celles de la séquence basale 5a. Ils renferment des débris de coquilles d'*Helix* et des horizons fins noirs millimétriques ;

5e : **sables grossiers quartzeux** brun jaunâtre (10YR 5/6) et épais de **33 cm**. Ils renferment des racines et des fragments de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers. Leurs caractéristiques sédimentologiques rappellent celles de la séquence 5c.

III- LES COUPES DES COURS AMONT ET MOYEN DES OUEDS TRIBUTAIRES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : UNE PRESENCE PARTICULIERE DES DEPOTS HISTORIQUES

Les vallées des cours amont et moyen des oueds tributaires de la sebkha al Kalbiyya, ont montré un développement important des dépôts surtout d'âge historique. Selon la morphologie des lits des oueds, étroits ou larges, ces dépôts se superposent et/ou s'emboîtent.

III-1- La coupe CaK du cours amont de l'oued al Kouz

Sur la rive gauche du cours amont de l'oued al Kouz, l'originalité des interfluves tient pour une grande part à l'extension en surface et sur de petites étendues d'une coloration gris noire, repérant assez facilement, des faciès dits hydromorphes.

A Hanshir at-Twila, le recul de tête d'un petit affluent de la rive gauche du cours amont de l'oued al Kouz a permis, sur une faible profondeur, de lever la coupe CaK et de caractériser le faciès (*cf*., Fig. 68 ; Fig. 72.1 ; 545001/277822).

La coupe montre un faciès **argilo-silteux**, **peu compact**, d'environ **110 cm d'épaisseur**. Il vient en-dessus d'un substrat mio-pliocène, de limons et d'argiles gypseux, très compacts. Il montre des taches diffuses et des filaments discontinus blanchâtres de sel. Les sédiments sont mal classés, modérément calcaires et de couleur gris foncé (7.5Y5 4/1). Ils présentent une distribution granulométrique subhyperbolique, un grain moyen dans les silts fins et une médiane très faible. A la binoculaire, les quartz émoussés luisants et émoussés mats prédominent (Fig. 72.2).

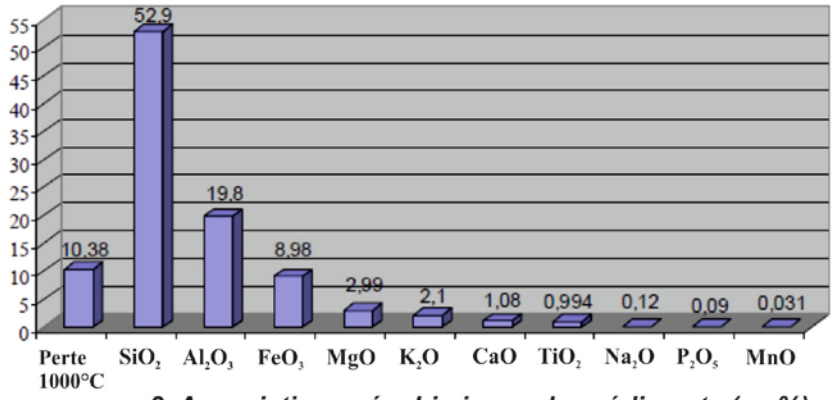
L'analyse géochimique montre d'importantes teneurs en silicium, aluminium, fer et magnésium (Fig. 72.3). L'association minéralogique du sédiment total présente la prédominance du quartz et de la calcite (Fig. 72.4). L'albite, le gypse, les argiles et possiblement l'anhydrite sont peu représentés. La phase argileuse est composée de kaolinite, d'illite, de smectite, des interstratifiées illite/smectite et chlorite/smectite, de chlorite et de quartz.



Granulométrie			
< 2µm	2 à 50 µm	50 à 200 µm	200 à 2000 µm
49,2	28,4	11,8	10,6
Indices granulométriques			
Indice de classement (So)		Moyenne (Mz)	Médiane (µm)
8,543		8,06	1,915
Morphoscopie			
SEL	EL	EM	RM
12	40	36	12

1. Dépôt hydromorphe de la coupe CaK

2. Caractéristiques sédimentologiques de dépôt



3. Associations géochimiques des sédiments (en %)

Composition minéralogique du sédiment total						Composition minéralogique de la fraction < 2 µm						
Quartz	Albite	Calcite	Gypse	Anhydrite	Argiles	Kaolinite	Illite	Smectite	Inter-stratifié illite/smectite	Chlorite	Inter-stratifié chlorite/smectite	Quartz
xx	x	xx	x	x?	x	x	x	x	x	(x	ou x)	x

xx : Phase minéralogique majeure ; xx : Phase minéralogique mineure ; x? : Probablement présent

4. Composition minéralogique des sédiments

Fig. 72 : Caractéristiques sédimentologiques et minéralo-géochimiques du dépôt hydromorphe de la coupe CaK (affluent de la rive gauche du cours amont de l'oued al Kouz)
Analyses géochimiques et minéralogiques : HGS, UMR 7517, CNRS/ULP
Analyses granulométriques : M. Trautmann

III-2- La coupe CmG du cours moyen de l'oued al Gharig

Dans les fonds des oueds tributaires de la sebkha al Kalbiyya, l'extension et les épaisseurs apparentes des dépôts holocènes antéhistoriques sont extrêmement réduites. Ces dépôts apparaissent nettement à la faveur des profondes entailles. C'est particulièrement le cas dans l'oued al Gharig (oued profond en arabe). Là, s'individualise une ancienne nappe alluviale sous une épaisse accumulation historique, taillée en une terrasse d'accumulation.

La coupe CmG a été levée sur la rive gauche du cours moyen de l'oued al Gharig (*cf.*, Fig. 68 ; 540821/281259). Elle montre du plus ancien au plus récent (Fig. 73.1) :

1- **Une nappe alluviale** qui apparaît d'une façon continue sur les berges du cours moyen de l'oued, dont l'épaisseur apparente varie entre de **1 à 1,8 m**. Elle est caractérisée par son **dépôt fin et compact**. Il s'agit d'argiles limoneuses (1a et 1d) et de limons argileux (1c) de couleur brun jaunâtre clair (10YR 6/4) et gris brunâtre clair (10YR 6/2). Généralement, le sédiment est mal trié, modérément calcaire et peu gypseux. Il possède un grain moyen dans les silts fins et une médiane très faible, comprise entre 1,9 et 44,3 µm. Il renferme des débris de coquilles d'*Helix* et des racines. La courbe granulométrique est de forme sub-hyperbolique.

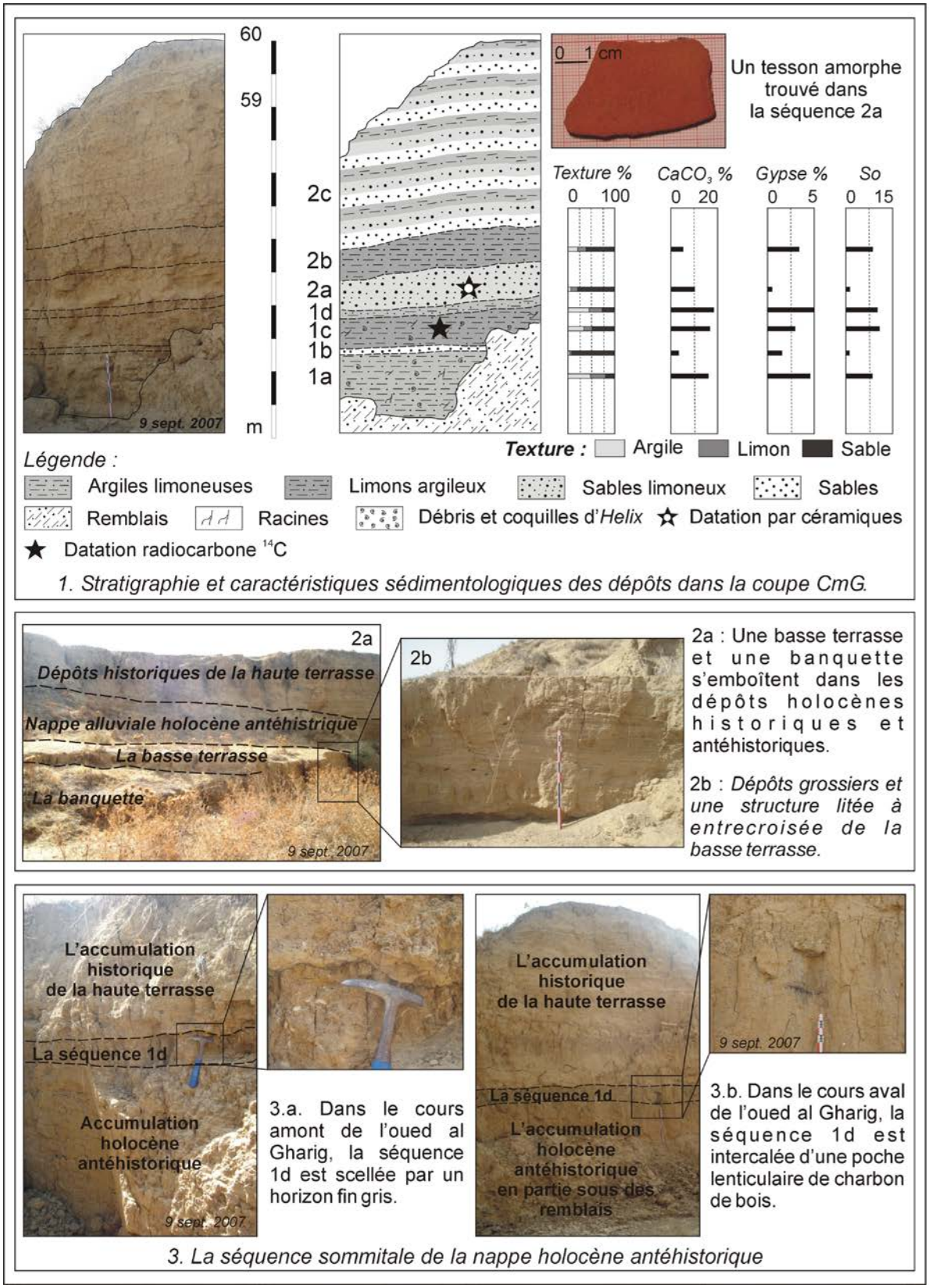


Fig. 73 : Agencement, caractéristiques et évolution latéro-verticale des accumulations alluviales dans la moyenne vallée de l'oued al Gharig

Un lit de sables lités (1b), très bien classés, épais de 10 cm en moyenne et de couleur jaune rougeâtre (7.5 YR 7/6) apparaît dans la nappe. Les quartz présentent un aspect émoussé luisant (48%) et émoussé mat (32%) dominant. Localement, dans le cours amont et

aval de l'oued, la nappe est scellée par un horizon fin gris ou intercalée d'une poche lenticulaire de charbon de bois (Fig. 73.3).

Une datation radiométrique ^{14}C a été effectuée sur des débris de coquilles d'*Helix* de la séquence 1c. Elle a donné **un âge erroné de 391±156 BP** (LRAE-T2 ; 661-250 cal BP/1289-1700 cal AD). La nappe est sans doute d'âge holocène antéhistorique puisqu'elle est recouverte par une épaisse accumulation historique ;

2- **Dépôts historiques d'une terrasse d'accumulation** haute de 3 à 4 m et large de 14 à 40 m environ. Ils sont séparés de la nappe par **un niveau d'érosion**. Ils se caractérisent par leur granulométrie relativement grossière par apport à celle des dépôts sous-jacents. De bas en haut on distingue :

2a : **sables limoneux lités** (10-15 cm), jaunes (10YR 7/6) très bien classés, modérément calcaires et d'une épaisseur totale de **55 cm**. Le grain moyen est dans les sables fins. La courbe granulométrique est parabolique. U**n tesson amorphe de céramique antique** a été trouvé dans le sédiment (Fig. 73.1) ;

2b : **limons argileux** brun jaunâtre clairs (10YR 6/4), épais de **60 cm**, tachés d'oxyde de fer, peu calcaires, très mal triés et peu gypseux. Ils présentent un grain moyen dans les silts grossiers et une distribution granulométrique de forme sublogarithmique.

2c : alternances (5-15 cm) de **sables** et de **sables limoneux** brun pâle (10YR 7/4) avec des **argiles limoneuses prismatiques** et de couleur brun jaunâtre clair (10YR 6/4). L'épaisseur totale est de **2,5 m**.

A environ 120 m à l'aval de la coupe et sur la berge droite de l'oued, **une banquette** et **une basse terrasse** s'emboitent dans les formations précédentes (Fig. 73.2a). La basse terrasse, large de 3 à 5 m, domine le talweg actuel de 1,5 m et présente la domination de sédiments grossiers et une structure litée et lenticulaire (Fig. 73.2b). La banquette, peu développée, a une épaisseur décimétrique, une largeur de moins de 2 m et une accumulation essentiellement sableuse. Dans le cours aval de l'oued al Gharig, les dépôts historiques deviennent plus épais (**plus de 7 m**) et déposés sous des structures variées (litée, lenticulaire, entrecroisée). **La terrasse historique passe à une morphologie de cône-terrasse**.

III-3- La coupe CmL du cours moyen de l'oued Lahmar

Oued Lahmar présente l'un des principaux oueds descendant le versant occidental des Dhras Laghmas-ash-Shraif. Dans sa vallée, les remblaiements révèlent une variation latéro-verticale plus nette de figures et de faciès sédimentaires. La coupe CmL a été levée en travers la vallée moyenne de l'oued (*cf.*, Fig. 68 ; 540629/278052). Elle a permis d'apprécier **l'agencement des dépôts *mio-pliocènes*-historiques** (Fig. 74). Elle a livré un jalon de datation relative mais qui reste imprécis. La coupe montre deux niveaux superposés, hydrique et éolien, visibles sur les deux rives de l'oued et une terrasse historique. Du plus ancien au plus récent :

1 : **sables grossiers** grésifiés appartenant au substratum mio-pliocène. Ils sont de couleur rouge clair (10R 6/8) et riches en cailloux gréseux, concrétions calcaires et dragées de quartz. **Un replat** de quelques mètres de largeur les sépare du dépôt pléistocène sus-jacent. Une morphologie d'**une terrasse d'érosion**, perchée de 7 à 9 m au-dessus du lit de l'oued, marque localement le fond de la vallée ;

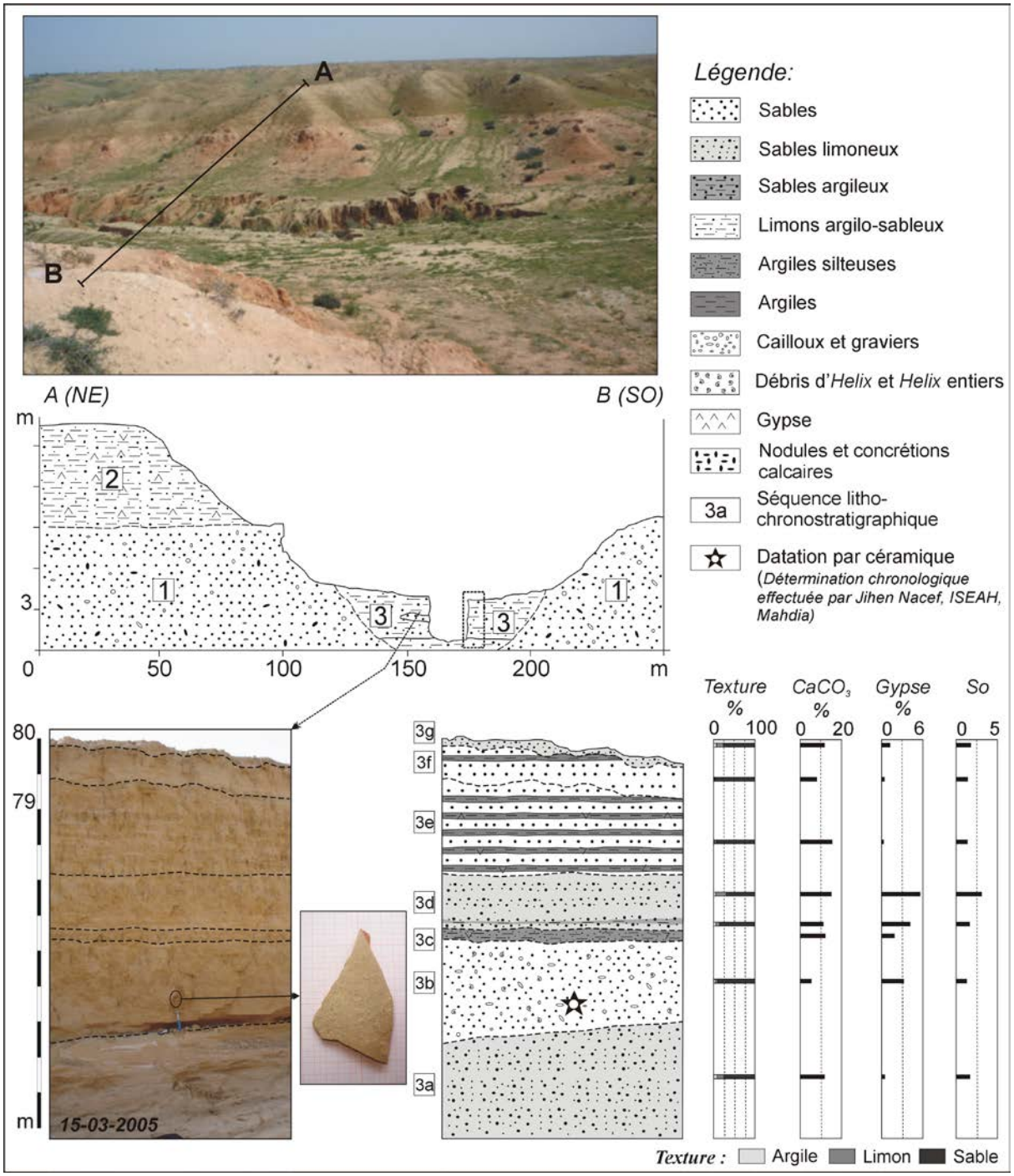


Fig. 74 : La coupe CmL levée sur la rive gauche du cours moyen de l'Oued Lahmar

2 : **dépôt fin limono-argilo-sableux de la lunette pléistocène d'al Kalbiyya (QP3f)**. Il est de couleur rose (7.5YR 7/4) et riche en gypse. Il vient recouvrir les sables mio-pliocènes sans aucun passage graduel, montrant une discontinuité frappante de la lithostratigraphie ;

3 : **accumulation de la haute terrasse historique**. Une alternance de sables limoneux (3a, 3d 3g), de sables (3b, 3e, 3f), d'argiles silteuses (3c) et d'argiles (3e), d'épaisseur variable comprise entre quelques centimètres et 150 cm, s'emboîte dans le dépôt mio-pliocène (1). Le dépôt forme une terrasse large de 20 à 35 m et haute de 3 à 5 m. Le matériel est caractérisé par une nette prédominance des sables et des sables limoneux (92% de l'accumulation) avec parfois des passages grossiers de graviers et de cailloux calcaires

(3b, 3d, 3f). Il est peu à modérément calcaire et non gypseux. Il possède un grain moyen dans les silts fins et les sables fins et moyens et montre une distribution granulométrique de forme parabolique et sublogarithmique. La couleur est jaune brunâtre (10YR 6/8), brun jaunâtre foncé (10YR 4/6) et jaune (10YR 7/6 et 8/6). La couleur brun jaunâtre (10YR 5/8) des argiles silteuses prismatiques de la séquence 3c, est bariolée par une teinte verdâtre.

Une encoche d'érosion latérale apparaît à la base de la séquence alluviale **à 120 cm au dessus du talweg**. Elle affirme le surcreusement du fond de l'oued, permettant ainsi l'apparition des sables de la séquence sous-jacente (3a). Celle-ci est **une nappe alluviale probablement d'âge holocène antéhistorique**. La séquence (3b) emballe à sa base **un fragment de panse d'amphore d'âge antique imprécis**.

III-4- Les coupes du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga

Dans le cours moyen de l'oued Lahmar-Ghuirga, le fond de la vallée s'élargit et montre **l'emboîtement de deux terrasses historiques**, **d'une banquette subactuelle** et **d'une banquette en cours de formation**. Les talus de raccordement sont souvent estompés. Les berges abruptes des rives concaves et celles de certains ravins latéraux, ont permis de caractériser les dépôts historiques. Trois coupes ont été levées.

III-4-1- La coupe CmLG-1

La coupe CmLG-1 a été levée sur la rive gauche de l'oued Lahmar-al Ghuirga (*cf.*, Fig. 68 ; 534561/283434). Elle montre la superposition des dépôts de nature et d'âge différents (Fig. 75.1). De bas en haut on trouve :

1- **le substrat mio-pliocène**, composé de sables jaune rougeâtre (7.5YR 6/8) et d'argiles silteuses oxydées, modérément gypseuses (5,7%) et de couleur rouge clair (2.5YR 6/6). Il apparaît de façon discontinue sur les berges de l'oued. Ici, l'épaisseur apparente est de **90 cm**. A environ 170 m à l'amont de la coupe, les dépôts mio-pliocènes dominent le talweg actuel de 3 m et présentent un pendage vers le nord d'environ 15°.

2- **une accumulation historique**, dont l'âge est confirmé par des **fragments de la céramique antique**. Elle forme la haute terrasse, large de 50 à plus de 150 m et haute de 3 à 6 m. Elle montre deux membres superposés.

Le membre inférieur, d'environ 3,2 m d'épaisseur, est composé essentiellement de sables limoneux (2a, 2f), intercalés de lits limoneux argileux (2b, 2d) et sableux (2e) épais de 10 à 30 cm. Ces sables limoneux forment 80% du matériel. Ils sont de couleur jaune brunâtre (10YR 6/6), très bien triés, modérément calcaires et peu gypseux. Ils présentent une distribution granulométrique de forme parabolique et possèdent une médiane forte et un grain moyen dans les sables fins. Des sables fins limoneux (2c), épais de 10 à 20 cm, de couleur brun pâle (10YR 8/3), lités et très bien triés s'intercale dans le dépôt. La courbe granulométrique est très redressée (Fig. 75.2). Les quartz émoussés mats prédominent (48%). Les grains ronds mats représentent 4%. Le bon tri, la morphoscopie des quartz, l'allure de la courbe granulométrique et le litage très fin du dépôt plaident en la faveur d'**une origine éolienne des sédiments**. Une lentille décimétrique de sables grossiers et de graviers calcaires, apparaît à la base du membre. Elle renferme un **fragment de panse d'amphore** (Fig. 75, 2a-1) et **deux tessons amorphes** (Fig. 75, 2a-2- et 2a-3) de **la période antique** ;

Le membre supérieur montre une alternance de lits sablo-limoneux et argilo-silteux, épais de 15 à 35 cm, sur environ **2 m d'épaisseur totale**. Les argiles silteuses sont prismatiques, jaune olive (2.5Y 6/6) et brun jaunâtre (10YR 5/8), modérément calcaires et très mal classées. Elles montrent une distribution granulométrique de forme hyperbolique à

subhyperbolique et possèdent une médiane très faible (2,544 µm). Les sables limoneux, d'une structure massive, sont très bien triés et de couleur brun jaunâtre (10Y5 5/8). Leur distribution granulométrique est parabolique. Leur médiane est forte (290,1 µm). A la binoculaire, les quartz émoussés luisants (48-56%) et émoussés mats (28-32%) prédominent ;

Des **limons sableux** épais de **30 cm** (2h), très bien classés, modérément calcaires et de couleur brun très pâle (10YR 8/3) occupent la partie sommitale des berges et terminent l'accumulation de la haute terrasse. Ils renferment des graviers calcaires, des coquilles d'*Helix* et des lits centimétriques (2-3 cm) de sables limoneux.

III-4-2- La coupe CmLG-2

La coupe CmLG-2 a été levée sur la berge droite d'un ravin de la rive droite de l'oued Lahmar-al Ghuirga, à 280 m à l'aval de la coupe précédente (*cf.*, Fig. 68 ; 543396/283663). Elle permet de décrire les dépôts d'une basse terrasse d'accumulation qui s'emboîte dans la haute terrasse historique (Fig. 76). Le talus de raccordement, d'environ 3 m de commandement, est estompé. L'extension longitudinale de la terrasse est discontinue. La surface se situe entre 2 et 2,5 m au-dessus du lit de l'oued. La largeur est variable, de 2 à 10 m. Les dépôts, épais de **235 cm,** sont hétérogènes, mais de même couleur jaune terne (2.5Y 6/4). On distingue, du plus ancien au plus récent :

1a : **limons silto-argileux lités**, d'une épaisseur apparente de **25 cm en moyenne** modérément calcaires, et très mal classés. La médiane est très faible (20,96 µm). La courbe granulométrique est sublogarithmique. Au sommet apparaissent des dragées de quartz, des cristaux de gypse, des graviers calcaires, des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers ;

1b : **sables quartzeux lités** (3-5 mm), épais de 25 cm, très bien triés, modérément calcaires et non gypseux. Ils renferment des débris de coquilles d'*Helix*. La courbe granulométrique est parabolique. La médiane est forte (248,8 µm).

1c : Les sables lités sous-jacents passent à des **sables massifs**. L'épaisseur est de l'ordre de **25 cm**. Au sommet apparaît un lit d'argiles oxydées, épaisses de 3 cm ;

1d : **limons sableux lités**, épais de **95 cm**, modérément calcaires et très bien triés. La médiane est « moyenne » (152-162 µm). La courbe granulométrique est parabolique. Le dépôt renferme des fragments de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers et montre l'intercalation d'une lentille de sables grossiers jaunes ;

1e : **sables** épais de **10 cm** dont leurs caractéristiques sédimentologiques rappellent celles de la séquence 1b. Ils contiennent des rosettes gypseuses ;

1f : **sables limoneux**, épais **50 cm en moyenne**, modérément calcaires et peu gypseux. Ils renferment des racines et des débris de coquilles d'*Helix*. Le tri est bon. La médiane est forte (330 µm). La courbe granulométrique est parabolique. Au centre, il apparait des lits d'argiles brunes, épais chacun de 2 cm en moyenne.

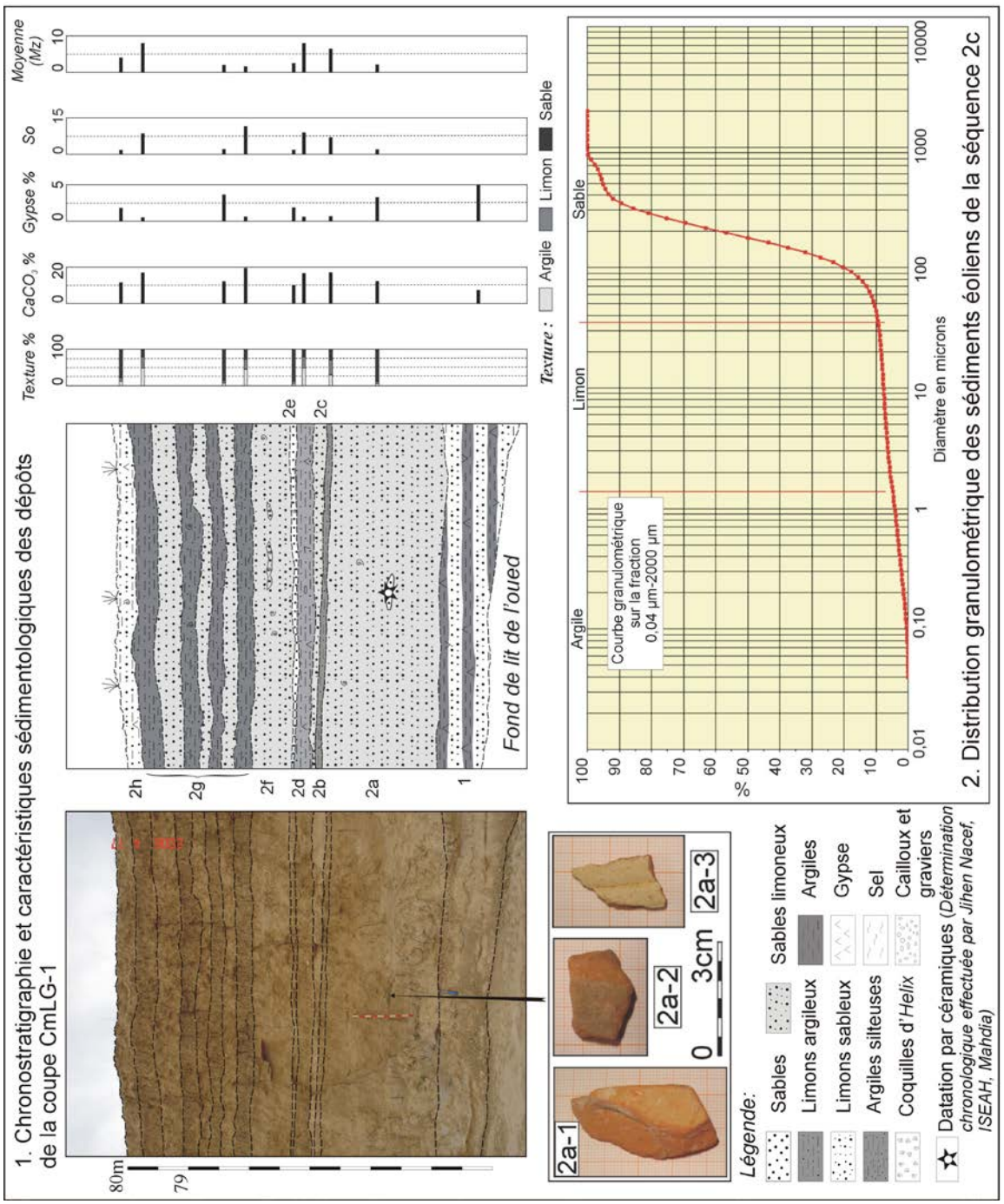


Fig. 75 : La coupe CmLG-1 levée sur la rive gauche du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga

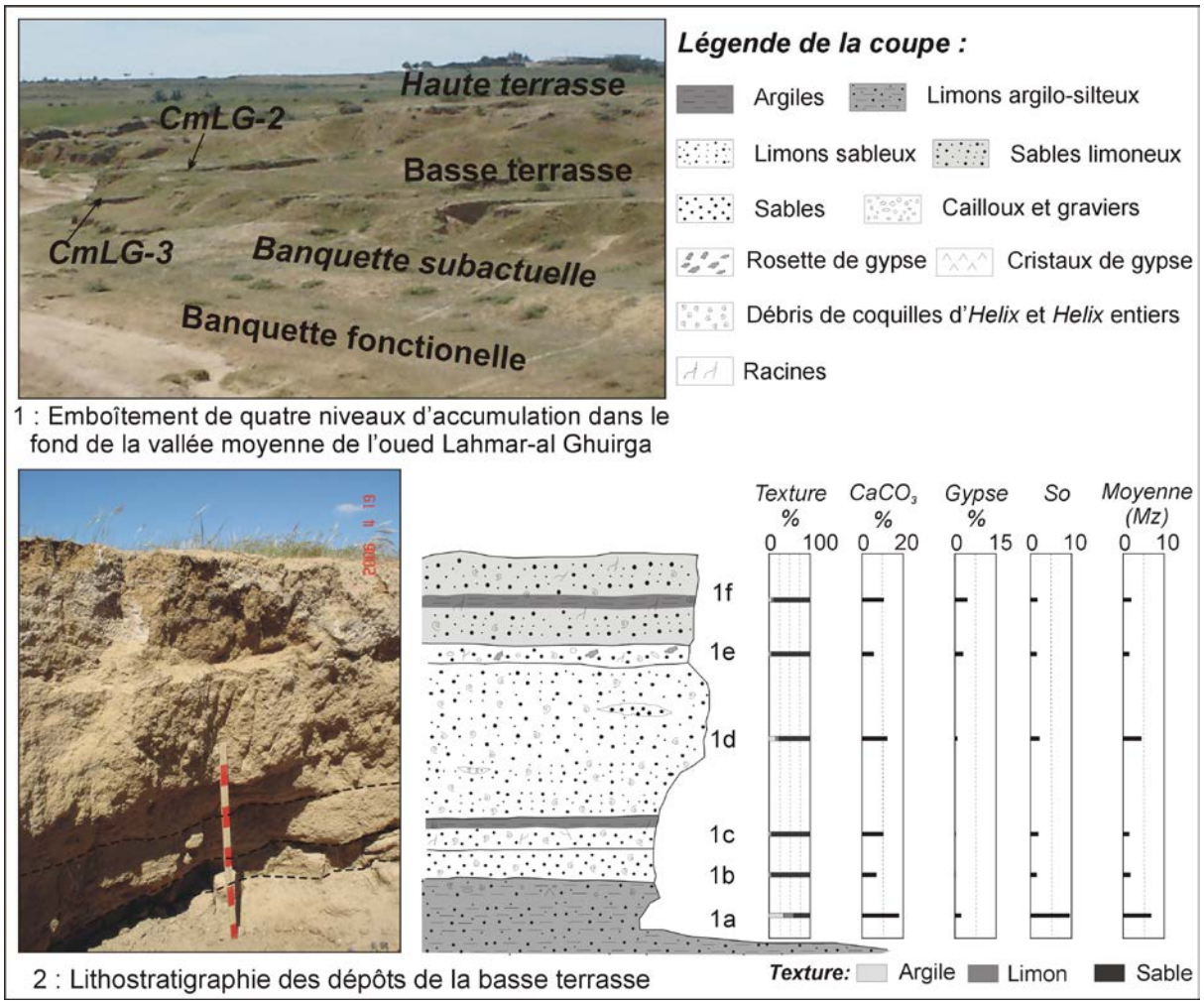


Fig. 76 : La coupe CmLG-2 levée sur la rive droite du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

III-4-3- La coupe CmLG-3

A une dizaine de mètres à l'aval de la coupe précédente, la coupe CmLG-3 a permis la description des dépôts en **banquette subactuelle**, emboités dans l'accumulation alluviale de la basse terrasse historique. Le talus de raccordement, de quelques décimètres, est estompé. La banquette domine le talweg actuel de 1 à 1,5 m et large de moins de 5 m (*cf.*, Fig. 68 ; Fig. 77 ; 543399/283670). Elle est formée de **sables lités**, de couleur jaune terne (2.5Y 6/4 ; 1a) et brun jaunâtre (2.5Y 5/4, 1b), très bien triés, modérément calcaires et peu gypseux. La médiane est forte, comprise entre 241 et 292 µm. Le grain moyen est dans les sables fins à moyens. La courbe granulométrique est parabolique. Le matériel renferme des racines, des débris de coquilles d'*Helix* et des petits *Helix* entiers. Au sommet (1b), les sables montrent l'intercalation des lits millimétriques d'argiles et du sel blanc diffus. A la binoculaire, le sédiment renferme des petits cristaux de gypse lenticulaire. Les quartz émoussés luisants (52%) et émoussés mats (24%) prédominent.

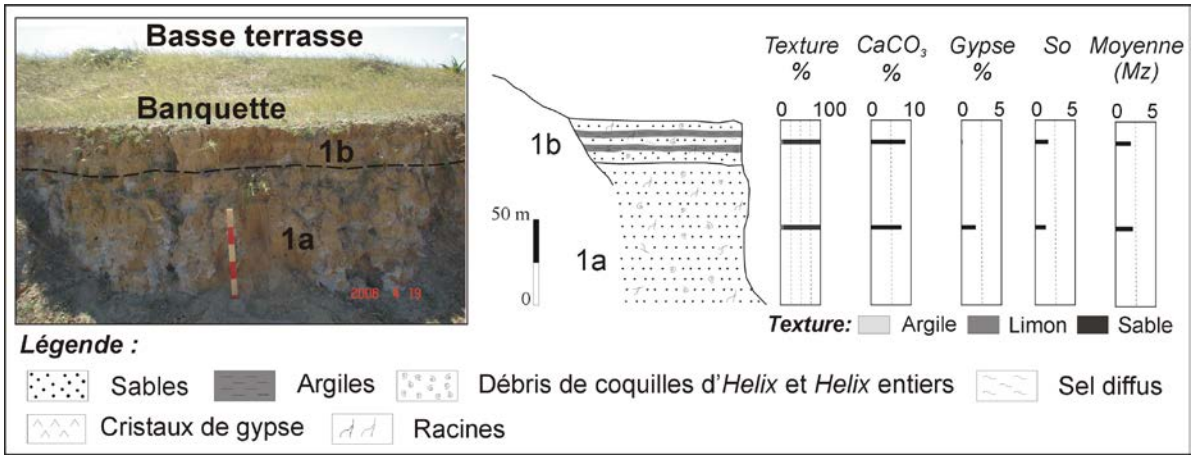


Fig. 77 : La coupe CmLG-3 levée sur la banquette du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga
Analyses de laboratoire : M. Trautmann et A. Boujelben

IV- LES COUPES DES COURS AVAL DES OUEDS : UNE TENDANCE A LA SUPERPOSITION DE NOMBREUX DEPOTS HOLOCENES

Dans les cours avals des oueds débouchant dans les plaines ou les sebkhas, le dispositif alluvial montre une tendance générale à la superposition de nombreux dépôts plus ou moins épais. Il permet d'apprécier la chronostratigraphie et la morphodynamique des zones d'épandage. Des coupes et un sondage à la tarière à main ont permis la description et des prélèvements sur des terrasses-cônes, des cônes d'épandage, des placages éoliens et un cône deltaïque d'âge allant au moins de la protohistoire à l'Actuel.

IV-1- La coupe CaLG du cours aval de l'oued Lahmar-al Ghuirga

La coupe CaLG a été levée sur la berge gauche, à environ 200 m à l'aval de l'exutoire de l'oued Lahmar-al Ghuirga (*cf.*, Fig. 68 ; 543459/284058). Elle révèle la superposition de deux formations (Fig. 78).

- la première formation (1) correspond à **une nappe alluviale de sables limoneux** noirs brunâtres (10YR 2/2), renfermant des débris de coquilles d'*Helix*, des *Helix* entiers et du pseudomycélium. Le dépôt, d'une épaisseur apparente de **1 à 1,7 m**, est très bien trié. Il possède une médiane faible (98,45 µm), un grain moyen dans les sables très fins et une distribution granulométrique de forme parabolique (Fig. 78.1). A la binoculaire, des taches noires revêtent les surfaces de quartz. Les grains émoussés luisants (44%) et émoussés mats (28%) prédominent. La nappe est semblable au paléosol brun des coupes CaS, CmS-1 et 2 et CmM.

Une datation radiocarbone ^{14}C a été effectuée sur des coquilles d'*Helix*, prélevées au sommet de la formation. Elle a donné un âge de **3874±201 BP** (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC). Elle a permis d'affirmer **l'âge holocène supérieur préhistorique du dépôt.**

- la deuxième formation (2) recouvre la nappe précédente (1) sans aucun passage progressif et au contraire des autres coupes sans contact net de ravinement. Elle présente une succession de **dépôts de la haute terrasse historique** qui domine le talweg actuel de **4 m environ** et qui passe latéralement à **une morphologie de cône d'épandage**. Elle montre la superposition de six séquences, moins développées et moins grossières que leurs équivalentes dans la coupe CmG-1 du cours moyen du même oued. Le dépôt est modérément calcaire et peu à non gypseux. Il est caractérisé par la prédominance des éléments fins, essentiellement **argilo-limoneux** (35%, 2c) et **limono-sableux** (31,7%, 2a)

puis **limono-sablo-argileux** (16%, 2e), lités avec des passages grossiers de sables (2b) et de sables limoneux (2d et 2f) emballant des amas millimétriques calciques et ferrugineux et des graviers et des cailloux calcaires. Des débris de coquilles d'*Helix* (2a, 2c, 2d, 2e) des *Helix* entiers (2b), du sel diffus (2a, 2c) et des racines (2e) ont été observés dans l'accumulation.

Dans les zones d'épandage des oueds Lahmar et Hlig ar-Rizg, on observe une succession stratigraphique presque identique des mêmes dépôts protohistoriques et historiques (Fig. 78.3).

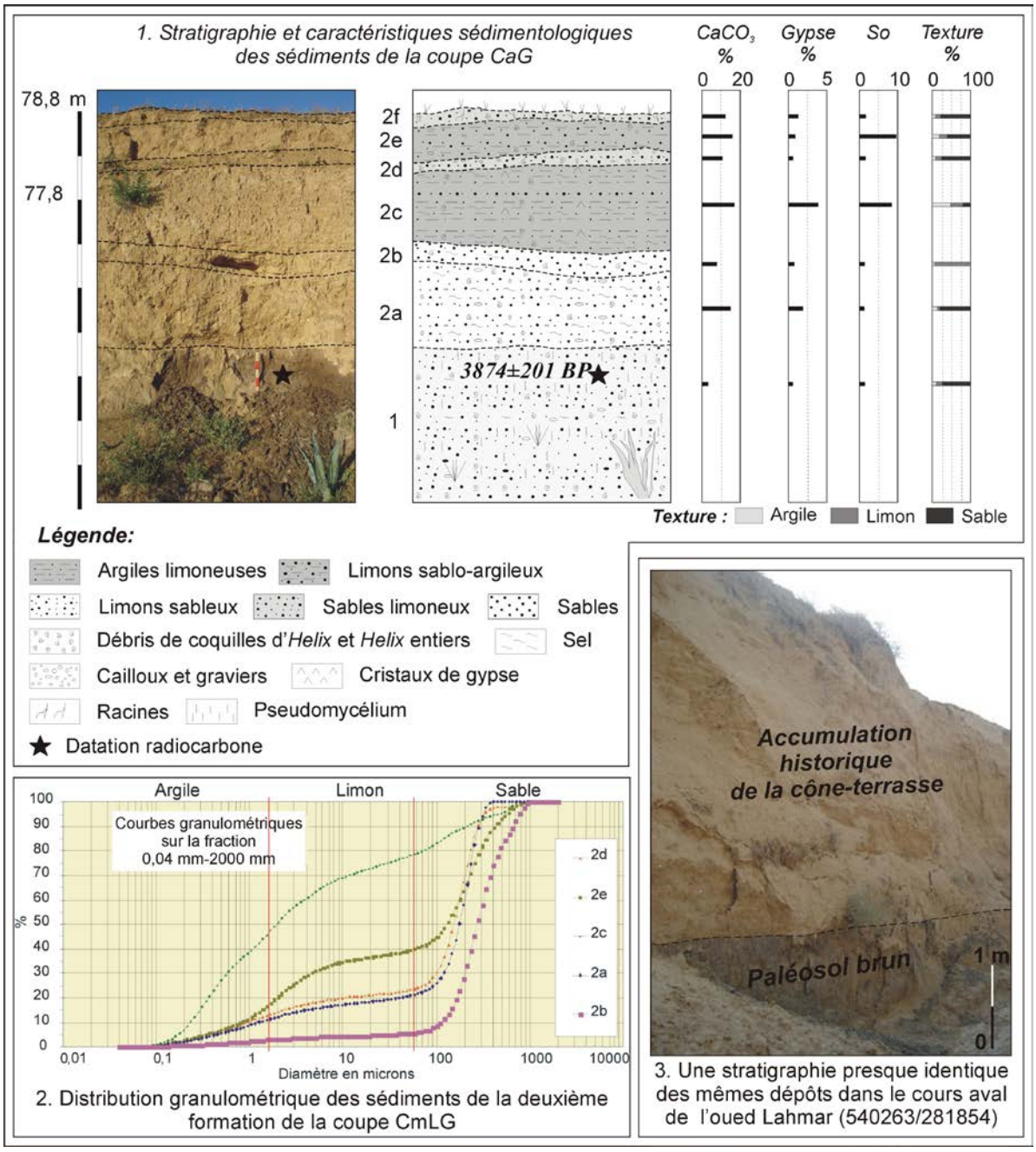


Fig. 78 : La coupe CaLG levée sur la berge gauche du cours aval de l'oued Lahmar-al Ghuirga

IV-2- Les coupes du cours aval de l'oued Salah Bou Giddida

L'oued Salah Bou Giddida est l'un des principaux tributaires de la rive sud-est de la sebkha al Kalbiyya. Trois coupes ont été levées dans son cône d'épandage, à partir de l'apex. L'intérêt du site réside en l'importance de l'éventail alluvial, de la largeur et de

l'extension longitudinale de la basse terrasse (Fig. 79.1), de la forte variation latérale des faciès et de la superposition **des dépôts d'âge holocène antéhistorique à historique**.

IV-2-1- La coupe CaSB-1

La coupe CaSB-1 a été levée sur la rive droite de l'oued (*cf.*, Fig. 68 ; 544205/273835). Elle a permis d'apprécier l'organisation et les caractéristiques sédimentologiques des **dépôts du cône d'épandage** (Fig. 79.2). Elle montre la superposition de **deux ensembles de nature et d'âge différents**.

- **Le premier ensemble** (1) rappelle les anciens dépôts d'âge **holocène antéhistorique** de la base des coupes CmS-1, CmS-2 et CmG des cours moyens des oueds as-Souriyya et al Gharig. Il est composé de :

1a : **sables limoneux peu compacts**, avec une médiane à 180 µm. Ils sont de couleur brun très pâle (10YR 7/4), normalement classés et modérément calcaires. L'épaisseur visible va de **0,8 à 1 m**.

1b : **sables lités**, épais de **1,1 m**. Ils sont très bien classés, peu calcaires et de couleur brun jaunâtre (10YR 5/4) et jaune brunâtre (10YR 6/8). Ils renferment des cailloux et des graviers calcaires. La médiane est forte (217 µm). Des lits centimétriques d'argiles silteuses, jaune terne (2.5Y 6/3) et prismatiques, s'intercalent dans la masse.

- **Le second membre** est **d'âge historique** dont l'âge est défini par **une céramique antique** prélévée dans les sédiments. Les dépôts sont plus fins que ceux du premier ensemble. Du plus ancien au plus récent, on trouve :

2a : **sables fins**, épais de **55 à 85 cm** et peu à modérément calcaires. Ils sont très bien triés et de couleur brun très pâle (10YR 7/4). Ils possèdent une médiane forte (273,5 µm). Ils renferment des cailloux et des graviers calcaires, des amas ferrugineux millimétriques, des racines et des débris de coquilles d'*Helix*. A environ 50 m à l'aval de la coupe, la séquence alluviale a livré un **fragment de panse d'amphore** d'âge imprécis mais vraisemblablement de **la période antique** (Fig. 79.3) ;

2b : **limons sableux** jaunes (10YR 7/4). Le tri est mauvais. La médiane est forte (235,6 µm). Le dépôt contient des graviers calcaires et des coquilles d'*Hélix*. **Un contact ravinant à grand rayon de courbure le sépare** de la séquence sous-jacente. L'épaisseur varie de **60 à 95 cm** ;

2c : **limons argileux** épais de **20 cm en moyenne**, très mal classés et modérément calcaires. Ils sont de couleur brun jaunâtre (10YR 5/4) et ont une médiane très faible. Ils renferment des débris de coquilles d'*Helix*, des graviers calcaires et des racines.

IV-2-2- La coupe CaSB-2

A environ 135 m à l'aval de la coupe précédente et sur la berge gauche de l'oued (*cf.* Fig. 68), les dépôts historiques du cône d'épandage ont révélé **un changement d'agencement lithostratigraphique de sédiments** et une forte variation latérale de faciès. Ils reposent directement sur les argiles gypseuses mio-pliocènes et se trouvent en **position perchée à 3,2 m** au-dessus du talweg actuel (Fig. 79.4). Ils sont beaucoup moins développés que leurs équivalents de la coupe précédente CaSB-1. Ils montrent la prédominance d'une granulométrie fine, dont les argiles et les argiles silteuses, présentent plus de 80% de l'accumulation alluviale. La structure est litée et prismatique. Des sables argileux et des sables, renfermant des coquilles d'*Helix* et des graviers calcaires, s'individualisent en lits et en lentille de 8 à 43 cm d'épaisseur. Au sommet de l'accumulation, les argiles gris noirâtre (7.5YR N3/1), épaisses de **65 cm en moyenne**, révèlent certaines traces d'hydromorphie qui

apparaissent de façon discontinue sur la berge. Cet agencement lithostratigraphique et l'évolution latérale de dépôts ont été observés dans le cours amont de l'**oued Khaled** qui incise le cône d'épandage de l'oued Lahmar-al Ghuirga.

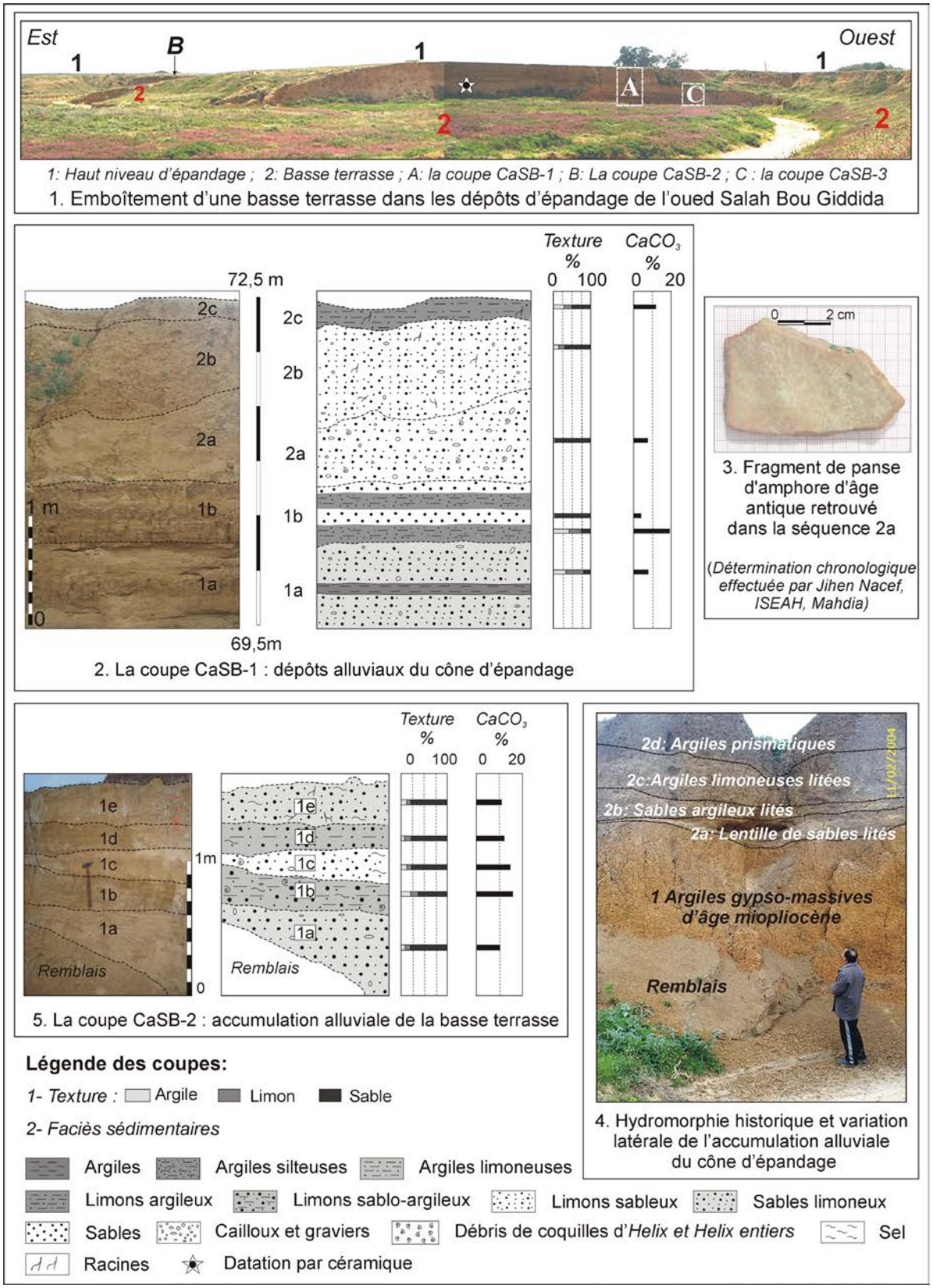


Fig. 79 : Les coupes du cours aval de l'oued Salah Bou Giddida : niveaux alluviaux et caractéristiques morphosédimentologiques des dépôts

IV-2-3- La coupe CaSB-3

Une basse terrasse historique, haute seulement de **1,6 m en moyenne** mais large de **2 à 60 m**, s'emboîte dans les dépôts du haut niveau d'épandage. La coupe CaSB-3 (*cf.*, Fig. 68) a été levée sur la berge droite de l'oued (Fig. 79.1). Elle montre des dépôts hétérogènes, visibles de part et d'autre de l'axe d'écoulement (Fig. 79.5). Le matériel est marqué par une légère prédominance des **sables limoneux** (1a, 1e) et des **limons sableux** (1c), lités, bien triés, modérément calcaires et non à peu gypseux. Ils sont de couleur jaune (10YR 7/6) et contiennent des lits millimétriques d'argiles sombres (1a), des débris de coquilles d'*Helix*, des racines et du sel diffus (1e). L'épaisseur varie entre 10 et 60 cm. La médiane est comprise entre 153 et 179 µm. Les sédiments fins sont représentés par des **limons sablo-argileux** (1b) et des **argiles limoneuses** (1d), de couleur jaune brunâtre (10YR 6/6 et 6/8), mal classés, peu gypseux, modérément calcaires et épais de 15 à 30 cm. Ils renferment des coquilles d'*Helix* et du sel diffus (1b) et sont intercalés de lits fins de sables limoneux (1d). La totalité des dépôts, montre la prédominance d'un aspect émoussé luisant (52%) et émoussé mat (28%) des quartz.

IV-3- Coupes et tarière des cours aval des oueds al Msid-ar-Ramla, as-Souriyya et al Manfas as-Sod

Dans le cours aval des principaux affluents de la rive droite de l'oued al Manfas as-Sod, notamment oueds as-Souriyya et al Msid-ar-Ramla, les accumulations alluviales de la haute et de la basse terrasses et les sommets d'interfluve sont localement recouverts par des sédiments éoliens. **Deux générations de dépôts éoliens** témoignent de la place importante des vents dans la morphogenèse depuis **la période postmédiévale et à l'Actuel**.

IV-3-1- La coupe CaMR du cours aval de l'oued al Msid-ar-Ramla

Dans le cours aval de l'oued al Msid-ar-Ramla, l'accumulation de la basse terrasse s'emboîte dans les formations à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur terminal (QP3g) et les formations holocènes antéhistoriques de sables bruns et « *Hmari* ». La coupe CaMR a été levée sur la rive gauche de l'oued (*cf.*, Fig. 68 ; 544563/290088). Les dépôts ressemblent à leurs homologues dans les coupes CaS, CmS-2 et CaSO. Ils se développent sur une épaisseur minimum de **1,5 m** et s'organisent au moins en **trois séquences alluviales superposées** (1a, 1b et 1c ; Fig. 80.1). La texture est généralement grossière, composée particulièrement de **sables**, de **sables limoneux** et de **sables argilo-limoneux** avec l'intercalation des lits et des lentilles centimétriques graveleux.

La séquence alluviale sommitale est couverte par un **dépôt sableux lité à entrecroisé** (1d), très bien trié, de couleur rose (7.5YR 8/4) et d'une épaisseur maximum de **35 cm**. La médiane est forte (275,4 µm). Le grain moyen est dans les sables moyens. Les quartz émoussés mats (48%) et émoussés luisants (32%) prédominent. Les quartz ronds mats représentent 12% des grains examinés. Le très bon tri des sédiments, l'importance des quartz émoussés mats et ronds mats (Fig. 80.2) et le redressement de la courbe granulométrique (Fig. 80.3) peuvent affirmer l'origine éolienne des sédiments. Il s'agit d'**un voile éolien**. Le bon pourcentage des grains émoussés luisants explique un remaniement éolien de sédiments fluviatiles à partir du fond de l'oued.

Au sommet de la coupe, **des sables limoneux fluviatiles** (1e), aux débris de coquilles d'*Helix* et aux graviers et cailloux calcaires recouvrent le voile éolien. Ils sont de couleur rose (7.5 YR 6/4), épais de **55 cm**, modérément calcaires et peu gypseux. Ils sont mis en culture d'oliviers et montrent un recul par apport au dépôt éolien sous-jacent. Un petit replat décimétrique facilite la distinction entre les deux dépôts 1d et 1e.

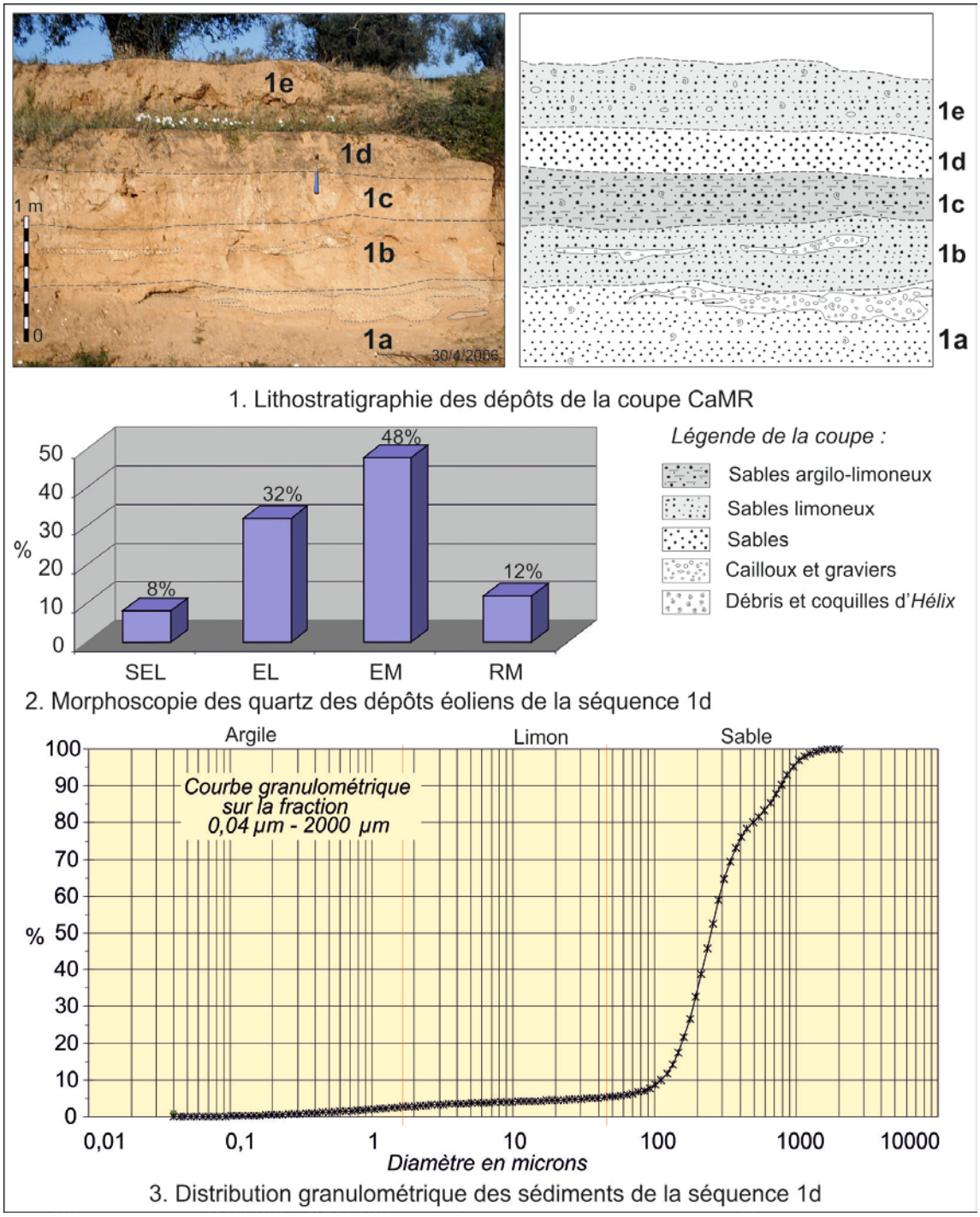


Fig. 80 : La coupe CaMR du cours aval de l'oued al Msid-ar-Ramla et les caractéristiques sédimentologiques des sédiments de la séquence éolienne 1d

Le même **voile éolien** est observé dans les cours moyen et aval de l'oued as-Souriyya. **Son âge relatif est postmédiéval**. Ceci peut être prouvé par le **tesson de poterie hafside** récolté au sommet de l'accumulation alluviale de la basse terrasse sur la rive droite du cours amont du même oued (*cf. supra* la coupe CaS).

IV-3-2- La coupe CaSM du cours aval de l'oued as-Souriyya

Dans les cours avals de l'oued al Manfas as-Sod et son affluent as-Souriyya, un **dépôt éolien** tapisse les versants et recouvre les terrasses et les interfluves (Fig. 81.1 ; Boujelben, 2002). Un échantillon a été prélevé à la hauteur d'ad-Dgagza sur la berge droite

du cours aval de l'oued as-Souriyya (*cf.*, Fig. 68 ; 549390/293989). Il s'agit de **sables** (93%) de couleur rose (7.5YR 8/4), très bien triés, peu calcaires et non gypseux. Ils possèdent un grain moyen dans les sables moyens et une forte médiane (Fig. 81.2). A la binoculaire, les quartz émoussés mats (52%) et émoussés luisants (36%) dominent. Les ronds mats ne présentent que 4% des grains examinés. La courbe granulométrique est parabolique, très redressée (Fig. 81.3). Le dépôt correspond à **un modelé fonctionnel de voile et de placage éoliens**. Il est connu chez les fellahs locaux sous l'appellation « ***Trab es-Saffi*** » (Boujelben, 2002).

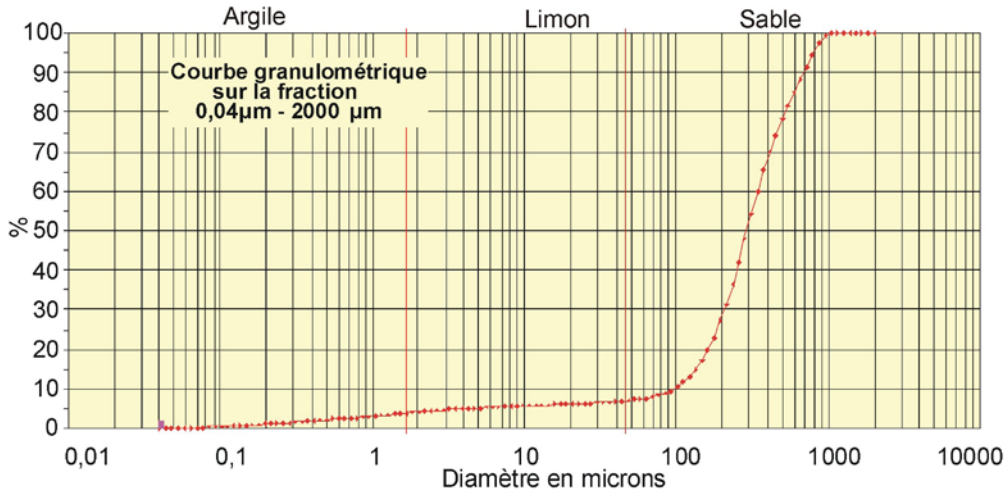


A : Haute terrasse historique ; B : Basse terrasse historique

1. "*Trab es-Saffi*" tapisse les versants et recouvre les sommets de berges

Granulométrie			
< 2µm	*2 à 50 µm*	*50 à 500 µm*	*500 à 2000 µm*
3,92	3	71,18	21,9
Indices granulométriques			
Indice de classement	*Moyenne (Mz)*		*Médiane (µm)*
1,595	1,87		292
Morphoscopie			
SEL	*EL*	*EM*	*RM*
8	36	52	4

2. Caractéristiques sédimentologiques de "*Trab es-Saffi*"



3. Distribution granulométrique d'un échantillon de "*Trab es-Saffi*"

Fig. 81 : Le placage/voile éolien « Trab es-Saffi » : position morphologique et caractéristiques sédimentologiques

IV-3-3- Le sondage à la tarière à main T45 dans le cône deltaïque de l'oued al Manfas as-Sod

A l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod, un trait géomorphologique intéressant réside en la présence d'au moins **trois générations de cônes deltaïques**. Un sondage à la tarière à main **T45**, profond de 350 cm et de côte à 180 cm au dessus du niveau zéro marin, a été effectué à l'amont du front deltaïque du cône le plus ancien (Fig. 82.1). L'objectif est de caractériser l'évolution des environnements deltaïques.

Les remplissages n'ont pas pu faire l'objet d'analyses sédimentologiques et de datations absolues qui permettent l'appréciation des mécanismes sédimentaires et des différentes étapes de progradation et d'aggradation deltaïques. De bas en haut, le log stratigraphique montre la succession suivante (Fig. 82.2) :

-170/-130 cm: ***argiles limoneuses*** brun grisâtre (10YR 5/2) montrant des horizons fins et des lits millimétriques (2 mm) noirâtres et oxydés rouillés ;

-130/-115 cm : **argiles limoneuses** brun grisâtre (10YR 5/2). A la base apparaît un lit (1 cm) argilo-sableux de couleur rouille ferrique contenant des microcristaux de gypse ;

-115/-90 cm : **sables limoneux** jaune brunâtre (10YR 6/6), montrant vers -105 cm de profondeur l'apparition d'un lit grisâtre épais de 5 cm et un lit oxydé contenant des petits grains de charbon et des graviers argileux ;

-90/-85 cm : **sables** jaune brunâtre (10YR 7/6) renfermant des débris de coquilles d'*Helix* ;

-85/-50 cm : **sables limoneux** jaune rougeâtre (7.5YR 7/8) ;

-50/-40 cm : **sables moyens à grossiers** jaune rougeâtre (7.5YR 7/6) ;

-40/-30 cm : **argiles** brunes (10YR 5/3) laminaires ;

-30/0 cm : **argiles limoneuses** brun jaunâtre foncé (10YR 4/4) renfermant vers -20 cm de profondeur des grains de charbon de 2 mm de diamètre en moyenne ;

0/+25 cm : **limons argileux** de couleur brun pâle (10YR 6/3), montrant des lits contenant du sel blanchâtre, des microcristaux de gypse et des grains de charbon ;

+25/+55 cm : **limons sablo-argileux** brun jaunâtre (10YR 5/4), lités et renfermant des grains de charbon et des microcristaux de gypse dispersés dans la masse. Vers 30 cm de profondeur apparaissent des grains et des lits discontinus de sel, des microcristaux de gypse, des grains de charbon de bois et des racines.

+55/+80 cm : **limons sableux laminaires** brun jaunâtre (10YR 5/6). Ils montrent du sel blanchâtre, des microcristaux de gypse dispersés dans la masse et un lit (1-2mm) de sables brun jaunâtre ;

+80/+100 cm : **limons sableux** jaune brunâtre (10YR 6/6) relativement quartzeux et enveloppant des racines et des microcristaux de gypse à la base ;

+100/+140 cm : **limons sableux** jaune rougeâtre (7.5YR 6/6) structurés en lits millimétriques (5 mm) et contenant des taches et des horizons fins discontinus de sel blanchâtre et des microcristaux de gypse ;

+140/+160 cm : **sables limoneux** bruns (7.5YR 6/4) montrant des tâches et des lits discontinus (1 mm) de sel blanc et quelques microcristaux de gypse ;

+160/+180 cm : **sables** fins à moyens bruns (7.5YR 5/4) renfermant des racines, des débris de coquilles d'*Helix* et des petites taches blanchâtres de sel ;

Au niveau de l'apex du cône deltaïque, **des fragments de céramique romaine et moderne** existent à la surface de l'accumulation alluviale. Les tessons datés sont :

- Tesson de bord d'une marmite (90.3a) ; Type : Hayes 184/Bonifay culinaire type 7C ; **IIIe s. ap. J.C.**
- Tesson de bord émoussé par l'eau (90.3b) ; Type : Bonifay commune type 8 ; Chronologie : **IIIe s. ap. J.C.**
- Tesson de bord d'une marmite (90.3c) ; Type : Hayes 23B/Bonifay culinaire type1 ; Chronologie : **première moitié du IIe s. ap. J.C**.
- Tesson qui porte sur la paroi interne un revêtement glaçuré (90.3d) ; Chronologie : **moderne**.

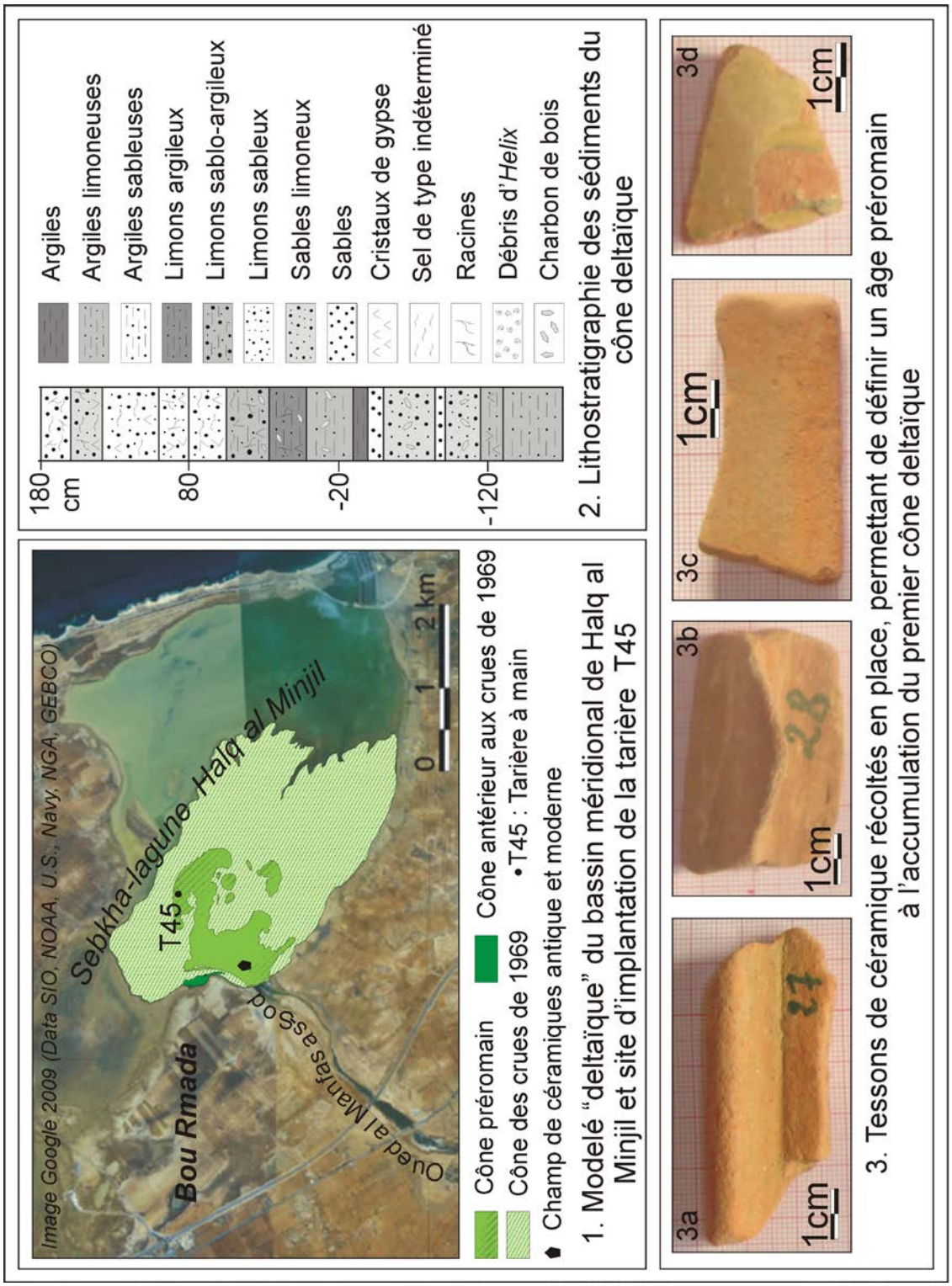


Fig. 82 : Lithostratigraphie et calage chronologique relatif des dépôts de l'ancien cône deltaïque de l'oued al Manfas as-Sod

CONCLUSION DU CHAPITRE

Les coupes étudiées ont permis de souligner l'ampleur, l'hétérogénéité et l'originalité des archives sédimentaires holocènes des fonds d'oueds, des sommets d'interfluves et des plaines. Elles ont montré de forts changements latéraux et séquentiels des dépôts et de leurs agencements morphologiques d'un bassin à un autre et au sein d'une même vallée. Des différences morphosédimentaires sont essentiellement remarquées entre les vallées des oueds d'al Kalbiyya et celles des principaux affluents de la rive sud de l'oued al Manfas as-Sod. La nature du substrat, la topographie et la morphodynamique locales y sont à l'origine.

Les dépôts holocènes antéhistoriques, d'une origine hydrique prépondérante, sont souvent superposés et se développent surtout dans les fonds des principaux affluents de l'oued al Manfas as-Sod. Les dépôts holocènes historiques, beaucoup plus variés, sont superposés et/ou emboîtés. Ils gagnent en épaisseur et en extension dans les fonds d'oueds tributaires des sebkhas. Dans les plaines, la tendance est à la superposition des générations de dépôts qui couvrent plus ou moins toute la période holocène.

La succession de dépôts différents par leur nature, leur épaisseur et leur évolution post-sédimentaire, ainsi que par leur agencement en modelés superposés, étagés ou emboîtés, révèle la complexité du fonctionnement du système fluvial. Elle offre un potentiel intéressant pour l'étude des dynamiques paléoenvironnementales et paysagères, des différentes phases de la morphogenèse et des facteurs du contrôle.

CHAPITRE IX : LES MODELES HOLOCENES DU SYSTEME FLUVIAL : ETUDE DE SYNTHESE ET INTERPRETATION D'ENSEMBLE

Une multitude de modelés holocènes bien différenciés tant par leur origine que par la nature et l'extension des dépôts, marque le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. Trois terrasses et deux banquettes d'accumulation sont construites dans les fonds de vallées. Des cônes d'épandage et deltaïques, des cône-terrasses, des cône-glacis et des plaines d'épandage sont édifiés dans les plaines, à l'exutoire des oueds et en milieux fluvio-deltaïques des bordures de sebkhas. Des paléosols de type brun-isohumique, rébufié et hydromorphe, des voiles et des placages éoliens ont vu également le jour dans les plaines, sur les sommets d'interfluves et dans les fonds de vallées. Ces formes et les formations associées se développent puis prennent de l'ampleur depuis l'Historique sur les bordures ouest d'al Kalbiyya, sur la rive sud du bassin de l'oued al Manfas as-Sod ainsi qu'au sud et au nord-ouest du système littoral Halq al Minjil.

La synthèse de la lithostratigraphie et des datations absolue et relative a permis de dresser une chronologie des dépôts holocènes, de les corréler entre les différentes coupes levées et d'élaborer **une coupe de synthèse** (Fig. 83). Cette coupe explique la relation entre **dix différentes formations**. Elle montre **l'emboîtement et la superposition de six modelés** les plus distingués dans le paysage, sans tenir compte des contrastes de détails intéressants qu'ils cachent et qui seront développés dans le texte ci-après.

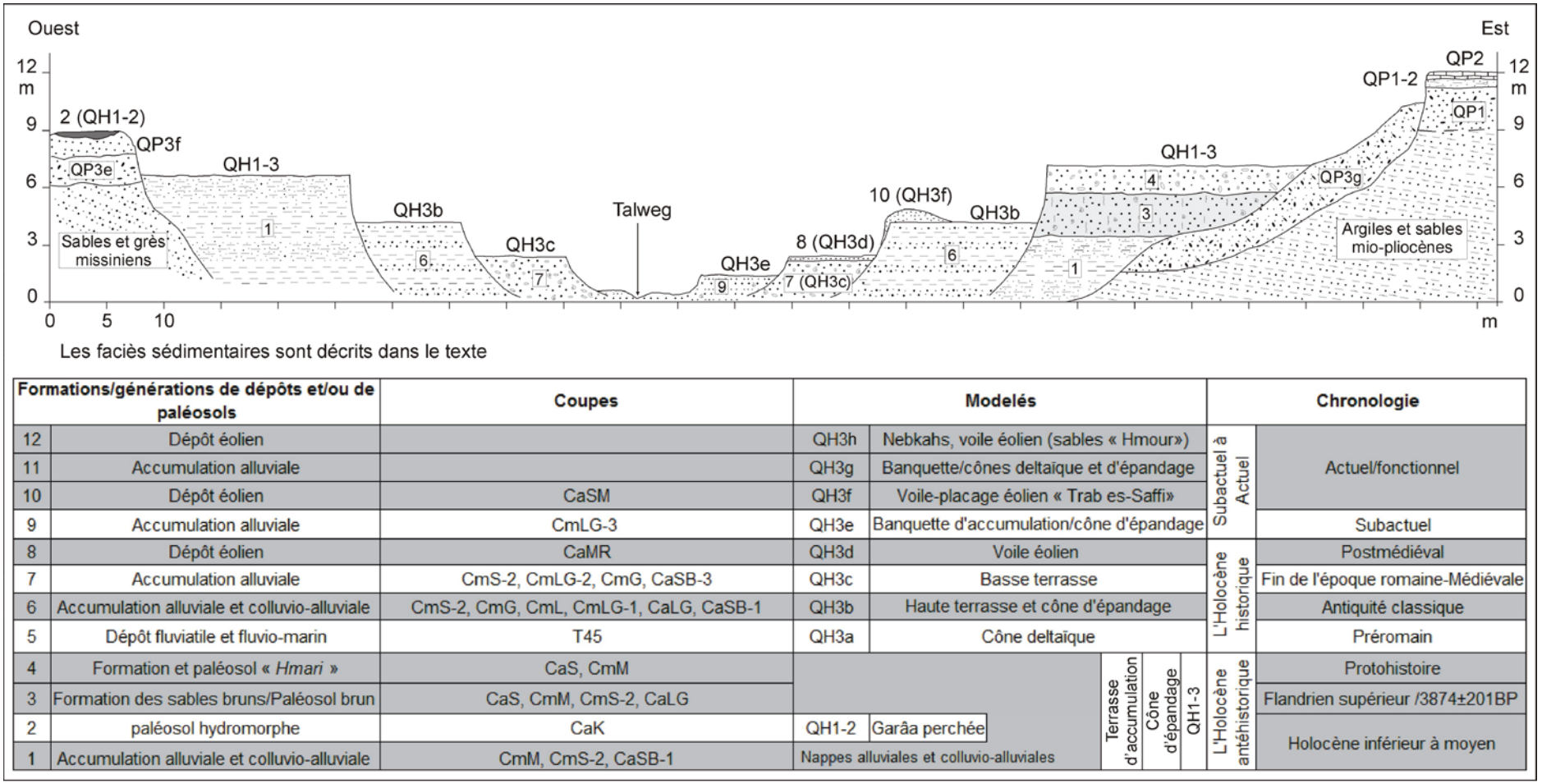
Ce chapitre consiste à étudier la position morphologique, l'extension et la répartition des modelés et des formations holocènes, à examiner leurs traits morphométriques et sédimentologiques et les mécanismes responsables de leur mise en place. Là où il a été possible, on cherchera leurs homologues reconnus, particulièrement dans les régions environnantes de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil. Le but est de chercher des corrélations et une signification autant locale que régionale des modelés hérités.

I- LES MODELES D'AGE HOLOCENE PREHISTORIQUE : QUOIQUE PEU NOMBREUX ILS INDIQUENT DES VARIATIONS DES CONDITIONS LOCALES ET DU CLIMAT

Excepté les formations des sables bruns et *« Hmari »* et malgré l'échelonnement de la période qu'ils recouvrent, sur plus des 2/3 de l'Holocène, les dépôts d'âge holocène préhistorique, bien que variés, sont peu étendus. Ils tendent souvent à la superposition et appartiennent à quatre générations bien séparées dans le temps. Les modelés associés sont hydriques, peu nombreux et certains d'entre eux sont très localisés. Ils correspondent à des garâas perchées, un cône deltaïque et surtout à une terrasse d'accumulation qui passe dans les zones d'épandage à une morphologie de cône-terrasse et de cône d'épandage.

I-1- La terrasse d'accumulation QH1-3

Dans les coupes CaS, CmM et CmS-2, les dépôts d'âge holocène antéhistorique prennent généralement la forme d'une terrasse d'accumulation. Par endroits, ils se présentent en nappes alluviales et colluvio-alluviales.



Formations/générations de dépôts et/ou de paléosols		Coupes	Modelés					Chronologie	
12	Dépôt éolien		QH3h	Nebkahs, voile éolien (sables « Hmour»)				Subactuel à Actuel	Actuel/fonctionnel
11	Accumulation alluviale		QH3g	Banquette/cônes deltaïque et d'épandage					
10	Dépôt éolien	CaSM	QH3f	Voile-placage éolien « Trab es-Saffi»					
9	Accumulation alluviale	CmLG-3	QH3e	Banquette d'accumulation/cône d'épandage					Subactuel
8	Dépôt éolien	CaMR	QH3d	Voile éolien				L'Holocène historique	Postmédiéval
7	Accumulation alluviale	CmS-2, CmLG-2, CmG, CaSB-3	QH3c	Basse terrasse					Fin de l'époque romaine-Médiévale
6	Accumulation alluviale et colluvio-alluviale	CmS-2, CmG, CmL, CmLG-1, CaLG, CaSB-1	QH3b	Haute terrasse et cône d'épandage					Antiquité classique
5	Dépôt fluviatile et fluvio-marin	T45	QH3a	Cône deltaïque					Préromain
4	Formation et paléosol « *Hmari* »	CaS, CmM			Terrasse d'accumulation	Cône d'épandage	QH1-3	L'Holocène antéhistorique	Protohistoire
3	Formation des sables bruns/Paléosol brun	CaS, CmM, CmS-2, CaLG							Flandrien supérieur /3874±201BP
2	paléosol hydromorphe	CaK	QH1-2	Garâa perchée					Holocène inférieur à moyen
1	Accumulation alluviale et colluvio-alluviale	CmM, CmS-2, CaSB-1	Nappes alluviales et colluvio-alluviales						

Fig. 83 : Coupe de synthèse des modelés holocènes du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

I-1-1- Extension géographique et caractéristiques morphométriques du modelé

La terrasse préhistorique QH1-3 est la forme la plus courante des fonds des cours amont et moyen des principaux affluents de la rive droite de l'oued al Manfas as-Sod et ceux du bassin méridional de la sebkha-lagune Halq al Minjil. Elle est souvent emboitée dans les dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur (OP3g). La terrasse présente un profil longitudinal plus au moins continu et une largeur très variable. Dans les cours amont et moyen de l'oued al Msid-ar-Ramla et le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga, la terrasse s'allonge sur 200 m à plus de 2 km de long et se développe sur 15 à plus de 150 m de largeur (Fig. 84 ; Pl. 6.1). Par contre, dans la plupart des fonds des oueds tributaires d'al Kalbiyya, elle est rarement aperçue. Elle est absente ou souvent recouverte par des dépôts historiques. Dans le cours amont de l'oued Salah Bou Giddida (Pl. 6.2), de quelques mètres de largeur, la terrasse s'emboîte dans les dépôts à nodules et à concrétions calcaires (QP3e) de la terrasse du Pléistocène terminal. Elle domine la haute terrasse historique d'environ 1,5 m. Les talus de raccordement, sont ici estompés.

I-1-2- Stratigraphie et caractéristiques sédimentologiques de l'accumulation

L'accumulation de la terrasse holocène antéhistorique montre **la superposition de trois ensembles** (*cf.*, Fig. 83 ; 1, 3, 4) **bien séparés dans le temps**.

- **Des nappes alluviales et colluvio-alluviales à la base de l'accumulation de la terrasse** représentent le premier ensemble basal (1). Des caractères formationnels et morphométriques bien différenciés peuvent être distingués au moins entre deux principaux compartiments du système fluvial. D'une part, dans les fonds des principaux affluents de l'oued al Manfas as-Sod et celui de l'oued Khili, principal tributaire du bassin méridional de la sebkha-lagune Halq al Minjil. Ici, la formation vient, dans la plupart des cas, sur les formations pléistocènes et sous le paléosol brun et la formation « *Hmari* ». L'accumulation est surtout sableuse et sablo-limoneuse, litée et d'une épaisseur visible qui va de 1,1 à 3,7 m. D'autre part, dans les cours amont et moyen des oueds tributaires de la rive droite d'al Kalbiyya où les dépôts sont moins diversifiés. Ils viennent sous des épaisses formations historiques. Ils sont alternativement composés de sédiments grossiers et fins compacts, surtout argilo-limoneux. La structure est tantôt stratifiée tantôt massive. L'épaisseur apparente ne dépasse pas 2 m en moyenne.

- **Les formations sables bruns (3) et « *Hmari* » (4)** forment les deux ensembles supérieurs. Ces formations sont essentiellement développées dans les vallées de la rive méridionale du bassin de l'oued al Manfas as-Sod et celles du bassin méridional de la sebkha-lagune Halq al Minjil. Souvent, seuls les sables bruns caractérisent le sommet de l'accumulation de la terrasse. Ils recouvrent la première formation (1) sans aucun passage progressif ou ils viennent directement sur les dépôts nodulaires du Pléistocène supérieur terminal (QP3g). Généralement, le faciès est grossier, sableux et sablo-limoneux. La structure est litée à massive. L'épaisseur va de 0,8 à 2,5 m.

Localement, la terrasse antéhistorique se présente en terrasse d'érosion, d'extension réduite (*cf.*, la coupe CmL). Elle correspond à un niveau de 3 m à plus de 4 m d'épaisseur, taillé dans les dépôts tertiaires. Le matériel est tantôt homogène composé de sables graveleux et grésifiés missiniens, tantôt hétérogène et plus fin, formé d'un mélange de limons, sables et argiles. Ces derniers sont riches en cristaux, tubules et rosettes de gypse et en concrétions calcaires d'âge mio-pliocène.

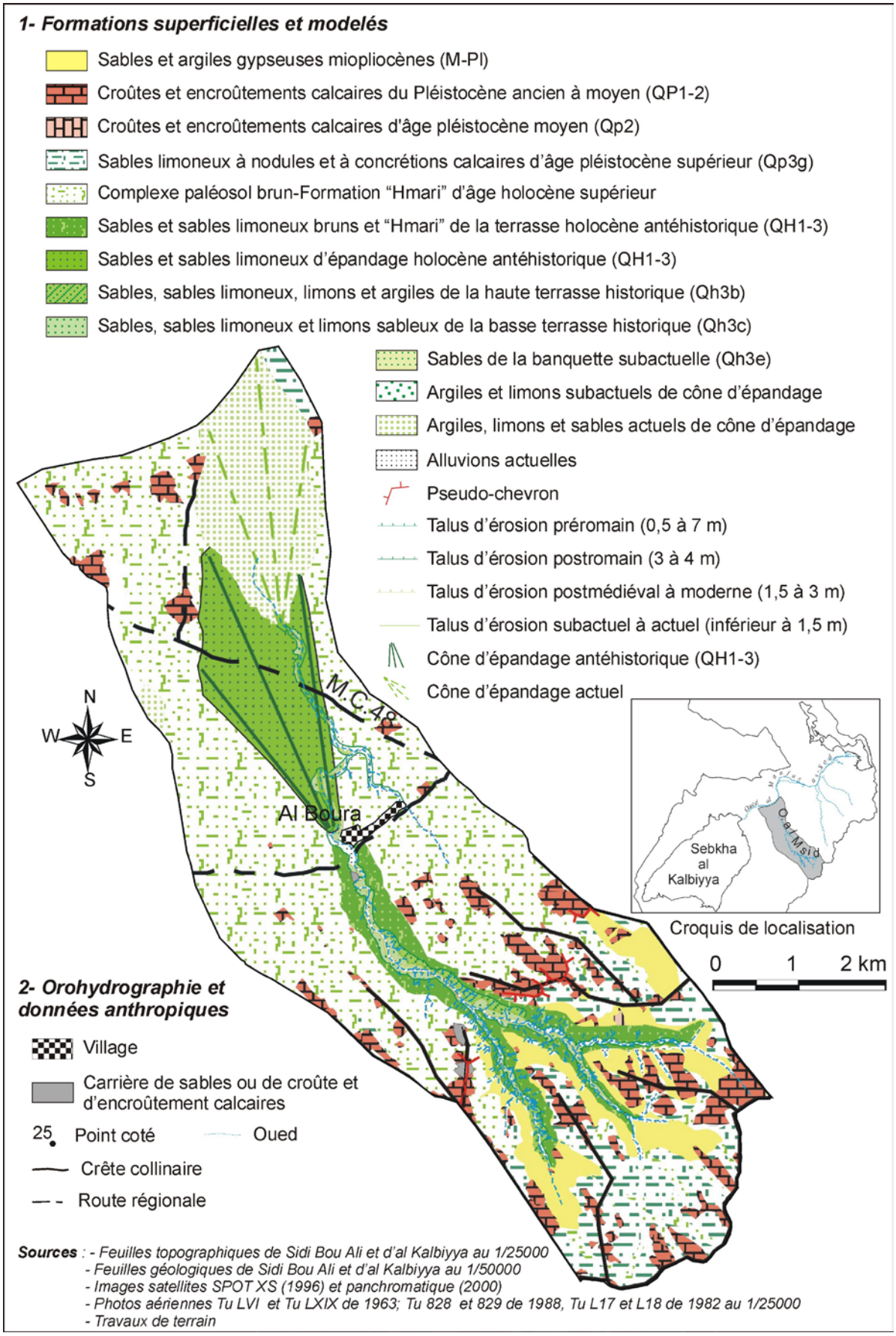
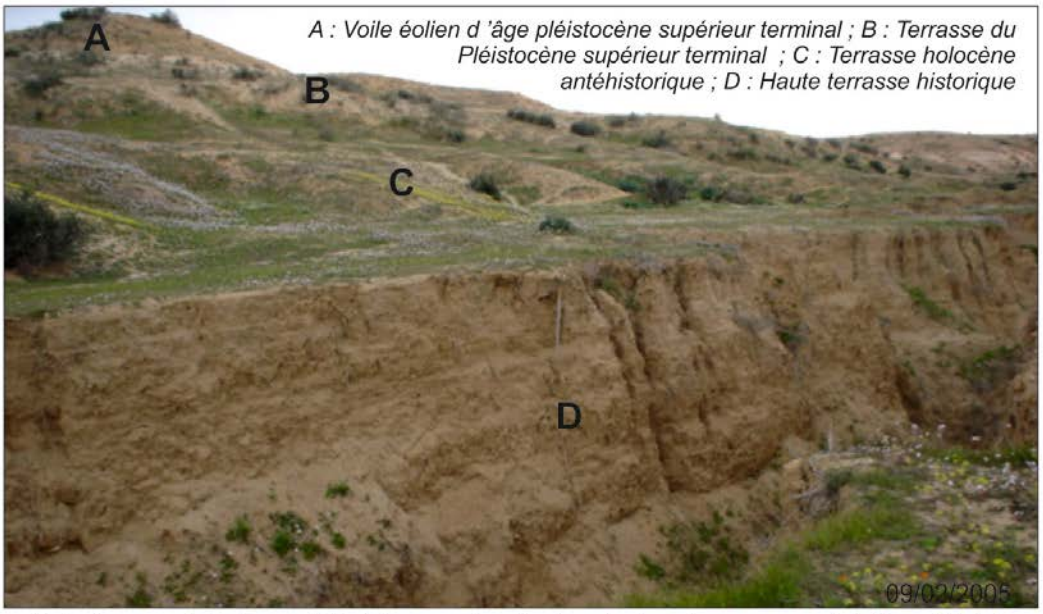


Fig. 84 : Carton géomorphologique du bassin de l'oued al Msid-ar-Ramla



1. Développement de la terrasse holocène antéhistorique dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga (rive droite)



2. La terrasse holocène antéhistorique, moins développée dans le cours amont de l'oued Salah Bou Giddida (rive ouest), s'emboîte dans la terrasse pléistocène et domine la haute terrasse historique. Les talus de raccordement d'environ 1,5 m de commandement sont estompés

Pl. 6 : Position morphologique et caractéristiques morphométriques de la terrasse Holocène antéhistorique dans les cours moyen et amont des oueds Lahmar-al Ghuirga et Salah Bou Giddida

I-1-3- Implications morphodynamique et morphogénique des dépôts et du modelé

L'accumulation de la terrasse se compose de deux à dix séquences différentes, superposées et arrangées en trois formations d'âge différent. Elle indique une grande variation des processus et des conditions de la morphodynamique. Les matrices, très hétérogènes, dérivent de la variété des formations superficielles dans les bassins d'où elles sont issues. La texture grossière, l'épaisseur notable et la structure souvent litée des dépôts, témoignent de la domination des dynamiques fluviatiles actives et des régimes hydriques peu contrastés permettant un bon tri hydrodynamique (Rosique *et al*., 2000). Les sédiments sont essentiellement issus de la suspension graduée avec un peu de roulement et se sont déposés en vrac et en mode libre pendant les grandes crues par des écoulements

intermittents, à plus ou moins forte capacité de transport. Les apports latéraux sur les pentes sont loin d'être négligeables.

Des contacts ravinants séparent par endroits les trois générations des dépôts de la terrasse ainsi que certaines séquences lithostratigraphiques qui les composent. Ils signalent l'inversion des tendances morphogéniques en perturbant le comblement fluviatile des fonds de vallées (*cf.*, les coupes CmM, CmS-2). Mais, les effets d'une érosion linéaire étaient limités et ont empêché tout emboîtement des trois formations (1), (3) et (4). L'évolution pédologique des sables bruns et de la formation « *Hmari* » témoigne de l'atténuation ou de l'arrêt de la morphogenèse, de la stabilisation des milieux et de l'amélioration des conditions climatiques.

I-1-4- Calage et essai de corrélation chronologiques

La première formation de la base de la terrasse n'a pas bénéficié de datations absolue et relative. Néanmoins, quelques éléments plaident pour son âge **holocène inférieur à moyen**. Le premier résulte de l'agencement de ses dépôts qui s'emboîtent ou se superposent aux dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène moyen et supérieur terminal (QP3e et QP3g). Le second se justifie par la datation radiocarbone du sommet du paléosol brun du dessus. L'âge ^{14}C obtenu sur les *Helix* (*cf.*, la coupe CaG) remonte à **3874±201 BP** (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC). Le troisième consiste en vestiges d'occupation romaine révélés au sommet de la formation « *Hmari* » et le paléosol brun. Dans les cours moyen et amont des oueds as-Souriyya et al Msid-ar-Ramla et sur la rive centre-est de Halq al Minjil, des tessons de poterie romaine *(cf.*, la coupe CmM) et des trous de plantation antiques (Mrabet et Boujarra, 1999), ainsi que des traces de centuriation romaine très visibles à Hanshir al Krari, nous rendent compte de l'occupation et de l'exploitation antiques de ces dépôts et paléosol. **Le paléosol brun et la formation « *Hmari* »** sont d'âge **holocène supérieur antéhistorique**. **La terrasse holocène antéhistorique** couvre une longue période qui s'étale sur environ les **2/3 de l'Holocène *senso-lato***.

Des formes équivalentes à la terrasse ont été reconnues dans le centre et le centre-ouest de la Tunisie. Cette terrasse est corrélable à une terrasse principale d'âge fini-pléistocène-holocène moyen, des vallées du bassin de Kasserine (Bkhairi, 2013). Bkhairi et Karray (2008) la calent entre 11873±764 et 4473±502 cal BP. Dans le bassin versant de l'oued Sbeïtla, une terrasse holocène couvre la même période entre 11700 et 4200 cal BP (Zerai, 2006). Dans le système endoréique de Sidi al Hani, Cherita et Mechertata, Ben jmaa (2008) place une haute terrasse entre 12615±449 et 4620±130 BP. En terme de corrélation, il est tentant de citer uniquement la contemporanéité de la première génération de dépôts de la terrasse holocène préhistorique avec les terrasses holocènes des régions environnantes de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil.

I-2- Les dépôts hydromorphes et les paléogarâas perchées (QH1-2)

I-2-1- Localisation et extension géographiques

Les cours amont et moyen des oueds al Kouz, Salah Bou Giddida, Hsin et Lahmar montrent des espaces d'interfluves et des parties de fonds de vallées marqués de taches sombres, grises à noirâtres, facilement repérables sur les fonds photographiques et satellitaires (Pl. 7). Ces taches sont d'une étendue réduite variant entre 800 et 965 m² environ. Ils marquent les témoins de **petits paléofonds humides** et de dépressions topographiques qui ont connu une forte activité des processus d'hydromorphie de surface (*cf.*, la coupe CaK). Ces paléofonds et dépressions répondent à une morphologie de **paléogarâas perchées**. Ils se situent à des altitudes absolues allant de 111 à 146 m. Ils ont

des profondeurs visibles (sur des coupes) qui peuvent atteindre pour certains sites environ 2 m. Les paléogarâas sont façonnées dans les argiles et les limons gypseux mio-pliocènes ou dans les pseudo-sables éoliens pléistocènes (QP3f). Elles sont le réceptacle d'éléments fins et un milieu de stagnation des eaux de ruissellement, favorisant le développement d'un sol hydromorphe peu profond. Aujourd'hui, ces paléo-espaces humides sont partiellement intégrés dans le système ravinant des oueds et sont réduits à l'état de lambeaux ou lanières.

I-2-2- Faciès et caractéristiques sédimentologiques

Les sédiments sont presque identiques dans les différents sites prospectés. Le dépôt à tendance fine est composé surtout d'argiles et de limons peu compacts. Il renferme des taches diffuses et des filaments blanchâtres de sel, des débris et des petites coquilles d'*Helix* et des microcristaux de gypse. La structure est massive à litée. La couleur est grise à noirâtre (5Y 4/1 ; 5Y 7/1). Le cortège minéralogique se distingue par la prédominance du quartz et de la calcite avec la faible présence mais toutefois significative du gypse, de l'anhydrite et des interstratifiées illite/smectite et chlorite/smectite. Le fer et le magnésium dépassent 12% de l'ensemble de la composition géochimique.

I-2-3- Signification morphodynamique et hydropédologique

Les formations grises à noirâtres correspondent à des dépôts fins de colmatage de petits fonds. Les sédiments argileux et limoneux sont issus de la suspension uniforme. Ils ont transité sur des petites distances par des ruissellements à faible capacité de transport et se sont déposés en mode libre proche de la décantation. La couleur grise est due aux phénomènes de réduction du fer. Celle-ci résulte d'une saturation temporaire des pores, provoquant dans des conditions anoxiques, la décomposition de la matière organique et l'accumulation du fer ferreux (Duchaufour *et al.*, 1977 ; Cantet *et al.*, 2003).

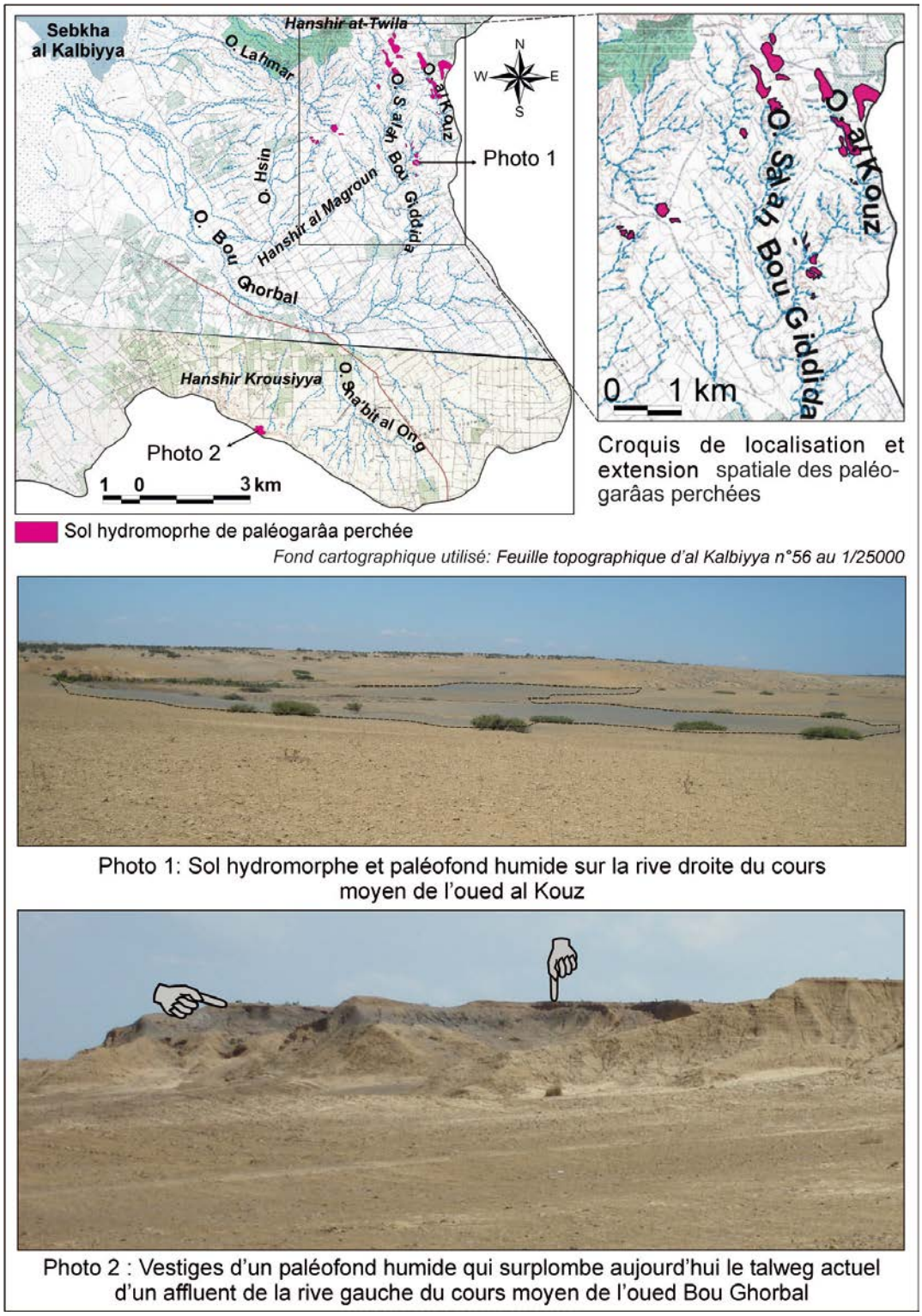
L'engorgement des sédiments en eau est lié soit directement à la fréquence des précipitations, soit à un mauvais drainage de surface ou encore à un apport d'eau excessif par ruissellement. Il peut témoigner de l'imperméabilité des sédiments eux-mêmes ou des formations sous-jacentes donnant un mauvais drainage interne (Kervazo et Laville, 1988). Ainsi, la mise en place d'une nappe d'eau perchée permanente sur le substrat mio-pliocène compacte ou sur les dépôts argilo-limoneux pléistocènes, a pu guider l'évolution pédogénique des sédiments par l'effet d'excès en eau (Vizier, 1984 ; Nicole *el al.*, 2003). Néanmoins, le fonctionnement des processus d'hydromorphie sur une faible profondeur et sur des petites étendues est en rapport avec la morphologie des dépressions topographiques et/ou encore avec la dynamique locale et limitée des nappes perchées (Nicole *et al.*, 2003). Les taches et les filaments blanchâtres du sel, le gypse et l'anhydrite témoignent de la diminution du niveau d'eau dans la nappe ou de sa disparition par évaporation (Cojan et Renard, 1999 ; Schütt, 1998, 2004). Ils peuvent indiquer l'arrêt temporaire de l'hydromorphie, l'exondation puis l'assèchement total des petites dépressions. L'hydromorphie est vraisemblablement un phénomène saisonnier.

I-2-4- Essai de calage chronologique

Aucune datation n'a été effectuée sur les dépôts *in situ*. Une attribution stratigraphique et chronologique correcte reste à préciser. Le dépôt repose directement sur les formations gypseuses mio-pliocènes et/ou sur les recouvrements éoliens pléistocènes sans aucun passage progressif et sans être recouvert par des dépôts plus récents.

La position perchée des garâas, la nature des sédiments et les dynamiques paléohydrologiques associées autorisent des corrélations stratigraphiques avec des dépôts de référence plus anciens. La contemporanéité de ces garâas de l'extension des plans d'eau dans la Tunisie centrale et méridionale à l'Holocène inférieur est possible (Karray, 1990,

1993 ; Ballais, 1991 ; Abichou, 2002). La corrélation des dépôts hydromorphes avec l'optimum climatique - à la fois hydrique et thermique atteint vers 8500 BP (Brun, 1991) - est également plausible. **Les paléofonds humides sont vraisemblablement contemporains de l'optimum lacustre d'al Kalbiyya** installé environ **entre 8052±168 BP** (9416-8545 cal BP/7467-6596 cal BC) **et 5632±218 BP** (LRAE-T52-1 ; 6931-5935 cal BP/4982-3986 cal BC).



Pl. 7 : Répartition géographique et extension des sols hydromorphes et des paléogarâas au sud et au sud-est du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

I-3- Le paléosol brun et la formation « *Hmari* »

Par leurs extensions, faciès et traits pédologiques, le paléosol brun et la formation « *Hmari* » présentent deux dépôts bien distincts dans le paysage géomorphologique du système fluvial. Ils servent de bons jalons litho-chronostratigraphiques à grande signification morphogénique, pédologique et paléoclimatique.

I-3-1 Position morphologique et extension spatiale

Le paléosol brun et la formation *« Hmari* » constituent les dépôts holocènes les plus étendus du système fluvial. Ils présentent aujourd'hui le support édaphique le plus exploité au Sahel tunisien (Boujarra et Mrabet, 1999 ; Brahim, 2001 ; Boujelben, 2002). Ils se développent particulièrement dans les fonds de vallées, sur le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar et dans les plaines de Sidi Bou Ali-Bal'oum et Sidi Bin Jabir (Fig. 85.1).

Dans les fonds de vallées, les dépôts sont en nappes en dessous les formations historiques ou dégagés en terrasse par une incision fini-protohistorique (*cf.*, les coupes CaG, CaS, CmM et CmS-2). Dans les cours avals des oueds as-Souriyya et al Msid-ar-Ramla, les dépôts ont la forme de cône-terrasse et de cône d'épandage (*cf.* Fig. 84). Le profil transversal est peu bombé et la pente en long est inférieure à 3%. Aujourd'hui, les oueds ont contourné les apex habituels de leurs cônes. Leurs cours avals occupent la position d'anciens inter-cônes.

Entre l'oued Hlig ar-Rizg à l'ouest et l'oued as-Souriyya à l'est, un matériel détritique de quelques décimètres à 2 m d'épaisseur, est modelé en « glacis de transit» (Tricart et *al.*, 1972 ; Joly, 1997). Il est composé de sables bruns, de la formation *« Hmari* » et par endroits de dépôts à nodules et à concrétions calcaires pléistocènes (OP3g). La surface topographique, assez régulière, s'incline doucement vers le nord et présente une pente inférieure à 2%. Sur la rive nord de l'oued al Manfas as-Sod, les dépôts bruns et « *Hmari* » s'amincissent et laissent apparaître les croûtes calcaires du Pléistocène ancien à moyen (QP1-2 et QP2).

I-3-2- Faciès sédimentaires et traits pédologiques

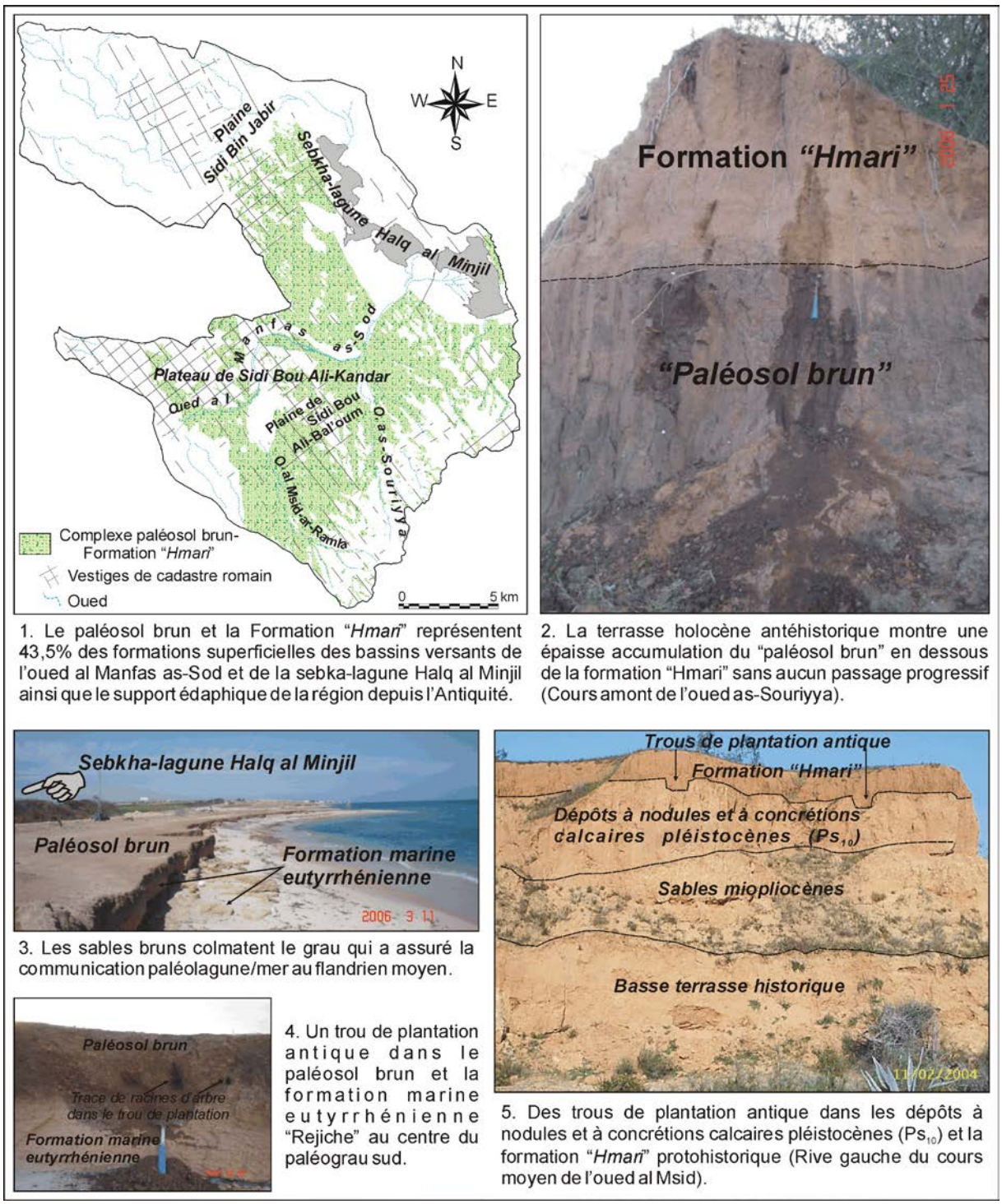
Le paléosol brun se distingue par sa granulométrie grossière, sa couleur foncée et sa richesse en matière organique et en pseudomycélium. Il est composé de sables (plus de 90%) et de sables limoneux peu calcaires. Il renferme des gravillons calcaires et des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers. Le paléosol est le plus riche du système fluvial en matière organique qui varie en profondeur en allant de 0 à 0,7% (Boujelben, 2002). L'épaisseur apparente va de 30 cm à plus de 3 m (Fig. 85.2). La structure est essentiellement grumeleuse. La couleur est brune rougeâtre foncée (5YR 3/3), brune foncée (7.5YR 5/6 et 7.5YR 3/2) à noir (5YR 2.5/1) et noire brunâtre (10YR 2/2). Les quartz émoussés luisants sont parfois revêtus de taches noires.

La formation « *Hmari* » ou « *Ardh Aïtha* » est composé de sables et de sables limoneux, peu à modérément calcaires. Elle renferme des cailloux et des graviers calcaires et des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers. La structure est litée à massive. La couleur est jaune rougeâtre (7.5YR 6/8, 7.5YR 7/8). L'épaisseur visible varie de 0,5 à 1,8 m.

I-3-3- Signification morphodynamique et évolution pédologique des dépôts

La phase sédimentaire des dépôts bruns *et « Hmari* » indique la domination des dynamiques fluviatiles actives, des écoulements couramment compétents et des apports latéraux non négligeables. Les sédiments sont principalement issus de la suspension graduée et sont mis en place en mode libre par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport.

La variation latérale des épaisseurs et de l'extension spatiale des dépôts est liée soit à l'irrégularité paléogéographique des fonds de vallées et des plaines lors de la sédimentation, soit à des différences spatiales d'accentuation de l'érosion des sols et d'accroissement de la charge solide des ruissellements concentrés ou diffus.



1. Le paléosol brun et la Formation "*Hmari*" représentent 43,5% des formations superficielles des bassins versants de l'oued al Manfas as-Sod et de la sebka-lagune Halq al Minjil ainsi que le support édaphique de la région depuis l'Antiquité.

2. La terrasse holocène antéhistorique montre une épaisse accumulation du "paléosol brun" en dessous de la formation "Hmari" sans aucun passage progressif (Cours amont de l'oued as-Souriyya).

3. Les sables bruns colmatent le grau qui a assuré la communication paléolagune/mer au flandrien moyen.

4. Un trou de plantation antique dans le paléosol brun et la formation marine eutyrrhénienne "Rejiche" au centre du paléograu sud.

5. Des trous de plantation antique dans les dépôts à nodules et à concrétions calcaires pléistocènes (Ps_{10}) et la formation "*Hmari*" protohistorique (Rive gauche du cours moyen de l'oued al Msid).

Fig. 85 : Le paléosol brun et la formation « Hmari » : extension spatiale, position morphologique, rapport stratigraphique et éléments de calage chronologique

Les sables bruns ont subi une évolution pédologique de type brun-isohumique. Ceci est attesté par la forte teneur en matière organique, la couleur brune foncée à noire des sédiments, le revêtement des quartz en taches noires et la présence du pseudomycélium filamenteux et ramifié. La formation « *Hmari* » vient en dessus du paléosol brun sans aucun passage progressif (Fig. 85.2). Les deux sont parfois séparés par un niveau d'érosion qui indique une rupture des conditions de biostasie antérieurement installées et le rétablissement de la morphogenèse. L'accumulation « *Hmari* » ne montre pas les traits d'une remarquable évolution pédologique comparable à celle de la formation sous-jacente.

I-3-4- Calage et corrélation chronologiques

La datation radiocarbone ^{14}C des *Helix* du sommet du paléosol brun (*cf.*, la coupe CaG) a donné un âge de **3874±201 BP** (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC). On ne sait pas encore l'âge de la base de l'accumulation. Au sud-est et au centre-est de Halq al Minjil, le paléosol recouvre la surface du raccordement cordon tyrrhénien/sebkha-lagune. Sa mise en place est à l'origine du colmatage des graus septentrionaux qui assuraient la communication mer/lagune au Flandrien moyen ainsi que de la progradation des rivages et du rétrécissement de la sebkha-lagune installée à la transition Flandrien moyen-Flandrien supérieur (Fig. 85.3). Sur les bordures orientales de l'enclave littorale, ce paléosol est enseveli par les dépôts éoliens du bourrelet édifié au Flandrien supérieur (Beta 290411 ; **3410±40 BP** ; 3731-3562 cal BP/1782-1613 cal BC).

La phase sédimentaire des sables bruns est sans doute postérieure au deuxième stade lagunaire SH_X de Halq al Minjil et est vraisemblablement contemporaine du stade sebkha-lagune SH_{XII} installée vers la limite inférieure du Flandrien supérieur. L'évolution pédologique de ces sables est antérieure à l'installation du stade sebkha-littorale SH_{XIII} et à la construction du bourrelet hydroéolien à la fin de l'Holocène moyen. **Les sables et le paléosol bruns sont d'âge flandrien moyen** et se placent **entre 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3105-2889 cal BC) **et 3410±40 BP** (Beta 290411 ; 3731-3562 cal BP/1782-1613 cal BC).

Les conditions biostasiques contrôlant leur pédogénisation ont été installées sur une courte durée. Elles sont corrélables avec celles reconnues dans le centre-ouest de la Tunisie (Bkhairi et Karray 2008, Karray, 2010). En 1972, Barrot a identifié une formation semblable aux sables bruns et lui a attribué un âge würmien. Brahim F. (2001) a décrit à proximité des oueds el Khanga et Mbarek et dans le bassin amont de l'oued Guelet, des dépôts semblables portant des traces d'occupation romaine. Dans le bassin de l'oued Sbeïtla, Zerai K. (2006) a distingué au moins trois générations de paléosols noirâtres dont les traits morpho-pédologiques rappellent ceux du paléosol brun. Il les a attribués à des âges capsien (Oued Douleb/Safhit El-Flalig), holocène inférieur (Bled Ennfad) et historique (Ain Sfisifa).

La formation « *Hmari* » recouvre le paléosol brun. Elle est postérieure à **3410±40 BP** (Beta 290411 ; 3731-3562 cal BP/1782-1613 cal BC). En surface, elle montre des champs de céramiques de tradition punique et romaine (**I^{er}s av. J.C - V^{e}s ap. J.-C.**) et des vestiges du cadastre romain. Ces données confirment son âge protohistorique. Par contre sa pédogénisation remonte à la période préromaine. Des trous de plantation antique (Communication orale de Mrabet A.), équidistants et de même taille, sont aujourd'hui visibles dans le paléosol brun et la formation « *Hmari* ». Ils rendent comptent de l'ancienne exploitation agricole de ces sols durant l'Antiquité romaine (Fig. 85.4 et 85.5).

I-4- La première génération de cône deltaïque à l'embouchure de l'oued al Manfas as-Sod *(QH3a)*

I-4-1- Localisation et caractéristiques morphologiques

Dans le milieu lagunaire actuel de Halq al Minjil, l'oued al Manfas as-Sod a édifié trois « cônes deltaïques » bien différenciés (Fig. 86.1). Les clichés aériens de 1963 montrent visiblement la première génération de cône possédant une forme bien particulière. Elle présente une morphologie de flèche d'embouchure, vraisemblablement liée aux dynamiques érosives des courants lagunaires (Rey *et al.*, 2005). Elle s'avance comme une presqu'île dans la dépression littorale (Fig. 86.2). La construction alluviale est d'une épaisseur moyenne de 3,5 m. Elle culmine à 1,8 m et s'étale sur 1,06 km² environ.

I-4-2- Caractéristiques sédimentologiques et implications morphodynamiques

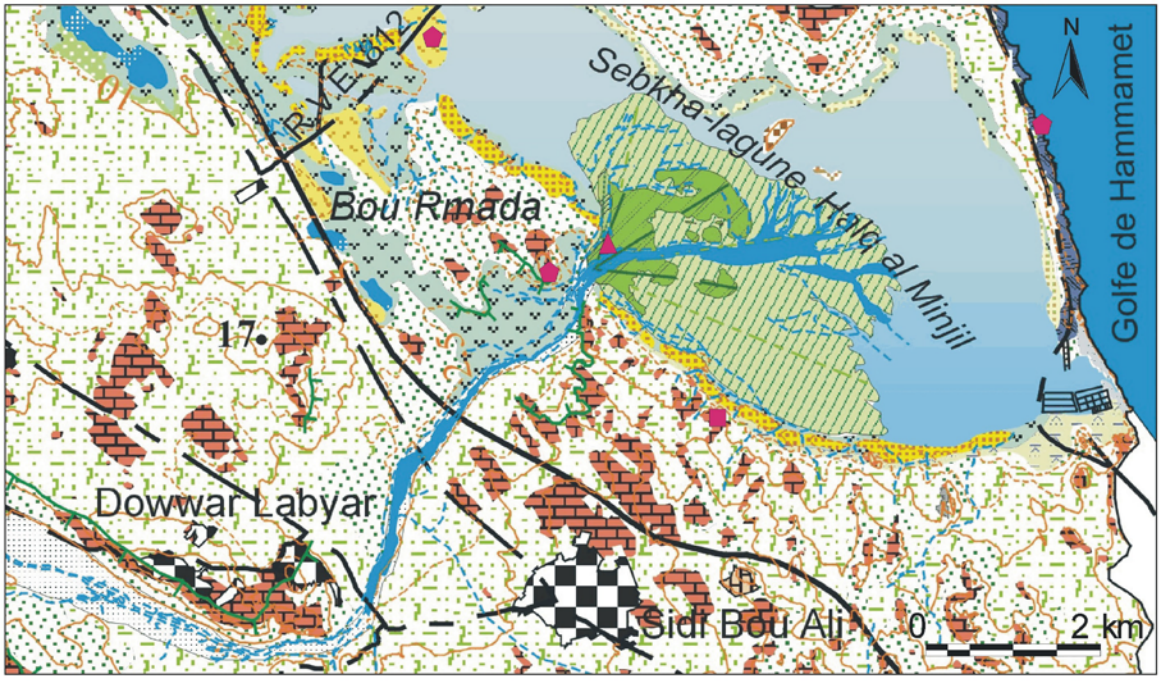
L'accumulation est composée d'alternances de sables, de sables limoneux, de limons sablo-argileux, de limons et de limons argileux lités. La matière, principalement grossière, est issue d'une dynamique fluviatile généralement active. Elle est mise en place par des écoulements intermittents mais à forte capacité d'érosion et de transport. Les courants d'eau se sont propagés à grande distance de l'embouchure, permettant l'étalement des matériaux grossiers d'autant plus vers le centre de Halq al Minjil. L'intercalation des passées d'argiles et d'argiles limoneuses laminaires implique des changements des processus et des conditions de la morphodynamique. Les sédiments fins correspondent à des dépôts de décrues ou de crues non énergiques, déposés par décantation dans un milieu calme. La présence du sel, du gypse et des racines indique des discontinuités dans les dynamiques de comblement de Halq al Minjil et une évolution post-déposionnelle des sédiments. Les grains de charbon de bois dans le dépôt peuvent certifier des incendies naturels et/ou anthropiques, liés à des actions de défrichements et de destruction dans le bassin versant.

I-4-3- Calage chronologique

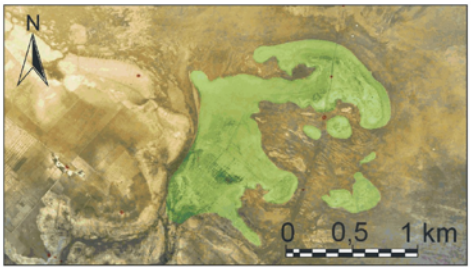
Les dépôts fluvio-deltaïques enfouissent les niveaux lagunaires du Flandrien moyen. Ils sont **postérieurs à 3410±40 BP** (Beta 290411 ; 3731-3562 cal BP/1782-1613 cal BC), date de l'installation du stade sebkha littorale SH_{XIII}. Au niveau de l'apex du cône deltaïque, des **tessons de céramique romaine et moderne** viennent au sommet de l'accumulation alluviale (*cf.*, chapitre 8, T45). Les éléments datables indiquent une mise en place antérieure à la **première moitié du II^e^s ap. J.-C**. L'aggradation alluviale de l'édifice est peut-être consécutive à la phase d'incision des fonds de vallées précédant l'époque de leur comblement historique. La construction est préromaine et remonte vraisemblablement à l'époque punique.

II- LES MODELES D'AGE HISTORIQUE : QUOIQUE MIS EN PLACE DANS UN LAPS DE TEMPS RESTREINT, ILS INDIQUENT DE RAPIDES VARIATIONS ENVIRONNEMENTALES ET DE GRANDES INSTABILITES MORPHOGENIQUES

Malgré leurs mises en place pendant une courte durée de l'Holocène, les héritages géomorphologiques historiques confèrent au système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil son originalité morphoclimatique. Dans les fonds de vallées, deux terrasses et une banquette s'emboîtent. A la sortie du relief collinaire et dans les plaines, ces modelés passent à une morphologie de cônes-terrasses, cônes et plaines d'épandage et cônes deltaïques. Contre les berges et sur les interfluves des cours avals de quelques oueds, des placages et des voiles éoliens prennent place.



1: Carton géomorphologique du bassin méridional de la sebkha lagune Halq al Minjil



Sources :
- *Feuilles topographiques de Sidi Bou Ali et Halq al Minjil au 1/25000*
- *Images satellites SPOT XS (1996) et panchromatique (2000)*
- *Photos aériennes Tu XLIX de 1963 au 1/25000*
- *Photos aériennes Tu 828 de 1988 au 1/25000*
- *Photos aériennes Tu L17 et L18 de 1982 au 1/25000*
- *Travaux de terrain*

2: La photo aérienne n°40 Tu XLIX au 1/25000 montre une morphologique distinctive de l'ancien cône deltaïque de l'oued al Manfas-as-Sod

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 16
25 10 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36 37

1- Formations et modelés liés aux eaux courantes

1: Croûtes et encroûtements calcaires du Pléistocène ancien à moyen (QP1-2); 2: Croûtes et encroûtements calcaires d'âge pléistocène moyen, (QP2); 3: Complexe *« Paléosol brun »*-Formation *« Hmani »* et dépôts à nodules et à concrétions calcaires (QP3g); 4: Complexe "*paléosol brun*"-Formation "*Hmani*" d'âge holocène supérieur; 5: Sables et limons du cône deltaïque préromain; 6: Sables et limons du cône deltaïque antérieur aux crues de 1969; 7: Sables et limons du cône deltaïque des crues de 1969; 8: Argiles et limons gypseux; 9: Alluvions actuelles en transit; 10: Paléovallée pléistocène supérieur; 11: Cône deltaïque préromain; 12: Cône deltaïque antérieur aux crues de 1969; 13: Cône deltaïque des crues de 1969.

2- Dépôts et modelés littoraux

14: Superpositions des dépôts marins et éoliens d'âge tyrrhénien; 15: Sables de plage actuelle.

3- Formes et formations éoliennes

16: Dunes probablement d'âge pléistocène supérieur; 17: Deux générations de dépôts superposés d'un bourrelet d'âge holocène inférieur et moyen; 18: Dune-îlot d'âge holocène inférieur et moyen portant le site épipaléolithique SHM1; 19: Bourrelet protohistorique; 20: Dune-îlot (Guataya) d'âge protohistorique à historique; 21: Champs de nebka; 22: Ecoulement permanent.

4- Orohydrographie, données anthropiques et végétation

23: Ecoulement temporaire; 24: Altitude point coté; 25: Courbe de niveau (équidistance de 10 m); 26: Route nationale et régionale; 27: Autoroute; 28: Pont antique; 29: Site atérien; 30: Site épipaléolithique; 31: Site antique; 32: Village; 33: Carrière de sables ou de croûte et d'encroûtement calcaires ; 34: Station d'aquaculture; 35: Végétation halophile de chott; 36: Sebkha-lagune; 37: Petits fonds isolés.

Fig. 86 : Une morphologie de flèche d'embouchure caractérise l'ancien cône deltaïque préromain de l'oued al Manfas as-Sod

A la différence des dépôts holocènes préhistoriques, les formations historiques ont l'avantage de présenter des éléments archéologiques datables. Mais, ces éléments ne sont pas présents dans une même coupe ou au moins dans deux termes d'une accumulation pour y déterminer les rythmes de l'érosion.

II-1- La haute terrasse et les cônes d'épandage (QH3b)

II-1-1- Extension géographique et caractéristiques morphologiques

La haute terrasse historique occupe des étendues importantes mais inégales dans le système fluvial de l'hydrosystème. Elle présente des caractères morphométriques différents entre deux espaces. Ceci est en rapport avec les contrastes géologiques et orohydrographiques locaux.

(1) **Dans les vallées des principaux affluents de l'oued al Manfas as-Sod et celles des cours d'eau du bassin méridional de Halq al Minjil**, la haute terrasse est surtout visible dans les cours amont et moyen où le profil longitudinal est très discontinu. Dans le cours moyen de l'oued as-Souriyya, la terrasse s'allonge sur quelques centaines de mètres de long et ne dépasse pas quelques dizaines de mètres de largeur. Dans le cours aval de Sha'bit al Warrad, le modelé se présente en lambeau de terrasse. Son altitude, par rapport au talweg, atteint rarement 5,5 m. L'épaisseur des dépôts va de 1,8 à 3,65 m (*cf.*, la coupe CmS-2). Localement, l'accumulation est incisée par des ravins latéraux colmatés et en position perchée à 1 m au-dessus du talweg actuel (cours moyen de l'oued as-Souriyya).

(2) **Dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya**, la haute terrasse est beaucoup plus développée. La largeur va de 6 m dans le cours amont de Sha'abit el Ong à plus de 40 m dans le cours moyen de l'oued al Gharig. Les épaisseurs sont variables. Elles atteignent 7 m dans le cours aval de l'oued Dar La'zibi. Dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga, la terrasse présente la plus grande extension (Fig. 87). Elle s'allonge sur plus d'une centaine de mètres de largeur et sur plus de 2 km de longueur.

A l'exutoire des oueds, la haute terrasse passe à une morphologie de cône-terrasses et de cônes d'épandage. L'accumulation alluviale est plus puissante et dépasse parfois 8 m dans le cours aval des oueds al Gharig et Salah Bou Giddida. Dans la plaine d'al Hanya, les cônes sont coalescents et de très faible convexité, donnant l'aspect d'une morphologie de « glacis ».

II-1-2- Faciès sédimentaires et significations morphodynamiques

Dans les vallées des oueds de la rive méridionale du bassin de l'oued al Manfas as-Sod et celui de Halq al Minjil, la matrice est essentiellement grossière. Les accumulations alluviales sont composées d'une alternance de séquences sableuses, sablo-limoneuses et limoneuses, d'épaisseur centimétrique à décimétrique. Elles sont localement intercalées de poches de sables quartzeux et de graviers calcaires (Pl. 8.1). Les sédiments sont surtout charriés par la suspension graduée, par la suspension de fond et par roulement. L'accumulation est en vrac par excès de charge et libre proche d'un dépôt forcé.

Dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya, la matrice est plus hétérogène et varie rapidement aussi bien verticalement que latéralement (*cf.*, les coupes CmG-1 et CmL). Elle est alternativement grossière et fine. Des séquences argileuses, argilo-silteuses sont entrecoupées par des lits de sables, de sables limoneux et de sables argileux. Des lentilles centimétriques à métriques argileuses ou sableuses aux graviers calcaires s'intercalent dans l'accumulation (Pl. 8.2). Le dépôt témoigne des puissances variables des flux d'eau qui ont joué sur la grossièreté des sédiments (Fig. 88).

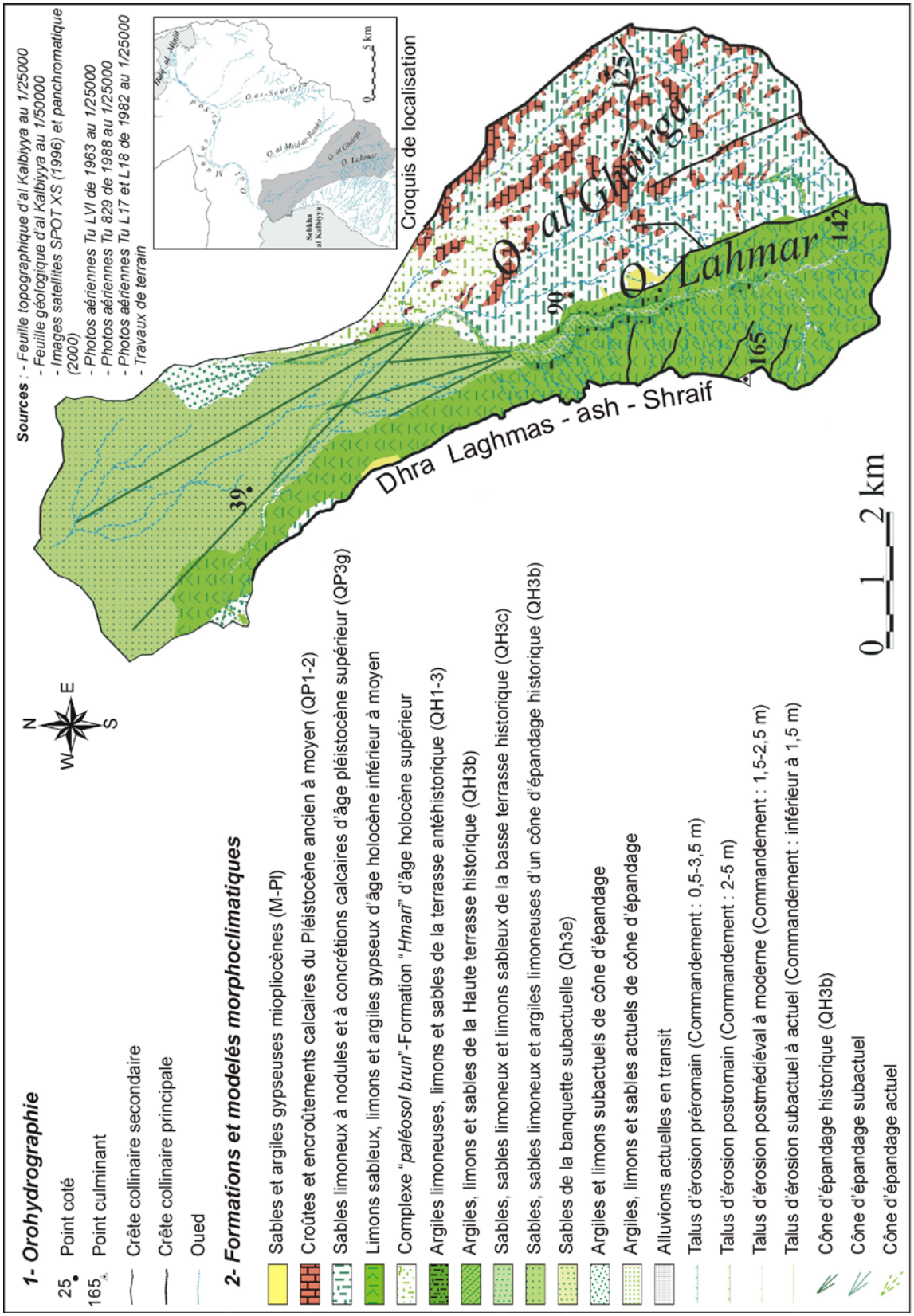


Fig. 87 : Carton géomorphologique du bassin de l'oued Lahmar-al Ghuirga

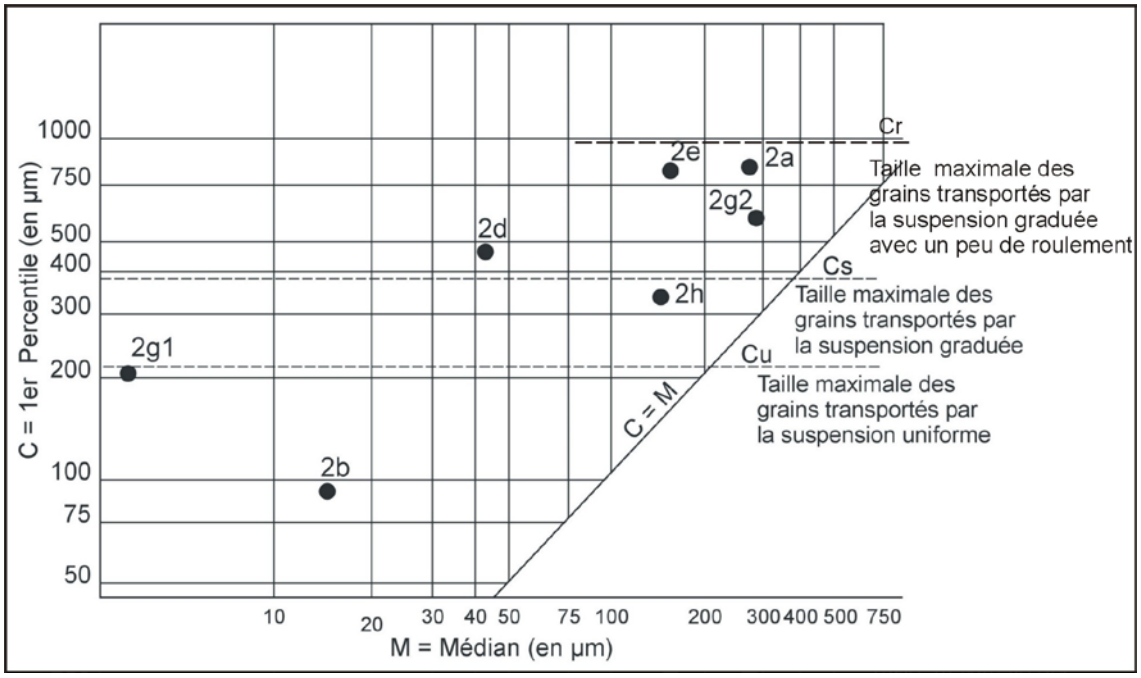


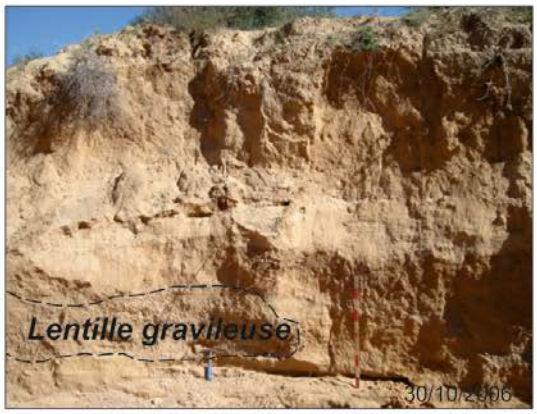
Fig. 88 : Modes de transport des sédiments de la haute terrasse (la coupe CmLG-1) selon l'image CM

Dans les zones d'épandage, les cônes et les cône-terrasses présentent la même succession de dépôts historiques. Les sédiments restent généralement moins calcaires que les alluvions holocènes.

L'hétérogénéité spatiale des sédiments et le changement des figures sédimentaires témoignent de la disparité des contextes locaux dans les bassins et de l'instabilité morphodynamique dans les vallées (Pl. 8.3). La superposition des séquences aux sédiments fins et grossiers résulte des successions de dynamiques fluviatiles actives et lentes. Des lits pluri-centimétriques de sables fins éoliens s'intercalent dans l'accumulation. Ils attribuent aux vents une place dans la morphogenèse (*cf.*, la coupe CmLG-1). Localement, des contacts ravinants séparent les membres de l'accumulation. Le ravinement le plus développé a été observé dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga (Pl. 8.4). Il témoigne de l'inversion des tendances morphogéniques et de la reprise de l'érosion dans le fond de la vallée. Cependant, l'absence d'une véritable phase de creusement linéaire n'a pas permis l'emboîtement ou l'étagement des formations alluviales.

II-1-3- Calage et corrélation chronologiques

Les dépôts de la haute terrasse historique se superposent et s'emboîtent dans les dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur terminal (QP3g) et dans le paléosol brun et la formation « *Hmari* » d'âge flandrien supérieur à protohistorique (QH1-3). Le remblaiement des fonds de vallées a été précédé par une importante **phase d'incision linéaire** responsable d'un surcreusement des talwegs **sur 5 à plus de 10 m** de profondeur. Cette phase est **d'âge préromain**. Sur les différentes coupes levées, seuls les membres inférieurs de la terrasse ont livré **des tessons de céramiques antiques** qui **n'ont donné aucune précision chronologique relative** (*cf.*, les coupes CmL et CmG-1, CaSB-1). En outre et faute de trouver des éléments archéologiques datables au sommet de l'accumulation, il reste difficile d'apprécier la fourchette d'âge de la fin du comblement des vallées et celle de début de l'incision linéaire, ultérieurement responsable du dégagement de la terrasse. Toutefois, les données chrono-géomorphologiques disponibles plaident pour un **âge historique remontant à l'époque romaine**.

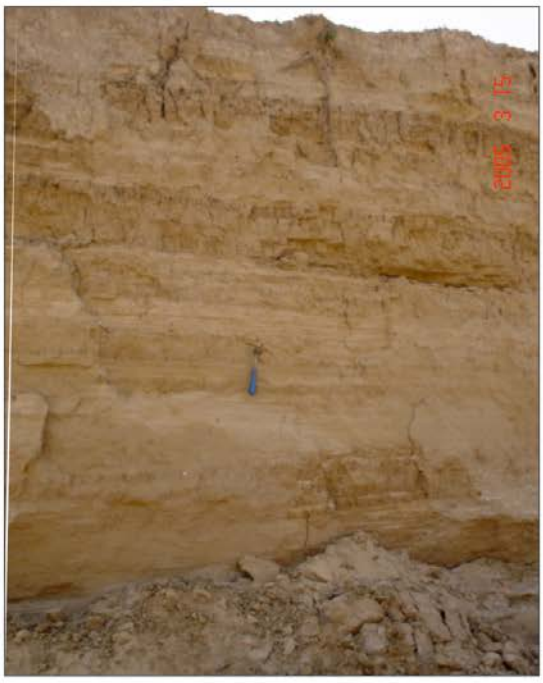


1 : Dans les vallées des affluents de l'oued al Manfas as-Sod, l'accumulation alluviale de la haute terrasse, moins développée, est essentiellement sableuse et intercalée de grandes lentilles graveleuse (rive droite du cours moyen de l'oued as-Souriyya).



2 : Par contre, dans les vallées des oueds tributaires de la sebkha al Kalbiyya, l'accumulation est beaucoup plus épaisse et composée d'alternances de sédiments fins et grossiers (rive droite du cours moyen de l'oued al Gharig).





3 : Sur quelques mètres de distance, l'accumulation alluviale montre une forte variation verticale et latérale des faciès et des figures sédimentaires (rive nord du cours moyen de l'oued Lahmar).



4 : Un remarquable contact ravinant sépare les séquences alluviales de la haute terrasse (rive droite du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga).

Pl. 8 : Caractéristiques sédimentologiques et morphométriques de l'accumulation de la haute terrasse historique

La haute terrasse historique trouve son équivalent dans toute la Tunisie (Hamza, 1982 ; Bourgou et Oueslati, 1987 ; Oueslati, 1989 ; Ballais, 1991 ; Bourgou, 1993 ; Oueslati, 1993 ; Karray, 1993 ; Brahim, 2001 ; Boujarra et *al.*, 2006). Elle peut correspondre à la terrasse historique principale du bassin versant de l'oued Sbeïtla. Zerai K. (2006) lui a attribué un âge plus récent variant entre 1,6 ka cal BP, à la base de la terrasse, et 1,1 ka cal BP au sommet, soit de la fin de l'époque romaine (320-420 ap. J.C.) jusqu'aux IX-Xe siècles. La terrasse peut ressembler aussi à la haute terrasse historique du bassin de Kasserine (Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013). Mais ici, les remblaiements sont beaucoup plus précoces, entre 2439±288 et 1 948±236 cal. BP et leur fin date du IVe au VI^{e}s après J.-C., qui correspond à l'époque romaine tardive. Enfin, cette haute terrasse peut concorder à la basse terrasse du système endoréique de Sidi al Hani, Cherita et Merchertate. Ben Jmaa H. (2008) lui a attribué un âge s'étalant entre 4515±161 et 1393±85 BP (3642-2873 cal BC/525-783 cal AD).

II-2- La basse terrasse historique (QH3c)

II-2-1- Caractéristiques morphométriques et extension géographique

La basse terrasse historique est le modelé le plus fréquent du système fluvial. Mais, elle y reste peu développée. Elle atteint rarement 3 m de hauteur et présente une largeur souvent inférieure à 14 m. Dans la plupart des cas, les coupes ne permettent pas de voir la base de l'accumulation. Certaines sections de vallées montrent un développement notable du modelé, ce qui est très net dans les lobes convexes des méandres (Pl. 9.1). Dans le cours aval des oueds Salah Bou Giddida et as-Souriyya , la terrasse présente une extension longitudinale continue sur plus de 250 m, une largeur de 2 à 60 m et une hauteur de l'ordre de 1,6 à 1,75 m. Dans le cours principal de l'oued al Manfas as-Sod, le modelé présente une extension réduite.

II-2-2- Caractérisation des dépôts et signification morphodynamique

Dans l'ensemble du système fluvial, la basse terrasse présente une ressemblance des caractéristiques sédimentologiques des dépôts et une similarité des mécanismes de sa mise en place. L'accumulation souvent stratifiée est essentiellement grossière. Elle est composée d'alternances de lits centimétriques à décimétriques de sables, de sables limoneux et de limons sableux. Elle se distingue par la présence de lits et de lentilles renfermant des dragées de quartz, des graviers, des cailloux et des galets calcaires et gréseux, des débris de coquilles d'*Helix* et des *Helix* entiers et des tessons de poterie, surtout à l'aval des sites archéologiques dominants les berges. Des passées millimétriques à centimétriques d'argiles, d'argiles limoneuses et de limons silto-argileux s'intercalent dans les sédiments.

Les dépôts témoignent sans doute de la prédominance des dynamiques fluviatiles actives. Les matériaux grossiers sont essentiellement transportés par la suspension graduée, la suspension de fond et roulement (Fig. 89). Ils correspondent aux dépôts des maximums d'épisodes de grandes crues ou des crues brèves et violentes, générées lors des pluies intenses et rapides. Les galets, les cailloux et les graviers gréseux et calcaires peuvent confirmer des apports latéraux sur les croûtes calcaires et les grès mio-pliocènes à partir des versants. Ils sont mis en place par des écoulements compétents concentrés ou diffus, prenant parfois une allure torrentielle. Les lits d'argiles et de limons silteux correspondent, en revanche, aux dépôts de crues non vigoureuses ou aux sédiments de décrue. L'accumulation est souvent libre et forcée puis libre de décrue.



1: Dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga (rive gauche), la basse terrasse s'emboîte dans la haute terrasse historique et montre une importante extension longitudinale.



2: Sur la rive droite du cours amont de l'oued Sha'abit el Ong, la haute et la basse terrasses historiques sont étagées. Sur l'autre rive, la basse terrasse s'emboîte dans la terrasse d'érosion holocène antéhistorique dégagée dans les dépôts mio-pliocènes.

Pl. 9 : La basse terrasse historique : extension et position morphologique dans les oueds Lahmar-al-Ghuirga et Sha'abit el Ong

La présence du sel, des taches noires, des cristaux et des rosettes de gypse dans l'accumulation ainsi que des passées de sables limoneux éoliens témoignent des tendances morphogéniques inversées. Elle explique l'intervention des épisodes de pédogenèse et d'action éolienne. La grossièreté notable des remblaiements même dans les vallées endoréiques où prédominent les terrains lithologiques fins, est corrélée à une possible déstabilisation des versants et à des chenaux latéraux à forte capacité de transport sur des sites archéologiques dominant les berges (galets, tessons de poterie). On peut mettre en évidence des relations directes entre les comblements colluvio-fluviatiles, l'activité hydrique et les forçages anthropiques. Le caractère sédimentologique de la basse terrasse exclut une origine entièrement climatique mais peut faire intervenir une augmentation de la fréquence des événements hydro-pluviométriques extrêmes.

II-2-3- Attribution et corrélation chronologiques

L'accumulation de la basse terrasse s'emboîte dans les dépôts de la terrasse préhistorique et dans la haute terrasse et les cônes historiques. Une seule coupe étudiée a montré un dispositif d'étagement des deux terrasses historiques. Il résulte de la proximité du substratum et de l'importance de l'incision linéaire précédant la mise en place de la basse terrasse (Pl. 9.2). Cette terrasse, qui a pris localement la forme d'une terrasse d'érosion (cours aval de l'oued as-Souriyya), est postérieure à une phase importante d'incision

linéaire. Dans la plaine d'al Hanya, les oueds ont creusé leur cône d'épandage historique sur 7 à 10 m de profondeur.

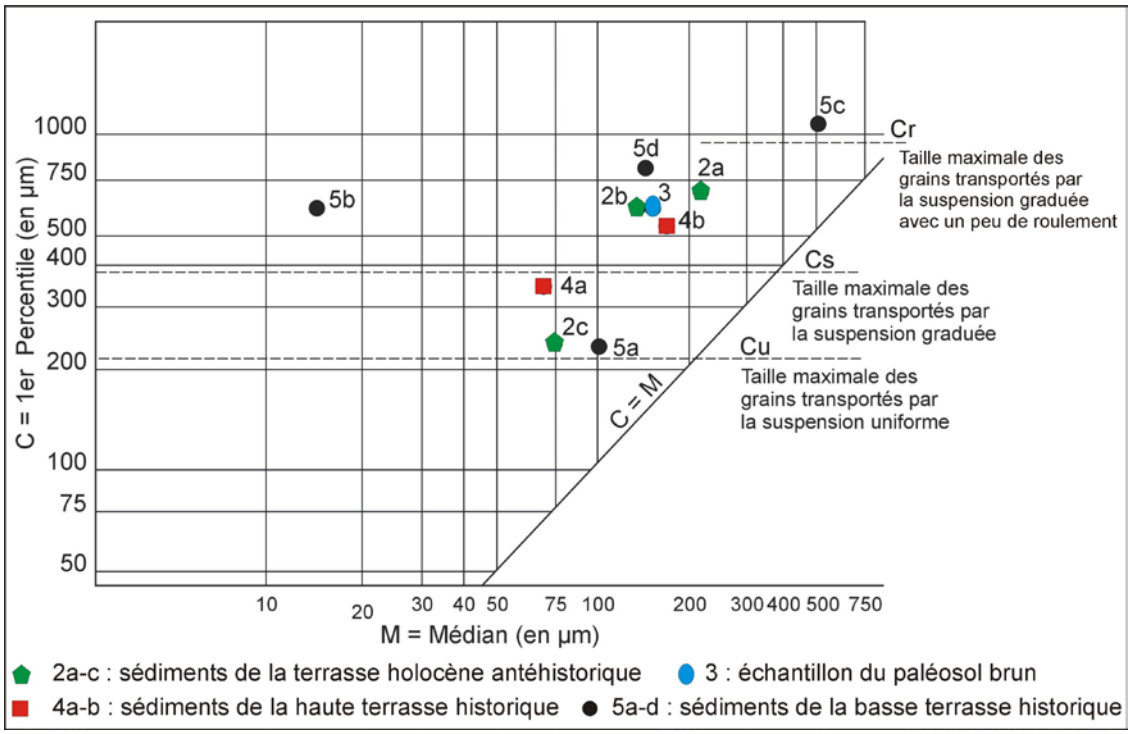


Fig. 89 : Modes de transport des échantillons de la coupe CmS-2 (Image CM)

Les séquences médianes de l'accumulation de la terrasse ont emballé des tessons de poterie romaine, datées du **IIe au III^e^s ap. J.-C.** Seule la coupe CaS du cours amont de l'oued as-Sourriyya a montré dans les termes supérieurs de l'accumulation une **céramique éventuellement de l'époque hafside** associée à des tessons de poterie romaine. Toute interprétation chronologique y reste délicate car ces éléments archéologiques n'établissent qu'une chronostratigraphie floue. Néanmoins, on peut avancer prudemment l'hypothèse d'**une mise en place en deux phases** : (1) une première phase postérieure à la période romaine et antérieure à l'époque hafside ; (2) une deuxième phase qui s'est poursuivie durant et après la période hafside. La basse terrasse a pu éventuellement **couvrir la période post-romaine-médiévale**. **L'incision linéaire** responsable de son dégagement remonte vraisemblablement à **l'époque moderne**.

La basse terrasse historique est corrélable avec la deuxième terrasse historique intermédiaire de Zerai K. (2006), mise en place depuis le X^e^s ap. J.-C. Elle est l'équivalente des basses terrasses des bassins endoréiques du Sahel tunisien qui s'échelonnent du Moyen Âge à l'Epoque moderne (Boujarra *et al.*, 2006). Elle correspond également à la basse terrasse du bassin de Kasserine dont la base a été datée à 609±40 ans cal. BP et sa partie sommitale est beaucoup plus récente puisqu'elle contient des boîtes de conserve et des emballages en plastique (Bkhairi et Karray ; 2008, Bkhairi, 2013).

II-3- Voile éolien, remblaiement fluviatile et banquette d'âge moderne et subactuel

II-3-1- Un voile éolien et un dépôt fluviatile postmédiévaux très localisés

II-3-1-1- Extension géographique et caractéristiques morpho-sédimentologiques

Un dépôt éolien d'épaisseur décimétrique vient couvrir la basse terrasse historique en voile très localisé. Il a été observé dans les cours avals des oueds as-Souriyya et al Msid-

ar-Ramla (Pl. 10). Il est composé de sables et de sables limoneux bien triés. La structure est litée à entrecroisée. L'importance des quartz émoussés luisants (32%) témoigne du remaniement éolien à partir des fonds et des zones d'épandage des oueds.

Des sables limoneux viennent ensuite revêtir le dépôt éolien. Ils n'ont été observés que dans l'oued ar-Ramla, à la hauteur d'Ahl Jmi (*cf.*, la coupe CaMR). Ils correspondent vraisemblablement à un dépôt de débordement et/ou de colluvionnement. Ils mettent en évidence la reprise des apports latéraux et du remblaiement fluviatile du fond de la vallée en rapport avec le développement de l'érosion des sols des terrains environnants.



Pl. 10 : Un voile éolien postmédiéval recouvre l'accumulation alluviale de la basse terrasse historique, à l'est d'al Ghitha, sur la rive droite du cours aval de l'oued as-Souriyya

II-3-1-2- Essai d'attribution chronologique

Le voile éolien et le niveau colluvio-alluvial en dessus, tapissent l'accumulation de la basse terrasse. Leur ancienne exploitation culturale en oliveraie (communication orale des fellahs), indique que leur mise en place est achevée il y a longtemps. Les édifices remontent vraisemblablement à la **période moderne**, **au plus tard au XIXe siècle**.

II-3-2- Une banquette d'accumulation subactuelle

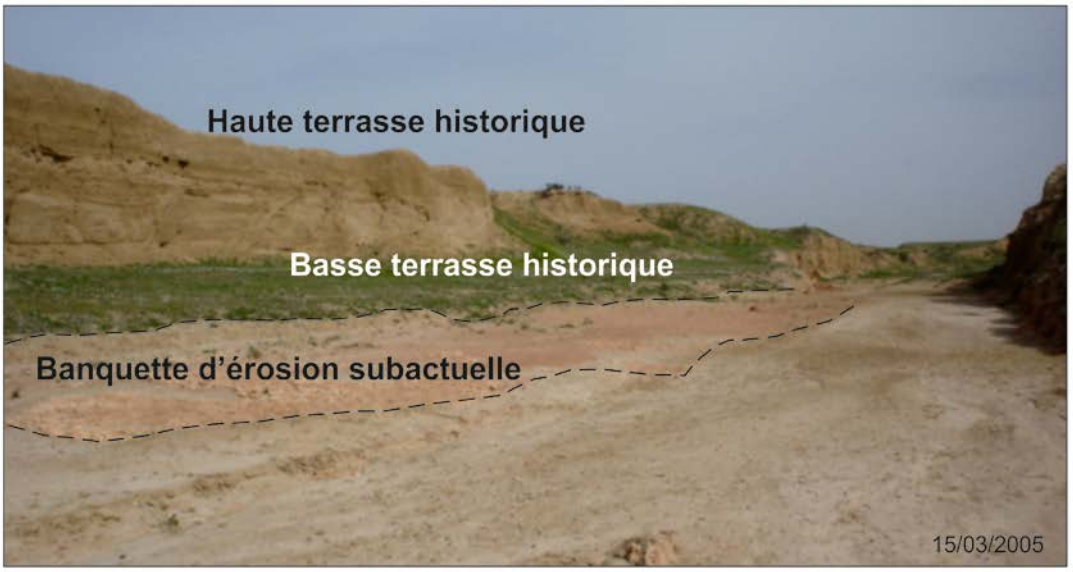
II-3-2-1- Extension et morphologie

Peu fréquente et d'une étendue très limitée, une banquette d'accumulation se dégage seulement dans les artères principales des oueds. Elle présente un développement très localisé dans les lobes convexes des méandres des cours moyens et avals des oueds. Elle domine le talweg actuel de 0,7 à 1,2 m et ne dépasse pas en moyenne 10 m de largeur.

II-3-2-1- Caractéristiques sédimentologiques, implication morphodynamique et attribution chronologique des sédiments

Le matériel est grossier. Il est principalement composé de sables et de sables limoneux lités. Il est parfois intercalé de lits fins d'argiles et/ou de lits ou de lentilles de graviers et de cailloux calcaires emballés dans une matrice essentiellement sableuse. Les

sédiments sont des dépôts de crues, mis en place par des écoulements généralement compétents. Lesquels sont jalonnés parfois par de courtes périodes de décantation. Les lentilles graveleuses et caillouteuses correspondent à un remplissage de chenaux. Dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga, la banquette est taillée dans les sables limoneux rouges grésifiés messiniens. Il s'agit ici d'une banquette d'érosion (Pl. 11.1).



1: Les sables limoneux grésifiés messiniens sont taillés en une banquette d'érosion d'âge subactuel (rive gauche du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga).



2: La banquette subactuelle s'emboîte dans la haute et la basse terrasses historiques et domine une banquette actuelle en cours de formation (rive gauche du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga).

Pl. 11 : La banquette subactuelle : type et position morphologique dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga

La banquette s'emboîte dans la haute et la basse terrasses historiques (Pl. 11.2). Elle est postérieure à **une phase d'incision linéaire de la période moderne** qui n'a dépassé que rarement **3 m de profondeur** et qui est à l'origine du dégagement de la basse terrasse. La banquette est également postérieure au voile éolien et au dépôt fluviatile qui superposent cette terrasse (*cf.*, la coupe CaMR). L'accumulation alluviale n'a pas révélé du matériel archéologique ou des déchets plastiques comme ceux trouvés dans les dépôts de banquettes étudiées par Oueslati A. (1989), Zerai K. (2006), Bkhairi et Karray (2008). La construction

domine également une autre banquette en cours de formation. Sa position morphologique et son extension réduite renseignent sur son âge récent. Elle est **vraisemblablement d'âge subactuel** au plus tard **le XIXe-le début de XXe siècle**.

D'autres formes et dépôts, d'origine hydrique et éolienne, sont en voie d'édification. Ils sont variés mais très localisés dans les secteurs avals et aux débouchés des oueds et dans les plaines de bordures des sebkhas. Ils prennent la forme de placages et de voiles éoliens, de cônes deltaïques, de cônes et de plaines d'épandage (Annexe 3).

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil a hérité de l'évolution géomorphologique holocène d'au moins douze générations de formes et de dépôts. Elles sont différentes tant par leurs origines que par leurs natures et extensions aussi bien dans les vallées que dans les plaines et sur les marges immédiates des sebkhas. Ceci tient d'abord aux contrastes orohydrographiques et géologiques au sein et entre les différents compartiments du système fluvial et aux changements locaux des processus et des conditions de la morphodynamique.

Le changement lithostratigraphique des faciès et l'intervention des incisions (contact ravinant, emboîtement, étagement ou superposition des formes et des dépôts) en alternances avec des phases de remblaiement et d'évolution pédologique des sédiments enregistrent une série de ruptures de fréquences et d'amplitudes variées. Ils témoignent de l'instabilité et de l'inversion récurrente des tendances morphogéniques.

L'étude de ces tendances à travers l'analyse des dynamiques géomorphologiques permet la distinction de deux phases majeures dans l'histoire morphogénique du système fluvial, de l'évolution des paysages et des facteurs du contrôle : (1) une première phase holocène antéhistorique et (2) une deuxième phase holocène historique.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil est caractérisé par un relief de faible énergie. Il est marqué par la prédominance d'une topographie de plaines (56,7% de la superficie), bordée par des collines basses (moins de 80 m en moyenne) et à faibles pentes. Le réseau hydrographique est peu développé dans le centre-est et le sud. Il apparaît absent sur la rive gauche de l'oued al Manfas as-Sod et s'écoule dans des vallées à peine marquées dans la topographie des parties nord et ouest du système fluvial.

Ce relief s'inscrit dans une structure simple et jeune. Les mouvements orogéniques étaient d'intensité limitée. Des anticlinaux méridionaux amples passent à un synclinal large. Les affleurements géologiques sont surtout tendres et débutent par l'Oligocène. Les affleurements cénozoïques n'occupent que 10% de la surface. Les binômes géologiques font presque défaut. Les modelés morphostructuraux sont peu nombreux. La tectonique pléistocène a joué un grand rôle dans le façonnement du système fluvial et de l'hydrosystème en général. Des plissements dans deux régimes décrochants de compression et de distension, associés à des mouvements de failles décrochantes, ont marqué le Pléistocène inférieur et le Tyrrhénien.

Ces données orohydrographiques et géologiques définissent un cadre physique particulier du fonctionnement quaternaire du système fluvial. Elles sont responsables des différences d'ampleur et de nature des formations et des modelés pléistocènes et holocènes. Deux générations de croûtes et d'encroûtements calcaires du Pléistocène ancien à moyen (QP1-2) et moyen (QP2) scellent les sommets d'interfluves et occupent de grandes étendues du plateau de Sid Bou Ali-Kandar. Trois formations détritiques à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène inférieur (QP1) et supérieur moyen (QP3e) et terminal (QP3g), ont comblé les fonds de vallées et les plaines. Elles sont à l'origine de la construction des nappes, des terrasses et des cônes d'épandage. Aujourd'hui, ces modelés se trouvent, pour la plupart, ensevelis sous les dépôts holocènes.

Les sédiments holocènes sont omniprésents et parfois dilatés de 4 à 10 m, dans les plaines et de nombreuses vallées. La succession de neuf formations détritiques de nature, d'âge et d'agencement différents, intercalées ou superposées par au moins trois générations de dépôts éoliens, révèle la forte complexité du fonctionnement du système fluvial. En plus, les deux tiers de ces formations découlent des érosions historiques. Une terrasse holocène antéhistorique (QH1-3), deux terrasses historiques (QH3b, QH3c) et deux banquettes d'âge subactuel à actuel (QH3e, QH3g) ont été construites dans les fonds de vallées. Dans les plaines, à l'exutoire des oueds et en milieux fluvio-deltaïques, ces modelés passent à une morphologie de cônes d'épandage et deltaïques, de cône-terrasses, de cône-glacis et de plaines d'épandage. Des paléosols hydromorphe (QH1-2), brun-isohumique (QH1-3), et rébufié (« *Hmari* »), des voiles et des placages éoliens (QH3d, QH3f, QH3i) ont vu également le jour dans les plaines, sur les sommets d'interfluves et dans les fonds de vallées.

L'hétérogénéité des dépôts holocènes souligne le poids des conditions locales. La succession des phases d'incision et de détritisme, de progradation et d'aggradation et d'évolution post-dépôt des sédiments explique l'instabilité des conditions et des dynamiques dans le système fluvial. Elles traduisent des inversions récurrentes des tendances morphogéniques et pédogéniques en rapport avec les variations holocènes du poids des différents forçages bioclimatiques, anthropiques et tectoniques.

QUATRIEME PARTIE :

LES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL ET LEUR SYSTEME FLUVIAL IMMEDIAT : MORPHOGENESE, SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES ET DYNAMIQUES PAYSAGERES

CHAPITRE X : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS 25120±120 BP ET DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR

CHAPITRE XI : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE MOYEN (7000-3500 BP)

CHAPITRE XII : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL A L'HOLOCENE SUPERIEUR (DEPUIS 3500 BP)

INTRODUCTION

De par leur connectivité hydrologique et leur situation géographique, les sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil constituent des niveaux de base locaux à l'intérieur de l'hydrosystème étudié et régionaux des oueds Nebhana, Merguelil et Zéroud. Leurs remplissages sédimentaires sondés, archivent les événements morphogéniques et environnementaux qui ont affecté, depuis le Pléistocène supérieur terminal, la Tunisie centrale. Cependant, la discrimination précise de deux types d'enregistrement local et régional reste délicate, en l'état actuel des connaissances et des types d'analyses entreprises.

Le système fluvial de ces deux sebkhas est composé d'un ensemble de petits bassins hectométriques. Ils sont inégalement répartis et développés à l'intérieur de l'hydrosystème. En dépit de leur taille, ces bassins ont montré une ampleur et une diversité des héritages géomorphologiques, dans les fonds de vallées et dans les plaines. Ces héritages, hydriques et éoliens, témoignent des modifications holocènes des rythmes et des processus morphogéniques qui sont parfois interrompus par la pédogenèse. Leurs dépôts, complexes et hétérogènes soulignent le poids des conditions locales. Ils expliquent le comportement du système fluvial face aux changements locaux des forçages bioclimatiques, anthropiques et tectoniques.

Les données présentées dans les chapitres précédents mettent en évidence une instabilité morphodynamique et préparent à la réalisation de la synthèse paléoenvironnementale et morphogénique de l'hydrosystème. Pour la première fois dans cette région de la partie nord du Sahel septentrional tunisien, le couplage et la concordance des différents résultats d'analyses géomorphologique, stratigraphique, sédimentologique, micromorphologique, géochimique, minéralogique, palynologique, archéozoologique et archéologique couplés à des données historiques et des datations absolues et relatives, autorisent à retracer la chronostratigraphie holocène des paléoenvironnements et de la morphogenèse et à évaluer les facteurs qui les contrôlent. Il convient de souligner que l'exploitation des résultats de recherche du groupe pluridisciplinaire du projet tuniso-italien pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla, était d'un grand intérêt. Elle a aidé à reconstituer les changements du climat, de la végétation et des rapports sociétés épipaléolithiques/milieu, durant l'Holocène inférieur à moyen.

Les datations ^{14}C effectuées sur la matière organique, les *Cerastedorma glucum* et les *Helix* ont donné des âges compris entre 25120±120 BP et 2079±240 BP. Elles aident à saisir les différentes étapes de la morphogenèse et des variations bioclimatiques depuis le Pléistocène supérieur terminal jusqu'à la période phénicienne. La chronostratigraphie des phases morphogéniques postérieures restent imprécises en absence de datations absolues. Néanmoins, la datation de la céramique romaine et islamique et les essais de corrélation des différentes phases de sédimentation et d'érosion dans l'hydrosystème en comparant les résultats obtenus aux données paléoenvironnementales disponibles dans d'autres régions de la Tunisie centrale ont permis d'en résoudre le problème. Ceci a permis de développer notre étude sur le long intervalle Pléistocène terminal-Subactuel.

La corrélation spatio-temporelle des modelés et de l'enregistrement environnemental des archives sédimentaires a permis **l'établissement d'un schéma synthétique**. Celui-ci illustre la chronologie globale des différents formes et remplissages sédimentaires holocènes ainsi que, dans une perspective du continuum amont-aval, leurs relations spatiales et chronostratigraphiques. Ce schéma permet de mieux comprendre et saisir la rythmicité et les modalités des grandes phases de sédimentation, de l'érosion, de fonctionnement hydromorphologique et hydroéolien. Il permet de **saisir l'évolution diachronique de la**

morphogenèse, des dynamiques, des environnements et des forçages climatiques, eustatiques et anthropiques essentiellement au cours les derniers 10000 ans (Fig. 90).

Dans les chapitres qui suivent, on propose une chronostratigraphie des différentes phases de la morphogenèse et du fonctionnement hydromorphologique et hydroéolien des sebkhas et leur système fluvial depuis le Pléistocène supérieur terminal au Subactuel. On essaie d'évaluer l'impact des changements bioclimatiques et des forçages anthropiques. On prendra en compte des probables reflets et interventions néotectoniques et des variations holocènes du niveau marin relatif.

Age	Période	La sebkha-lagune Halq al Minjil : Faciès et niveaux sédimentaires	La sebkha-lagune Halq al Minjil : Système de fonctionnement hydromorphologique et hydroéolien	La sebkha al Kalbiyya : Faciès et niveaux sédimentaires	La sebkha al Kalbiyya : Stade et système de fonctionnement hydromorphologique et hydroéolien	Le système fluvial : Dépôt et/ou paléosol	Le système fluvial : Modelés	Le système fluvial : Erosion/sédimentation (8 m 6 4 2)	Civilisation Rapport Société/Erosion/Milieu	Morphogenèse/ Pédogenèse	Variabilité du climat semi-aride	niveau relatif de la mer (- 2m 0 +2m)
XXe s.	Holocène – Actuel					Dépôt éolien (12) Sables « *Hmour* »	Nebkas-Voile éolien QH3h	incision	Du protectorat français à nos jours	Remblaient/Incision Activité éolienne	Tendance à l'aridification	≥ 0
						Accumulation alluviale (11)	Banquette Cônes d 'épandage et deltaïque QH3g		De la mise sous tutelle au protectorat français	Alluvionnement rapide 10-20 mm/an Incision linéaire		
						Dépôt éolien (10)	Voile-placage éolien "Trab es-Saffi" QH3f		Ottomane Instabilité relative	Incision Activité éolienne	Occurrence d'événements hydro-pluviométriques extrêmes	
1^{ère}moitié XIXe s.	Subactuel	FF4-FMF5				Accumulation alluviale (9)	Banquette QH3e Cône d 'épandage		- Aghlabide, fâtimide, almohade/Hafside - Histoire agro-pastorale instable	Faible bilan érosion/ alluvionnement		
XVIe s.	L'Historique – Moderne					Dépôt éolien (8)	Voile éolien Qh3d	Incision majeure		Incision généralisée		
VIe s. ap. J-C.	L'Historique – Moyen-âge Antiquité tardive			FCA5-FCV9	Lacs temporaires-sebkhas et sebkhas SK$_{I}$	Accumulation alluviale et colluvio-alluviale (7)	Basse terrasse et cône d 'épandage Qh3c	Aggradation	Vandale/Byzantine Déprise rurale (V^{e}-VI's)	2ème crise érosive		
Ve s. ap. J-C.	L'Historique – Romaine		Sebkha-lagune SH$_{I}$			Accumulation alluviale et colluvio-alluviale (6)	Haute terrasse et cône d 'épandage Qh3b	Incision majeure Aggradation suprême Contact ravinant	Romaine Anthropisation des milieux	Phase suprême d 'alluvionnement 3,7 à 12 mm/an	Meilleure régularité des précipitations	Quelques centimètres
2079±240 BP		Période phénicienne-punique		FCV8 FEO	Sebkha SK$_{II}$/ Bourrelet (BHK) et voiles des bordures est et sud-est	Dépôt fluviatile et fluvio-marin (5)	Cône deltaïque Qh3a	Incision majeure	Phénicienne-punique Une emprise agricole et agropastorale	Morphogenèse accélérée 1ère crise érosive	Péjoration climatique Evénements météo-rologiques extrêmes	≤ 0
1 000 av. J.-C.		Transition Protohistoire-période phénicienne		FEA8-FFG5-FCV7	SK$_{III-4}$	Paléosol « *Hmari* »	2ème génération de dépôts	Stabilité relative	Néolithique et berbère	Pédogenèse/courte phase biostasique	Saisonalité marquante sèche et humide	
	L'Holocène supérieur antéhistorique – Protohistoire	FF3-FMF4		FEA7-FCV6	SK$_{III-3}$ Lacs temporaires-sebkhas SK$_{XII}$	Formation « *Hmari* » (4)		Aggradation	Activités agro-pastorales	Recrudescence de la morphogenèse Remblaiement : 0,6 à 2 mm/an	Amélioration relative des conditions hydro-pluviométriques	≥ 0
				FEA6-FFG4-FCV5	SK$_{III-2}$							
3410±40 BP		FEO3 + FE4	Bourrelet des bordures est Sebkha littorale SH$_{II}$	FFG3	SK$_{III-1}$			Incision légère	Culture d'Olivier semble abandonnée	Morphogenèse modérée	Pic d'aridité	≤ 0
3874±201 BP	La 2ème moitié de l'Holocène moyen (4965-3500 BP)	**** FMF3	Sebkha-lagune SH$_{III}$	FFG2	Lacs temporaires-sebkhas SK$_{V}$	Paléosol brun Formation des sables bruns (3)	2ème génération de dépôts	Stabilité	Néolithique	Pédogenèse		
4365±50 BP		*** FMM2	Lagune-sebkha SH$_{IV}$	FFG1-FCV3	Sebkha SK$_{VI}$	Continuation de la construction des nappes alluviales et colluvio-alluviales (1)	Terrasse holocène préhistorique QH1-3	Incision légère	A partir de 4365±50 BP: premiers indices d'une emprise humaine sur les milieux	Remblaiement généralisé (3-6 mm/an) accélération relativedu remplissage Morphogenèse active	Reprise d 'une humidification relative Augmentation de l'aridité Climat chaud précipitations limitées	+65 cm ≥ 0 +185 cm ≥ 0 +71 cm
		** FL2	Lagune SH$_{V}$									
4965±35 BP		FMM1	Lagune-sebkha SH$_{VI}$	FEA4-FCA4-FCV2	Lacs temporaires SK$_{VII}$							
5632±218 BP		* FL1	Lagune SH$_{VII}$	FFL4-FPL4	Lacs pérennes SK$_{VIII}$ 2ème système lacustre majeur							
	La 1ère moitié de l'Holocène moyen (7000-4965 BP)	FMF2	Sebkha-lagune SH$_{VIII}$	FCA3-FEA3	Lac temporaire SK$_{IX}$			Aggradation	- Epipaléolithique à néolithique (populations de chasseurs-cueilleurs) - L'Homme : un facteur encore non déterminant dans le système morphogénique	Morphogenèse modérée à plus au moins active	Humidification relative	≥ 0
		FE3	Sebkha littorale SH$_{IX}$								Occurrence plus sèche	≤ 0
		FF2-FMF1	Sebkha-lagune SH$_{X}$	FFL3-FPL3-FCV1	Lacs pérennes SK$_{X}$						Humidification relative	≥ 0
		FE2 + FEO2	- Sebkha littorale SH$_{XI}$ - 2ème génération de dépôt éolien et surélévation du bourrelet des bordures sud et ouest de la sebkha	FCA2-FEA2	Lacs temporaires SK$_{XI}$					Activation de la morphogenèse éolienne	Aridification relative du climat semi-aride	≤ 0
	Holocène inférieur	FSC2	- Sebkha-lagune SH$_{XII}$ - Fixation de la 1^{ère}génération de dépôt éolien du bourrelet des bordures sud et ouest de la sebkha-lagune	FFL2	Lac pérenne SK$_{XII-3}$	- Paléosol hydromorphe (2) - Nappes alluviales et colluvio-alluviales (1)	1ère génération des dépôts de la terrasse Hi-s$_1$ Garâas perchées Hi-m$_2$ Terrasse holocène préhistorique Hi-s$_1$		Epipaléolithique Site SHM-1 (7880±35-6625±30 BP) Maintien local de l'équilibre de l'environnement	- Morphogenèse modérée à peu active - Hydromorphie localisé	Saisonnalité plus ou moins marquée Optimum hydrique et thermique	≥ 0
8052±168 BP				FPL2	Interstade palu-lacustre SK$_{XII-2}$ 1er système lacustre majeur							
				FFL1	Lac pérenne SK$_{XII-1}$							
				FCA1-FEA1	Lacs temporaires SK$_{XIII}$							
				FPL1	Lac pérenne SK$_{XIV}$							
	Transition Pléistocène-Holocène	FE1 + FEO1	- Sebkha littorale SH$_{XIII}$ - 1ère génération de dépôt éolien et naissance du bourrelet des bordures sud et ouest de la sebkha					Incision majeure		- Morphogenèse éolienne active - Incision linéaire majeure (10 m)	Tendance à l'augmentation de l'aridité	≤ 0
25120±120 BP	Pléistocène supérieur terminal	FSC1 + FF1	Lac temporaire-Sebkha SH$_{XIV}$			Dépôt à nodules et à concrétions calcaires FF1-C2/Ps$_{10}$ (4 m)		Aggradation		-Pédogenèse (nodulisation) - Mobilisation des carbonates - Morphogenèse active	Tendance à une augmentation relative de l'humidité	≥ 0

Précision chronologique :

* : Le Flandrien moyen ; ** : La limite supérieure du Flandrien moyen ; *** : La transition Flandrien moyen-Flandrien supérieur ; **** : Limite inférieure du Flandrien supérieur

Fig. 90 : Schéma synthétique de l'évolution diachronique de la morphogenèse, des dynamiques, des environnements et des forçages de contrôle dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil depuis environ 25120±120 BP

CHAPITRE X : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS 25120±120 BP ET DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR

De l'ensemble des archives sédimentaires étudiées, seuls les remplissages de la base des carottes C2 et C3 et la première génération de dépôt éolien des bordures méridionale et occidentale de Halq al Minjil, ont été attribués à la période fin-pléistocène-début holocène. Si l'âge de ces formations est au-delà du cadre chronologique de la thèse, leur intégration dans le schéma global de l'évolution de l'hydrosystème paraît intéressante afin de pouvoir comprendre l'évolution du système morphogénique préholocène.

L'originalité et la variation synchrone des faciès rencontrés (sulfato-carbonaté, « évaporatique », lacustre, fluviatile, hydromorphique) révèlent une succession d'environnements et de morphogenèses différentes dont les dynamiques sont soumises aux conditions locales et régionales. Les recherches pluridisciplinaires entreprises sur le site SHM-1 ont livré de nouvelles données pour la compréhension des relations Homme épipaléolithique-milieu naturel. Les limites chronologiques de chaque phase d'évolution Pléistocène terminal-Holocène inférieur sont placées approximativement. Le nombre de datations au ^{14}C est limité. Néanmoins, l'évolution géomorphologique de l'hydrosystème s'inscrit parfaitement dans les scénarios de grandes tendances évolutives des environnements mis en place ailleurs en Tunisie.

I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DU 25120±120 BP JUSQU'AU DEBUT DE L'HOLOCENE

Les archives sédimentaires de l'ombilic et des bordures de Halq al Minjil permettent de saisir deux périodes différentes de dynamiques morphogéniques et environnementales ayant cours au Pléistocène supérieur terminal et à la transition Pléistocène-Holocène. Halq al Minjil a fonctionné en systèmes de sebkha-lagune et de sebkha littorale. Elle a connu sur ses bordures méridionale et occidentale la mise en place de la première génération de dépôt d'un bourrelet hydroéolien. Une incision linéaire majeure préholocène a marqué les fonds de vallées.

I-1- Fonctionnement hydromorphologique et dynamiques sédimentaires au Pléistocène supérieur terminal

I-1-1- Le stade lac temporaire SH_{XIV} de Halq al Minjil

Depuis 25120±120 BP (Beta-290410 ; 28341-27611 cal BC), un dépôt sulfato-carbonaté d'origine fluvio-marine (**FMC1-C3**) a comblé le fond de l'enclave littorale sur une épaisseur de **plus de 4,3 m**. Halq al Minjil a fonctionné en **système de lac temporaire** peu profond, barré du côté est par le cordon fossile tyrrhénien. Elle a connu périodiquement d'importantes submersions par des flux d'eaux continentales souvent à plus ou moins faible capacité de transport. La sédimentation argileuse et argilo-silteuse s'est effectuée par décantation ou en mode libre proche d'une décantation dans un milieu généralement calme. Au moins saisonnièrement, Halq al Minjil passe d'un milieu peu profond à un milieu exondé et asséché. Son plan d'eau a beaucoup varié. Les fortes teneurs en calcite, dolomite et ankérite permettent de supposer un transport des carbonates dissous dans une épaisse colonne d'eau, et des écoulements soutenus des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. La

précipitation diagénétique des sels sous forme de croûtes salines fines et de macrocristaux de gypse évoque ultérieurement la diminution du niveau d'eau et l'émersion du lac temporaire. Celle-ci évolue en milieu de sebkha, surtout pendant les périodes sèches de l'année et par évaporation.

I-1-2- L'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod : dynamique et évolution morphologique

Sur les bordures centre-ouest de Halq al Minjil, un dépôt fluviatile à nodules et concrétions calcaires (**FF1**), **épais de 4 m**, est issu de la partie inférieure de la carotte C2. Il forme le soubassement du bourrelet hydroéolien holocène. Il correspond aux sédiments détritiques d'un **ancien cône-deltaïque**, édifié sur les marges du lac temporaire, vraisemblablement au Pléistocène supérieur terminal. De part sa position, le dépôt laisse supposer une déviation du cours aval de l'oued al Manfas as-Sod, avant d'avoir son exutoire holocène, ou une défluviation de l'un de ses bras, jadis fonctionnel durant le passé lointain.

Entre les buttes allongées de Sidi Khlifa à l'est et celles de Dowwar Kharrouba à l'ouest, s'allonge sur plus de 800 m de largeur un vallon en berceau subméridien (Fig. 91). Son fond est actuellement occupé par un chott et des petites dépressions isolées et inondables. Ce vallon est probablement un bras mort, jadis drainé par l'ancien chenal de l'oued al Manfas as-Sod ou par l'un de ses défluents qui a pu édifier un cône-deltaïque à son débouché.

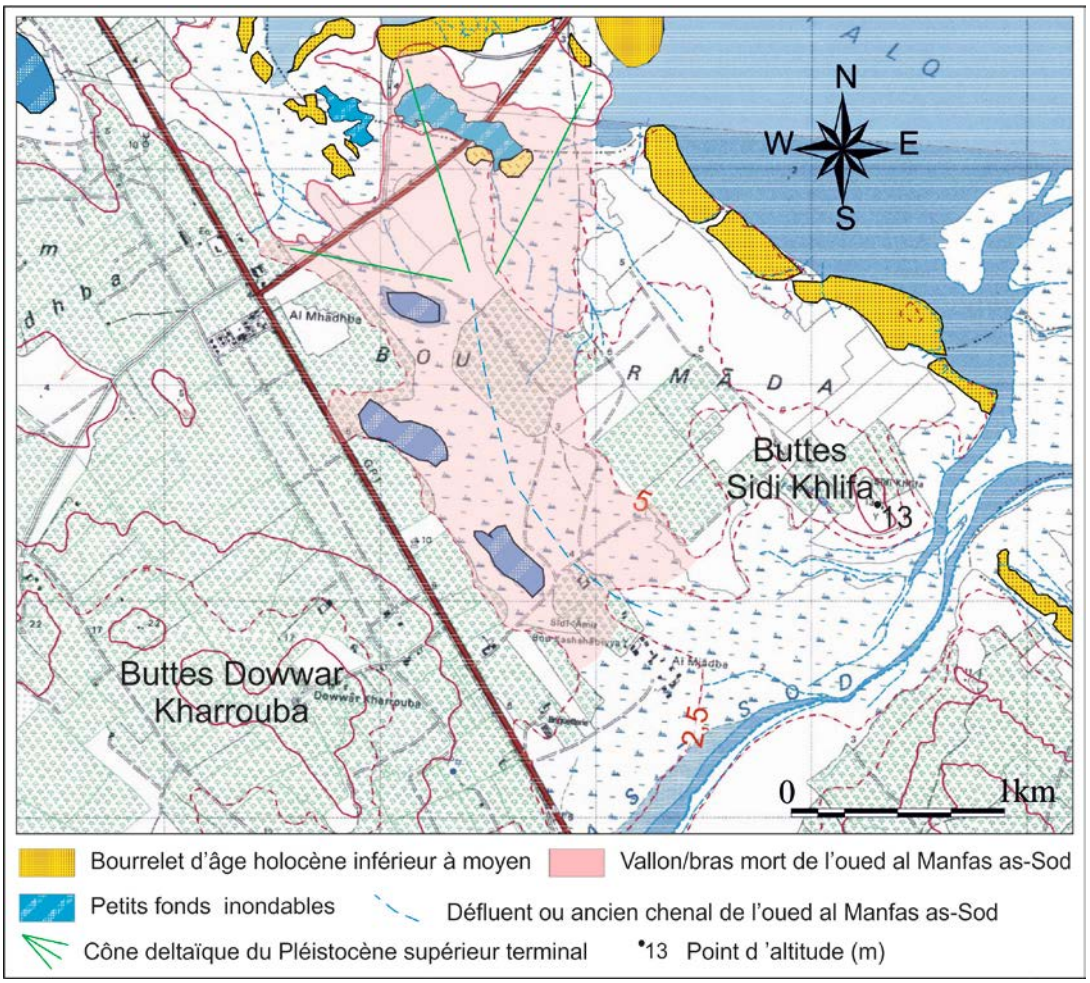


Fig. 91: Déviation du cours aval de l'oued al Manfas as-Sod, avant d'avoir son exutoire holocène, ou défluviation de l'un de ses bras, autrefois fonctionnel pendant le Pléistocène supérieur terminal
Fond cartographique : feuille topographique de Sidi Bou Ali SE, n°49 au 1/25000

I-1-3- Morphogenèse et paléoenvironnements : interprétation de l'enregistrement sédimentaire et pollinique des dynamiques

I-1-3-1- L'enregistrement sédimentaire : une morphogenèse généralement active

Le niveau FSC1 de la partie inférieure de la carotte C3 se distingue par la forte représentation des carbonates dans les argiles silteuses. La dolomite et l'ankérite sont essentiellement d'origine détritique et sont issues de l'altération physicochimique des formations calcaires dans les bassins. Une origine diagénétique précoce des carbonates dans le lac temporaire n'est pas à écarter (Schütt 2000 ; Schütt & Thiemann 2004). D'après Fischesser (1955) et Schütt (2000), d'importantes précipitations annuelles, acides et magnésiennes, et des températures moyennes élevées (20-30°C) conduisent à la forte mobilisation des carbonates dans les bassins et au développement des mécanismes d'altération physico-chimiques des calcaires. Les écoulements étaient actifs, soutenus et efficaces pour dissoudre le calcaire et mettre les boues en mouvement. La présence du gypse et de l'halite dans le sédiment explique l'émersion du lac et la précipitation des sels sous l'effet d'une évaporation intense, vraisemblablement de la période estivale. Le stade lac temporaire-sebkha SH_{XIV} est installé sous un climat plus humide que l'Actuel, avec des saisons incontestablement contrastées.

L'épaisseur plurimétrique du remplissage sulfato-carbonaté dans l'ombilic (FSC1 : 4,3 m) et des dépôts fluviatiles (FF1-C2, 4 m) sur les marges occidentales de Halq al Minjil, peut indiquer **une morphogenèse active et une accentuation de l'érosion des sols**. Elle peut aussi laisser penser au **rôle d'une subsidence** de l'enclave littorale.

I-1-3-1- L'enregistrement pollinique : un climat semi-aride avec une augmentation relative de l'humidité

Malgré le pas d'échantillonnage très serré, seulement les 10 supérieures séquences lithostratigraphiques de la carotte C3 ont livré des spectres polliniques continus (Lebreton, 2006 ; Boujelben et *al.*, 2008 ; Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013). Les parties basale et moyenne de la carotte étaient stériles (Tab. 23). Les quelques spectres isolés n'ont pas permis d'appréhender très finement les changements bioclimatiques qui ont marqué la période Pléistocène terminal-première moitié de l'Holocène moyen.

Un seul échantillon associé au faciès FSC1 de la séquence S4 a permis de suivre l'évolution de la végétation au sein du Pléistocène terminal mais sans aucune attribution chronologique précise. Le spectre montre l'importance de la steppe halophytique locale à Chenopodiaceae, les steppes à *Artemisia* et *Ephedra* et les steppes graminéennes de l'arrière-pays (Fig. 92). Les herbacées ubiquistes Cichorioideae ont une contribution significative au cortège pollinique. *Olea* et *Pinus* sont les seuls arbres les plus représentés. *Fraxinus* est le seul arbre caducifolié signifiant. Il s'est développé dans les plaines de l'arrière-pays et vers les reliefs à l'ouest et au nord le long des zones humides que constituent les lits des oueds (Lebreton et Jaouadi, 2013).

L'enregistrement pollinique reflète le **caractère steppique de la végétation**. Il décrit **un paysage assez proche de l'actuel** et met en évidence **un climat semi-aride**. Néanmoins, il faut certainement modérer l'aridité de ce climat. Les résultats morphosédimentaires mettent en évidence **une humidité un peu plus élevée que celle de l'Actuel et une certaine régularité saisonnière des paramètres thermo-hydro-pluviométrique**, mais dans les limites de la semi-aridité.

Prof. absolue (cm)	Séquences Lihostratig.	Faciès sédimentaire	Stade et système de fonctionnement	Datation ^{14}C AMS BP	Spc / Spi / St
9/-2	S25	FMF4	Sebkha-lagune SH_I		Spi (1 échantillon)
	S24	FF3			Spi (5 échantillons) + St
	S23	FE4	Sebkha SH_{II}	3410±40	Spc (6 échantillons)
	S22	FMF3	Sebkha-lagune SH_{III}		Spc (1 échantillons)
	S21	FMM2	Lagune-sebkha SH_{IV}		Spc (6 échantillons)
	S20				Spc (3 échantillons)
	S19				Spc (7 échantillons)
	S18	FL2	Lagune SH_V	4365±50	Spc (4 échantillons)
	S17	FMM1	Lagune-sebkha SH_{VI}		Spc (5 échantillons)
	S16	FL1	Lagune SH_{VII}	4965±35	Spc (5 échantillons)
	S15	FMF2	Sebkha-lagune SH_{VIII}		St
	S14	FE3	Sebkha SH_{IX}		St
	S13				St
	S12	FF2	Sebkha-lagune SH_X		St
	S11				St
	S10	FMF1			St
	Non remonté	Non remonté	***		***
	S9	FE2	Sebkha SH_{XI}		Spi (1 échantillon) + St
	S8	FSC2	Sebkha-lagune SH_{XII}		St
	S7				St
	S6	FE1	Sebkha SH_{XIII}		Spi (1 échantillon) + St
	S5	FSC1	Lac temporaire-Sebkha SH_{XIV}		St
	S4				Spi (1 échantillon) + St
	S3				St
	S2				St
	S1			25120±120	St

Tab. 23 : Distribution des données polliniques sur la carotte C3 de l'ombilic de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Analyses palynologiques : V. Lebreton

Légende :

FSC : faciès sulfato-carbonaté ; FE : faciès « évaporatique » ; FMF : faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables ; FF : faciès fluviatile ; FL : faciès lagunaire ; FMM : faciès mixte aux influences marines notables ; Spc : spectres polliniques continus ; Spi : spectre pollinique isolé, Spi + St : spectre pollinique isolé, les autres échantillons du faciès étant stériles ; St : stérile.

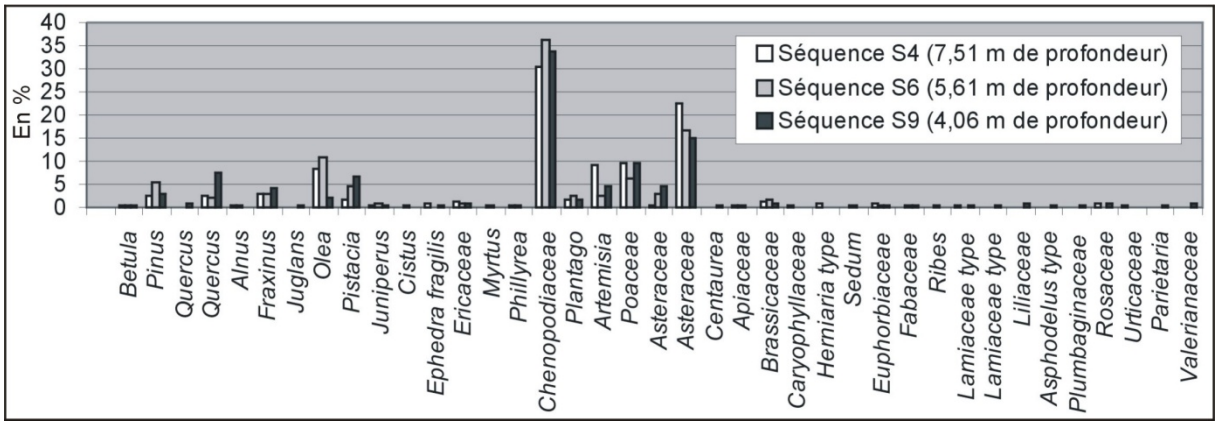


Fig. 92 : Pourcentages des taxons polliniques déterminés dans les spectres isolés des séquences lithostratigraphiques S4, S6 et S9 de la carotte C3

Analyses palynologiques : V. Lebreton
Représentation graphique : A. Boujelben

I-2- Evolution hydro-géomorphologique et environnements à la transition Pléistocène-Holocène

A la transition pléistocène-Holocène, un premier niveau « évaporatique » FE1, issu de la partie médiane de la carotte C3, signale le changement du fonctionnement hydromorphologique de Halq al Minjil en **système de sebkha littorale** et **l'activation des processus éoliens**. Une incision linéaire majeure a marqué les fonds de vallées.

I-2-1- Le premier stade de sebkha paralique SH_{XIII} et la mise en place de la première génération de dépôt du bourrelet des bordures ouest et sud de Halq al Minjil

Le niveau « évaporatique » **FE1**, argilo-silteux, épais de **62,5 cm** et riche en sels indique le changement des environnements sédimentaires précédents. **Halq al Minjil a évolué en système de sebkha paralique**, sous une influence notable du morphodynamisme continental. La sebkha est temporairement inondée. Elle connaît un colmatage fluvio-marin par les eaux marines et les apports terrigènes des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. Ces derniers sont très chargés en carbonates et en sels dissous et/ou résiduels. Les dynamiques sont généralement faibles. En périodes d'évaporation intense et/ou persistante, Halq al Minjil exondée connaît une pédogenèse active. Il en découle une importante précipitation diagénétique d'halite et du gypse (environ 30% du sédiment).

L'émersion de la sebkha, la déshydratation et la floculation des argiles silteuses favorisent la morphogenèse éolienne. Il en résulte **la mise en place de la première génération du dépôt éolien FEO1** (C2) qui a donné naissance au **bourrelet hydroéolien des bordures occidentale et méridionale de Halq al Minjil**. L'édifice est en forme de croissant, surbaissé (inférieur de 1m), discontinu et a une largeur inférieure à 120 m. Le même dépôt forme le niveau éolien basal de la dune portant le site épipaléolithique SHM-1. La variation verticale de la granulométrie peut être induite par le changement de la compétence des vents. La présence du gypse vermiforme et d'halite traduit une évolution post-dépôt des sédiments et témoigne de l'atténuation ou de l'arrêt de la morphogenèse éolienne. **La construction éolienne est polyphasée**. Le tri moyen et la grossièreté granulométrique relative du dépôt rendent compte de l'efficacité morphologique des vents des secteurs est et nord-est. Ils peuvent aussi indiquer la multitude de provenances des sédiments, outre que le fond vaseux de Halq al Minjil.

I-2-2- L'incision des fonds de vallées à la transition Pléistocène-Holocène: témoin de l'activité torrentielle des oueds

Au Pléistocène supérieur terminal, **des dynamiques prédominantes de remblaiement fluviatile et puis de pédogenèse** ont été responsables du comblement des fonds de vallées et de la mise en place de dépôts dilatés (**3-12 m**) à nodules et concrétions calcaires (Karray, 1993 ; Boujelben, 2002). L'achèvement de leur mise en place est signalé par **une phase majeure d'incision linéaire** qui a pu dépasser, dans quelques sections d'oueds, **10 m de profondeur** (cours moyen de l'oued as-Souriyya). Cette incision est peut-être la conséquence d'une ou plusieurs crises climatiques et morphogéniques et/ou d'une réponse du système fluvial à la variation des niveaux de base locaux. Ces crises sont engendrées par de vraisemblables événements hydro-pluviométriques exceptionnels, intenses et rapides au cours desquels les écoulements sont concentrés et torrentiels. Les eaux sont certainement peu abondantes mais libérées d'une grande partie de leur charge solide. De telles crises morphogéniques de la transition fin Pléistocène-Holocène sont évoquées ailleurs dans les bassins à l'amont de la sebkha al Kalbiyya en Tunisie centre-ouest (Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013).

I-2-3- Un climat semi-aride qui tend à l'accentuation de l'aridité

La sédimentation « d'évaporites », le dépôt éolien et l'incision des fonds de vallées témoignent d'un changement climatique qui tend à **l'accentuation de l'aridité, sans une forte atténuation de l'humidité**. La mobilisation des calcaires dans le bassin et l'alimentation de Halq al Minjil en carbonates dissous affirment la persistance de fortes pluies saisonnières mais de moins en moins abondantes et régulières que celles du Pléistocène supérieur terminal. L'installation d'un système de sebkha et la forte concentration des sels peuvent s'exprimer par la fluctuation des apports en eaux dans Halq al Minjil, un bilan hydrique généralement déficitaire, une évaporation intense et/ou prolongée. Le développement d'une plage en devant de la falaise tyrrhénienne et la fermeture des graus auraient contribué au confinement de la sebkha. Les rapports terre/mer étaient de plus en plus restreints. Un tel contexte a favorisé la morphogenèse éolienne. Les vents des secteurs est et nord-est étaient les plus efficaces.

Le spectre pollinique de la séquence S6 du niveau FE1 est marqué par une **surreprésentation des Chenopodiaceae** (Fig. 93). Il explique une extension importante du domaine du chott jouxtant la sebkha littorale. Il montre également une régression de *Artemisia* et *Ephedra* et un léger essor de *Pinus* ainsi que de *Olea* et *Pistacia* qui constituent une formation thermo-méditerranéenne mieux développée que la chênaie sclérophylle à *Quercus* type sempervirent (Lebreton et Jaouadi, 2013).

Le paysage est encore semi-ouvert et dominé par une végétation steppique (Asteraceae, Poaceae, *Plantago*…). Ceci est malgré la régression de *Artemisia* et *Ephedra* qui peut indiquer une aridité moins forte que celle du spectre S4 (Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013). Toutefois, la baisse de cette aridité reste relative à la vue des particularités de l'épaisse archive sédimentaire riche en gypse et en halite. Les données plaident en la faveur d'une phase d'assèchement et d'**un climat semi aride à saisons plus contrastées que celles d'aujourd'hui**, dont la saison sèche et chaude peut être prolongée et/ou intense. On peut également penser à une variabilité des températures annuelles qui peuvent avoir des conséquences sur la dynamique et l'évolution des milieux.

II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR (10000-7000 BP)

A l'Holocène inférieur, la sebkha al Kalbiyya a connu l'installation d'un premier système lacustre majeur. Halq al Minjil a fonctionné en système de sebkha-lagune sous une influence fluviatile notable. Une dynamique de remblaiement fluviatile a marqué les fonds de vallées. Des dépôts hydromorphes et des garâas perchées font la distinction des sommets d'interfluves des bordures sud-est de l'hydrosystème.

II-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamique paysagère

II-1-1- L'installation des stades lacustres permanents et temporaires SK_{XIV}, SK_{XIII} et SK_{XII}

Les niveaux fossilifères fluvio-lacustres (**FFL1 et FFL2**) et fluvio-palu-lacustre (**FPL1**) de la partie basale et moyenne des tarières T52, T55 et T60, rétablissent **l'installation de deux stades de lac pérenne SK_{XIV} et SK_{XII}** (*cf.* Fig. 22). Un dépôt proximal colluvio-alluvial (**FCA1**) et fluviatile d'épandage alluvionnaire (**FEA1**), non fossilifère, les sépare et marque l'évolution d'al Kalbiyya en **système de lacs temporaires** (stade SK_{XIII}). Les trois stades définissent le **premier système lacustre majeur d'al Kalbiyya** qui était installé depuis environ **8052±168 BP** (7027-6125 cal BC ; Karray, 1993) et pendant tout l'Holocène inférieur.

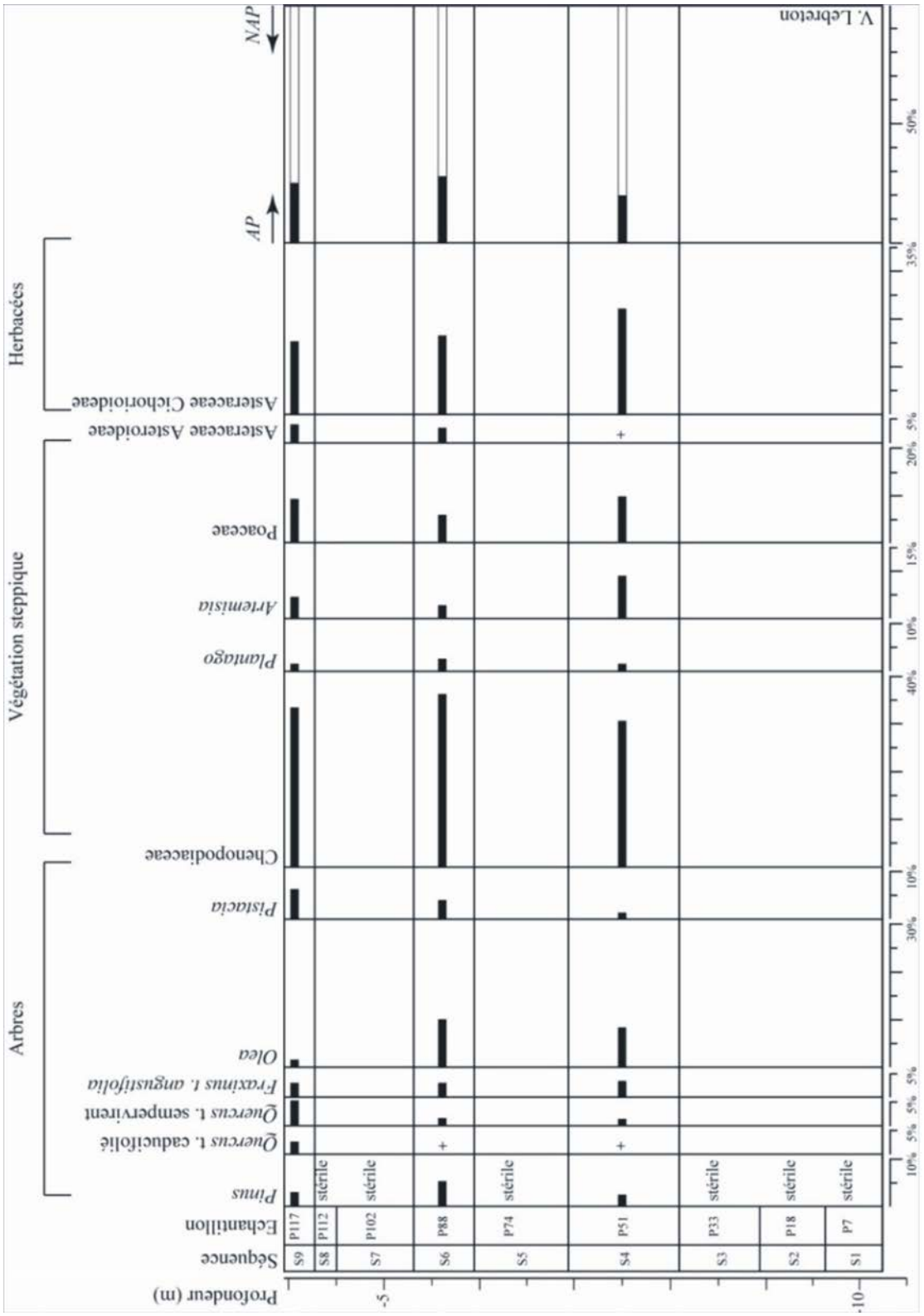


Fig. 93 : Diagramme pollinique des taxons les plus significatifs des séquences lithostratigraphiques S4, S6 et S9 de la carotte C3 de l'ombilic la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton, 2009a)

Durant **le stade SK_{XIV}**, al Kalbiyya est un lac pérenne, exoréique et à marées, affirmé par la présence des traces d'hydromorphie et d'émersion dans le sédiment. La morphodynamique était relativement active. Les apports hydriques étaient importants et saisonnièrement soutenus. Lors d'importantes pluies locales et/ou de crues allogènes, la cuvette se remplit d'eau et se transforme en lac étendu et anoxique surtout dans l'ombilic. Les sources artésiennes méridionales ont participé au bilan hydrique positif. Un seuil, comparable à celui d'aujourd'hui, a existé à l'exutoire d'al Kalbiyya et a contribué à la formation d'un barrage à l'amont duquel s'est développée l'étendue lacustre. Au moins saisonnièrement, le plan d'eau baisse sous l'effet de l'évaporation permettant l'installation des espaces palustres ou marécageux, principalement dans le domaine intertidal. La seule présence des naissains de *Cerastoderma glaucum* (3-6 mm) dans le sédiment, peut traduire **des cycles biologiques courts dans le lac**. Elle peut expliquer des changements brusques des conditions propices à la prolifération biocénotique (Chaouti et Bayed, 2005), d'autant que l'épaisseur importante des séquences fossilifères (65 cm) n'aura pas de rapports directs avec la durée de leur mise en place. La présence des débris d'*Helix* suppose le développement, en arrière des zones palustres du lac, d'habitats beaucoup plus secs (Hammouti, 2008).

Au cours du **stade SK_{XIII}**, l'absence de *Cerastoderma glaucum* est garante de changements du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et des environnements. Les faciès proximal colluvio-alluvial **FCA1** et fluviatile d'épandage alluvionnaire **FEA1** confirment des phases de **bas niveaux lacustres**. Al Kalbiyya a évolué en système de lacs temporaires semi-endoréiques, peu profonds et plus oxygénés. Elle recevait des apports hydriques irréguliers et moins abondants. Les cycles courts des lacs ont certainement empêché le développement d'une vie biocénotique. Le niveau d'eau a beaucoup varié et les émersions étaient fréquentes affectant surtout les bords. Il en résulte l'apparition des domaines marécageux et des chotts caractérisés par l'alternance des périodes de saturation en eau (horizons organiques, lits fins noirs) et d'assèchement (horizons gris olives et olives pales, d'oxyde de fer et sels…). Sous l'effet de l'évaporation, la rétraction des eaux vers le centre et puis l'exondation de la cuvette ont favorisé la précipitation des sels et ont activé les processus éoliens (agrégats de sables et d'argiles roulées). Une auréole de végétation touchée par la variation du niveau du plan d'eau et de la salinité a occupé les marges exondées (racines dans les sédiments).

La reprise de la production biocénotique dans l'enclave d'al Kalbiyya signale la réinstallation d'un nouveau stade de **lacs pérennes SK_{XII}**. Les deux niveaux fluvio-lacustres **FFL1** et **FFL2** des tarières T52 et T55, aux débris et valves de naissains et d'adultes de *Cerastoderma glaucum*, restituent deux épisodes lacustres permanents (SK_{XII-1} et SK_{XII-3}) Les conditions rappellent celles du premier stade SK_{XIV}. Les durées de stationnement étaient vraisemblablement assez longues, permettant l'évocation des environnements et des processus de la production biocénotique. La masse des *Cerastoderma glaucum*, d'âges et tailles différents, les confirme. Un *Cerastoderma glaucum* de 2 mm de taille peut définir un âge de plus de 3 mois (Conti *et al.*, 2014). Sur la base de la profondeur absolue des niveaux fossilifères lacustres, **la paléobathymétrie aurait varié entre 17,81 m et 17,07 m**, au dessus du niveau marin, **pour le premier épisode lacustre SK_{XII-1}** et entre **18, 92 et 17,71 m pour le second épisode SK_{XII-3}**.

L'intercalation d'un niveau fluvio-palu-lacustre (**FPL2**) dans le remplissage lacustre, montre un changement des conditions et une rétraction du lac pérenne SK_{XII-1} vers le centre de la cuvette. Ce niveau signale l'installation d'**un interstade palu-lacustre (SK_{XII-2})**. Il indique une perturbation survenue dans l'environnement local ou une réduction des apports

allogènes dans la cuvette. Le lac est peu profond et les eaux occupent une position souvent en retrait par rapport à leur position antérieure. Il s'y développe de larges aréoles palustres sous des tranches d'eau pelliculaires. Elles correspondent à des milieux calmes caractérisés, au moins saisonnièrement, par un engraissement organique (couleur grise, noire et grise olive des sédiments). Occasionnellement ou durant les saisons sèches, l'exondation puis l'assèchement des domaines palustres entraînent l'oxydation des sédiments et la précipitation des lits fins de sel blanc et des macrocristaux de gypse.

II-1-2 La réinstallation d'une sebkha-lagune (stade SH_{XII})

Le deuxième niveau sulfato-carbonaté (**FMC2**) de la partie médiane de la carotte C3 et de la base de la carotte C1, indique la réinstallation d'un **système de sebkha-lagune**. Un faciès fluvio-marin, riche en sels et en carbonates, a colmaté Halq al Minjil sur plus de **113 cm** d'épaisseur. A l'occasion des crues vigoureuses des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin, Halq al Minjil reçoit d'importants apports terrigènes riches en calcite, dolomite et ankérite. Les alimentations latérales sont non négligeables. La mobilisation des carbonates dans le bassin versant demeure importante. Néanmoins, la teneur du sédiment en $CaCO_3$ a diminué par apport à celle du stade pléistocène terminal SH_{XIV}. Ceci peut témoigner d'un changement des caractéristiques des eaux pluviales abondantes pour l'attaque physico-chimique des calcaires. En périodes sèches de l'année et sous l'effet de l'évaporation, la réduction ou l'assèchement total du plan d'eau conduit à l'émersion de la sebkha-lagune et son évolution en système de sebkha littorale marquée par la précipitation diagénétique du gypse et d'halite.

Sur les bordures occidentale et méridionale de Halq al Minjil, **le dépôt éolien FEO1 du bourrelet commence à se fixer progressivement**. Le développement de la pédogenèse et l'installation des populations épipaléolithiques l'attestent. Les taux relativement importants d'Al_2O_3 (10,4%) et de Fe_2O_3 (3,82%) témoignent de l'évolution post-dépôt des sédiments. Une telle évolution explique la stabilité des milieux et l'augmentation relative de l'humidité qui aurait joué le rôle d'agent de cohésion des sédiments éoliens. Au centre-ouest de la sebkha-lagune, des groupes épipaléolithiques viennent occuper la dune devançant le bourrelet hydroéolien (site SHM-1) de **7880±35 BP** (SacA 23655 ; 8780-8587 cal BP/7019-6638 cal BC) à **6625±30 BP** (SacA 23663; 7572-7459 cal BP/5623-5492 cal BC ; Saliège *et al.*, 2013). Cependant, les processus éoliens sont de temps en temps mis en œuvre. Des sables fins éoliens, intercalés dans les dépôts archéologiques, indiquent des phases d'abandon de site (Wattez et Eddargach, 2009) et de réactivation des processus éoliens.

II-1-3- Les garâas perchées, le remblaiement des vallées et l'aggradation des plaines d'inondation

A l'extrémité sud-orientale de l'hydrosystème, des espaces d'interfluves sont caractérisés par **l'extension localisée et réduite d'un paléosol hydromorphe**. Il est gris à noirâtre, relativement évolué et peu épais (*cf.*, Fig. 80 et 94). Il s'est développé aux dépens des argiles silteuses mises en place par des ruissellements à très faible capacité de transport dans des petits fonds peu profonds. Il définit un dépôt de colmatage évolué par des processus d'hydromorphie de surface dans un milieu de garâa, mal drainé. Les dynamiques marécageuses sont généralement faibles. L'engorgement hydrique temporaire ou saisonnier des sédiments est contrôlé par des afflux excessifs d'eaux de ruissellement et/ou pluviales et/ou par la remontée récurrente du niveau d'une nappe d'eau perchée en régime quasi-permanent (Vizier, 1984 ; Nicole *el al.*, 2003). Le déficit hydrique et l'assèchement des garâas peuvent être aussi avancés. Le dysfonctionnement au moins saisonnier des conditions et des processus hydromorphiques est enregistré par la présence du gypse et de l'anhydrite néoformés dans le dépôt.

Dans les fonds de vallées, les formations holocènes les plus anciennes forment la première génération de dépôts (1) de l'accumulation de la terrasse holocène préhistorique (QH1-3 ; *cf.* fig. 83). **La tendance générale est à l'alluvionnement et au comblement des lits avec une érosion limitée des fonds**. La nappe alluviale, épaisse de **1,1 m à 3,7 m**, est marquée par l'absence des niveaux pédogéniques et par la superposition de plusieurs séquences hétérogènes de sables, de sables limoneux et d'argiles limoneuses. Le remblaiement des fonds de vallées est polyphasé et s'est accru sous des conditions morphodynamiques généralement actives. Les sédiments sont déposés par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport et par des ruissellements peu chargés sur les versants. Localement et sur des petites distances, les membres de l'accumulation sont séparés par **des discontinuités de ravinement**. Ces discontinuités témoignent d'une légère érosion des formations en place, vraisemblablement lors d'événements assez brefs, et de l'absence de paroxysme dans le fonctionnement du système morphogénique.

Sur les rives orientale et occidentale d'al Kalbiyya, l'unité sédimentaire UK_{XIII} montre la superposition et la juxtaposition de sédiments proximaux colluvio-alluviaux et fluviatiles d'épandage alluvionnaire (*cf.*, Fig. 22 ; **FCA1** et **FEA1**/T52 et T55). Il s'agit des formations grossières composées de sables et de graviers calcaires et gréseux, d'origine essentiellement proche. Elles correspondent à des dépôts de crues mis en place sur les rives du lac et dans les plaines d'inondation. Elles expriment **des dynamiques actives de progradation et d'aggradation des zones d'épandage des oueds**. Leur mise en place est liée à une/ou plusieurs phases d'instabilité des versants et d'érosion dans les bassins proches, engendrées vraisemblablement lors des pluies locales à fortes intensités. Par réajustements des profils longitudinaux des axes d'écoulement, l'aggradation alluviale des fonds de vallées et celle des zones d'épandage des oueds, étaient concomitantes. Des **variations du niveau de base local** et une possible déstabilisation des marges lacustres, en rapport avec une **subsidence vraisemblablement lente mais constante** (Tagorti, 1990), ont pu favoriser l'érosion dans les bassins et l'augmentation des charges solides des oueds.

II-2- Morphogenèse et paléoenvironnements à l'Holocène inférieur

Au cours de l'Holocène inférieur, l'érosion et le fonctionnement hydromorphologique de l'hydrosystème sont principalement sous le contrôle climatique. On enregistre une augmentation de l'humidité et une morphogenèse généralement modérée. La fouille géoarchéologique du site SHM-1 et les recherches pluridisciplinaires entreprises ont permis de caractériser le mode économique des groupes culturels épipaléolithiques et d'apprécier les rapports Homme/milieu.

II-2-1- Environnements améliorants et morphogenèse modérée durant l'optimum holocène

II-2-1-1 Un optimum climatique à la fois hydrique et thermique

La montée des niveaux lacustres, les boues sulfato-carbonatées, le paléosol hydromorphe et les garâas perchées permettent de mettre en évidence **une augmentation de l'humidité et une amélioration des bilans hydriques**. Les conditions environnementales étaient plus ou moins stables et les milieux ont connu une évolution lente. La succession de deux stades lacustres pérennes séparés par un stade de lacs temporaires, contemporains d'un stade de sebkha-lagune à l'aval explique **des récurrences de très grandes amplitudes**. La forte mobilisation des carbonates dans l'hydrosystème permet de faire la part importante des processus physico-chimiques d'altération des terrains calcaires des bassins proches et lointains. La mise en œuvre de ces processus est conditionnée par des eaux pluviales abondantes, acides et magnésiennes et des températures moyennement élevées (20-30°C ; Fischesser ,1955 ; Schütt, 2000). Le seuil de tolérance des *Cerastoderma glaucum* se situe

aux environs de 34°C, avec une température maximale de 40 °C. Les naissains résistent mieux que les individus adultes (Desprez *et al.*, 1987). Néanmoins, la diminution des teneurs du remplissage sulfato-carbonaté de Halq al Minjil en $CaCO_3$ par apport à celles du Pléistocène terminal peut indiquer le changement des caractéristiques des eaux pluviales, jadis plus acides et plus magnésiques.

A l'Holocène inférieur, le climat s'est progressivement amélioré pour retrouver le traditionnel optimum climatique. **Un climat à saisons contrastées chaudes et humides a pu s'installer dans un contexte d'optimum hydrique et thermique** atteint vers 8500 BP (Brun, 1991). Les précipitations étaient forcément plus importantes que maintenant avec une répartition saisonnière différente de celles que l'on connaît actuellement. La croissance de l'humidité à l'Holocène inférieur a été évoquée par plusieurs chercheurs en Tunisie (Ballais et *al.*, 1988 ; Karray, 1990a, 1993 ; Petit-Maire et *al.*, 1991 ; Ballais, 1991 ; Brun, 1991 ; Bourgou, 1993 ; Abichou, 2002 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Zielhofer *et al.*, 2008 ; Bkhairi, 2013).

II-2-2-2- Une morphogenèse généralement modérée à peu active

Pendant l'Holocène inférieur, la morphogenèse était généralement modeste à peu active. Elle s'exprime essentiellement par les séquences inférieures de la première génération de dépôts de la terrasse holocène préhistorique QH1-3. Les dépôts sont peu épais (2 m en moyenne), limités surtout aux principaux axes d'écoulement et déposés pendant une grande partie de l'Holocène inférieur et moyen. Ils révèlent la part dominante des phénomènes lents et progressifs dans le système érosif, sans exclure l'effet local d'événements exceptionnels. Le remplissage sédimentaire hétérogène dans les deux enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, est surtout d'origine détritique lointaine. Il témoigne par contre d'un certain **développement de l'érosion dans les bassins drainant les reliefs atlasiques de la Tunisie centrale**. L'activité éolienne était faible ou atténuée.

Au cours du **stade SK_{XIII}**, la puissance (environ **1 m**) et la granulométrie grossière des dépôts proximaux colluvio-alluviaux (**FCA1**, T52) et fluviatiles d'épandage alluvionnaire (**FEA1**, T55) témoignent **des dynamiques actives de progradation et d'aggradation des zones d'épandage des oueds tributaires des lacs temporaires**. Ces dépôts expliquent une instabilité relative des versants et une érosion pluviale manifestement exercée dans les bassins proches. Ils sont vraisemblablement associés à des fortes intensités de pluies locales et à des crues exceptionnelles des oueds descendants les Dhras laghmas-ash-Shraif et as-Satour. L'épaississement des séquences lithostratigraphiques (**15 à 29 cm**) est-il l'expression de la **variation du niveau de base** et de la déstabilisation des marges de la dépression lacustre, en rapport avec **la subsidence** ? (Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1993). L'abaissement du niveau de base local a vraisemblablement favorisé l'érosion dans les axes d'écoulement et l'addition de matériel aux flux sédimentaires (Karray, 1993).

II-2-2-3- Le continuum amont-aval d'al Kalbiyya-Halq al Minjil : des rapports forts

Les deux systèmes al Kalbiyya et Halq al Minjil sont hydrologiquement liés. La comparaison de l'évolution séquentielle des teneurs en carbonates de calcium et en calcite des carottes C1 et C3 montre que l'accumulation des carbonates diminue graduellement du bas en haut (Tab. 24 ; Fig. 94). Elle atteint ses maxima à la base des carottes avec un changement dans la régularité des pics de concentration des carbonates. Puis, elle décline depuis environ les cinq derniers millénaires. Ces variations peuvent renseigner sur des tendances plus régionales des changements hydrologiques et climatiques : les fortes accumulations de carbonates coïncident avec l'optimum de l'Holocène inférieur et du début de l'Holocène moyen et proviendraient de la mobilisation des carbonates dans les bassins versants ; tandis que la diminution des teneurs synchronise l'aridification du climat depuis la

deuxième partie de l'Holocène moyen. Sur un autre plan, la différence des teneurs en carbonates dans les deux carottes découlerait des variations de l'hydrologie de surface et de l'origine proche ou lointaine des apports dans la sebkha-lagune.

Les fortes teneurs en $CaCO_3$ s'associent bien avec les faibles rapports magnésium/calcium (Mg/Ca), un indicateur utile pour la reconstitution de la paléosalinité. La faiblesse du ratio Mg/Ca indique la déficience des processus diagénétiques de dolomitisation et de précipitation des carbonates de calcium et des sulfates (Schütt, 2000). On peut déduire que le faciès sulfato-carbonaté, la calcite, la dolomite et l'ankérite des parties inférieures des carottes C1 et C3 sont essentiellement d'origine détritique.

Carotte C1	*Séquence lithostra.*	S24	S23	S22	S21	S20	S19	S18	S17	S16	S15	S14	S13
	Teneur en CaO	4,98	4,98	14,3	6,73-8,2	5,88	4,18	1,8-3,55	15,87	18,98-24,02	20,31	15,8	24,68
	Séquence lithostra.	S11	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	
	Teneur en CaO	23,5	16,4	18,69	15,63	17,01	16,6	12	15,23	22,93-20,6	14,45	14,8	

Carotte C3	*Séquence lithostra.*	S23	S22	S21	S20	S19	S18	S17	S16	S15	S14	S13
	Teneur en CaO	4,92	3,6	6,48	6,82	3,02	6,56	4,04	9,5/5,28	13,44	11,59/11,31	16,07/13,83
	Séquence lithostra.	S12	S10	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1
	Teneur en CaO	13,9	12,37	13,76	13,27	15,1/8,46	14,26/8,47	12,62/9,76	8,47/10,86	14,57/9,74	11,53/8,31	8,98/9,77

Tab. 24 : Evolution séquentielle des teneurs en CaO dans les carottes C1 et C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil

Durant l'Holocène inférieur et pendant le Pléistocène supérieur terminal, **les rapports hydrologiques amont-aval étaient importants et récurrents**. Le comblement du fond de Halq al Minjil a été particulièrement contrôlé par les apports allogènes des crues successives de l'oued al Manfas as-Sod. Les apports élevés en argiles et limons fluviatiles (érosion des sols) et les maximas de carbonates dans le lac temporaire-sebkha et la sebkha-lagune durant les stades SH_{XIV} et SH_{XII} se rapportent à l'évacuation des trop-pleins lointains des lacs pérennes SK_{XIV} et SK_{XII}, débordants et exoréiques d'al Kalbiyya vers la mer par l'intermédiaire de l'oued. Depuis au moins **8052±168 BP** (9416-8545 cal BP/7467-6596 cal BC) et jusqu'à un peu après **5632±218 BP** (LRAE T52-1 ; 4515-3511 cal BC), les flux sédimentaires étaient assurés par des écoulements déclenchés par des pluies d'extension régionale. Un peu avant **4965±35 BP** (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC), on observe des oscillations verticales des teneurs en carbonates. Elles expliquent des changements dans la production de carbonates, ou la dilution des apports issus du bassin versant.

II-2-2- Les rapports sociétés épipaléolithiques/milieu à l'Holocène inférieur

Les archives sédimentaires d'âge holocène inférieur ne contiennent pas de témoins clairs d'une emprise humaine sur les milieux. Les horizons fins et discontinus de charbon de bois dans la nappe alluviale de la terrasse holocène préhistorique de l'oued Lahmar et les particules charbonneuses dispersées dans le remplissage sulfato-carbonaté de Halq al Minjil peuvent indiquer une probable intervention sur la croissance végétale, en particulier par la pratique des feux.

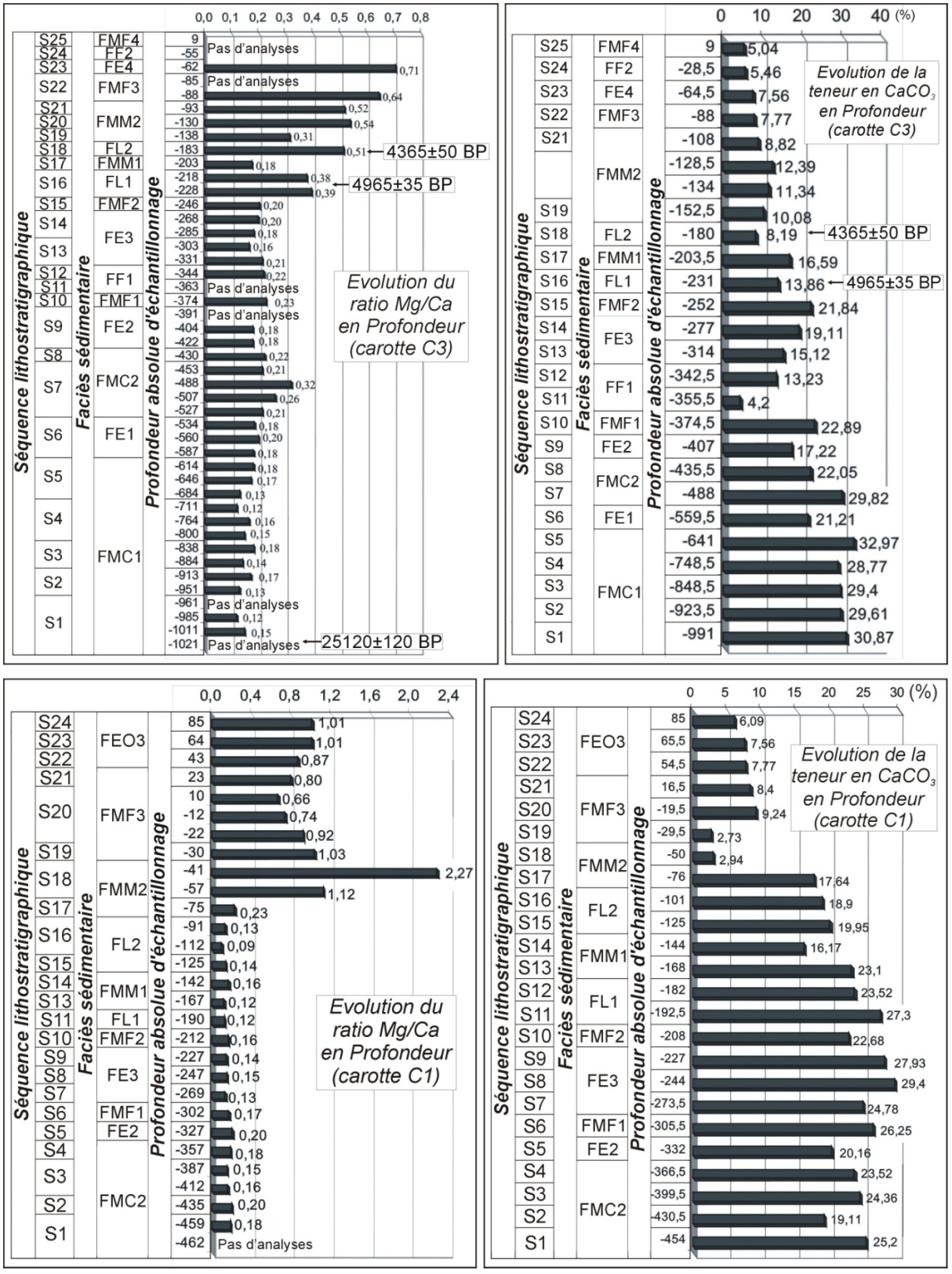


Fig. 94 : Evolution en profondeur des teneures en CaCO3 et du ratio Mg/Ca dans les carottes C1 et C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil

FMF : Faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables ; FMC : Faciès mixte sulfato-carbonaté ; FMM : Faciès mixte aux influences marines notables ; FL : Faciès lagunaire ; FE : Faciès « évaporatique » ; FF : Faciès fluviatile

L'époque épipaléolithique et néolithique est bien représentée sur les bordures de Halq al Minjil et tout le long de l'oued al Manfas as-Sod, comme en témoigne la densité des pièces lithiques de surface et des sites archéologiques (Fig. 95 ; Mulazzani *et al.*, 2007, 2008 ; Mulazzani, 2010). Dans le cadre du projet tuniso-italien pour l'étude de la Préhistoire de Hirgla, les prospections conduites sur les bordures d'al Kalbiyya ont permis de recueillir sur le versant ouest de la retombée septentrionale de Draa Laghmas **168 pièces lithiques et 69 fragments d'œufs d'autruches** (*cf.*, Fig. 23 ; Crema, 2006). Une première étude lithique incomplète, effectuée sur le matériel, a permis d'affirmer des fréquentations du territoire qui remontent à l'Atérien, l'Epipaléolithique et le Néolithique. L'abondance, la pérennité et la qualité des eaux ont fait des systèmes lacustres, des sites attractifs, fréquentés et/ou occupés par les populations humaines.

Seul **le site SHM-1**, occupant la dune qui devance le bourrelet holocène préhistorique au centre-ouest de Halq al Minjil, a fait l'objet d'une fouille strato-archéologique. Les résultats d'analyses archéologique, paléobotanique, archéozoologique et malacologique ont donné une idée des types d'occupation et quelques **détails supplémentaires sur l'économie des groupes ayant fréquenté le site, sur les paléoenvironnements et sur les rapports Homme/milieu/climat**.

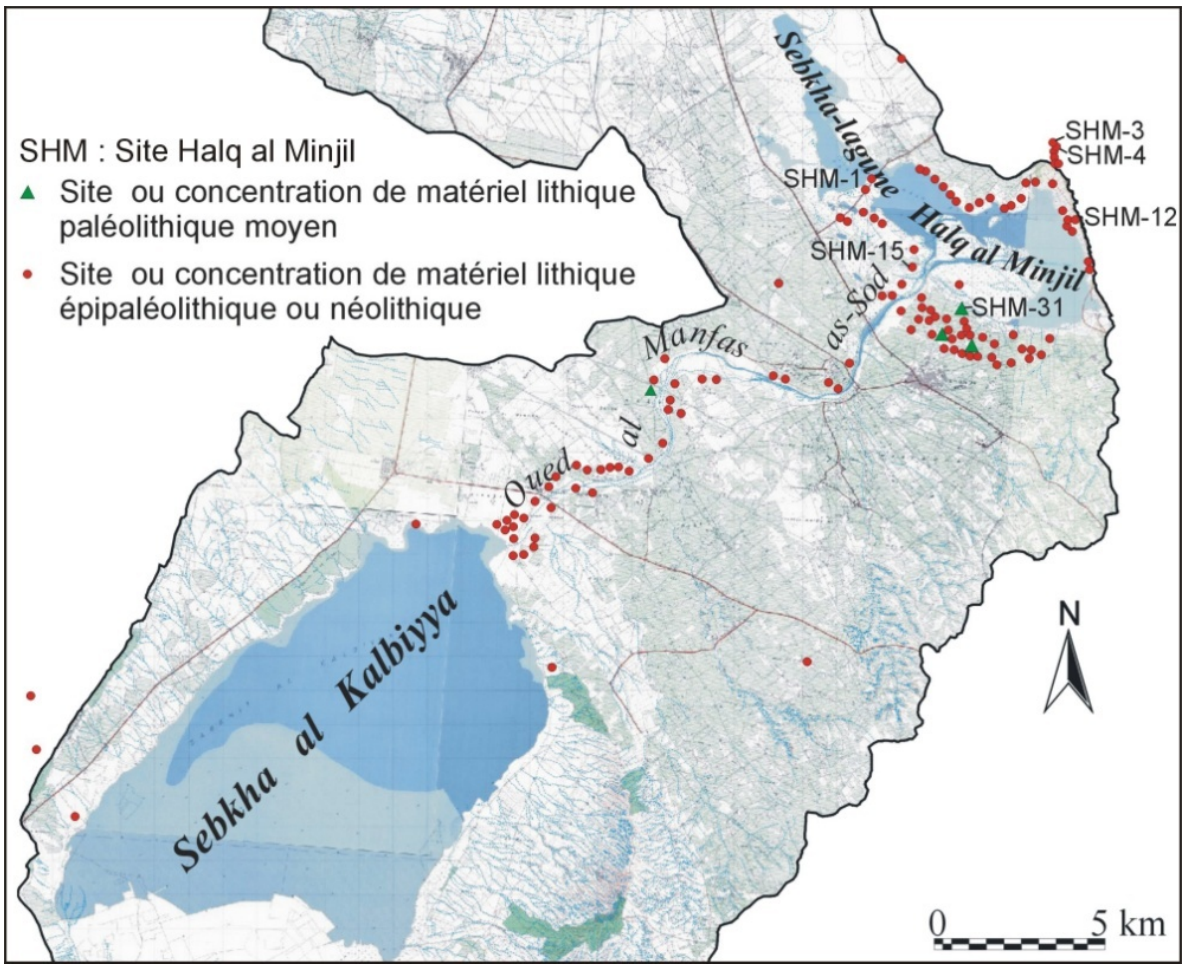


Fig. 95 : Sites préhistoriques et champs de concentration du matériel lithique : premiers résultats de la prospection géoarchéologique 2002-2007 (Mulazzani, 2010 ; observations de terrain)
Fond cartographique : feuilles topographiques de Sidi Bou Ali, Halq al Minjil, al Kalbiyya et Sidi al Heni au 1/25000

II-2-2-1- Le corpus lithique de SHM-1 : un outillage de chasse, de récolte végétale et de transformation domestique

La fouille de l'escargotière SHM-1 (2002-2007) a mis en évidence une succession de **sept niveaux d'occupation datés entre le VIIème et le VIème millénaire cal BC** (Mulazzani, 2010, 2013 ; Saliège *et al.*, 2013). Ils se différencient par la présence des macro-dissemblances chromatique et texturale et par l'introduction de pierres pour l'aménagement de zones d'habitat.

L'étude analytique du corpus lithique a montré l'absence de véritables innovations au cours des occupations, dont le matériel récolté a révélé les mêmes critères technologiques que ceux qui caractérisent le Capsien (Mulazzani *et al.*, 2009 ; Mulazzani, 2010 ; Jeddi *et al.*, 2013). Le manque de spécificité est lié à la nature des activités pratiquées tout autour de la sebkha-lagune. **Le ramassage des *Cerastoderma glaucum***, les plus consommés sur le site, a été effectué à main nue sans l'utilisation d'un outillage spécifique. Ainsi, **la pêche des poissons**, aussi bien dans le bassin lagunaire que sur la côte, a été effectuée avec des filets, ou avec des pièges en matériau végétal et périssable (Mulazzani, 2010 ; Vorenger, 2013). « *L'outillage lithique étudié aurait alors été lié **à des activités de chasse, des récoltes végétales, et de transformation domestique**, intégrées et combinées aux possibilités de l'industrie sur os composée principalement d'outils perforants* » (Mulazzani, 2010).

II-2-2-2- L'enregistrement palynologique : l'exploitation des ressources végétales sauvages

Les séquences S7 et S8 de la carotte C3, contemporaines de l'occupation épipaléolithique, étaient stériles. Vingt échantillons ont été prélevés sur les niveaux stratigraphiques et sur une sépulture humaine 2 du site SHM-1 (Jaouadi, 2009 ; Jaouadi et Lebreton, 2013). Seulement treize échantillons ont livré des pollens mais altérés et dans un mauvais état de conservation (Jaouadi *et al.*, 2010).

Les spectres polliniques des coupes DI47 et DE46 sont dominés par **les herbacées (87 à 97%)**, en particulier les Chenopodiaceae, les Poaceae, les Asteraceae Asteroideae et les Asteraceae Cichorioideae (Fig. 96). Sur les deux échantillons de la sépulture (US 238 ; 7595±80 BP, 6319-5812 cal. BC), un seul a montré une bonne préservation des grains et une correcte diversité pollinique. Le spectre est dominé par les herbacées (91%) en particulier les Poaceae, les Asteraceae Cichorioideae et les Chenopodiaceae. Un dernier échantillon, prélevé sur le remplissage d'une fosse creusée dans les dépôts archéologiques (US 529 ; **7870±30 BP**; 6499-6106 cal. BC), a livré des grains de pollen mal préservés et un spectre dominé par les herbacées. Les Asteraceae Cichorioideae représentent 78,5% du signal pollinique (Jaouadi et Lebreton, 2013). Leur surreprésentation initiale peut également être liée à la présence d'un grand nombre de pollinies qui viendraient de la mise en place sur site d'étamines ou de fleurs entières (Lebreton *et al.*, 2010).

Ces pollinies sont apportées intentionnellement par l'Homme par prélèvements des plantes dans les environs immédiats du site SHM-1. Leur examen a montré qu'elles appartiennent aux 4 taxons qui dominent largement les spectres polliniques. Il s'agit des Poaceae, des Chenopodiaceae, des Asteraceae Cichorioideae et des Asteraceae Asteroideae. Ils permettent **la reconstitution d'un paysage ouvert et steppique** (Jaouadi et Lebreton, 2013). Mais, leur développement aux dépens des essences halophiles indique **l'installation d'un écosystème peu salin,** vraisemblablement **en lien avec l'amélioration des débits des oueds et des conditions pluviométriques**. Les taux élevés des Poaceae (graminées) accompagnés d'une présence importante des pollinies du même taxon, témoignent d'un apport anthropique intentionnel de Poaceae sur le site. Ils expliquent **l'intensification de l'exploitation des ressources végétales sauvages** (Jaouadi et Lebreton, 2013).

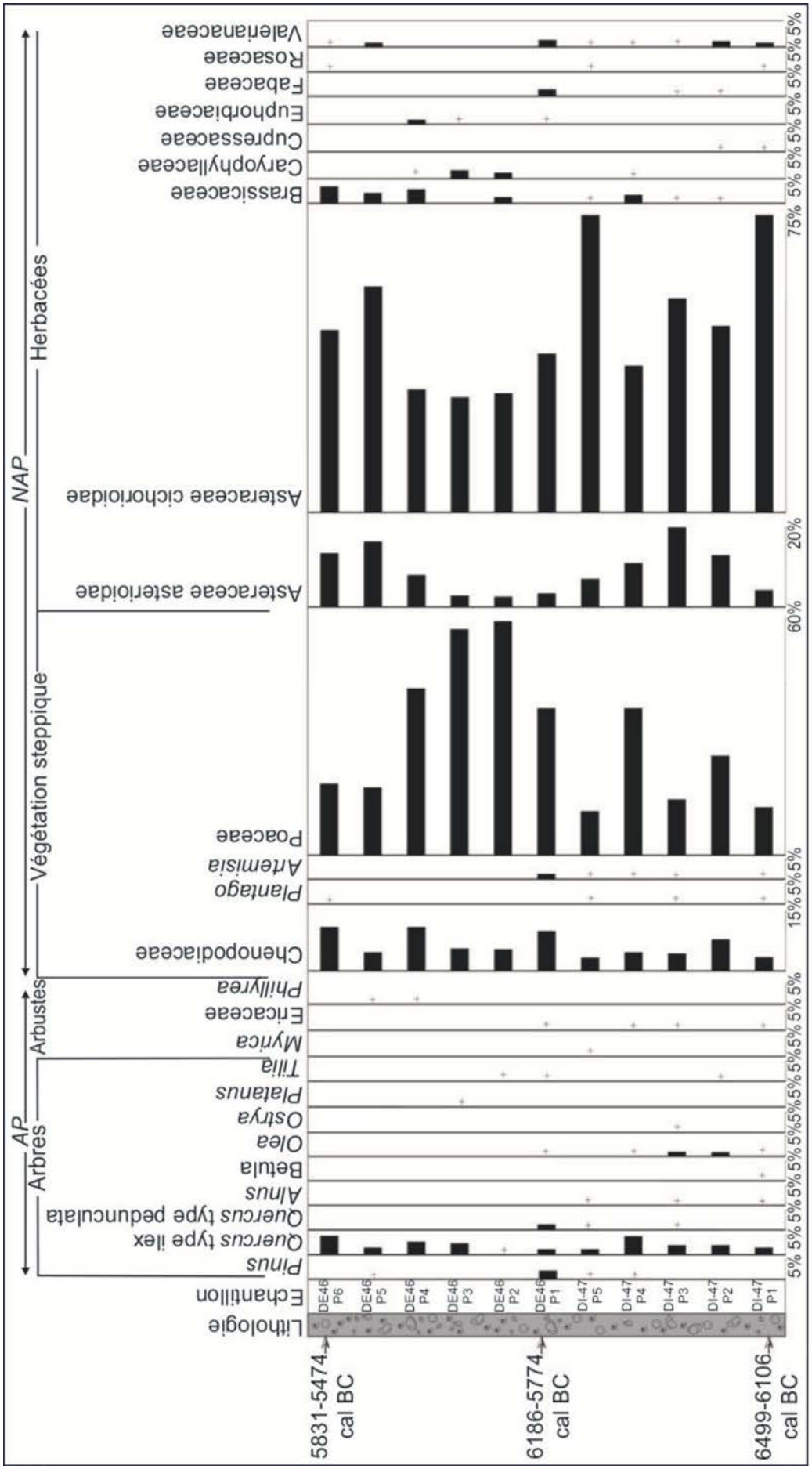


Fig. 96 : Diagramme pollinique détaillé des coupes DI-47 et DE-46 du site SHM-1 (Jaouadi et Lebreton, 2013)

II-2-2-3- La faune du site SHM-1 : des espèces exclusivement sauvages

Le site SHM-1 a livré un matréiel osseux important et diversifié (Aouadi *et al.*, 2013). Les analyses paléontologique et archéozoologique ont permis de comprendre les comportements de subsistance des groupes épipaléolithiques et de fournir quelques éléments sur l'environnement vécu par ces groupes.

II-2-2-3-1- Les données paléontologique et archéozoologique

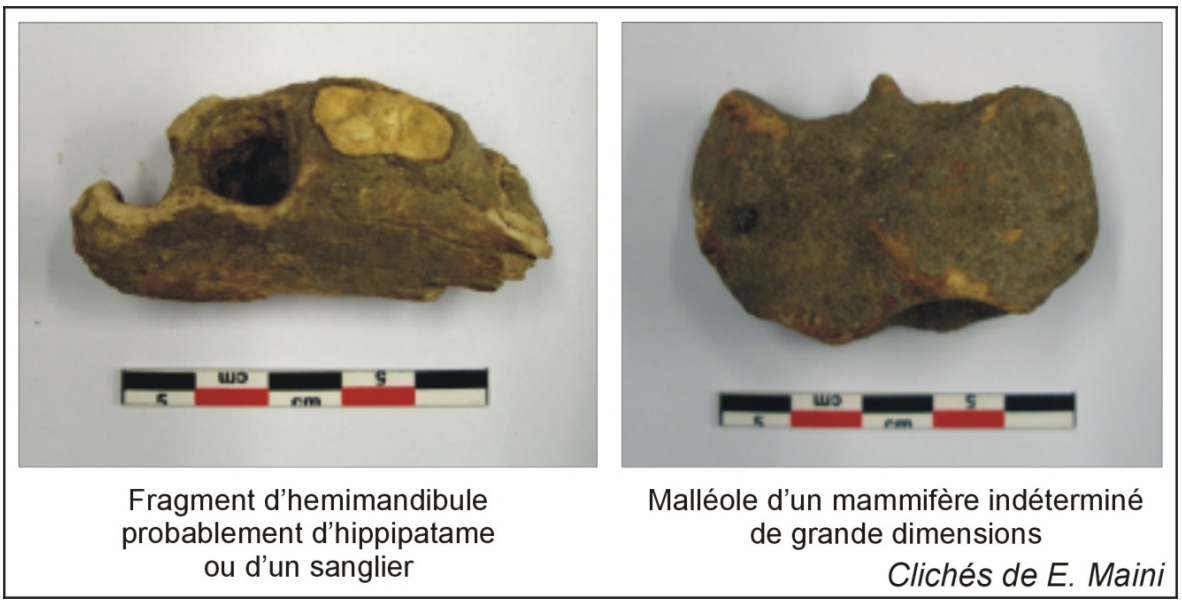
Le spectre faunique est **largement dominé par les bovidés et quelques carnivores** (Pl. 12). Le matériel osseux a montré une diversification progressive et une concentration croissante des niveaux d'occupation les plus anciens aux plus récents. Durant les premières phases d'occupation (1 à 4), les petits à moyens gibiers (lagomorphes, tortues, gazelles et bubales) composent le menu principal des habitants de SHM-1. Pendant la phase 5 et puis 6 et 7, ce sont les gros gibiers que les hommes épipaléolithiques vont chercher (aurochs, buffle, bubale, sanglier…). Le buffle, fortement lié aux points d'eau et au couvert végétal dense, se trouve plus présent dans le niveau 7 (Aouadi *et al.*, 2013). Les Artiodactyles de grandes dimensions ont été attestés par une petite portion mandibulaire. Elle est attribuable soit à un jeune hippopotame (*Hippopotamus amphibius*) ou un sanglier (*Sus scrofa*). Aussi, une malléole entière d'un artiodactyle de grandes dimensions a été attribuée à un gros exemplaire de *Bos primigenius*, mais son appartenance aux *Girafidae* (*Giraffa camelopardalis*) est probable (Aouadi, 2004 ; Aouadi *et al.*, 2013 ; Pl. 13).



Pl. 12 : Des restes osseux déterminables appartenant à la famille des Bovidae (Mulazzani, 2010)

II-2-2-3-2- Implications paléoenvironnementales du spectre faunistique

Le complexe faunique du site SHM-1 est composé strictement d'**espèces sauvages**, acquises à travers des **activités cynégétiques**. **L'economie de subsistance des sociétés épipaléolithiques est orientée sur des chasses sélectives visant surtout les bovidés de taille moyenne à grande avec une exploitation exhaustive et maximale des carcasses animales** (Aouadi, 2004 ; Aouadi *et al.*, 2013). Si sa présence est confirmée, l'hippopotame a besoin d'importantes quantités d'eau**. Les bovidés et les autres espèces reconnues vivent habituellement dans des environnements ouverts, de type savane, arborée ou peu boisée.** Le sanglier requiert essentiellement des conditions arborées (Mulazzani, 2010).



Pl. 13 : Les Artiodactyles de grandes dimensions ont été également attestés dans le site SHM-1 (Mulazzani, 2010)

La diversification progressive du spectre faunique, des niveaux les plus anciens aux plus récents, témoigne d'**une amélioration des conditions climatiques** (présence de l'eau). Elle indique **une pression démographique croissante** visant les espèces de moyenne à grande taille et un choix d'abattage orienté surtout vers les bovidés de zones ouvertes (bubales et gazelles). Sur la base de la distribution de la faune étudiée, une chasse à des fins alimentaires est certaine. **La question de la domestication animale semble encore inconnue par les occupants du SHM-1**. **Les niveaux de 1 à 4**, relevant du VIIème millénaire cal BC, **étaient plus arides**. **Une brève période humide** aurait accompagnée le **niveau 3**. **À partir du niveau 5**, attribué à la première moitié du VIème millénaire cal BC, **l'ambiance climatique est devenue plus humide** (Aouadi *et al.*, 2013).

II-2-2-4- Les ressources malacologiques : la périodicité d'occupation du site SHM-1 et de ses environs

Les restes malacologiques représentent les restes alimentaires les plus abondants dans le site SHM-1 (Mazzanti 2007 ; Mannino et Mazzanti, 2013). **Les mollusques marins les plus communs sont typiques d'environnements lagunaires ou qui peuvent s'adapter à un milieu lagunaire** : *Cerithium vulgatum*, *Cerithium rupestre*, *Bittium reticulatum*, *Truncullariopsis trunculus*, *Hinia costulata*, *Cerastoderma glaucum*, *Tapes decussatus* et *Donax trunculus*. **Les *Cerastoderma glaucum*** sont l'espèce la plus représentée. Les analyses dimensionnelles ont montré la quasi-absence d'exemplaires inférieurs à 15 mm.

Ceci témoigne d'**une récolte sélective et à des fins alimentaires** (Mazzanti 2007, *in* Mulazzani, 2010).

Les chasseurs-ramasseurs de SHM-1 ont emporté une exploitation non excessive, irrégulière et espacée dans le temps. Ils ont exploité les coquillages de manière épisodique pendant une saison ou des périodes spécifiques de l'année, durant lesquelles les coquillages lagunaires et continentaux pouvaient représenter des ressources alimentaires relativement importantes. Ces données, bien que préliminaires, plaident en faveur de l'hypothèse de **la périodicité d'occupation du site SHM-1 et de ses environs** (Mannino et Mazzanti, 2013). Cette hypothèse est, à ce jour, controversée, car elle n'émerge pas d'études archéologiques et archéozoologiques (Mulazzani, 2010 ; Aouadi et *al.*, 2013).

CONCLUSION DU CHAPITRE

Depuis 25120±120 BP (Beta-290410 ; 28341-27611 cal BC) et durant l'Holocène inférieur, les facteurs de la morphogenèse semblent uniquement inféodés aux variations des paramètres bioclimatiques. Les données fragmentaires de la palynologie suggèrent l'installation depuis le Pléistocène supérieur terminal des paysages ouverts de type steppique dont leur évolution est influencée par un climat semi aride fluctuant. Les changements du fonctionnement hydromorphologique et hydroéolien d'al Kalbiyya et de Halq al Minjil l'attestent avec une saisonnalité plus ou moins marquée à cause de variations dans la répartition des précipitations. Les dépôts lacustres et palu-lacustres et les niveaux fluviomarins sulfato-carbonatés (FMC2), peuvent globalement s'intégrer aux données géomorphologiques de la Tunisie centrale et méridionale pour traduire l'augmentation de l'humidité et des pluies régionales abondantes et régulières à l'Holocène inférieur dans un contexte général d'optimum climatique. Dans le système fluvial, les variations synchrones et stratigraphiques des sédiments enregistrent l'instabilité de la morphodynamique dans les vallées et une morphogenèse généralement modérée.

La combinaison des différents indicateurs géoarchéologiques, archéozoologiques et malacologiques ne témoignent pas d'une forte emprise anthropique sur le milieu au cours de l'Holocène inférieur et au début de l'Holocène moyen (7880±35-6625±30 BP). Le comportement alimentaire des sociétés épipaléolithiques était lié à des pratiques prédatrices de chasse, de pêche, de collecte et de cueillette. Par un mode de vie nomade, ces sociétés ont incontestablement contribué au maintien local de l'équilibre de l'environnement. Toutefois, la faible représentativité des données disponibles, incite à une certaine prudence (Communication orale de S. Mulazzani, 2010).

CHAPITRE XI :
L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE MOYEN (7000-3500 BP)

Les remplissages sédimentaires et les bio-marqueurs qu'ils renferment dans les deux enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, ont permis de mettre en évidence une succession d'unités lithostratigraphiques corrélables d'un site à l'autre. Ils ont permis de saisir les dynamiques morphogéniques et d'évaluer les tendances climatiques générales pendant la première moitié de l'Holocène moyen.

A partir de 4965±35ans BP, Halq al Minjil et al Kalbiyya ont connu respectivement l'installation des systèmes lagunaires et de sebkhas. Les remplissages sédimentaires ont délivré des données nouvelles de dynamiques, de variations climato-eustatiques et d'évolution des paysages ayant cours durant la deuxième moitié de l'Holocène moyen. Dans les fonds de vallées et dans les plaines, les tendances sont généralement au comblement et à l'aggradation alluviaux. Les manifestations érosives sont limitées.

Dans ce chapitre on décrira deux phases différentes d'évolution morphogénique, de dynamiques paysagère et environnementale. La première s'allonge de 7000 BP à 5000 BP environ (âge du premier dépôt lagunaire de Halq al Minjil). La seconde s'étale de 5000 BP jusqu'à 3500 BP.

I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT LA PREMIERE MOITIE DE L'HOLOCENE MOYEN (7000-5000BP)

Les dépôts proximaux colluvio-alluvial (FCA2) et fluviatiles d'épandage alluvionnaire (FEA2) d'al Kalbiyya et le remplissage « évaporatique » de Halq al Minjil (FE2) renseignent sur le fonctionnement hydrologique des deux enclaves au début de l'Holocène moyen. Ils témoignent des changements de dynamiques et d'environnements sédimentaires.

Depuis et durant la première moitié de L'Holocène moyen, al Kalbiyya a connu l'installation d'**un deuxième système lacustre majeur**. Deux épisodes de lacs pérennes à forte production biocénotique (SK_X et SK_{VIII}) sont séparés par un stade de lacs temporaires (SK_{IX}). Halq al Minjil a fonctionné en alternance de système de sebkha-lagune (SH_X et SH_{VIII}) et de sebkha littorale (SH_{XI} et SH_{IX}). Dans les fonds de vallées, on enregistre la continuité de la mise en place de la première génération de dépôts de la terrasse holocène antéhistorique (QH1-3). Il s'établit un régime d'érosion modérée à plus ou moins actif. Le rôle des variations climatiques dans la dynamique de l'hydrosystème est déterminant.

I-1- Dynamiques hydro-géomorphologiques et paysagères

I-1-1- L'installation des stades lacs temporaires SK_{XI} et sebkha littorale SH_{XI} et la surélévation du bourrelet hydroéolien de l'enclave paralique

Le niveau fluvio-lacustre **FFL2** aux *Cerastoderma glaucum* est enfoui sous un dépôt proximal colluvio-alluvial (**FCA2**) et fluviatile d'épandage alluvionnaire (**FEA2**), épais de **10 à 45 cm**. Al Kalbiyya évolue en **système de lacs temporaires** dépourvus de toute faune malacologique et périodiquement exondés et soumis à de fortes fluctuations. Les apports hydriques sont irréguliers et peu abondants par apport à ceux du stade lacustre précédent.

Des crues allogènes vraisemblablement violentes et brèves, inondent l'enclave continentale et apportent des sables et des limons par des écoulements assez compétents et à plus ou moins fortes capacités de transport. Les apports hydro-sédimentaires d'origine proche sont importants. L'évolution post dépôt des sédiments est marquée par une hydromorphie de surface (horizons noirs et grisâtres). Durant la saison et/ou les périodes sèches de l'année, le lac se rétrécit vers l'ombilic ou est entièrement émergé et asséché. La fréquente apparition des lits de sels et la forte précipitation des micros et des macrocristaux de gypse dans les franges capillaires peuvent expliquer des périodes de sècheresse plus fréquentes et/ou plus prolongées et une évaporation plus accentuée en comparaison à celles du stade lacs temporaires SK_{XIII}. Les lacs temporaires évoluent alors en sebkha desséchée.

Halq al Minjil a connu l'installation d'un nouveau stade de **sebkha littorale SH_{XI}**, attestée par le remplissage « évaporatique » **FE2**. Les dynamiques morphosédimentaires rappellent celles du stade sebkha littorale SH_{XIII}. L'enclave littorale reçoit des apports hydro-sédimentaires marins et continentaux, essentiellement lors des marées de vive-eau et des crues exceptionnelles des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. Les apports terrigènes sont prépondérants. Les apports latéraux sont importants. Des sédiments fins d'argiles et de silts, riches en sels (halite et gypse) et épais de **34 à 62 cm** sont mis en place. Le confinement du plan d'eau est important. Il est certainement géré par la réduction des apports hydriques dans la sebkha, par la déficience et l'irrégularité de la pluviométrie mais aussi par la faiblesse ou l'atténuation des entrées marines. Une isolation au moins saisonnière de Halq al Minjil de la mer est probable. Le développement occasionnel d'une plage en devant de la falaise tyrrhénienne barrant les goulets et une très faible amplitude de marées peuvent l'expliquer.

L'émersion puis l'assèchement prolongé de Halq al Minjil par une évaporation intense et persistante, expliquent la forte concentration du gypse de néoformation (22% du sédiment) dans la frange capillaire, les vides et les pores (lame mince L5). L'arrivée des premières pluies ou des nouveaux apports marins et/ou continentaux, entraîne la submersion de la sebkha « supratidale » et la décantation des sédiments laminaires recouvrant les sels, les protégeant de la dissolution et empêchant conséquemment la formation d'une croûte de sels massive.

L'installation de la sebkha littorale est accompagnée par **l'activation de la morphogenèse éolienne**. L'exondation de la sebkha, la déshydratation et la floculation des argiles et des silts gypseux, ont favorisé la déflation. On peut corréler à ce stade, la mise en place de **la deuxième génération de dépôt éolien FEO2** qui recouvre le premier ensemble éolien FEO1 et les niveaux d'occupation capsienne peu après **6625±30 BP** (SacA 23663; 5623-5492 cal BC). Sa mise en place est polyphasée et responsable de **la surélévation du bourrelet des bordures ouest et méridionale de Halq al Minjil**. Cinq séquences lithostratigraphiques, épaisses de **95 cm environ**, se superposent et montrent une forte hétérogénéité verticale des caractéristiques sédimentologiques. Elles renseignent sur le changement temporel des conditions, des dynamiques et de l'efficacité morphologique des vents des secteurs est et nord-est. Les limons sableux, les limons argileux et les argiles silteuses expriment une ou plusieurs provenances à part le fond argilo-silteux de la sebkha.

Des phases de stabilité et de pédogenèse ont interrompu la morphogenèse éolienne. Elles sont attestées par les phénomènes de lessivage et de percolation des eaux, la faible teneur des sédiments en calcium, la baisse du ratio Ca/Mg et du rapport molaire Ca/Al. La présence de l'anhydrite et du gypse lenticulaire néoformés dans les pores et les vacuoles (lame mince L12-C2) traduit également une pédogenèse parfois active et contrôlée par des cycles humectation-assèchement. L'existence de fibres rouilles et de taches diffuses d'oxyde

de fer et ferro-manganiques noires dans les fonds matriciels ainsi que la multiplicité des faits de la bioturbation (excrétas d'animal terrier, racines) peuvent expliquer l'interruption des dynamiques éoliennes.

I-1-2- L'installation de l'épisode lacustre pérenne SK_X et du stade sebkha-lagune SH_X

Des sables quartzeux et oxydés d'origine fluvio-lacustre (**FFL3**) et fluvio-palu-lacustre (**FPL3**), épais **de 10 à 20 cm** et riches en débris de *Cerastoderma glaucum*, comblent la cuvette d'al Kalbiyya et annoncent l'installation de **l'épisode lacustre SK_X**. Il s'agit de la première sous période du deuxième système lacustre majeur d'al Kalbiyya ayant marqué la première moitié de l'Holocène moyen. Les apports allogènes sont de plus en plus importants. Les apports latéraux sur les versants des rives est et ouest du lac sont loin d'être négligeables. Les dynamiques morphosédimentaires sont plus actives que celles du stade précédent SK_{XI}. Localement des vases argilo-silteuses (**FCV1**-T50) se déposent en périodes de hautes eaux, dans les marges peu profondes et calmes de la cuvette lacustre.

Les restes malacofaunistiques de différents calibres établissent une macrofaune possédant une taille moyenne de 2 cm. Ils permettent d'accorder au lac **une longue espérance de vie**, sachant qu'un *Cerastoderma glauc*um ayant une dimension de 20 mm, a un âge compris entre 15 et 18 mois (Dabouineau et Ponsero, 2009). **La paléobathymétrie semble osciller entre 19,35 m et 19,5 m à l'ouest et entre 17,8 m et 18 m à l'est**. Le plan d'eau a pu atteindre en moyenne 1,5 m de profondeur. Al Kalbiyya est un lac pérenne, exoréique, au fond oxygéné et soumise à des fluctuations du niveau d'eau (oxydation importante des sédiments). Une végétation se développe sur les marges palustres temporairement exondées.

Le remplissage fluviatile **FF1** et fluvio-marin aux influences fluviatiles notables **FMF1** (C1, C3, T40, T41 et T43), épais de **19 à 49 cm**, signe l'évolution de Halq al Minjil en système de **sebkha-lagune (SH_X)**. L'enclave littorale est sous une influence continentale prépondérante et enregistre des cycles inondation/exondation. En périodes de crues, de grandes marées et/ou de tempêtes marines, Halq al Minjil reçoit des sédiments fluvio-marins généralement fins de limons argileux, d'argiles silteuses et d'argiles. En milieux fluvio-deltaïques, la matière est plus grossière, exclusivement terrigène, composée de sables limoneux et de limons argilo-sableux. Les dynamiques sont relativement lentes à peu actives. Un plan d'eau peu profond et un milieu anoxique surtout dans l'ombilic s'installent temporairement. De telles conditions favorisent la mise en action des processus d'hydromorphie de surface et de décomposition de la matière organique. En périodes sèches, l'exondation progressive puis, l'assèchement total ou de la majeure partie de Halq al Minjil entraînent l'installation d'un milieu de sebkha asséchée. Un gradient de concentration de sels est marqué par la précipitation du gypse capillaire sur les bordures (S6-C1) et de l'halite dans l'ombilic (S10, S11, S12-C3).

I-1-3- Le stade lacs temporaires SK_{IX} et le stade sebkha littorale SH_{IX}

Un remplissage non fossilifère, composé de sédiments proximaux colluvio-alluviaux (**FCA3**) et fluviatiles d'épandage alluvionnaire (**FEA3**), annonce le dysfonctionnement des processus de la production biocénotique. Al Kalbiyya évolue en système de **lacs temporaires SK_{IX}**. Les dynamiques morphologiques et sédimentaires rappellent celles du stade SK_{XI}. Les sables et les limons sableux lités, peu épais (**10 cm**) sont mis en place par des écoulements assez rapprochés et compétents. Ils sont très oxydés et n'ont pas subi une importante évolution hydromorphique. Ils accusent un abaissement général du niveau du plan d'eau devenant moins profond et plus fluctuant que celui du stade lacustre précédent. Les apports dans l'enclave sont moins importants, parvenant lors des pluies locales et/ou des

crues brèves des oueds Nebhana, Merguelil et Zéroud. En périodes sèches de l'année, le lac se rétrécit vers l'ombilic permettant le développement d'une végétation sur les marges. Une certaine battance d'une nappe proche est responsable de la forte oxydation du matériel.

Halq al Minjil évolue en système de **sebkha littorale SH_{IX}**. Le niveau « évaporatique » **FE3**, épais de **74 à 81 cm**, est très riche en gypse (20-34% du sédiment). Il marque une véritable rupture avec les environnements sédimentaires du stade sebkha-lagune SH_X. Halq al Minjil est épisodiquement envahie par les eaux marines et continentales. Elle garde des échanges limités avec la mer et est soumise à une instabilité, au moins saisonnière, des régimes hydrologiques associés à un déficit du bilan hydrique. Ces données hydrologiques imposent au système de larges fluctuations du plan d'eau (forte oxydation et couleur olive pâle des sédiments). Les vases mises en place sont caractérisées par un mélange de sédiments marins et d'apports terrigènes. Ceux-ci deviennent abondants et plus grossiers à l'embouchure des oueds. Les dynamiques sont généralement lentes et rappellent celles du stade sebkha littorale SH_{XI}.

Les formes d'évolution post-déposionnelle en présence d'eau sont multiples : imprégnation micritique de la matrice et des fentes, incursion micritique et dissolution chimique des lentilles de gypse, évolution des smectites en illites. Elles caractérisent un milieu acide, hydrolysant et confiné. Lors d'émersion et d'assèchement de la sebkha, la pédogénèse fait intervenir les processus diagénétiques de précipitation du gypse puis de l'halite dans l'ordre inverse de leur solubilité (Gaucher et Burdin, 1974 ; Saaidi, 1988). Une croûte fine de sels recouvre les vases. La taille millimétrique et la forte concentration du gypse dans le sédiment indiquent une évaporation intense et/ou prolongée. Les rosettes de gypse et la forte oxydation du dépôt expriment la battance d'une nappe proche et un milieu aéré du bassin (Abichou, 2002). Une nouvelle inondation sporadique noie les figures de dessiccation des boues argileuses et forme une nouvelle lamine sédimentaire de décantation. A partir de ce stade, on note l'absence de la dolomie et de l'ankérite dans les sédiments.

I-1-4- La réinstallation d'un épisode de lacs pérennes (SK_{VIII}) et d'un stade de sebkha-lagune (SH_{VIII})

Le niveau fluvio-lacustre **FFL4** se distingue du reste des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya par sa forte densité en débris et valves de *Cerastoderma glaucum* jeunes et adules (**5632±218 BP** ; LRAE-T52-1 ; 6931-5935 cal BP/4982-3986 cal BC). Il témoigne du retour d'un nouvel **épisode lacustre pérenne SK_{VIII}** qui correspond à **la troisième sous période du deuxième système lacustre majeur d'al Kalbiyya**. Des sables et des limons sableux, fossilifères, fortement oxydés et épais de 11 à 27 cm, remplissent l'enclave continentale. Ils viennent en affleurement, mais de façon discontinue, sur les bordures sud-ouest, à l'est et au nord-est de la localité d'al Bshashma (Fig. 97). Ils prennent la forme d'**un dépôt de plage ou d'estran lacustre**, de largeur variable comprise entre 40 et 200 m. Ils se trouvent à 20 m au-dessus du niveau zéro de la mer, soit à une altitude plus élevée que celle du seuil de l'oued al Manfas as-Sod (19 m ; Fig. 98). Cette position altimétrique des restes malacofaunistiques pose deux problèmes/hypothèses :

(1) **la fermeture de l'exutoire d'al Kalbiyya**, au moins à la cote de 20 m, pour le contrôle du niveau des eaux dans le lac. On peut également penser à un barrage ayant entraîné cette fermeture. Ce barrage peut être d'origine structurale, lié à un mouvement relatif du seuil par un jeu de failles délimitant les marges nord-est de la cuvette lacustre (cf., chapitres 1 et 7), et/ou sédimentaire par la construction d'un obstacle fluviatile, éolien ou hydroéolien.

(2) **le gauchissement ou le soulèvement des paléorivages occidentaux**. Lors et/ou après la mise en place des dépôts lacustres, un mouvement tectonique a gauchi

ou a entraîné l'élévation, d'au moins d'un mètre, des bordures occidentales du lac. Un tel mouvement vertical peut expliquer la position perchée de la plage à *Cerastoderma glucum* au-dessus du seuil actuel de l'oued al Manfas-as Sod.

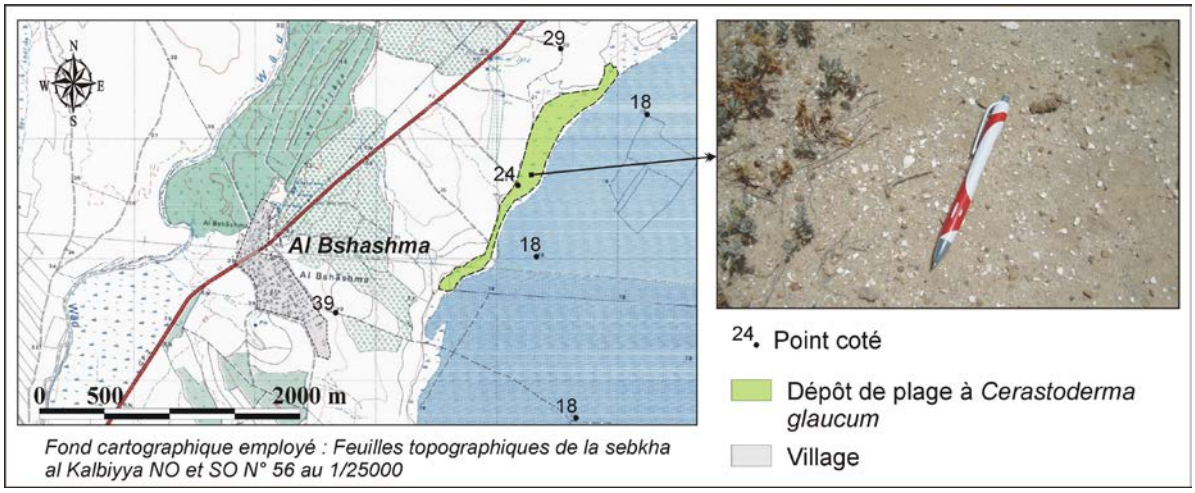


Fig. 97 : Dépôt de plage à Cerastoderma glaucum du stade lacustre SK_{VIII} de la première moitié de l'Holocène moyen (bordures sud-ouest de la sebkha al Kalbiyya)

L**a paléobathymétrie a varié entre 18,3 et 20 m**. La cuvette lacustre aurait eu une **superficie d'environ 127 km², soit 25% plus étendue que la sebkha actuelle**. Elle a pu emmagasiner jusqu'à environ **350 millions de m³ d'eau douce**. Al Kalbiyya est un lac pérenne, exoréique, anoxique dans l'ombilic et bien oxygéné sur les bordures palu-lacustres (caractère hydromorphique et oxydé des sédiments). La forte densité et la grande taille des *Cerastoderma glaucum* (3-30 mm) renseignent sur une longue durée du stationnement et d'ennoyage lacustres. Les apports hydriques dans le lac étaient disproportionnés, permettant un meilleur fonctionnement des processus de la prolifération biocénotique. Le déversement dans la mer par le biais de l'oued al Manfas as-Sod et Halq al Minjil était vraisemblablement fréquent.

Dans l'enclave côtière de Halq al Minjil, la mise en place du niveau fluvio-marin aux influences fluviatiles notables **FMF2**, a généré de nettes différences sédimentologiques par rapport aux dépôts « évaporatiques » sous-jacents. Le dépôt, épais de **14 à 22 cm**, témoigne du changement des environnements et du fonctionnement hydromorphologique de Halq al Minjil. La sebkha littorale SH_{IX} a évolué en système de **sebkha-lagune SH_{VIII}**. L'enclave littorale est le siège d'une sédimentation fine d'argiles et d'argiles silteuses fluvio-marines et d'apports terrigènes prépondérants. Halq al Minjil est temporairement inondée par les eaux marines, à l'occasion des marées de vive-eau, et par les eaux continentales en périodes de crues des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. Les dynamiques morphosédimentaires et l'évolution post-dépôt des sédiments rappellent celles du stade sebkha-lagune précédent (SH_X).

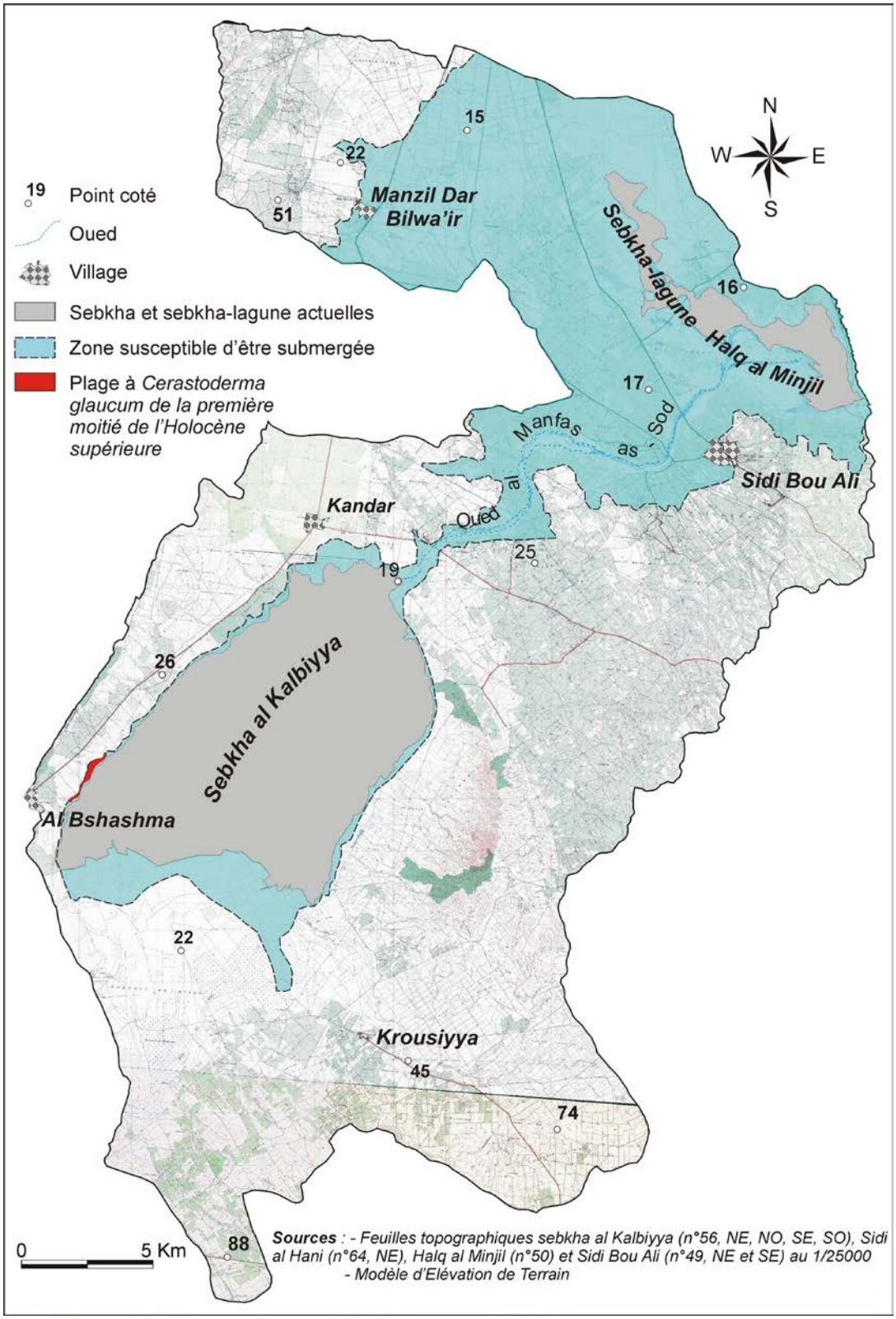


Fig. 98 : Zone susceptible d'être submergée lors de l'élévation du niveau du plan d'eau lacustre à 20 m au-dessus du zéro marin

I-1-5- La continuité du remblaiement des vallées et des plaines

La première moitié de l'Holocène moyen coïncide avec **une période de remblaiement des vallées et des plaines**. Les manifestations érosives sont limitées. Les datations absolues, permettant de calculer les vitesses de remblaiement sont absentes.

Dans les fonds de vallées, les sédiments stockés ont permis la **continuation de la construction des nappes alluviales et colluvio-alluviales de la base de la terrasse holocène antéhistorique QH1-3**, déjà commencées depuis le début de l'Holocène. Les sédiments ne comportent pas d'informations chronologiques pour caler les séquences lithostratigraphiques principalement mises à l'Holocène moyen. Généralement, les séquences supérieures, qui se trouvent fréquemment sous le paléosol brun, correspondent aux séquences récentes de ces nappes. La variation vertico-latérale des faciès indique une instabilité morphodynamique des vallées. Les coupes CmM, CmS-2 et CaSB-1 ont montré de grandes différences spatiales des épaisseurs et des caractéristiques sédimentologiques de sédiments. Une texture grossière, d'importantes épaisseurs apparentes (**1,1-3,7 m**) et une structure souvent litée marquent les fonds des principaux affluents de l'oued al Manfas as-Sod par rapport aux tributaires d'al Kalbiyya. **Des facteurs locaux** (lithologie, dessin hydrographie) ont joué un rôle majeur dans les changements de la morphodynamique et des caractéristiques formationnelles et morphométriques des nappes alluviales et colluvio-alluviales. Les formations sableuses, sablo-limoneuses et argilo-limoneuses sont des dépôts de crues, mis en place par des écoulements intermittents généralement compétents et à forte capacité de transport.

Dans les plaines, sur les bordures d'al Kalbiyya et Halq al Minjil et aux débouchés des oueds, les données morpho-sédimentologiques recueillies mettent en évidence des **épisodes de progradation et d'aggradation alluviales**, **d'édification des cônes** et **d'exhaussement des milieux fluvio-deltaïques**. Durant le stade lacs temporaires SK_{XI}, la mise en place sur la rive orientale d'al Kalbiyya du faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire **FEA2** (T55, T60), témoigne d'une aggradation et/ou progradation de la zone distale des cônes d'épandage. Les sables limoneux et les limons sableux, épais de **35 cm**, peuvent indiquer une ou des phases d'incision à l'amont engendrée par des écoulements peu chargés.

Le niveau relativement bas des eaux lacustres, la variation probable du niveau local des lacs temporaires et l'intensité des pluies sur les bassins tributaires d'al Kalbiyya (Lahmar-al Ghuirga, Lahmar, al Gharig) auraient favorisé l'érosion dans les axes d'écoulement, l'exhaussement des marges lacustres et l'édification et/ou l'aggradation alluviale des petits cônes « deltaïques ». Pendant le stade sebkha-lagune SH_X, le niveau fluviatile **FF2**, explique **l'édification ou l'aggradation du cône deltaïque à l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod**. Le remplissage sablo-limoneux et limono-argilo-sableux (S11 et S12-C3) est un dépôt de crue, mis en place par des écoulements à plus ou moins forte capacité de transport. Il correspond à des sédiments d'épandage alluvionnaire, qui sont déposés et avancés d'autant plus loin vers l'ombilic lors des flux d'eau brutaux et des crues allogènes, violentes. Sa mise en place indique le développement de l'érosion dans le bassin. Une incision à l'amont a dû coïncider avec une certaine aggradation à l'aval.

I-2- Morphogenèse et paléoenvironnements durant la première moitié de l'Holocène moyen

L'étude chronostratigraphique des archives sédimentaires datant de la première moitié de l'Holocène moyen a permis d'identifier **quatre phases de sédimentation et d'évolution hydro-géomorphologique**. Ces phases attestent d'une **morphogenèse modérée à peu active** dans un contexte d'**instabilité climatique** caractérisée par l'alternance des phases d'humidification et d'aridification relatives. Les données sédimentologiques et archéologiques recueillies ne permettent pas d'évaluer avec précision l'impact des sociétés sur l'évolution des milieux. Toutefois, le signal climatique reste prépondérant.

I-2-1 Une morphogenèse modérée à peu active

Le régime d'érosion est généralement caractérisé par une **ablation réduite**, par de faibles flux de matières et par **une érosion linéaire discrète ou imperceptible**. Les dépôts et leur stratigraphie témoignent d'**une tendance générale au décapage** sur les pentes et à l'accumulation en bas de pente. Mais cela n'écarte pas, parfois, des phénomènes brutaux. La texture grossière et l'épaississement relatif de certaines séquences dans les fonds de vallées (CmS-1, CmS-2,), sur les marges lacustres (FFL3-T55, FFL4-T50,) et aux débouchés des oueds (FF2-C3, FEA2-T60,) indiqueraient des **épisodes caractérisés par une érosion intense des sols** et l'accroissement des apports détritiques.

La présence de dolomite et d'ankérite, essentiellement d'origine détritique, dans les sédiments des niveaux fluvio-marins aux influences fluviatiles notables FMF1 et fluviatiles FF2 du stade sebkha-lagune SH_X, indiquent l'**activation des processus de dissolution chimique et de mobilisation des carbonates dans le bassin** et leur transport dissous à l'enclave côtière.

Sur les marges d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, **la révision du niveau de base local** vers l'abaissement et **l'intervention d'une subsidence lente** (Tagorti, 1990 ; Amari et Bédir, 1989 ; Karray, 1993) ont pu favoriser l'érosion dans les bassins, l'addition de matériel au flux sédimentaire et la **progradation des zones distales des cônes et des plaines d'épandage**.

I-2-2- L'Homme : un facteur encore non déterminant dans le système morphogénique

Les archives sédimentaires de la première moitié de l'Holocène moyen ne contiennent pas d'indices clairs d'une forte occupation humaine de l'hydrosystème ou des témoins d'une anthropisation des milieux naturels. Pourtant, la découverte d'un éclat calcaire et des fragments et d'une poche de charbon de bois dans les sédiments autorise une corrélation avec les installations préhistoriques. Un éclat calcaire beige de facture épipaléolithique à néolithique (*cf.*, Fig. 21) a été prélevé sur le niveau fluvio-lacustre FFL4 (S6-T50). Si la pièce ne permet qu'une chronostratigraphie floue et imprécise, une corrélation de l'épisode lacustre pérenne SK_{VIII} avec une présence humaine sur les bordures d'al Kalbiyya et son bassin proche, vers 5632±218 BP, est plausible. Les systèmes de paléolacs à forte prolifération de mollusques étaient des espaces particulièrement attractifs pour des populations de chasseurs-cueilleurs.

La présence des fragments et d'une petite poche de charbon de bois dans le niveau proximal colluvio-alluvial FCA3 d'al Kalbiyya (S4-T50) et dans la séquence alluviale 1d du sommet de la première génération de dépôt de la terrasse holocène préhistorique QH1-3 (*cf.*, Fig. 73), peut impliquer une origine humaine. Elle autorise une corrélation d'une présence humaine sur les bordures et dans les bassins tributaires d'al Kalbiyya avec l'interstade lacs temporaires SK_{IX}. Le charbon de bois serait issu des incendies locaux et/ou dans le bassin versant et permet de supposer des possibilités d'intervention sur la croissance végétale, en particulier par la pratique des feux.

Ces données restent insuffisantes pour apprécier l'impact des sociétés humaines sur le fonctionnement de l'hydrosystème et le niveau de l'anthropisation des milieux. Une étude pluridisciplinaire (palynologie, géoarchéologie, paléoanthropologie, micro-charbon…) semble nécessaire pour que les effets de l'anthropisation soient plus nettement appréciés. Généralement et durant le début de l'Holocène moyen, l'Homme est un facteur non déterminant de la morphogenèse. Les dynamiques sont fonction des fluctuations climatiques.

I-2-3- Un climat semi-aride aux temps variables a marqué la première moitié de l'Holocène moyen

L'interprétation paléoenvironnementale des archives sédimentaires des deux enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil a permis de reconnaître **quatre phases morphoclimatiques**. **Une première phase d'aridification relative du climat** a fait suite à l'optimum climatique hydrique et thermique de l'Holocène inférieur. Elle est bien documentée dans les dépôts « évaporatique » **FE2** et éolien **FEO2** de l'enclave littorale. Elle a commandé des niveaux lacustres très bas (stade lacs temporaires SK_{XI}), l'installation d'une sebkha littorale (SH_{XI}, Halq al Minjil) et la surélévation du bourrelet hydroéolien des bordures sud et ouest de Halq al Minjil, peu après **6625±30 BP** (SacA 23663; 7572-7459 cal BP/5623-5492 cal BC). Cette phase s'est accompagnée par une dégradation des milieux, l'irrégularité des régimes hydriques et l'activation de la morphogenèse éolienne. Elle peut être corrélée avec les courtes phases d'assèchement signalées par différents chercheurs en Tunisie centrale et présaharienne (Ben Ouezdou, 1987 ; Zouari, 1988 ; Ballais et *al.*, 1988 ; Bourgou, 1993 ; Oueslati, 1993). Elles sont placées entre 6500-6000 BP (Coude-Gaussen *et al.*, 1983 ; Ouda *et al.*, 1998), 7500-7000 BP (Ballais, 1991) et 7000-6000 cal BP (Zerai, 2006).

La végétation de cette phase morphoclimatique a été étudiée à partir de l'analyse du seul échantillon P117 de la séquence S9 du niveau « évaporatique » **FE2** (Lebreton, 2009a, Lebreton et Jaouadi, 2013 ; Fig. 99). Son interprétation en termes de réponse des environnements locaux et régionaux au changement climatique est délicate. Mais elle peut aider à reconstituer le paysage végétal. Le spectre pollinique montre **la prédominance des formations steppiques**. Le ratio AP/NAP traduit **des paysages semi-ouverts**. La steppe halophytique locale à Chenopodiaceae et les steppes à Armoise et graminéennes de plaines de l'arrière-pays présentent des valeurs proches du spectre de surface. Les herbacées ubiquistes Cichorioideae apportent une contribution significative à l'assemblage pollinique steppique. Rattachée aux formations thermo-méditerranéennes, *Pistacia* est mieux développée que l'arbre caducifolié à *Fraxinus et* la chênaie sclérophylle à *Pinus. Olea* chute et *Quercus* type caducifolié se développe. L'enregistrement de la chênaie caducifolié témoigne de l'augmentation de l'humidité sur les reliefs atlasiques et telliens éloignés du littoral. **L'environnement est assez proche du paysage actuel et lié à un climat semi-aride**. Le niveau « évaporatique » FE2 indique une ambiance d'aridité marquée localement et en accord avec la persistance des formations steppiques (Asteraceae, Chenopodiaceae, *Artemisia* et Poaceae). **Les précipitations sur les reliefs éloignés sont perceptibles et peuvent témoigner un gradient pluviométrique est-ouest** (Lebreton et Jaouadi, 2013).

La première phase sèche est suivie par **une période d'amélioration du climat** et par la **réapparition de l'optimum climatique holocène, plus humide et chaud**. Elle a favorisé une importante montée des niveaux lacustres et une forte mobilisation des carbonates dans le bassin. Le système de lacs pérennes SK_X et le stade de sebkha-lagune SH_X s'accordent bien avec des conditions climatiques où les régimes, la répartition et l'intensité des précipitations et les températures clémentes favorisent l'amélioration des débits et la régularité des écoulements, la prolifération des *Cerastoderma glaucum* et le développement des remplissages terrigènes riches en carbonates (dolomite, ankérite ; FMF1 et FF2-C3). **La tendance climatique vers une humidification relative**, s'expliquerait plus par **une meilleure répartition et** par **une augmentation de l'intensité des précipitations** que par l'accroissement de leur total et moyenne annuelle.

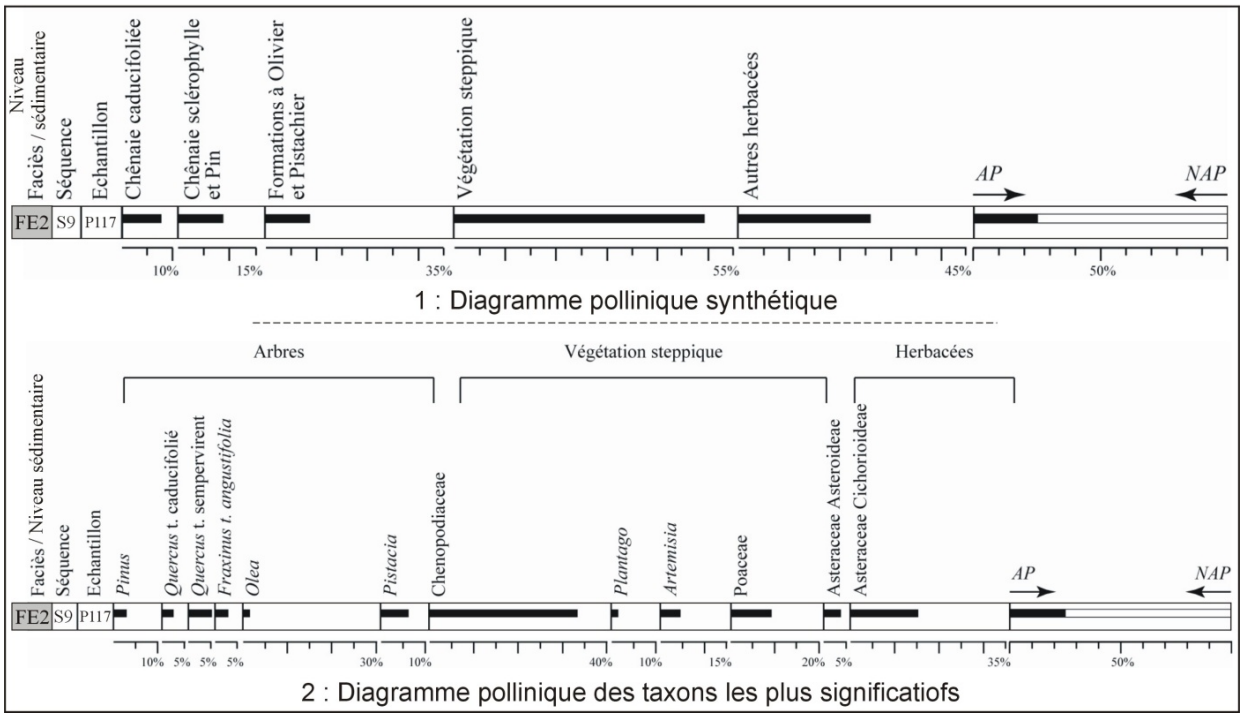


Fig. 99 : Cortège pollinique de la séquence S9 du niveau « évaporatique » FE2 de la carotte C3 (400-432 cm de profondeur)/stade sebkha littorale SH_{XI}

Analyses palynologiques : V. Lebreton, (2009a, 2013)

Ces tendances d'humidification du climat ont été interrompues par **une deuxième phase plus sèche**. Le dépôt « évaporatique » FE3, épais de 74 à 81 cm, témoigne d'une rupture dans les conditions et des environnements antérieurs. Il témoigne de fortes irrégularités de la pluviométrie, de l'augmentation des températures, d'un bilan P-ETP déficitaire et d'une circulation restreinte des eaux dans les cuvettes lacustre et côtière (Perthuisot *et al.*, 1972 ; Gaucher et Burdin ; 1974 ; Bahri, 1982 ; Saaidi, 1988 ; Cojan, 1999 ; Pomel *et al.*, 2004). L'**aridification relative du climat** a provoqué un abaissement des niveaux lacustres, l'installation de l'interstade lacs temporaires SK_{IX} et l'évolution de Halq al Minjil en système de sebkha littorale SH_{IX}. Cette phase d'aridification est corrélable avec celle signalée par Abichou (2002) dans le sud tunisien entre 5880-5800±50 BP (6799-6560 cal BP/4894-4611 cal BC).

Enfin, **une deuxième phase d'humidification relative du climat** se situe entre environ 5632±218 BP (LRAE-T52-1 ; 6931-5935 cal BP/4982-3986 cal BC) et 4965±35 BP (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC). **Un optimum hydrologique** est attesté par une importante remontée des niveaux lacustres. Une ambiance climatique caractérisée par **des précipitations mieux réparties et des températures clémentes**, a favorisé la réinstallation d'un épisode de lacs pérennes (SK_{VIII}) et d'un stade de sebkha-lagune (SH_{VIII}). Les paléolacs débordants et exoréiques témoignent des flux d'eaux saisonnièrement soutenus et des excès en apports hydriques.

Les données révèlent une certaine **instabilité hydro-morphodynamique et une fluctuation du climat semi-aride**. L'optimum climatique de l'Holocène inférieur n'est pas aussi marqué par une nette et continue amélioration du climat durant la première moitié de l'Holocène moyen. Ces données permettent de relativiser les modèles présentés par les chercheurs en Tunisie concernant l'amélioration des environnements, l'atténuation de la morphogenèse et l'apparition d'un optimum climatique, chaud et humide, durant tout

l'Holocène moyen (Coudé-Gaussen, 1984 ; Hamza, 1987 ; Ballais, 1991 ; Bourgou, 1993 ; Karray, 1993 ; Abichou, 2002 ; Zeilhofer, 2004 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008).

II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DURANT LA DEUXIEME MOITIE DE L'HOLOCENE 3500 BP)

A partir de **4965±35 BP**, des dépôts clairement distincts du reste des archives sédimentaires holocènes d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, certifient l'interruption des dynamiques et des environnements ayant marqué les périodes précédentes de l'Holocène. De nouveaux systèmes et des changements rapides du fonctionnement hydrologique vont marquer les deux enclaves continentale et côtière. Une période de remblaiement généralisé sur les versants, les plaines et dans les vallées, a donné lieu à une épaisse formation détritique qui a connu ensuite une importante évolution pédogénitique de type brun-isohumique. Durant le Flandrien moyen, la morphogenèse s'est accélérée. Aux forçages climatiques et anthropiques de l'érosion viennent s'ajouter les variations eustatiques. A la fin de l'Holocène moyen, la pédogenèse l'emporte largement sur la morphogenèse.

II-1- Dynamiques hydro-géomorphologiques et évolution des paysages

II-1-1- L'installation du premier stade lagunaire SH_{VII} et du stade lacs temporaires SK_{VII} d'al Kalbiyya

Le niveau lagunaire **FL1**, épais de **20 à 25 cm**, annonce l'installation du **premier stade lagunaire SH_{VII}** dans l'enclave littorale Halq al Minjil. Il se distingue par la prolifération de *Cerastoderma glaucum*, *Cerithium vulgatum* et *Donax trunculus* et par la présence de l'aragonite. Ce stade, installé vers **4965±35 BP** (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC), **se place dans le Flandrien moyen** (Perthuisot, 1976 ; Paskoff et Sanlaville, 1983). Halq al Minjil est une lagune ouverte sur le large. **Sa mise en place est progressive**, attestée par l'association de *Cerastoderma glaucum* et *Cerithium vulgatum* à la base du remplissage et par la prolifération uniquement de *Cerithium vulgatum* au sommet. Cette espèce est caractéristique d'un milieu ouvert et profond et fréquente surtout les zones infratidales (Carbonel *et al.*, 1981). Elle se caractérise par son aptitude à supporter une salinité d'au moins 60‰ et une température allant jusqu'à 45°C (Abichou, 2002 ; Mahmoudi, 1986).

Halq al Minjil est un milieu euxinique et salin (minéraux ferromagnésiens, argiles interstratifiées…) et connaît au moins saisonnièrement des états fluctuants entre submersion et assèchement (*cf.*, Fig. 43 ; précipitations ferro-manganiques et gypseuses, activité bactérienne…). Au nord, Halq al Minjil est sous une influence continentale prépondérante. Les apports en eau douce favorisent la dessalure de la lagune et la prolifération des *Donax trunculus*. La détermination de la répartition spatiale et des profondeurs absolues des dépôts fossilifères ont permis de définir l'étendue et la bathymétrie de la lagune et de marquer **les positions d'anciens stationnements des eaux marines. Dans des conditions tectoniques considérées stables (**Boujelben, 2009), **la paléobathymétrie a oscillé entre +71 cm (T40) et -364 cm (T46)**. Le plan d'eau aurait dû varier de quelques centimètres sur les rivages à plus de 4 m dans l'ombilic (Fig. 100).

Le stade lagunaire SH_{VII} témoigne d'**une première incursion marine dans l'enclave littorale en rapport avec une élévation du niveau marin relatif**. Il indique également une avancée des rivages vers le continent et de grands changements paysagers (Fig. 101). La lagune est une gouttière allongée, large au nord et étroite au sud. Ici elle est délimitée par le cordon tyrrhénien à l'est et le bourrelet hydroéolien holocène à l'ouest. Sa

superficie est presque trois fois plus étendue que celle de la sebkha-lagune actuelle. Elle communique avec la mer par trois graus, séparés par des îlots grésifiés tyrrhéniens.

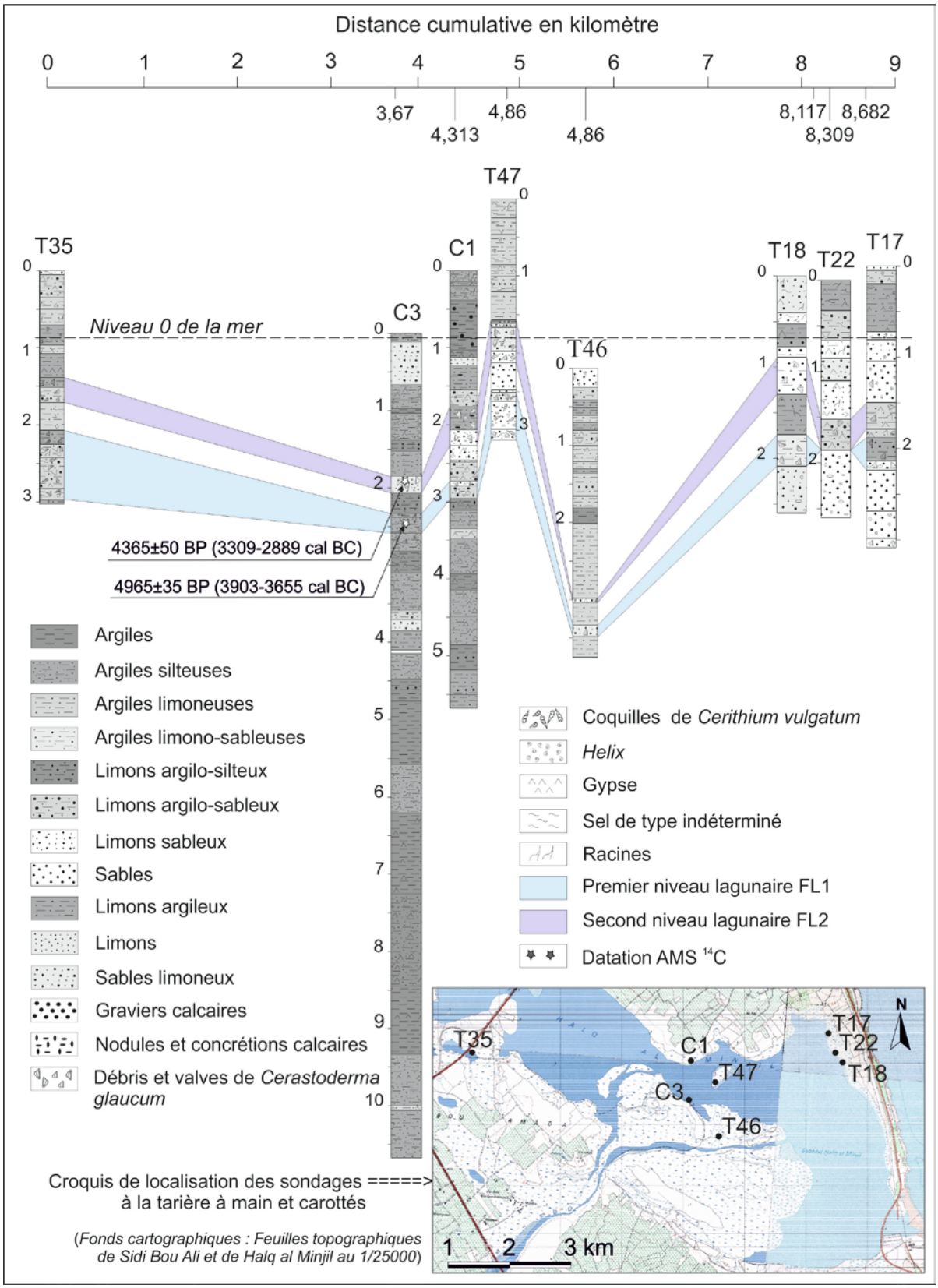


Fig. 100 : Variations bathymétriques des niveaux lagunaires flandriens FL1 et FL2 de Halq al Minjil

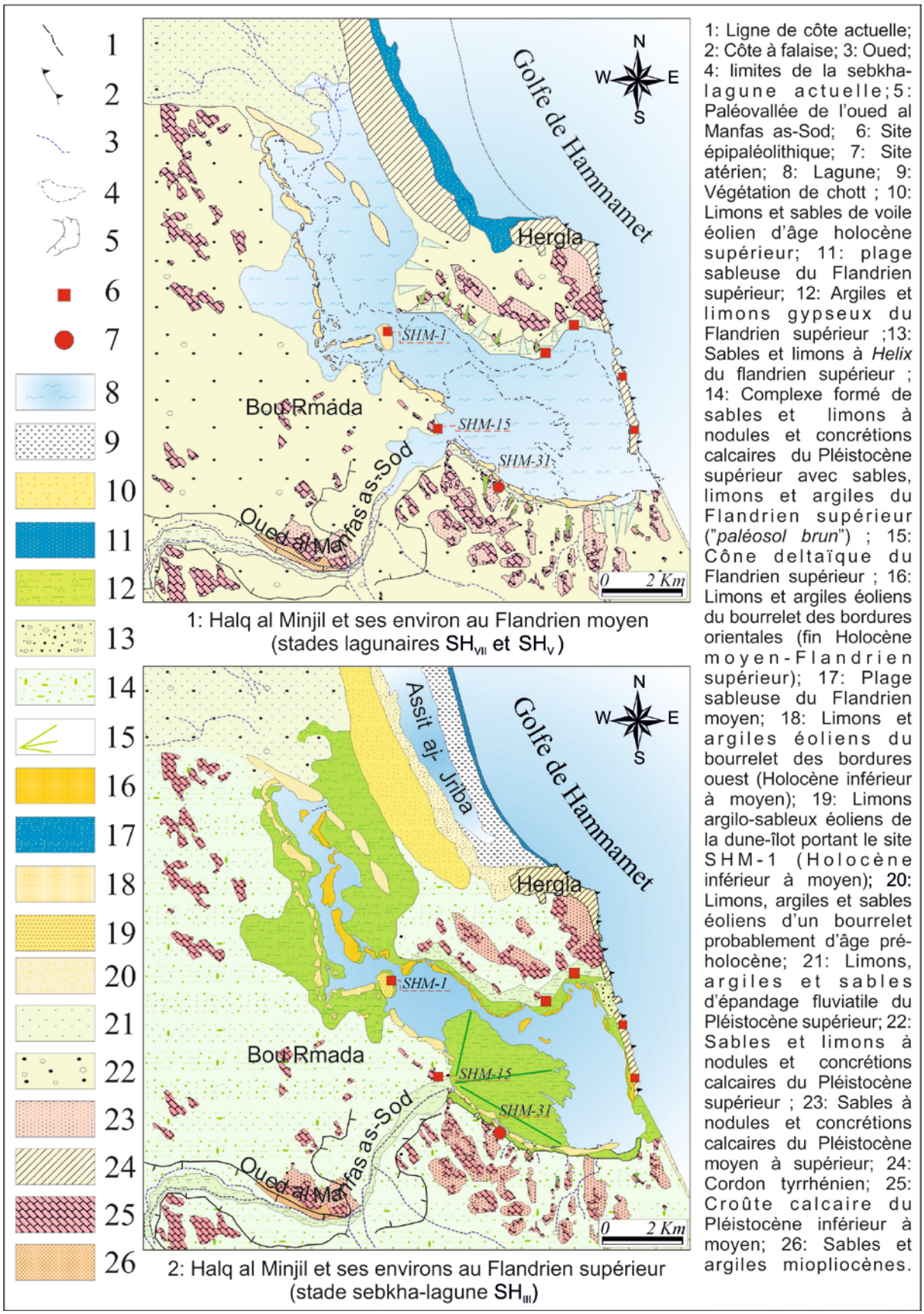


Fig. 101 : Evolution paysagère de Halq al Minjil et ses environs durant le Flandrien moyen et supérieur (Boujelben, 2013, modifié)

Le grau méridional, bas et large, assure l'alimentation la plus continue en eau marine. Le chott occupe une position extérieure par rapport à celle d'aujourd'hui. Ceci est en rapport avec le recul de la ligne de rivage, comme en témoigne la faible représentation des chénopodiacées dans les sédiments lagunaires de la carotte C3 (Lebreton et Jaouadi, 2013). L'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod forme un estuaire (Boujelben, 2009).

Durant la même période, al Kalbiyya a connu la réinstallation d'un **stade de lacs temporaires (SK_{VII})**, soumis aux conséquences des cycles récurrents inondation/exondation. Un niveau sédimentaire proximal colluvio-alluvial (FCA4-T54) et fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA4-T55 et T60), épais de 35 à 58 cm, a exhaussé les bordures nord, nord-est et est des lacs. Il montre les marques d'une évolution post-dépôt en milieu temporairement saturé en eaux puis exondé (oxyde de fer, sels, horizons gris et noirâtres d'hydromorphie de surface). Les apports hydro-sédimentaires lointains sont variables et irréguliers en fonction de variations des régimes hydrologiques des oueds Nebhana, Merguelil et Zéroud (crues-étiages). Ils sont généralement de moins en moins notables. Les particules grossières dans la sédimentation (cailloux et graviers calcaires et gréseux) sont d'une provenance proche prépondérante.

Une morphodynamique active a caractérisé les bassins tributaires d'al Kalbiyya. L'exhaussement des bordures orientales des lacs peut être attribué à **une dynamique importante de progradation et d'aggradation alluviale des zones distales des cônes et des plaines d'épandage** des oueds qui descendent les Dhras Laghmas-ash-Shraif. Une végétation, probablement halophile (racines), a colonisé l'auréole marécageuse ou exondée du lac temporaire.

II-1-2- Le premier stade lagune-sebkha SH_{VI} de Halq al Minjil

Le niveau fluvio-marin aux influences marines notables **FMM1** indique l'évolution de Halq al Minjil en **premier système de lagune-sebkha SH_{VI}**. Epais de **25 à 45,5 cm**, il contient de l'aragonite et est dépourvu d'une malacofaune laguno-marine. De moindre étendue que la lagune précédente, la lagune-sebkha est **occasionnellement ouverte sur le large et est de moins en moins sous l'influence directe de la mer**. Le recul du trait de côte et les seuils décimétriques des graus septentrionaux ont entravé les échanges terre/mer et ont favorisé la faible circulation des eaux marines dans la rade. Les apports terrigènes des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin, sont plus ou moins faibles, fins et irréguliers. Sur les bordures orientales, les apports latéraux sur les versants sont importants. Ils contribuent à l'exhaussement et à la progradation des rivages. Halq al Minjil possède un niveau d'eau très fluctuant. L'intercalation du gypse et de l'halite dans le remplissage ombilical l'atteste.

II-1-3- L'installation du deuxième stade lagunaire SH_V et du premier stade de sebkha SK_{VI}

A la limite supérieure du Flandrien moyen, Halq al Minjil a connu le retour des eaux marines et la réactivation des processus de la production biocénotique. Le niveau lagunaire **FL2**, épais de **22 à 48 cm** et riche en débris et en valves de *Cerastoderma glaucum*, annonce la réinstallation d'un **nouveau stade lagunaire**. Les conjonctures sont celles d'une lagune moins profonde et moins ouverte sur le large que la précédente. La présence seule de *Cerastoderma glaucum* et l'absence de *Cerithium vulgatum* les confirment. Halq al Minjil reçoit des apports fluviaux et marins. Les apports terrigènes lointains sont intermittents et plus ou moins importants lors des crues sporadiques et vigoureuses des oueds al Manfas as-Sod et al Mjinin. Les apports latéraux et le remaniement hydrique sur les formations pléistocènes des bordures orientales de la lagune sont importants (nodules et concrétions calcaires).

Dans l'ombilic, Halq al Minjil est anoxique et calme (couleur gris foncé des sédiments, minéraux phylliteux de néoformation,). Elle est oxygénée et peu agitée en milieu intertidal (limons sableux oxydés). Le niveau d'eau est très fluctuant et la lagune connaît les conséquences, au moins saisonnières, des cycles inondation/exondation. Elle peut être temporairement et en partie exondée à marée basse. En périodes sèches de l'année, les eaux lagunaires peuvent s'abaisser et se rétrécir vers le centre ou s'assécher totalement par une évaporation intense et/ou prolongée. La précipitation du gypse et de l'halite dans l'ombilic peut restituer l'exondation totale de la lagune et la formation en surface d'une croûte pelliculaire de sels. **La fin du fonctionnement lagunaire de Halq el Minjil date de 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC).

Le stade lagunaire indique **une deuxième incursion marine** et un haut niveau marin relatif mais dans un contexte morphodynamique différent à celui du premier stade lagunaire. **La paléobathymétrie a oscillé entre +187 cm (T41) et -329 cm (T46)**. L'examen des profondeurs du même niveau lagunaire montre un important décalage vertical et un paléofond fortement irrégulier. Les niveaux lagunaires FL1 et FL2 sont systématiquement plus profonds au sud qu'au nord avec un écart qui va de 24 à 290 cm. **Des mouvements du sol peuvent les expliquer**. Un système de fracturation actif de bord de blocs de direction N140-160, E-W et N45-60 contrôle une subsidence continue depuis le Crétacé (Fig. 102 ; Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990). De part et d'autre de l'axe d'écoulement aval de l'oued al Manfas as-Sod, deux entités du bourrelet hydroéolien holocène de Halq al Minjil montre un grand décalage latéral.

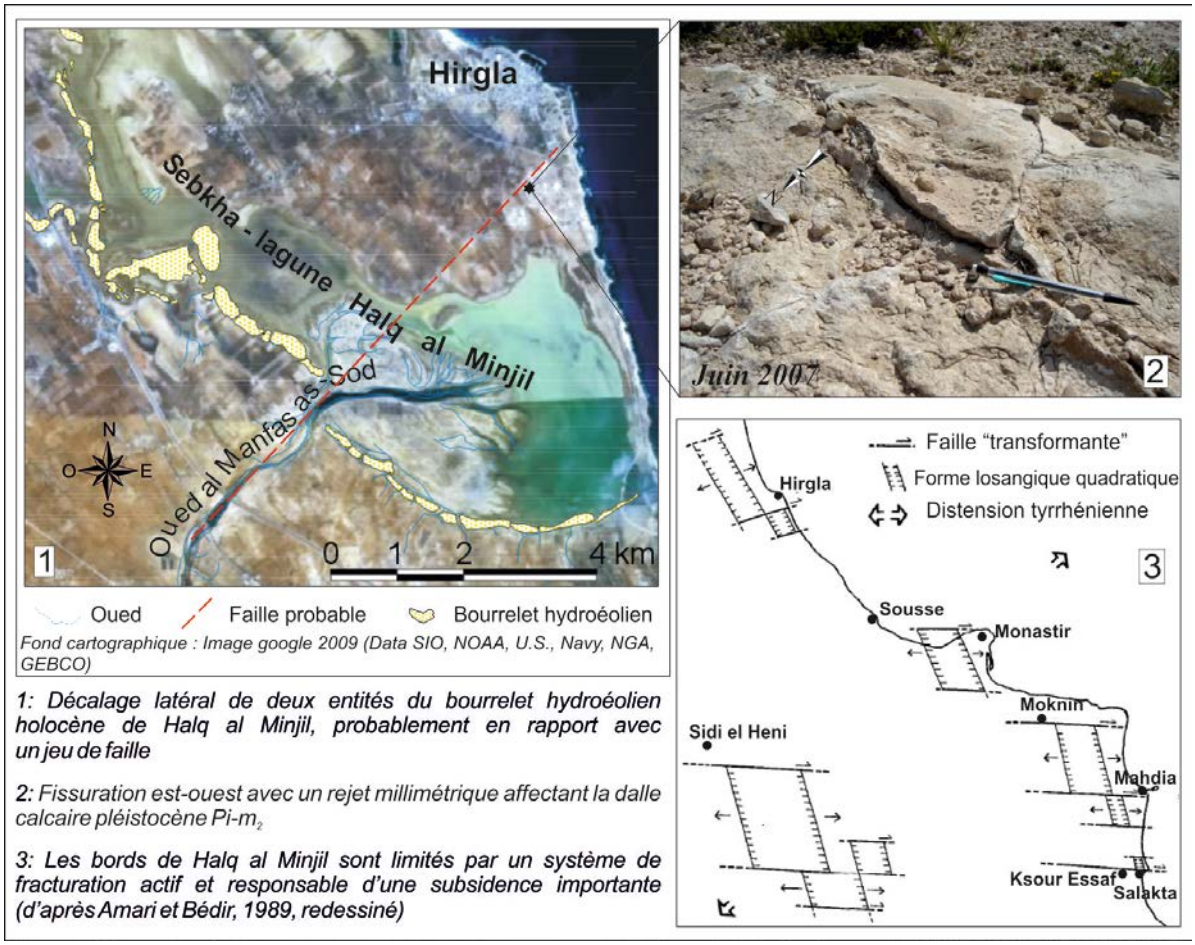


Fig. 102: Des mouvements de sol et un système de fracturation actif expliquant la variation latérale de la profondeur d'un niveau lagunaire

Ce décalage est probablement lié à un jeu de faille dont le tracé et la direction SWS-ENE sont les mêmes que ceux **des fissures affectant les croûtes calcaires pléistocènes (QP1-2)**, aux alentours d'el Fej, à environ 2,5 km au sud du village de Hirgla. Une composante verticale mineure de la faille probable peut expliquer le décalage vertical de la profondeur d'un même niveau fossilifère. A l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod, on constate le décalage vertical le plus fort et la position la plus profonde **des niveaux lagunaires entre 364 et 329 cm au-dessous du niveau marin actuel** (T46). Ici, **la compaction des niveaux silteux et argileux** sous le poids de la tranche d'eau et des sédiments terrigènes et fluvio-marins peut l'expliquer (Boujelben, 2009). Le paysage lagunaire rappelle celui du premier stade lagunaire.

A l'amont, al Kalbiyya a connu un système de fonctionnement hydrologique de type **sebkha (stade SK_{VI})**. Il est attesté par la mise en place d'un remplissage fluviatile aux lits grossiers-fins (**FGF1**) et de colmatage vaseux (**FCV3**), laminaire, oxydé et imprégné de sels. L'épaisseur va de **20 à 78 cm**. Al Kalbiyya est occasionnellement inondée avec une période d'assèchement plus marquée. Elle reçoit des apports hydriques et détritiques lointains et proches, généralement réduits et intermittents. Souvent, l'apport d'eau ne dépasse pas la capacité de stockage de la cuvette endoréique. Le bilan hydrique est déficitaire.

Al Kalbiyya a connu au moins **deux régimes hydrosédimentaires** en relation étroite avec la granulométrie des sédiments déposés et le régime des pluies et d'écoulements. (1) **Lors des fortes pluies exceptionnelles**, **rapides et intenses**, des crues brèves entraînent rapidement le dépôt d'éléments grossiers qui seront ensuite ensevelis par des lamines d'argiles et d'argiles limoneuses de décrue. Les dynamiques fluviatiles sont généralement actives ; (2) **Dans des conditions de pluies normales**, al Kalbiyya connaît des inondations d'intensité faible à modérée par des ruissellements diffus et étalés sur une grande largeur de la dépression. Il en résulte un remplissage généralisé et laminaire de vase d'origine essentiellement lointaine, dans un milieu relativement calme. Les dynamiques sont devenues lentes.

Avant l'exondation de la sebkha, une hydromorphie temporaire caractérise l'évolution post-dépôt des sédiments saturés en eau (horizons fins noirâtres et gris). Pendant les périodes ou saisons sèches de l'année, la perte d'eau due à l'évaporation est rapide. L'exondation de la sebkha ainsi que la battance d'une nappe proche sont à l'origine de l'oxydation du matériel et de la précipitation du gypse lenticulaire sur les bordures par un pompage évaporatique des eaux interstitielles. L'absence ou le faible développement de sels dans le centre de la sebkha (T49, T53) peuvent indiquer des phénomènes pédogéniques de courte durée ou des périodes sèches encore de faible intensité. La surface asséchée et craquelée favorise la floculation des argiles silteuses, leur enlèvement et leur transport par le vent.

II-1-4- Le stade lagune-sebkha SH_{IV}

Un deuxième niveau fluvio-marin aux influences marines notables (**FMM2**), non fossilifère, organo-détritique, épais de **52 à 78 cm**, contenant des foraminifères, de l'aragonite et riches en sels, vient ensevelir le niveau lagunaire précédent (FL2). Il indique une **tendance du niveau marin relatif à l'abaissement** et la réinstallation d'**un nouveau stade de lagune-sebkha**, **à la transition Flandrien moyen-Flandrien supérieur**, défavorable à toute production biocénotique.

Sous des influences marines notables, Halq al Minjil est de moindre étendue que la lagune précédente SH_V. Elle est temporairement isolée de la mer. Les seuils gréseux des graus septentrionaux, cotés à plus de 1,5 m, gênent l'échange terre/mer. Seul le goulet sud

maintient en permanence la communication terre/mer. La lagune-sebkha connaît des cycles inondation-exondation et une certaine rythmicité sédimentation/pédogenèse. En périodes de crues et de submersions marines, la phase sédimentaire donne des lits d'argiles et de limons (1-2 cm) terrigènes et marins. Ils sont parfois entrecoupés par des passées millimétriques d'éléments grossiers d'apports torrentueux aux débouchés des oueds et latéraux sur les marges en zones intertidales.

L'ombilic peu profond, calme et anoxique est propice à une activité bactérienne, à la décomposition de la matière organique et à la formation de sapropèle. L'abaissement du niveau d'eau, par réchauffement rapide, emmène la précipitation subaquatique du gypse pseudohexagonaux (35% du volume initial ; Boulvain, 2006) et de l'aragonite dont la salinité varie entre 36 et 50‰ (Purser, 1980, 1983, *in* Abichou, 2002). L'exondation de la lagune laisse installer une sebkha et déclencher les processus diagénétiques de précipitation d'halite et du gypse lenticulaire. L'assèchement total donne enfin en surface des fentes de dessiccation et de bréchification (Lame mince L2-C3) et une croûte fine de sels (halite majoritaire dans l'ombilic, S19-21-C3).

II-1-5- La mise en place de la formation des sables bruns : une phase de remblaiement généralisé dans le système fluvial

Une phase d'érosion légère a succédé à la mise en place du membre basal de l'accumulation de la terrasse préhistorique QH1-3. Elle s'est traduite par un **contact ravinant** séparant les séquences supérieures de la première moitié de l'Holocène moyen de la base des sables et du paléosol bruns de la **limite inférieure du Flandrien supérieur**. Elle confirme une interruption de la sédimentation. L'érosion a dû être engendrée par des écoulements peu actifs et insuffisamment chargés.

Par la suite, le système fluvial a connu une **phase de remblaiement généralisé** déroulée **entre peu après 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC) et **3874±201 BP** (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC). Elle est responsable de **la mise en place de la formation des sables bruns**, la plus importante du système, tant par son épaisseur que par son extension. Des sables et des sables limoneux, colluvio-alluviaux et alluviaux, sont mis en place sur les pentes, dans les fonds de vallées, les plaines et le plateau. Ils présentent environ 44% des formations superficielles. L'accumulation est surtout développée dans les fonds de vallées (30-350 cm) et **correspond au deuxième ensemble des dépôts de la terrasse holocène antéhistorique QH1-3**. A la sortie des oueds, elle prend la morphologie de terrasse-cône et de cône d'épandage (*cf*. Fig. 84). Dans le cours aval de l'oued al Mzid et Hlig ar-Rizg, elle vient au-dessus des dépôts à nodules et à concrétions calcaires pléistocènes et contribue à l'aggradation alluviale d'anciens cônes d'âge préholocène. Entre oued Hlig ar-Rizg à l'ouest et oued as-Souriyya à l'est, l'accumulation est discontinue et montre une épaisseur variable de quelques décimètres à 2 m environ. Elle présente une pente régulière et faible (moins de 2%) et est modelée en « glacis de transit».

Cette phase d'accumulation grossière, épaisse et étendue, fait suite à la phase de faible activité fluviatile qui a marqué l'Holocène inférieur et la première moitié de l'Holocène moyen. Elle indique le passage à une période de forte dynamique fluviatile sans exclure des épisodes éventuellement saisonniers pendant lesquels les vents étaient actifs. L'importance des quartz éolisés dans le sédiment, l'explique. La phase sédimentaire a été suivie par une période de stabilité, d'amélioration des environnements et de **développement pédologique des sables bruns**. Elle se situe **entre 3874±201 BP**, date de fin de la mise en place de la formation **et 3410±40 BP** (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC),

âge du niveau « évaporatique » **FE4** qui fossilise les sables bruns sur les bordures est de Halq al Minjil.

II-1-6- L'installation du stade sebkha-lagune SH_{III} et du premier stade lacs temporaires-sebkhas SK_V

Le remplissage fluvio-marin aux influences fluviatiles notables **FMF3**, épais de **17 à 83 cm**, annonce l'**évolution de Halq al Minjil en système de sebkha-lagune (SH_{III})**, désormais sous une influence continentale prépondérante. Il est synchronie à la période de mise en place des sables bruns. L'enclave littorale est le siège d'une sédimentation fine, d'argiles et de limons terrigènes et marins qui ont dû se mettre en place lors des crues allogènes des oueds al Manfas-as Sod et al Mjinin et des grandes marées de vives-eaux. Sur les versants orientaux, les apports latéraux sont importants et contribuent à l'exhaussement des marges de la sebkha-lagune (graviers et cailloux calcaires, passées de sables grossiers).

Le niveau d'eau et les conditions hydro-thermiques ont beaucoup varié sous l'effet de successions des cycles inondation/exondation. Halq al Minjil passe d'un milieu anoxique et réducteur (couleurs grise et olive, odeur désagréable de certaines séquences) à un milieu non saturé en eau et à forte battance d'une nappe perchée temporaire permettant la redistribution et la réoxydation du fer dans les sédiments. Enfin, l'assèchement total de la surface favorise la précipitation diagénétique du gypse, puis d'halite (Pomel *et al.*, 2004).

Sur les bordures orientales de l'enclave littorale, le niveau fluvio-marin aux influences fluviatiles notables **FMF3** passe latéralement à la formation des sables bruns (T12, T13, T15, T16, T17). Cette formation fossilise les niveaux lagunaires et fluvio-marins aux influences marines notables FL2 et FMM2. Elle a colmaté les graus septentrionaux jadis assurant la communication lagunes flandriennes/mer (*cf.*, Fig. 85.3). Elle a comblé environ 1/3 des marges de la lagune-sebkha SH_{IV}. Elle a contribué également à la progradation des rivages, surtout est, de la sebkha-lagune SH_{III} qui lui est contemporaine. De fait et **depuis la limite inférieure du Flandrien supérieur, il en résulte de grands changements paysagers**. Halq al Minjil a eu sa morphologie pré-définitive. L'enclave littorale juxtapose des petits fonds fermés et isolés, envahis auparavant par les eaux lagunaires et séparés dès lors par de petites éminences hydroéoliennes, à peine marquées dans le paysage actuel. Seul le goulet méridional assure désormais l'entrée occasionnelle des eaux marines dans le bassin.

Durant la même période, al Kalbiyya a connu l'installation d'**un premier système de lacs temporaires-sebkhas (SK_V)**. Elle est soumise à des cycles inondation/exondation, d'une durée variable et **passe régulièrement d'un lac temporaire, semi-endoréique à une sebkha salée et asséchée**. Un niveau fluvio-turbiditique aux lits grossiers-fins (**FGF3**), épais de **10 à 60 cm**, se répand dans la dépression. En périodes pluvieuses de l'année ou lors des averses temporairement intenses, les apports hydriques dans le bassin sont relativement importants permettant l'extension en un lac temporaire. Les débits soutenus et les crues concentrées surtout des oueds Nebhana, Merguelil et Zéroud, assurent le charriage sur des grandes distances de sédiments grossiers jusqu'au centre d'al Kalbiyya.

Les dynamiques fluviatiles sont généralement actives. Le plan d'eau, fluctuant, peut atteindre quelques mètres de profondeur et quelques mois de stationnement. Il dépend de la répartition et de l'intensité de la pluviométrie, de la régularité des débits et de la fréquence des crues. La saturation en eau assure au lac une hydromorphie de surface et conduit à la formation des horizons noirâtres dans des conditions de privation d'oxygène, de réduction de fer et d'anoxie. Pendant les périodes sèches de l'année, incontestablement la saison estivale, le niveau et la superficie du plan d'eau diminuent. Ils laissent instaurer progressivement un système de sebkha endoréique. De l'émersion partielle à l'assèchement

totale de la surface, al Kalbiyya passe d'un milieu oxydant à un milieu évaporatique. Le pompage évaporatique de l'eau libre et interstitielle ainsi que la battance d'une nappe proche permettent la précipitation des taches et des filaments de sels de type indéterminé et des rosettes et des cristaux lenticulaires de gypse.

II-2- Morphogenèse et paléoenvironnements pendant la deuxième moitié de l'Holocène moyen : changements des facteurs de forçage ?

L'interprétation morphogénétique et paléoenvironnementale des archives sédimentaires permet de mettre en évidence **deux phases morphoclimatiques**. La **première phase (4965±35-3874±201 BP**) correspond à une succession rapide de différents stades de fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Elle est caractérisée par **une morphogenèse active et accélérée** et une **tendance climatique générale à l'accentuation de l'aridité**. Durant la même phase, Halq al Minjil a connu deux intrusions marines, synchrones d'un haut niveau marin relatif à **4965±35 ans BP** et **4365±50 BP**. **La deuxième phase de courte durée (3874±201-peu avant 3410±40 BP)** correspond à une **période de stabilité morphogénique** et au développement pédologique de la formation des sables bruns (le paléosol brun) sous **une pulsation climatique humide**. L'analyse palynologique a révélé à partir de **4365±50 BP** les premiers indices d'une emprise humaine sur les milieux.

II-2-1- Une morphogenèse active et accélérée entre 4965±35 et 3874±201BP

Entre 4965±35 BP (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC) **et 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC), au moins quatre niveaux sédimentaires de nature et d'origine variées, épais de **20 à 78 cm**, se superposent et colmatent les fonds d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Ils expliquent le **changement rapide du fonctionnement hydrologique** surtout de Halq al Minjil et témoignent d'une **accélération relative du remplissage** par apport à la première moitié de l'Holocène moyen. Les datations permettent d'évaluer **un exhaussement du fond de Halq al Minjil d'environ 197 cm pendant 600 ans** et un taux de **sédimentation d'environ 3,2mm/an** contre 1mm/an durant la première moitié de l'Holocène moyen. Cette sédimentation à l'aval concorde avec une phase d'érosion à l'amont dans le système fluvial. Cette phase est en partie responsable de déblaiement d'une partie des séquences supérieures du premier ensemble des dépôts de la haute terrasse antéhistorique QH1-3. Une phase d'incision mineure explique le contact ravinant séparant cet ensemble de la formation des sables bruns.

Peu après 4365±50 BP (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC) et **jusqu'à 3874±201 BP**; (LRAE-1 ; 4839-3823 cal BP/2890-1874 cal BC), une **phase de remblaiement généralisé** a mis en place des dépôts grossiers de sables et de sables limoneux, épais de 30 cm à plus de 3 m. Elle témoigne d'une **accrétion accélérée des lits fluviaux et des plaines**, jadis lente avant **5000 BP**. Elle permet d'évaluer un **taux de sédimentation maximum à plus de 6 mm/an** (Les coupes CaS, CmM, CmS-1, CmS-2).

La part importante des grains éolisés dans les sédiments indique des épisodes d'activités éoliennes qui ont entrecoupé la dynamique hydrique. La morphogenèse hydrique active ne signifie pas forcément une augmentation de l'humidité et des périodes d'abondance hydrologique et d'augmentation des débits des oueds. L'épaisse formation des sables bruns peut indiquer **une phase de paroxysme dans le fonctionnement du système morphogénique** et faire **la part des événements pluvio-hydrologiques exceptionnels, intenses et irréguliers dans le système érosif**. Une dynamique hydrique torrentielle est à l'origine de l'accentuation de l'érosion des sols et des pentes à l'amont, de l'accroissement de la charge solide du ruissellement concentré et diffus et de l'aggradation et de la

progradation alluviales à l'aval. **Dans les fonds d'al Kalbiyya et Halq al Minjil**, on estime respectivement un **exhaussement à environ 60 et 83 cm durant presque 500 ans**.

II-2-2- Variations eustatiques flandriennes : deux élévations du niveau marin relatif à 4965±35 BP et 4365±50 BP

Les deux stades lagunaires SH_{VII} et SH_V de Halq al Minjil indiquent **deux incursions marines dans l'enclave côtière et une mobilité verticale du niveau marin relatif**. Sans prendre en compte les conséquences d'éventuels mouvements de sols (subsidence, fracturation, compaction,…), les profondeurs absolues maximales des deux niveaux lagunaires permettent de définir les différentes positions des masses d'eau marine dans le bassin de Halq el Minjil et d'apprécier les valeurs d'élévation du niveau marin. Les données bathymétriques permettent d'évaluer respectivement **à 4965±35 BP et 4365±50 BP deux élévations marines minimums de 71 cm et de 187 cm au-dessus du zéro actuel**.

Les valeurs présentées procurent des appréciations locales relatives aux niveaux approximatifs des plans d'eau dans les paléolagunes. Elles définissent des valeurs minimales et relatives d'élévation du niveau marin local dans la région au Flandrien moyen. L'étude détaillée des variations eustatiques et la détermination du maximum de la remontée du niveau marin restent délicates, en raison de la morphodynamique et notamment du forçage tectonique et d'éventuels mouvements verticaux du sol. Ceux-ci peuvent agir à des échelles spatiales aussi réduites qu'étendues (Amari et Bédir, 1989 ; Tagorti, 1990 ; Karray, 2006).

Les deux stades lagunaires restituent **deux variations positives et rapides (en 600 ans)** du niveau marin relatif. Ils se rapportent à deux pulsations transgressives synchronisées à **une élévation régionale du niveau marin relatif à plus de 2 m** (Fig. 103)**.** Cette élévation est reconnue en Tunisie par des géomorphologues, géologues et sédimentologues (Perthuisot, 1976 ; Jauzein et Perthuisot, 1972 ; Oueslati *et al.*, 1982 ; Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Carbonel *et al.*, 1981 ; Oueslati, 1993 ; Abichou, 2002…). Il est également plausible de les corréler avec le remplissage sédimentaire de Bhiret el Biban (Paskoff et Oueslati, 1988) et le dépôt de bordure et le milieu lagunaire de la sebkha el Melah (4000-6000 BP ; Perthuisot, 1975 ; Abichou, 2002). Néanmoins, les paléolagunes de Halq al Minjil apparaissent jeunes par rapport aux systèmes et faciès littoraux similaires retrouvés ailleurs dans le sud tunisien tels que le dépôt de plage de l'oued Ferd vers 5500 BP (Paskoff et Sanlaville, 1983) et le système lagunaire de Boujmel (7500 BP ; Lakhdar *et al.*, 2006). Perthuisot (1976) a étalé la deuxième pulsation transgressive flandrienne entre 5920±120 BP (4651-3990 cal BC) dans le site d'el Gargabia et 5160 ±250 BP (4102-2848 cal BC) dans le chenal de Bahar Alouan.

II-2-3- Tendances climatiques générales au renforcement de l'aridité

Le fonctionnement lagunaire de Halq al Minjil accuse des implications climatiques et eustatiques. Si on admet l'équivalence Pluvial/Glaciaire et l'origine primordiale glacio-eustatique de la remontée du niveau marin relatif, cette remontée synchronise une phase d'assèchement climatique. Cette phase se raccorde bien au début de l'aridification du climat holocène, placée dans la chronologie régionale vers 5000-4000 BP (Ballais, 1991 ; Brun, 1991 ; Abichou, 2002).

L'analyse palynologique de la partie supérieure de la carotte C3 (S16 à S23) a présenté en continu l'histoire de la végétation de la deuxième moitié de l'Holocène moyen. Elle a permis la confortation de certaines hypothèses en termes d'évolution climatiques (Boujelben *et al.*, 2008 ; Lebreton et Jaouadi, 2013). Elle a révélé, **entre 4965±35 BP et 3410±40 BP, de nombreuses variations dans la végétation**. **Trois zones polliniques** ont

été proposées (Fig., 104 et 105 ; Lebreton et Jaouadi, 2013). **La première zone pollinique** (1) correspond au **premier stade lagunaire SH_{VII}**. Elle montre les valeurs les plus marquantes des NAP. Les taux des Poaceae et des *Plantago* sont les plus forts de l'enregistrement pollinique. En revanche les valeurs d'*Artemisia* sont les plus faibles. *Quercus* sempervirens régresse. **Vers 4965±35 ans BP** (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC), **le paysage est très ouvert**, **le climat est chaud et les précipitations sont limitées**.

La deuxième zone pollinique (2) coïncide avec **le stade lagune-sebkha SH_{VI}** et une **grande partie du temps du deuxième stade lagunaire SH_V**. La steppe à Armoise l'emporte brusquement sur la steppe graminéenne. Le *Pistacia* a connu un grand développement. **Jusqu'à 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC), les formations végétales témoignent de l'**augmentation de l'aridité**.

La troisième zone pollinique (3) synchronise **la fin du stade lagunaire SH_V** et les **trois stades lagune-sebkha SH_{IV}, sebkha-lagune SH_{III} et sebkha-littorale SH_{II}**. Elle est marquée par le repliement d'*Artemisia*, la forte progression d'*Olea* et par une frappante régression du *Pistacia*. **Quatre sous-zones ont été distinguées** dont la quatrième remonte à l'Holocène supérieur (stade sebkha-littorale SH_{II}). La sous-zone 3a est marquée par l'essor d'*Olea*. Dans la sous-zone 3b, *Olea* régresse et *Pinus* et les Poaceae progressent fortement. La sous-zone 3c montre un déclin puis un développement de *Pinus*, un rétablissement d'*Olea* et une progression de *Quercus* sempervirens, de *Fraxinus* et des Cichorioideae. **Après 4365±50 BP** (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC) et **jusqu'à avant 3410±40 BP** (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC), la zone pollinique 3 indique généralement **une reprise de l'humidité**, responsable de l'essor de *Olea* aux dépens de *Pistacia* dans la végétation régionale et éventuellement dans les paysages des Basses et Hautes Steppes. Ces changements d'environnements ont conditionné la mise en place puis, à la fin de l'Holocène moyen, l'évolution pédologique des sables bruns.

Durant la **deuxième moitié de l'Holocène moyen**, **l'aridité doit être marquée à basse altitude**, sur le littoral et dans les plaines de l'arrière-pays, avec des paysages dominés par les steppes à Armoise et les steppes graminéennes. Après 4965±35 ans BP, des conditions plus sèches ont perturbé les régimes hydrologiques et pluviométriques. Leurs influences se sont faites sentir dans l'ensemble de l'hydrosystème. L'augmentation du ratio Mg/Ca et la faible accumulation des carbonates dans Halq al Minjil témoignent d'une forte salinité et de l'atténuation voire le dysfonctionnement des processus de dissolution et de production des carbonates (*cf.*, Fig. 94). Dans al Kalbiyya sont installés des sebkhas et des lacs temporaires. Les rapports amont/aval sont faibles et l'évacuation des trop-pleins par l'intermédiaire de l'oued al Manfas as-Sod vers Halq al Minjil et la mer sont de moins en moins fréquents.

Une augmentation de l'humidité caractérise les reliefs de la Tunisie tellienne et atlasique. Des apports lointains ont été également enregistrés dans le diagramme pollinique, avec la présence permanente des chênaies caducifoliées précisément de *Quercus* type caducifolié accompagné de *Fraxinus*. **Vers la fin de l'Holocène moyen, cette augmentation d'humidité gagne l'hydrosystème**. Elle est principalement enregistrée dans le paléosol brun et secondairement dans les sédiments fluvio-marins aux influences fluviatiles notables du niveau sédimentaire FMF3. **Jusqu'avant la fin du IVème millénaire BC**, le spectre palynologique ne montre **aucun indice d'activités agricoles** (Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013).

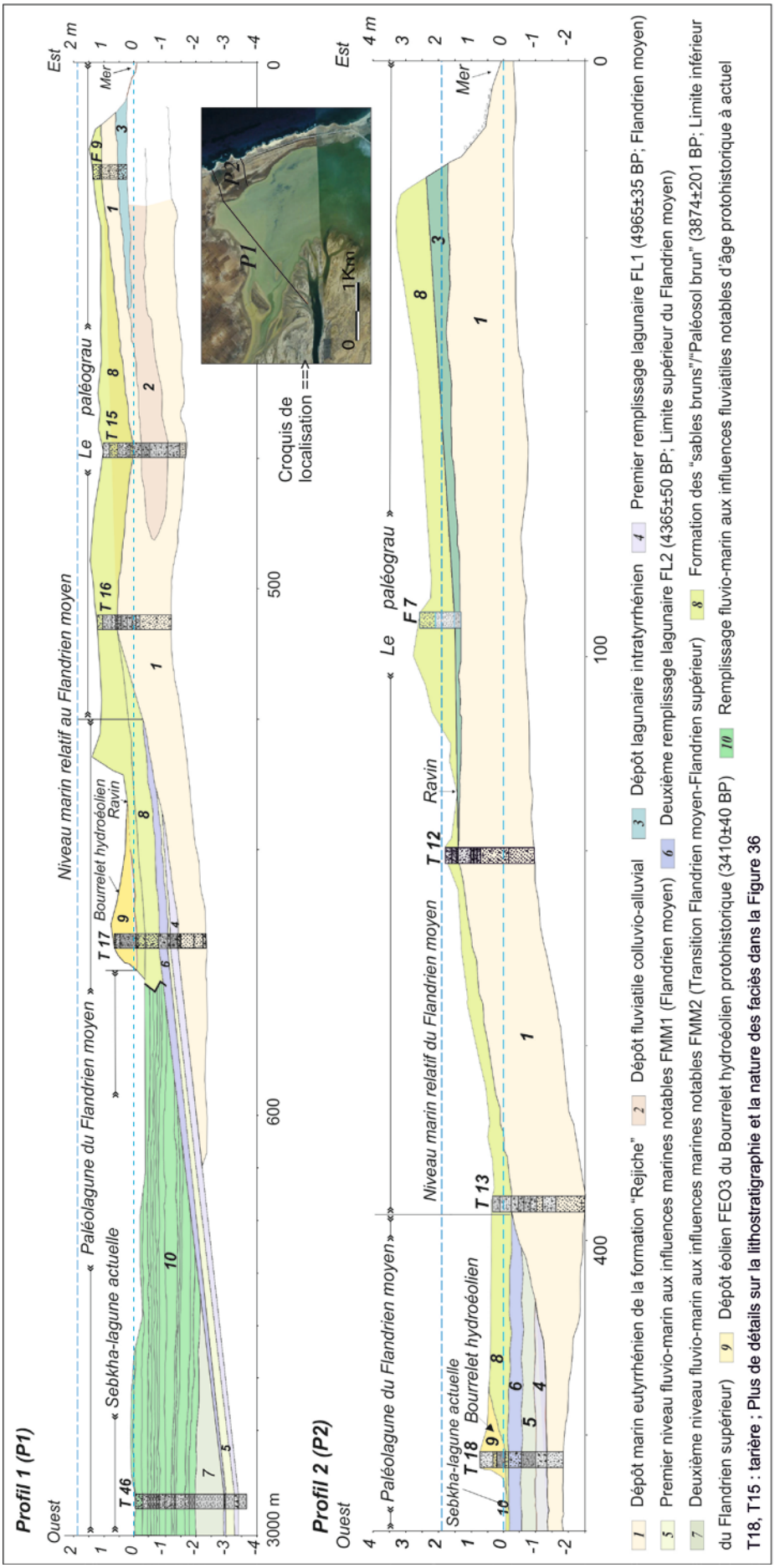


Fig. 103 : Paléobathymétrie et niveau marin relatif dans les lagunes flandriennes et évolution des paléograus septentrionaux de Halq el Minjil depuis 4365±50 BP

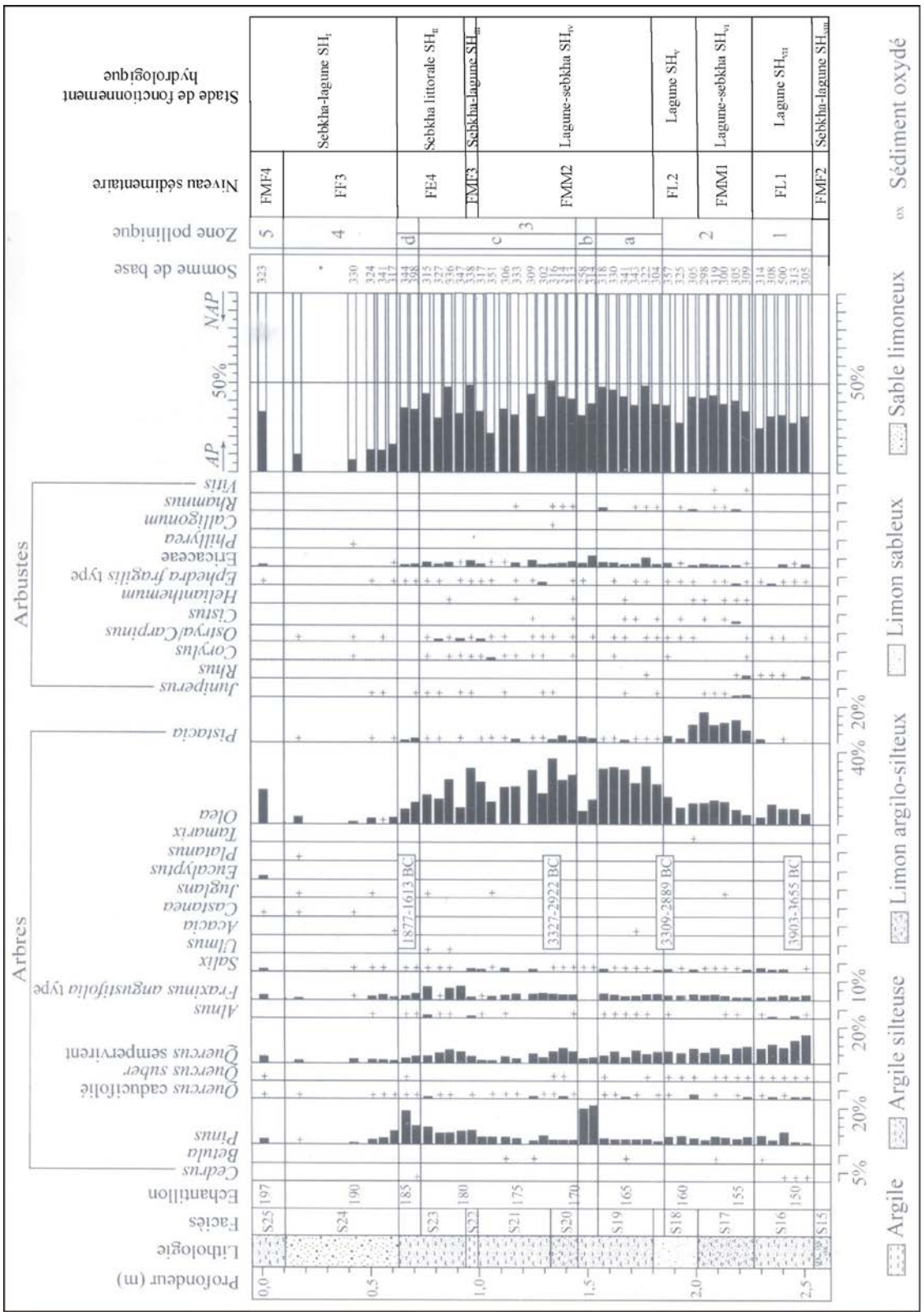


Fig. 104 : Diagramme pollinique détaillé (arbres et arbustes) du sommet de la carotte C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton et Jaouadi, 2013, Faciès sédimentaires et stades de fonctionnement hydrologique ajoutés)

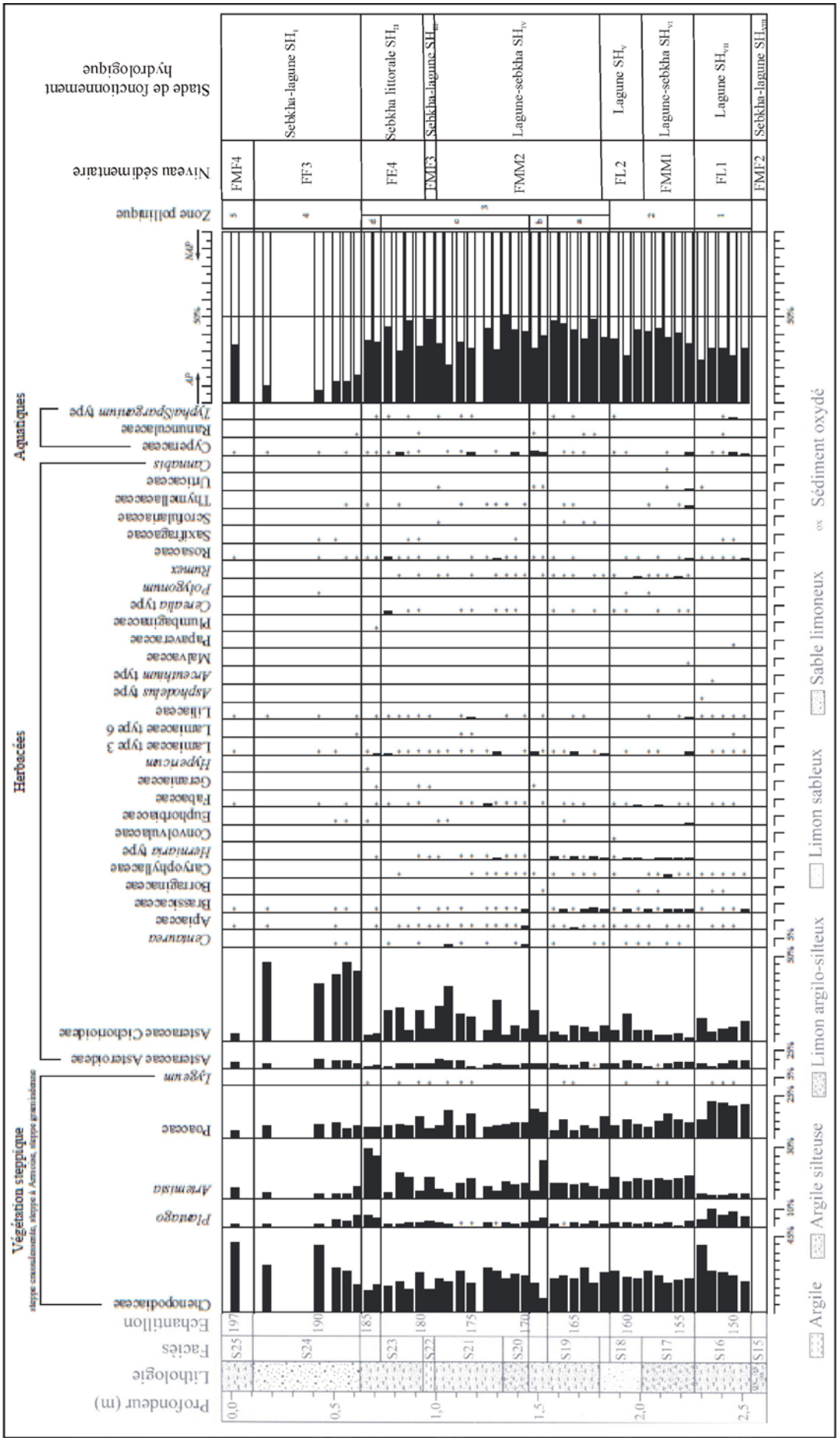


Fig. 105 : Diagramme pollinique détaillé (végétation steppique, herbacées et aquatiques) du sommet de la carotte C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton et Jaouadi, 2013, Faciès sédimentaires et stades de fonctionnement hydrologique ajoutés)

II-2-4- Depuis environ 4365±50 BP, le forçage anthropique s'ajoute aux effets des variations climatiques

A partir du IIIème millénaire BC, **le paysage végétal témoigne de modifications environnementales** qui ne sont peut-être pas le fait des seules fluctuations climatiques. C'est à cette époque que le peuplement de la Tunisie s'enrichit par la venue des berbères, issus paraît-il de la migration vers le nord de populations libyques. L'impact des activités humaines est enregistré dans le matériel pollinique des séquences S18 à S22 de la carotte C3. Depuis l'installation du stade lagune-sebkha SH_{VI}, **l'enregistrement continu des *Ericaceae* conforte l'hypothèse d'un épisode d'incendie**. Il s'agit d'arbustes pionniers après un épisode de feu (Lebreton et Jaouadi, 2013).

Le **développement de l'olivier**, **entre 3300 et 1780 BC**, peut être véritablement rendu à **une mise en culture précoce de cet arbre** à partir de souches sauvages déjà présentes dans l'environnement naturel (Lebreton et Jaouadi, 2013). La détermination au microscope à transmission du taxon pollinique *Olea* (*Olea europaea* L. subsp. *europaea*) ne donne pas de critères morphologiques clairs pour bien distinguer le pollen d'olivier sauvage, var. *sylvestris*, du pollen d'olivier cultivé, var. *europaea* (Lumaret et Ouazzani, 2001 et Green, 2002 ; *in* Lebreton et Jaouadi, 2013). Ainsi, la chronologie de la diffusion des phénomènes de la domestication de l'olivier dans le bassin sud-méditerranéen et au nord du continent africain est encore mal connue. Mais et **depuis le deuxième stade lagunaire SH_V** (4365±50 BP), le **développement brutal du taxon *Olea*** dans la troisième zone pollinique (3) peut indiquer **la culture importée ou la domestication locale de cet arbre par les sociétés pré et protohistoriques**, à partir d'oléastres indigènes (Lebreton et Jaouadi, 2013).

II-2-5- Pédogenèse et pulsation climatique humide à la fin de l'Holocène moyen

Après 3874±201 BP (date de la fin de la mise en place de la formation des « *sables bruns* ») et **avant 3410±40 BP** (âge du dépôt « évaporatique » FE4 du stade sebkha-littorale SH_{II}), l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil a connu **les environnements les plus équilibrés depuis le début de l'Holocène**. La formation des sables bruns a connu une **forte pédogénisation** et se transforme en un **paléosol brun** (*cf.*, Fig. 83) à pseudomycélium et relativement **riche en matière organique** (**0,7%** ; Boujelben, 2002). Il correspond aujourd'hui au support édaphique le plus développé, le plus profond et le plus étendu du Sahel septentrional tunisien (Gaddas, 1962 ; Donnay, 1963 ; Belkhouja *et al.*, 1973 ; Boujarra et Mrabet, 1999 ; Boujelben, 2002).

La variation latérale des épaisseurs et l'éclaircissement local des couleurs sont liés à l'irrégularité longitudinale des paléofonds de vallées lors de la mise en place de dépôt, à la variation du niveau de la nappe touchant inégalement le dépôt et à une moindre stagnation des eaux surtout dans les cours amont des oueds (Faust *et al.*, 2004 ; Zerai, 2006). Les pseudomycéliums filamenteux et ramifiés expliquent une activité biologique des sols à horizons calciques et/ou une précipitation physicochimique des carbonates de calcium diffus autour des racines et dans les anfractuosités des sols (Duchaufour, 1975 ; Fedoroff et Courty, 1989 d'après Regaya, 2000). L'augmentation des limons et de la matière organique en profondeur (**0-0,7%** ; Boujelben, 2002), témoigne des phénomènes ultérieurs de lessivage de sol. La disparation de la couverture végétale et/ou la texture grossière du sol favorisent la percolation des eaux pluviales qui entraînaient un certain nombre de composants vers les horizons inférieurs tel que l'humus, les limons et les sels.

Ces indices d'une pédogénisation forte témoignent d'une ambiance biostasique, des conditions hydroclimatiques améliorantes, d'une activité biologique développée et d'une végétation plus luxuriante (S22). Ils indiquent également une phase d'atténuation de l'érosion des sols. Les milieux sont en équilibre. **Le climat tend à l'humidification**. Il

connaît soit **des petits changements de très faibles intensités dans la pluviométrie annuelle** soit tout simplement **une meilleure répartition saisonnière des pluies**. L'évolution post-dépôt de la formation des sables bruns se rapporte à **une courte pulsation plus humide** (**environ 470 ans) de fini-Holocène moyen**, reconnue par certains chercheurs en Tunisie (Ballais, 1991 ; Bourgou, 1991 ; Ballais et Ben Azzouz, 1994 ; Bkhairi, 2013). Bkhairi et Karray (2008) la placent entre 2439±288 et 1948±236 cal BP.

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'interprétation paléoenvironnementale et morphoclimatique des archives sédimentaires et des modelés géomorphologiques de l'hydrosystème a relevé des données nouvelles concernant l'instabilité climatique et environnementale à l'Holocène moyen. A la différence de l'Holocène inférieur, l'Holocène moyen a été caractérisé par des changements successifs, de courte durée, du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Les récurrences sont généralement de faibles amplitudes. Elles témoignent d'une certaine instabilité environnementale et posent le problème des facteurs de la morphogenèse et de l'évolution des dynamiques et des milieux.

Durant la première moitié de l'Holocène, la morphogenèse et l'évolution de l'environnement sont sous la seule contrainte des fluctuations climatiques. L'analyse palynologique et morphosédimentaire précise un type d'environnement assez proche de l'Actuel et un climat semi-aride caractérisé par des fortes variabilités de la température et de la pluviométrie. L'alternance des phases d'humidification et d'aridification relatives se traduit par une saisonnalité plus ou moins marquée et par des changements de très faible intensité dans la répartition saisonnière et les moyennes annuelles des pluies et des températures. Mais généralement, les précipitations n'étaient pas forcément plus importantes que maintenant. La position perchée d'une plage à *Cerastoderma glaucum* de 1 m au-dessus du seuil actuel de l'oued al Manfas as-Sod nous laisse penser soit à une fermeture structurale ou sédimentaire de l'exutoire d'al Kalbiyya soit un mouvement tectonique de basculement et/ou d'élévation des bordures occidentales.

Après environ 5000 BP, le changement du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et Halq al Minjil en systèmes de lacs temporaires-sebkhas et de lagunes et l'accélération de la morphogenèse permettent de conclure au changement du poids et à l'intervention d'autres forçages morphogéniques et facteurs de l'évolution des environnements et des paysages. Le climat a connu une accentuation de l'aridité. Des événements pluvio-hydrologiques exceptionnels sont à l'origine du développement de l'érosion et du remblaiement dans le système fluvial. Les taux de sédimentation ont varié entre 3 et 6 mm/an. Deux variations eustatiques positives et rapides de +71 cm à 4965±35 BP (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC) et de +187 cm à 4365±50 BP (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC), sont responsables de deux incursions marines dans l'enclave littorale de Halq al Minjil. A partir du IIIème millénaire BC, des sociétés humaines néolithiques pratiquant des activités agro-pastorales ont commencé à faire sentir leurs effets sur le milieu.

Après 3874±201 BP et avant 3410±40 BP, l'hydrosystème a connu les environnements les mieux équilibrés depuis le début de l'Holocène. La pédogénisation de la formation des sables bruns témoigne de l'atténuation de la morphogenèse à son minimum, du retour de conditions plus humides ou d'une meilleure répartition des précipitations et d'une végétation plus améliorante.

CHAPITRE XII :
L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE SUPERIEUR (DEPUIS 3500 BP)

L'Holocène supérieur se distingue des périodes holocènes précédentes par le changement des rythmes, des modalités et des facteurs d'une morphogenèse fluctuante et mouvementée. Halq al Minjil a évolué en système de sebkha littorale et de sebkha-lagune. Al Kalbiyya a connu l'installation de quatre systèmes de sebkhas et de lacs temporaires-sebkhas. Le système fluvial a hérité de huit générations de dépôts d'origine hydrique et éolienne. Contrairement aux formes et formations d'âge holocène inférieur et moyen, les dépôts et les modelés de l'Holocène supérieur sont juxtaposés, superposés ou emboîtés. Trois voiles éoliens, deux terrasses et deux banquettes d'accumulation, d'âge historique, sont omniprésents. Leur âge, leur puissance, leur étendue et leur fréquence spatiale posent le problème de leur origine. Ils suggèrent la participation de l'Homme à l'édification des formes. Depuis le IVe millénaire av. J.-C, la présence humaine est devenue remarquable. La venue des phéniciens vers 1101 av. J.-C a marqué le passage de la Préhistoire à l'Histoire. L'étude de la morphogenèse et de l'évolution des paysages et des environnements pendant l'Holocène supérieur est dès lors indissociable de la dialectique homme/climat/érosion.

Ce chapitre propose un schéma d'évolution géomorphologique de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, pendant la Protohistoire et l'Histoire. Il examine la signification des remblaiements et des érosions qui sont à l'origine d'une multitude de modelés et d'archives sédimentaires. Il cherche à définir l'origine des héritages géomorphologiques historiques et à contribuer au débat sur les facteurs de la morphogenèse à l'Holocène supérieur. Deux phases de l'Holocène supérieur seront distinguées. Elles sont différentes par leurs héritages géomorphologiques et par les rapports qu'entretient l'Homme dans le temps avec son environnement et la morphogenèse. Il s'agit de l'Holocène supérieur préromain et l'Holocène supérieur post-romain.

I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL A L'HOLOCENE SUPERIEUR PREROMAIN

Durant l'Holocène supérieur préromain, l'hydrosystème a connu quatre phases morphoclimatiques, d'évolution des environnements et des paysages. Al Kalbiyya a fonctionné en système de sebkha continentale et de lacs temporaires-sebkhas. Halq al Minjil, de moins en moins sous les influences marines, a connu la réinstallation d'un stade de sebkha littorale et de sebkha-lagune. Dans le système fluvial, la mise en place de la formation « *Hmari* », son évolution pédologique et le dégagement de la terrasse holocène antéhistorique QH1-3, mettent en évidence le développement du remblaiement, de la pédogenèse et de l'érosion. Le rôle d'un climat semi-aride légèrement fluctuant reste déterminant dans la morphogenèse. L'impact anthropique n'a commencé à faire sentir ses effets sur le milieu qu'au début de la période punique.

I-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamiques paysagères

I-1-1- L'installation du stade sebkha littorale SH_{II} et la construction du bourrelet hydroéolien des bordures orientales de Halq al Minjil

Le niveau « évaporatique » **FE4**, épais d'environ **20 cm** et riche en gypse (14-20% du sédiment) et en halite indique l'évolution de Halq al Minjil en **système de sebkha côtière**, sous des influences continentales prépondérantes. L'enclave littorale reçoit des apports marins et continentaux sporadiques et limités surtout en périodes de crues ou lors des marées de vive-eau et des tempêtes. Elle subit une alternance irrégulière des périodes d'inondation et d'exondation, associées à des forts stress hydrothermiques. Le système est contemporain d'**un abaissement du niveau marin relatif à quelques dizaines de centimètres** au-dessous de sa position actuelle (Paskoff et Oueslati, 1988 ; Abichou, 2002). La régression marine du Flandrien supérieur ainsi que la cote des seuils de graus septentrionaux de Halq al Minjil, à plus de 1 m au-dessus du niveau marin zéro, laissent envisager des rapports terre/mer restreints et un confinement progressif des eaux de la sebkha-lagune précédente SH_{III}. Le plan d'eau est superficiel et souvent de faible extension. Des sédiments fins d'argiles et d'argiles silteuses, laminaires, d'origine terrigène prépondérante comblent le fond. Les dynamiques sont généralement lentes. Une évaporation principalement estivale, intense et/ou prolongée, entraîne l'exondation puis l'assèchement total de la sebkha. Le bilan hydrique est déficitaire. Les sédiments connaissent une évolution post-dépôt de type « évaporatique ». Des sels surtout du gypse lenticulaire et de l'halite, se précipitent respectivement dans la frange capillaire et en surface. La fin du fonctionnement de Halq al Minjil en système de sebkha (SH_{II}) remonte au 3410±40 BP (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC).

Durant la même période, l'activation des processus éoliens sur un fond asséché et desquamé, d'argiles silteuses floculées, a permis la mise en place du **dépôt éolien FEO3** et **l'édification d'un bourrelet hydroéolien sur les bordures orientales de la sebkha**. L'édifice, en forme de S inversé, est à peine marqué dans le paysage. Il est surbaissé d'une quarantaine de centimètres au-dessus du fond de la sebkha, discontinu et large de 40 à 200 m. Il est beaucoup plus développé à l'amont de la route RVE 812. Le bassin méridional de Halq al Minjil, étroit et allongé, est largement envahi par les eaux marines et continentales. Il est peu propice à la déflation éolienne. La mise en place de la construction est polyphasée. Son édification et évolution sont rythmées par l'alternance, au moins saisonnière, des phases de pause et de reprise éolienne. Elles sont exprimées par des séquences fines de sédiments éolisés, du gypse néoformé et d'argiles de lessivage. La mise en place de l'édifice sur les bordures orientales de la sebkha, semble indiquer que **les vents dominants et actifs sont, au moins depuis l'Holocène supérieur, des secteurs ouest et nord-ouest**. Ils sont, au cours de l'Holocène inférieur et moyen, des secteurs est et nord-est et responsables de l'édification du bourrelet hydroéolien sur les rives occidentales et méridionales de Halq al Minjil.

De même, une dune-îlot hydroéolienne, appelée chez les riverains « guataya », est dégagée dans le centre du même bassin. Elle est allongée nord-est/sud-ouest, sur environ 6 ha de superficie (T47). Elle est édifiée progressivement par l'action conjointe de la végétation, des apports terrigènes, fluvio-marins et éoliens. Les vents actifs sont des secteurs ouest et nord-ouest et secondairement sud et sud-est. Une végétation halophile, poussée sur un fond exondé, a joué un rôle primordial pour le freinage des vents et le piégeage des argiles et des silts. Les afflux d'eaux étaient insuffisants pour nettoyer le fond et les sédiments piégés. De tel édifice est reconnu ailleurs dans les fonds des sebkhas Sidi al Hani, al Kalbiyya, al Khirat, Mechiguig,… (Karray, 1990b ; Ben Jmaa, 2008 ; Amami, 2009).

I-1-2- Le rétablissement d'un système de sebkha continentale SK_{IV}

Le niveau de colmatage vaseux **FCV4**, laminaire, épais de **27 cm en moyenne**, chargé de sels et intercalé d'horizons d'oxyde de fer, se généralise dans l'ensemble de la dépression d'al Kalbiyya. Il annonce **l'évolution du système en sebkha SK_{IV}**. La cuvette continentale est endoréique. Les fréquences de débordement et les relations avec la sebkha littorale SH_{II} étaient probablement faibles (*cf.*, Fig. 94). Le fonctionnement laminaire (argile, oxyde de fer, sel) indique une certaine rythmicité, au moins saisonnière, d'alluvionnement vaseux et d'évolution post-dépôt, commandée par une alternance des cycles inondation/assèchement.

Les apports dans la sebkha sont limités et intermittents. La cuvette est submergée d'eau en saison de pluies, lors des crues et/ou du déversement des trop-pleins des nappes souterraines artésiennes des bordures sud d'al Kalbiyya. L'étalement des lamines détritiques d'argiles et d'argiles silteuses nécessitent des ruissellements en nappe, chargés en matériaux en suspension. Sur les bordures et à l'exutoire des oueds tributaires de la sebkha, les dynamiques fluviatiles sont plus actives. Al Kalbiyya a connu l'aggradation verticale, d'environ 60 cm, et la progradation des zones distales des cônes d'épandage. L'épandage fluviatile de sables limoneux, de limons et de limons sableux (FEA5-T60), est corrélatif de l'ablation dans les bassins proches. Une érosion active est générée surtout lors des crues brèves et torrentielles et des averses intenses et orageuses. L'abaissement du niveau d'eau dans la cuvette et la battance de la nappe favorisent la coloration olive et l'oxydation du matériel. En périodes sèches de l'année, la sebkha desséchée est couverte d'efflorescences salines, comme en témoigne les horizons fins de sel blanc dans l'ombilic (S9-T53). Sur les bordures, des macrocristaux de gypse sont néoformés dans les sédiments d'épandage fluviatile (S11-12-T60). Tout autour de la sebkha, une auréole temporairement touchée par les eaux salées a permis le développement d'une végétation, vraisemblablement halophile, et l'installation d'un domaine de chott (S3-T48).

I-1-3- La réinstallation des systèmes de lacs temporaires-sebkhas (SK_{III}) et de sebkha-lagune (SH_I)

Dans la sebkha al Kalbiyya, l'unité sédimentaire UK_{III} relie latéralement des faciès très hétérogènes qui montrent des changements verticaux de la nature et de la provenance des sédiments, des mécanismes et des environnements sédimentaires. La superposition de cortèges sédimentologiques différents a permis de distinguer la succession de quatre sous-stades de lacs temporaires-sebkhas (*cf.*, Fig. 22). Chacun définit la succession dans la cuvette continentale des régimes au moins saisonniers de lac temporaire et de sebkha soumis aux conséquences d'alternance des cycles inondation/assèchement. Durant un épisode lac temporaire-sebkha, on peut distinguer **la succession de trois phases de dynamiques**, enregistrées dans trois types de lamines : détritique, hydromorphique et oxydo-gypseuse.

La première phase est sédimentaire. Elle correspond à un colmatage fluviatile d'un lac temporairement débordant qui s'installe dans un contexte hydro-pluviométrique généralement favorable. Des crues allogènes rapprochées et/ou intenses et des fortes pluies locales ont permis la montée des eaux dans la cuvette et l'installation d'un plan d'eau fluctuant. Dans l'ombilic, se généralise souvent un faciès de colmatage vaseux, composé d'argiles et d'argiles silteuses. Sur les bordures, le remplissage, très hétérogène, montre la superposition ou la juxtaposition des faciès fluviatiles aux lits grossiers-fins (**FGF4 et 5**) et de colmatage vaseux (**FCV5**). En milieux fluvio-deltaïques, les niveaux fluviatiles d'épandage alluvionnaire **FEA6 et FEA7**, témoignent de fortes dynamiques d'aggradation alluviale des cônes deltaïques et des plaines d'épandage des oueds al Atef au sud et ceux des Dhras Laghmas-ash-Shraif à l'est. Ils expliquent une érosion vigoureuse aussi bien dans les

bassins proches que lointains. **Au cours de ce stade SK_{III}, on estime un exhaussement** de fond d'al Kalbiyya **d'environ 120 à 155 cm**.

La seconde phase est post-sédimentaire d'évolution hydromorphique du remplissage **en milieu de lac**. Les sédiments saturés en eau ont connu, sous l'action de processus d'oxydo-réduction, une évolution hydromorphique de surface. Des taches et des horizons fins noirs et gris s'intercalent dans la masse sédimentaire. **La troisième phase est d'évolution « évaporatique »** de sédiments **en milieu de sebkha**. L'abaissement du niveau d'eau puis l'exondation du lac sont à l'origine de l'oxydation du matériel. L'assèchement total du lac marque l'installation d'une sebkha vraisemblablement d'été et entraîne la précipitation des filaments de sels et des microcristaux de gypse dans le sédiment.

Al Kalbiyya asséchée et desquamée est également le siège d'un prélèvement éolien. Ceci est enregistré par la présence des boules et des agrégats millimétriques d'argiles roulées dans le sédiment (S16-T53 ; S10-T56 ; S8-T49 ; S10-T53). Durant le sous-stade SK_{III-1}, les sels sont peu représentés. Ils témoignent peut-être d'une faible évaporation et/ou des submersions successives et rapprochées dans le temps, empêchant leur forte concentration dans l'enclave semi-endoréique.

A l'aval dans le système littoral, les remplissages fluviatile (FF3 et 4) et fluvio-marin aux influences fluviatiles notables (FMF4 et 5), des parties médianes des tarières T31, T32, T35 et T46, annoncent l'**évolution de Halq al Minjil en système de sebkha-lagune (SH_I)**. L'enclave littorale est le siège d'une sédimentation fine, laminaire et intercalée des traces d'hydromorphie (couleur gris, noir et olive des sédiments, décomposition de la matière organique) et d'émersion (oxydation du matériel et précipitation des sels). Elle est soumise aux conséquences d'alternance des cycles inondation-exondation.

Halq al Minjil est irrégulièrement submergée d'eau en saison de pluies, lors des grosses crues, des grandes marées de vive-eau et/ou des tempêtes hivernales. Le goulet méridional peut occasionnellement assurer les rapports terre/mer. Les apports terrigènes lointains sont prépondérants. Les apports latéraux et locaux sont moins remarqués. Halq al Minjil est un milieu semi-isolé de la mer et temporairement anoxique et réducteur. En périodes ou saisons sèches de l'année, l'effet de l'évaporation peut être accentué par la fermeture du goulet méridional et l'isolation de l'enclave littorale de la mer. L'exondation, puis l'assèchement de Halq al Minjil lui confient une morphologie de sebkha littorale. Ils favorisent la précipitation des sels surtout dans la partie septentrionale de la dépression littorale. Les argiles floculées et fendillées sont propices au transport éolien.

I-1-4- Aggradation des lits fluviaux et des plaines et la mise en place de la formation « Hmari »

La mise en place de la formation « *Hmari* » synchronise les stades lacs temporaires-sebkhas SK_{III} et sebkha-lagune SH_I. Le dépôt est composé de sables et de sables limoneux, épais de **50 à 180 cm** et contenant des cailloux et graviers calcaires. Il a remblayé les fonds de vallées et en partie la plaine de Sidi Bou Ali-Bal'oum et le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar. Il est caractérisé par la prédominance des alluvions, mélangées aux colluvions d'apports latéraux sur les versants et au sein desquelles apparaissent des particules éolisées (*cf.*, coupes CaS, CmM). La formation grossière témoigne des phases de forte activité morphodynamique. Les sédiments sont en partie issus de l'ablation et d'une faible incision linéaire des séquences supérieures de la formation des sables bruns. Localement, les deux formations des sables bruns et « *Hamri* » sont séparées par des contacts ravinants à grand rayon de courbure.

Dans les axes d'écoulements, **la formation « *Hmari* » forme le troisième ensemble des dépôts de la terrasse holocène antéhistorique** (QH1-3). Elle vient au-dessus du paléosol brun sans aucun passage progressif. Sur les « piémonts », le dépôt constitue les séquences alluviales supérieures des cônes d'épandage et des cône-terrasses holocènes antéhistoriques. Elle finit par endroits par recouvrir totalement le paléosol brun et les dépôts à nodules et à concrétions calcaires du Pléistocène supérieur (Ps_{10}). La position morphologique de l'accumulation et les trouvailles archéologiques montrent que **l'aggradation des lits fluviaux est d'âge protohistorique**.

La formation « *Hamri* » porte les indices d'une évolution pédologique (quartz teintés d'oxyde de fer ; 10,07% d'hydroxyde de fer ; 20,9% d'oxyde d'aluminium,). Elle peut indiquer la **mise en œuvre des processus de décarbonatation et de rubéfaction** qui lui ont donné sa couleur rouge clair et jaune rougeâtre (2.5YR 6/6, 7.5YR 6/8, 7.5YR 7/8). De tels processus se mettent en place en présence d'un contraste hydrique entre une saison humide et sèche et entraînent la déshydratation d'oxydes et d'hydroxydes de fer (Boyé et Nesson, 1970 ; Baize, 2004 ; Mathieu et Lozet, 2011). La formation s'est transformée en paléosol, moins évolué que le paléosol brun (*cf.*, Tab. 15 et 16). Par ses caractéristiques, il peut s'apparenter aux sols faisant transition avec les sols rouges typiques du climat méditerranéen (Geroge, 1970 ; Baize, 2004 ; Mathieu et Lozet, 2011…). **La pédogénisation de la formation date la fin de la Protohistoire ou à la limite le début de la période phénicienne**.

I-1-5- L'installation du stade sebkha SK_{II} et l'édification d'un bourrelet et des voiles hydroéoliens sur les bordures est et sud-est d'al Kalbiyya

Durant la période phénicienne, le niveau vaseux **FCV8**, épais de **20 cm** et riche en sels, colmate la dépression d'al Kalbiyya. Il annonce la **réinstallation d'un nouveau système de sebkha continentale SK_{II}** (T49, T50, T53, T56, T60). L'enclave endoréique est le siège de laminations argileuses et argilo-silteuses, dans lesquelles s'intercalent des horizons fins d'évolution post-dépôt en milieu sec ou humide. Elle enregistre des cycles d'inondation et d'assèchement et est soumise aux conséquences de l'irrégularité du régime pluvio-hydrologique et de l'évaporation. Les lamines détritiques mettent en évidence la succession de courtes périodes d'alluvionnement associées à des petites ou brèves crues allogènes qui s'avèrent incapables d'évacuer. Elles témoignent d'une mise en place par des écoulements intermittents et à faible capacité de transport. Les sédiments d'apports latéraux et d'une provenance proche sont peu représentés (S12-T50 ; S12-T56). Ils proviennent des remaniements effectués à l'occasion des averses locales et orageuses qui génèrent des écoulements brefs et temporairement torrentiels. Généralement, les apports sont irréguliers. Ils sont soumis aux rythmes d'événements hydro-pluviométriques dans le bassin plus qu'à un rythme saisonnier.

En périodes et/ou saison sèches de l'année, l'exondation puis l'assèchement total de la sebkha entraînent l'oxydation superficielle de sédiment puis la précipitation du gypse et des sels (S17- T53, S14-T49). Des périodes de faible évaporation et/ou de dissolution de sels, liées aux apports sporadiques d'une nouvelle crue, peuvent expliquer la faible concentration du gypse dans certaines lamines. La sebkha est entourée d'une auréole de végétation halophile bien développée sur la partie centro-méridionale et orientale de la dépression (racines dans les séquences S14-T49, S12-T56, S25-T60).

L'assèchement de la surface et la floculation des argiles et des silts favorisent le transport éolien. Les agrégats d'argiles roulés observés dans le dépôt (12-T50, 17-T53, 14-T49, 12-T56) les attestent. On peut corréler à ce stade de sebkha, **la mise en place du bourrelet QH3a et des voiles hydroéoliens des bordures orientale et sud-orientale**

d'al Kalbiyya. Des argiles silteuses et des sables remaniés viennent se plaquer contre le bas-versant de la lunette pléistocène (QP3f). Ils ont donné un modelé de bourrelet de 8,5 km de longueur et de 150 à 1000 m de largeur (*cf.*, Fig. 24).

Les caractéristiques de l'accumulation éolienne (litage, couleurs variées) indiquent une mise en place polyphasée par des vents temporaires exercés sur le fond de la sebkha et sur les lits et les zones d'épandage des oueds. La précipitation des sels, la compaction et la désalinisation des sédiments et le lessivage des carbonates témoignent d'une certaine évolution et de l'intervention des phases de pause ou d'atténuation de l'activité éolienne. La présence des racines démontre le rôle primordial joué par la végétation salicorne dans le piégeage des éléments éolisés et la stabilisation de l'édifice.

On ne sait pas encore ni l'épaisseur précise, ni la date de début de la mise en place de l'accumulation éolienne. Néanmoins, **la construction peu couvrir la période punique-préromaine** (2079±240 BP ; LRAE-LH1 ; 2620-1538 cal BP/671 BC-412 AD). Les données permettent d'affirmer **une période d'érosion éolienne depuis la période phénicienne**. Aussi, au sud-est d'al Kalbiyya, des voiles éoliens composés de limons et d'argiles silteuses viennent couvrir les Dhras Zmenka, ar-Rommana, ash-Shrashir et ach-Sh'ir (*cf.*, Fig. 27 : Karray, 1990a). La position morphologique des constructions hydroliennes rendent compte de l'efficacité éolienne des vents des secteurs ouest et nord-ouest.

I-1-6- L'édification du premier cône deltaïque de Halq al Minjil QH3a

Au débouché de l'oued al Manfas as-Sod, une **construction fluviatile de cône deltaïque** marque la morphologie actuelle du bassin méridional de la sebkha-lagune Halq al Minjil (*cf.*, Fig. 86). Durant la **période punique-préromaine**, la cuvette a été comblée d'épaisses séquences alluviales (20-40 cm), composées essentiellement de limons sableux lités, d'épaisseur totale de **295 cm** sur environ **106 ha** de superficie (*cf.*, Fig. 82). La formation témoigne des régimes hydriques contrastés et d'une mise en place polyphasée, par des écoulements temporaires à plus ou moins forte capacité de transport. Les tâches et les horizons fins discontinus de sel blanchâtre et les microcristaux de gypse indiquent des phases de pause et de l'interruption des dynamiques sédimentaires. L'aggradation métrique de l'éventail alluvial découle du **développement et/ou de l'accélération de l'érosion surtout dans le bassin versant de l'oued al Manfas as-Sod**. Elle est consécutive à la phase du creusement des fonds des affluents de la rive est du même oued, précédant la phase de leur remblaiement historique. Le **rythme d'exhaussement est d'environ 3,6 mm/an**.

I-2- Morphogenèse et environnements pendant l'Holocène supérieur préromain

Les héritages géomorphologiques de l'Holocène supérieur préromain mettent en évidence **une dégradation générale des milieux** par rapport à ceux des périodes holocènes antérieures. Elle se rapproche nettement par l'installation des sebkhas littorales et continentales, l'édification des bourrelets et des voiles éoliens, l'accélération de l'érosion et l'incision des talwegs. **L'intervention humaine commence à interférer avec les dynamiques naturelles**.

I-2-1- Un pic d'aridité et une morphogenèse modérée au début de l'Holocène supérieur

Une **dégradation des milieux et une tendance climatique à l'accentuation de l'aridité ont marqué le début de l'Holocène supérieur**. La perturbation des régimes hydrologiques, l'activation des processus éoliens, la diminution et l'irrégularité de la pluviométrie et l'accentuation de l'évaporation sont évidentes dans les enregistrements sédimentaires (FE4, FEO3, FCV4,). Cette période est caractérisée dans les dépressions par

l'installation des sebkhas continentale et littorale (SK_{IV}, SH_{II}) et l'édification d'un bourrelet hydroéolien sur les bordures orientales de Halq al Minjil.

Les données de la palynologie ne contrarient pas les observations géomorphologiques. Le spectre pollinique de la séquence S23-C3 coïncide avec la sebkha littorale SH_{II}. Il est décrit par la sous-zone 3d qui témoigne des modifications environnementales (*cf.*, Fig. 107 et 108 ; Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013). *Olea* régresse simultanément *Pinus*, *Pistacia* et *Artemisia* progressent. Les formations caducifoliées lointaines déclinent avec la régression concomitante de *Quercus* type caducifolié et *Fraxinus*. *Quercus* type sempervirent se maintient. Vers **3410±40 BP** (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC), la culture de l'olivier semble abandonnée. Dans le même temps, la steppe à Artemisia atteint ses valeurs maximales du diagramme, sans doute en rapport avec l'accroissement de l'aridité. **Le climat évolue progressivement vers les conditions d'aridité actuelles de la Tunisie centrale**. Incontestablement, à cette augmentation de l'aridité, il convient de superposer **l'impact des activités agro-pastorales des sociétés humaines néolithiques et berbères dans la structuration des paysages végétaux** (Lebreton, 2009a ; Lebreton et Jaouadi, 2013).

L'analyse géomorphologique révèle **la faiblesse de l'érosion au début de l'Holocène supérieur**. Dans les fonds des vallées, le paléosol brun a été suivi par une phase d'érosion de faible ampleur précédant la mise en place de la formation « *Hmari* ». Leur accumulation est régulièrement superposée. Localement, un contact ravinant les sépare. **L'érosion hydrique n'a fait que décaper une partie du paléosol brun**. Les écoulements intermittents s'avéraient incapables d'inciser. Ils sont occasionnellement concentrés, provoquent localement une légère incision linéaire de certaines sections de talwegs. Dans les dépressions, les faibles épaisseurs des remplissages sédimentaires (20-27 cm), peuvent-elles expliquer une faible érosion hydrique et des écoulements incompétents ?

Une aridification du climat au début de l'Holocène supérieur a été signalée par plusieurs chercheures en Tunisie (Coudé-Gaussen, 1984 ; Hamza, 1987 ; Brun, 1989, 1991 ; Oueslati, 1993…). Dans l'hydrosystème, l'augmentation de l'aridité et la dégradation des milieux coïncident avec la tendance sèche du climat post-néolithique, reconnues dans le bassin Kébir Miliane en Tunisie septentrionale (Bourgou, 1993) et dans le Sahel central et méridional (Brahim, 2005). Elles sont également corrélables avec l'ambiance sèche et la phase de péjoration climatique caractérisant cette période de l'Holocène dans les bassins versants de l'oued Sbeïtla et de Kasserine dans la Tunisie centrale (Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013). Il est enfin tentant de les corréler avec la phase d'aridification du climat et la déflation éolienne, mises en évidence dans la Tunisie présaharienne peu après 3680±160 BP (2490-1662 cal BC ; Ballais, 1991).

I-2-2- Alluvionnement, érosion et amélioration relative des conditions hydro-pluviométriques pendant la Protohistoire

Depuis environ 3410±40 BP (Beta-290411 ; 3562-3731 cal BP/1877-1613 cal BC), les tendances paraissent être à l'**amélioration du contexte hydro-pluviométrique** et à une **recrudescence de la morphogenèse**. L'installation des systèmes de sebkha-lagune (SH_I) et de lacs temporaires-sebkhas (SK_{III}) et l'aggradation alluviale et colluvio-alluviale des lits fluviaux et des zones d'épandage (QH1-3) les attestent.

Une nouvelle phase de remplissage sédimentaire a marqué les deux enclaves littorale et continentale. **Une succession des laminations** d'argiles et de limons sableux prépondérants **ont exhaussé les fonds** d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, **respectivement de 90 et 137 cm en moyenne**. Une légère amélioration des conditions hydro-pluviométriques est évidente par apport à la phase holocène précédente. Les données recueillies conduisent à

l'idée d'une augmentation de faible intensité de la pluviométrie donc du ruissellement et des apports dans le bassin, pendant que l'érosion s'accroît et l'évaporation diminue.

Sur la rive droite du bassin de l'oued al Manfas as-Sod, la formation « *Hamri* » a marqué **le retour aux remblaiements grossiers**. Des sables et des sables limoneux, colluvio-alluviaux et épais de **50 à 180 cm**, comblent les fonds de vallées. La puissance, l'extension et la fréquence spatiales des remblaiements traduisent une recrudescence de la morphogenèse. On estime, selon les endroits, un **rythme d'alluvionnement de 0,6 à 2 mm/an**. A la sortie du relief collinaire, les sédiments charriés entraînent l'exhaussement alluvial de la plaine de Sidi Bou Ali-Bal'oum et du plateau de Sidi Bou Ali-Kandar et finissent par recouvrir partiellement les formations anciennes. L'aggradation des lits fluviaux et des zones d'épandage est survenue quand l'apport des sédiments a excédé les capacités de transport des oueds. Elle est consécutive à une probable dégradation du couvert végétal par les populations post-néolithiques et berbères. Ces derniers ont connu leurs premières tentatives de sédentarisation en pratiquant le feu et le défrichement de la végétation naturelle afin de gagner des terres, développer la céréaliculture et élever du bétail (Gsell, 1913 ; Decret et Fantar, 1981 ; Hamza, 1987 ; Lebreton et Jaouadi, 2013).

I-2-3- Une courte phase biostasique et de pédogenèse à la fin de la Protohistoire et au début de l'Historique

A la fin de la protohistoire ou à la limite au début de la période phénicienne, l'hydrosystème a connu une **période vraisemblablement séculaire d'équilibre environnemental, d'arrêt ou d'atténuation de la morphogenèse**. L'évolution pédologique de la formation « *Hmari* » en paléosol rubéfié témoigne d'une biostasie. La décarbonatation du sédiment, la dynamique des oxy-hydroxydes de fer, la réoxydation du fer en taches de teinte rouille à la surface des quartz témoignent d'une stabilisation du dépôt. De tels phénomènes se développent dans un milieu bien drainé et aéré et soumis saisonnièrement à des forts contrastes hydriques (Duchaufour, 1968 ; Baize, 2004 ; Mathieu et Lozet, 2011 ; Larousse, 2013). Au cours de cette période, le climat semi-aride est caractérisé par **une saisonnalité prononcée entre saisons sèche et humide** qui rythment les processus pédogéniques. **Les précipitations, quoique peu abondantes, étaient relativement plus régulières**.

Ballais (1991) met en évidence à Ksar Ghilane, au sud-ouest des jbels Matmata, une pulsation climatique humide plus tardive, qui remonte à la période punique (2380±155 BP ; 819-92 cal BC). Bkhairi et Karray (2008) ont identifié dans le bassin de Kasserine en Tunisie centrale une période de stabilité relative et d'humidification du climat entre 2439±288 cal BP et 1948±236 cal BP.

I-2-4- Une phase préromaine d'incision majeure des vallées, de dégradation des milieux et de recrudescence de l'activité éolienne : peut-on parler d'une première crise morphogénique historique ?

Peu avant **2079±240 BP** (LRAE-LH1 ; 2620-1538 cal BP/671 BC-412 AD) et vraisemblablement durant la période phénicienne-préromaine al Kalbiyya a connu **l'installation d'un système de sebkha (SK_{II}) et l'édification d'un bourrelet (BHK) et des voiles éoliens** sur ses bordures est et sud-est. L'endoréisme, la mise en place de laminations gypseuses et l'activation des processus éoliens indiquent le passage d'une phase de biostasie à des conditions environnementales plus sévères.

Dans le système fluvial, le calme morphogénique relatif de la fin de la période protohistorique est interrompu par **une phase d'incision majeure**. Les lits des cours d'eau sont incisés dans les remblaiements d'âge holocène inférieur à supérieur préhistorique. Ils

formaient jusqu'à la période post-romaine, les lits majeurs des vallées. **Une terrasse holocène préhistorique (QH1-3) est dégagée dans le paysage**. Elle domine le talweg de 5 à 10 m. Cette première phase d'incision couvre la période fini-protohistorique-préromaine. Elle est la plus importante de la période holocène. Compte tenu de l'évolution pédologique fini-protohistorique de la formation « *Hmari* » et de l'emboîtement des formations d'âge romain dans la terrasse QH1-3, on peut déduire **une incision linéaire sur plus de 7 m de profondeur pendant** environ **950 ans** et **un rythme de creusement de 7,3 mm/an**.

Dans les plaines des bordures orientales d'al Kalbiyya, **la tendance générale est à l'aggradation** provoquant une surélévation progressive des zones d'épandage des oueds. La superposition des dépôts peut être expliquée par la révision du niveau de base local de la dépression continentale à la hausse. Cette aggradation est non plus généralisée dans l'ensemble du système fluvial. **Les oueds as-Souriyya et al Msid-ar-Ramla**, principaux affluents de cours d'eau al Manfas as-Sod, **incisent leurs anciens remblaiements et contournent leurs apex**. Au débouché du même cours d'eau, l'accumulation alluviale, grossière et étendue du cône deltaïque préromain QH3a, est consécutive à cette incision.

L'activation de la morphogenèse au début de l'Historique peut être expliquée comme le **résultat d'actions conjointes des sociétés et du climat**. L'hydrosystème est certainement soumis aux conséquences d'une prolongation de la saison sèche et à celles des sécheresses intenses. Une **péjoration climatique** marquée par la réduction des précipitations et la désorganisation des écoulements sont envisageables. Ainsi, **des événements météorologiques extrêmes**, comme des orages automnaux, ont pu engendrer des écoulements torrentiels et une érosion pluviale agressive. **Les ruissellements concentrés**, dépourvus ou peu chargés en sédiments à charrier, **ont dispensé leur énergie en incisant dans leurs remblaiements**. Le colmatage puissant, étendu et grossier de Halq al Minjil à l'aval, n'a pu se faire qu'au cours des crues vigoureuses.

Cette phase d'aggravation de la morphogenèse s'est produite dans un contexte d'oscillations du niveau marin relatif. A Cheikh Yahya à Jerba, un platier de corrosion et un dépôt de plage ont été attribué à la période phénicienne (2700 BP). Ils indiquent un **mouvement positif du niveau de la mer de +0,6 cm à +0,8 cm** (Paskoff et Sanlaville, 1983). Par la suite et **pendant la période carthaginoise**, plusieurs sites archéologiques côtiers démontrent **un abaissement du niveau marin relatif de quelques dizaines de centimètres au dessous de sa position actuelle** (Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Paskoff et Oueslati, 1988 ; Oueslati, 1993, …). Cette baisse ne nécessite-elle pas une adaptation du profil en long du cours de l'oued al Manfas as-Sod et de ses affluents.

La première crise érosive semble aussi liée à **une déstabilisation phénicienne et punique des versants et des horizons de surface des sols**. L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil fait partie du Sahel connu depuis l'Antiquité sous le nom du **Byzacium (ou byzacène**) qui désigne un assez large territoire au sud de Carthage (Frézouls, 1963 ; Désanges, 1963, 1984). Ce territoire est, à croire les auteurs de l'Antiquité, une région de grandes richesses (Boujarra et Mrabet, 1999). Il a connu une importante **prospérité des activités agro-pastorales et une forte emprise agricole**. Cette emprise est amorcée avec les berbères sous domination phénicienne, en pratiquant le feu et **le défrichement de la végétation naturelle afin de conquérir de nouveaux champs pour la céréaliculture et l'élevage** (Gsell, 1913, 1918, 1920 ; Hamza, 1987). Elle s'est ensuite accrue pendant la période carthaginoise.

Pour une population de plus en plus croissante (700 000 habitants à Carthage au début de la troisième guerre punique), Carthage a nécessité un approvisionnement régulier et un arrière-pays capable d'assurer une production suffisante pour la consommation locale

et l'exportation (Gsell, 1918). Long (1954, *in* Hamza, 1987) a étudié la végétation de la Tunisie centrale et a noté que **la période punique marque « le début de l'ère de la destruction de la végétation primitive »**. Le byzacène punique a connu un développement rapide de la céréaliculture, de l'élevage et puis de l'arboriculture. Le défrichement de la végétation naturelle a permis la mise en valeur quasi-générale des terres (Gsell, 1918a, Despois, 1961, *in* Hamza, 1987). Il a favorisé le ruissellement et la dénudation des sols sur les pentes.

Durant la période historique préromaine, la participation anthropique à l'aggravation des effets de l'érosion est certaine. Mais **la morphogenèse,** en dépit de l'importance de l'emprise des sociétés**, reste essentiellement commandée par les événements météorologiques paroxysmiques**. **Le facteur anthropique n'a fait qu'amplifier l'impact climatique**. Durant la même période, le développement des paléosols dans les bassins de l'oued Sbeitla et de Kasserine, en Tunisie centre-ouest, a permis de souligner une amélioration des environnements et une humidification relative du climat (Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013). Il est cependant plausible de supposer que les Hautes Steppes et les montagnes qui bordent le bassin amont d'al Kalbiyya recevaient un peu plus ou connaissaient une meilleure répartition de pluie qu'aujourd'hui.

II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS LA PERIODE ROMAINE A L'ACTUEL : TRANSFORMATION EN MILIEU ANTHROPISE ?

Depuis la période romaine, al Kalbiyya fonctionne, au rythme des événements hydro-pluviométriques et des sécheresses, en systèmes de lacs temporaires-sebkhas et de sebkhas. Halq al Minjil, sous une influence continentale prépondérante, évolue en système de sebkha-lagune. Leurs archives sédimentaires relatives à cette période ne sont pas calées chronologiquement. Ceci a empêché la bonne approche chronologique des évolutions des dynamiques, du bilan sédimentaire et des rythmes d'exhaussement ou d'incision, déroulés dans les deux dépressions sur environ 2000 ans.

Le système fluvial a hérité d'une multitude de formes et formations post-romaines. Sept modelés d'origine hydrique et éolienne emboîtés ou superposés (terrasses, cônes, banquettes, voiles et placages éoliens) témoignent d'une instabilité environnementale et morphogénique. Leur âge, puissance, extension et fréquence spatiales posent un problème important concernant leur origine et les arguments respectifs de l'action des sociétés et du climat. Les dépôts prennent de l'ampleur dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya. Ils ont mis au clair la participation de la tectonique cassante et de la subsidence à l'aggradation des lits fluviaux.

II-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamiques paysagères

II-1-1- L'installation du stade lacs temporaires-sebkhas et sebkhas (SK_I)

Le faciès de colmatage vaseux **FVD9** et proximal colluvio-alluvial **FCA5** des parties moyennes et supérieures des tarières T50, T53, T49, T55, T57, T58 et T59, informe du **fonctionnement d'al Kalbiyya en système de lacs temporaires sebkhas et de sebkhas**. L'installation du système est révélée par la haute fréquence d'horizons post-dépôts d'hydromorphie ou d'évaporation. Il est fonction du bilan hydrique, des volumes d'eau apportés et de leur réparation temporelle. Elle dépend également de la distribution des années sèches et humides et de la fréquence des événements hydro-pluviométriques exceptionnels et des sécheresses. **Depuis l'Antiquité et jusqu'à l'Actuel, le fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya n'a pas changé**. Les modalités, les dynamiques et les environnements sédimentaires rappellent ceux du stade SK_{III}. Des

lamines d'argiles et d'argiles silteuses, d'origine essentiellement lointaine, ont conduit le colmatage progressif de l'enclave. L'épaisseur totale du **remplissage va de quelques décimètres à plus de 3 m à l'entrée de la dépression**. Des sédiments plus grossiers, fluviatiles et d'apports latéraux sont à l'origine de **l'aggradation décimétrique, alluviale et colluvio-alluviale des bordures surtout orientales**.

Le régime hydrologique est très irrégulier. **Al Kalbiyya fonctionne au rythme d'alternance des périodes d'assèchement et de pleins**. **Pendant les années pluvieuses** et à l'occasion des crues torrentielles ou rapprochées, **un plan d'eau peut séjourner des mois voire quelques années** (Karray, 1993). Al Kalbiyya est semi-exoréique. Lors de la crue isolée de 1934, suivie de deux années moyennement arrosées, un lac a stationné 1201 jours (Karray, 1993). Les profondeurs d'eau sont variables et peuvent atteindre un maximum de 4 m (Despois, 1955 ; Barrot, 1972a ; Belkhodja, 1972). **Pendant les années sèches**, les apports hydriques dans la cuvette diminuent. Les apports lointains et proches sont rarement importants. **Le bilan hydrique est négatif**. **Al Kalbiyya évolue vers un milieu de sebkha** comparable à celui d'aujourd'hui. **Les phénomènes d'endoréisme sont de plus en plus accentués**. Ils sont en rapport avec la diminution de la pluviométrie, l'intensification de l'évaporation et l'augmentation de la fréquence des sécheresses ou encore en relation avec l'action de l'Homme (aménagements hydrauliques : barrages, digues… ; Karray, 1993).

II-1-2- Le système sebkha-lagune SH_I

Les niveaux fluviatiles (**FF3**) et fluvio-marins aux influences fluviatiles notables (**FMF4**) des parties supérieures de la carotte C3 et des tarières T29, T31, T32, T35, T38, T40, T43, T45, T46 et T60 décrivent le **fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil en système de sebkha-lagune (SH_I)**. Son évolution est complexe. L'emprise anthropique sur les milieux est de plus en plus lourde (Boujelben, 2002). Les variations eustatiques et l'évolution de la ligne de rivage sont attestées par les vestiges archéologiques de Horrea Caelia (Oueslati *et al.*, 1982 ; Paskoff et Oueslati, 1988 ; Slim *et al.*, 2004).

Généralement, **les dynamiques et les environnements sédimentaires rappellent ceux du stade sebkha-lagune SH_{III}**. Un remplissage hétérogène et dilaté de **0,75 à plus de 2 m** colmate la dépression littorale. Le milieu lagunaire méridional est le siège de laminations millimétriques à centimétriques d'argiles et d'argiles limoneuses fluvio-marines intercalées irrégulièrement par des lits fins terrigènes et/ou d'apport latéral, organiques (sapropèle) et de sels. Il est en connexion intermittente avec le large. Il est submergé d'eau lors des grandes marées de vive-eau et des tempêtes. Le grau méridional est occasionnellement fermé, vraisemblablement en été. Sa dynamique est aujourd'hui contrôlée par la ferme aquacole « Aquaculture Tunisienne ».

Au nord, dans la plaine de Sidi Bin Jabir, la lagune semi-fermée passe à un milieu de sebkha. Ici, le remplissage sédimentaire est entièrement terrigène. L'exhaussement de la sebkha, l'aggradation et/ou la progradation des cônes deltaïques sont commandés par un colmatage fluviatile intermittent. Parfois et à l'occasion des événements hydropluviométriques exceptionnels, le colmatage est notable et rapide (Barrot, 1972b ; Boujelben, 2002). Aux débouchés des oueds, se développe une sédimentation fluvio-deltaïque. La texture grossière des sédiments, les teneurs en phosphore et en fer, la présence du charbon peuvent traduire une érosion vigoureuse des surfaces et une instabilité des bassins à l'amont. Elles peuvent également témoigner d'une rupture d'équilibre en étroite relation avec l'emprise humaine sur le milieu (Barrot, 1972b ; Hamza 1987 ; Karray, 1993 ; Boujelben, 2002 ; Mkina, 2006 ; Zerai, 2006).

II-1-3- Une première phase principale d'alluvionnement et d'incision

Les fonds de vallées et les zones d'épandage sont colmatés par de **puissantes accumulations alluviales et colluvio-alluviales dépassant en moyenne 330 cm d'épaisseur**. Les coupes ont montré une succession de tronçons et de séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes (*cf.*, les coupes CaSO, CmG, CmL, CmLG-1, CaLG, CaSB-1). La formation est plus grossière dans les vallées de la rive sud des bassins de l'oued al Manfas as-Sod et Halq al Minjil. Elle se développe et prend de l'ampleur dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya, dépassant parfois **7 m** d'épaisseur.

L'accumulation s'emboîte dans les dépôts holocènes-préromains et pléistocènes. Uniquement dans les zones d'épandage des oueds tributaires d'al Kalbiyya, la tendance est à la superposition. Les dépôts ne présentent pas de traces d'hydromorphie et d'évolution pédologique. Localement, des lits pluri-centimétriques de sables fins éoliens et des contacts ravinants intra-séquentielles ont été observés (*cf.*, Coupe CmG-1 et Pl., 8). **Vers le Ve siècle, une incision majeure est intervenue**. Elle a dégagé **la haute terrasse et les cônes-terrasse historiques**. Localement, dans les zones d'épandage de certains oueds, un dépôt corrélatif est responsable de **l'édification et de l'aggradation alluviale des cônes en trompettes** (cours aval de l'oued Lahmar).

II-1-4- Une deuxième phase de remblaiement suivi de l'incision des lits fluviaux et l'activation des processus éolien

Dès environ le VIe siècle, le système fluvial a connu **une deuxième phase de remblaiement historique des talwegs**. Une nappe alluviale et colluvio-alluviale est mise en place. Elle est moins puissante que les accumulations qui lui sont antérieures (**1-2,5 m** ; *cf.*, les coupes CaS, CaSB-3, CmS-2, CmG, CmLG-2). Pourtant, elle a une forte fréquence spatiale à l'échelle régionale et celle de la Tunisie centrale (Boujelben, 2002 ; Boujarra et *al.*, 2006 ; Zerai, 2006 ; Ben Jmaa, 2008 ; Bkhairi et Karray, 2008). Elle constitue les dépôts de la basse terrasse historique (QH3c). Elle s'emboîte dans les dépôts de la terrasse holocène préromaine et dans la haute terrasse et les cônes d'épandage historiques. **Son âge s'échelonne sur une longue période, couvrant l'Antiquité tardive et l'époque Médiéval**.

L'accumulation se développe aux confluences des affluents et dans les cours moyens des oueds. Le dépôt est grossier intercalé de lits et de lentilles aux dragées de quartz, aux graviers, cailloux et galets calcaires et aux tessons de poterie, surtout à l'aval des sites antiques dominants les berges. Il montre des contacts ravinant qui témoignent une série de ruptures de fréquence et d'amplitude variables.

Une importante incision postmédiévale suit la phase de remblaiement et **dégage la basse terrasse** qui atteint localement 3 m de hauteur. Durant la période moderne, on assiste à des fluctuations morphogéniques et à l'activation des processus éoliens. Un voile éolien, épais moins de 50 cm, recouvre l'accumulation de la basse terrasse (*cf.*, la coupe CaMR).

II-1-5- Une troisième phase modeste de remblaiement et d'incision de talwegs

Une période de remblaiement détritique des talwegs, plus modeste, a succédé à la mise en place du voile éolien de la période moderne et a continué **durant le Subactuel**. Une accumulation très peu développée, épaisse de **0,7 à 1,2 m**, a marqué les lobes convexes des méandres. Le matériel alluvial est grossier. La nappe sédimentaire est principalement composée de sables et de sables limoneux lités, parfois intercalés de lits fins d'argiles et/ou de lits et des lentilles de graviers et de cailloux calcaires. A terme, **l'alluvionnement est rapidement interrompu par une phase d'incision**. **Une banquette d'accumulation est localement dégagée** dans les cours moyens et avals des oueds. Dans le cours moyen de

l'oued Lahmar-al Ghuirga, la banquette est d'érosion et est taillée dans les dépôts mio-pliocènes (*cf.*, Pl.11.1).

II-1-6- Le comblement récent du fond des cuvettes littorale et continentale et les modelés en voie d'édification dans le système fluvial

Aujourd'hui et à l'occasion des crues exceptionnelles, les charges solides des oueds allogènes et celles de l'oued al Manfas as-Sod et d'al Mjinin sont variables, mais parfois énormes. Les fonds d'al Kalbiyya et Halq al Minjil connaissent un exhaussement important. A l'occasion des crues de 1969, al Kalbiyya a reçu 100 à 150 millions de mètre cube de sédiments (Belkhodja, 1972). **Entre 1969 et 1978** et après les crues exceptionnelles de l'autonome 1969 et du printemps 1973, elle a connu **un puissant alluvionnement**, évalué entre 50 et 100 cm, soit **un relèvement moyen de 4,2 cm/an** (Karray, 1990b).

Les apports solides moyens annuels dans Halq al Minjil, sont évalués entre 70.10^3 et 95.10^3 tonnes, dont les 2/3 sont charriés par l'oued al Manfas as-Sod. On estime un **colmatage fluviatile de 2,36 à 3,26 mm/an** (APAL, 2002). A l'occasion de la crue isolée de 1969, les apports terrigènes de l'oued al Manfas as-Sod ont largement transformé le milieu lagunaire méridional. Halq al Minjil a hérité d'**un cône deltaïque d'environ 6 km^2 de superficie** et de plusieurs millions de m^3 de matériaux accumulés (Barrot, 1972b ; Boujelben, 2002). Aujourd'hui, dans le système fluvial, le remblaiement se produit en alternance avec incision et déflation éolienne. **Des modelés variés** tant par leur nature que par leur origine **sont en cours de formation**. Les cours moyens et aval des oueds exposent une banquette et un voile et placage éolien fonctionnels (Annexe 3).

II-2- Morphogenèse et dynamiques environnementales

II-2-1- Une morphogenèse active pendant l'époque romaine : entre le contrôle climatique et les causes anthropiques

II-2-1-1- Une morphogenèse active

La période romaine a connu **la phase suprême d'alluvionnement** dans les fonds des vallées et les zones d'épandage. Les nappes alluviales et colluvio-alluviales sont dilatées atteignant 2,2 m à plus de 7 m. Elles sont **la contrepartie d'une érosion exercée durant environ six siècles**. Elles marquent l'augmentation des apports sédimentaires dans le bassin et l'accroissement de la charge solide des oueds combinés à des écoulements intermittents mais actifs et compétents. On estime **un rythme d'aggradation d'environ 3,7 à 12 mm/an**. Il exprime une vitesse de sédimentation relativement accélérée par apport à celle des périodes holocènes précédentes. Les disparités spatio-temporelles des caractéristiques morphosédimentaires de l'accumulation de la haute terrasse résultent de la différence des contextes locaux et de la déstabilisation des conditions et des processus morphodynamiques. Le remblaiement détritique enregistre également des ruptures. Il est entrecoupé d'**épisodes d'activité éolienne**, vraisemblablement courts ou de faible intensité. Aussi, **des contacts ravinants** séparent localement les nappes sédimentaires. Ils **expriment des amorces incisions/érosions et l'inversion des tendances morphogéniques**.

Les épaisses et fréquentes accumulations datées de la période romaine sont un fait avéré en Tunisie (Hamza, 1987 ; Bourgou et Oueslati, 1987 ; Ballais, 1991; Bourgou et Oueslati, 1991 ; Bourgou, 1993 ; Karray, 1993 ; Oueslati, 1995 ; Brahim, 2001 ; Boujelben, 2002 ; Faust *et al.*, 2004 ; Brahim, 2006 ; Boujarra *et al.*, 2006 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013). Leur présence a posé le problème de leur origine, climatique ou anthropique. Certains chercheurs les ont qualifié de remblaiement d'origine principalement anthropique sans que le rôle du climat soit écarté (Hamza, 1987 ; Bourgou, 1993 ; Oueslati, 1995 ; Brahim, 2006 ;). D'autres, ont privilégié le facteur climatique et

relativisé le rôle de l'anthropisation (Faust *et al.*, 2004 ; Zerai, 2006 ;). A l'échelle de l'hydrosystème, l'interprétation des épais et rapides remblaiements permet de penser aux rôles des paramètres tectono-eustatiques, de l'anthropisation et du climat dans la morphogenèse.

II-2-1-2- Le contrôle climatique de la morphogenèse

La phase principale de remblaiement historique traduit, au rythme méditerranéen semi-aride, l'alternance des périodes de déficit d'écoulement et de sécheresse avec celles de forts débits et d'abondance hydrologique. Des textes historiques et des documents archéologiques décrivent **un climat qui ne diffère pas de ce qu'il est aujourd'hui** (Tertullien, saint-Cyprien, saint-Augustin, Corippus, *in* Gsell, 1913). La saison estivale est sèche et chaude. La sécheresse sévit parfois toute l'année ou se prolonge pendant plusieurs années. Les pluies sont irrégulières et des fois torrentielles.

Au début de l'année 46 av. J.-C., l'armée de César, campant dans la région de Sousse, fut soudainement surprise pendant la nuit par un orage de grêle et de pluie torrentielle (Gsell, 1913). En 128, le biographe d'Hadrien décrivait l'arrivée des pluies après cinq ans de sécheresse. Vers 202, Tertullien mentionnait que, sous le gouvernement d'Hilarianus, il n'y a pas de récoltes. Il parlait des pluies de l'an 211, qui avaient été un vrai déluge (Gsell, 1913). Comme il arrive encore de notre temps, il y avait des années sèches et humides (Hamza, 1987, 1988). Néanmoins, des arguments ont été évoqués en faveur d'une occurrence ou ambiance humide. Les textes historiques ont mentionné l'existence des éléphants, entre le IVe s. av. J.-C. et le Ve s. ap. J.-C., comme preuve d'un changement climatique (Hannon, Hérodote, *in* Gsell, 1913), malgré leur disparition qui n'a pas eu forcément pour cause une modification du climat (Gsell, 1913).

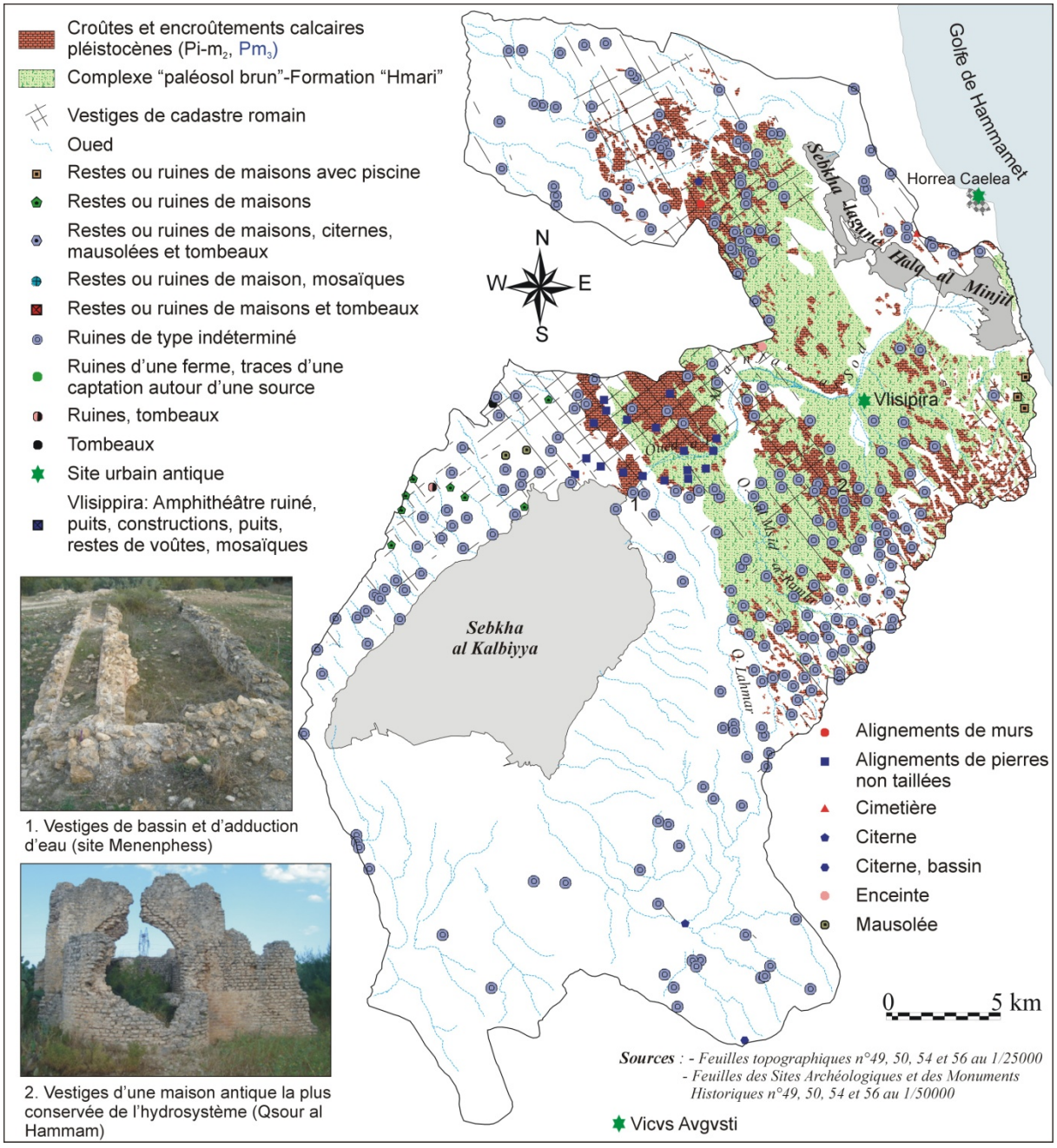
A l'exutoire de la sebkha al Kalbiyya, le site romain Menenphess (Despois, 1955), montre une richesse en infrastructure hydraulique (bassins, citernes, adductions d'eau) et le développement dans certaines adductions de travertins calcaires épais de 10 à 15 cm (Karray, 1993). Ce dernier auteur suppose une alimentation en eau continue et l'extension d'un lac pérenne durant la période I^{e} s. av. J.-C. et le IVe s. ap. J.-C. Néanmoins, et selon le même auteur, la présence des témoins de travaux de réfections et de renforcements dans différents édifices (contreforts de soutènements, murs additifs,…) explique le caractère perturbé du régime lacustre par des crues et des déversements périlleux. Ailleurs en Tunisie, **l'hypothèse d'une ambiance, récurrence ou pulsation humide ou encore d'une courte phase humide ou d'une oscillation climatique mineure est formulée pour la période romaine** (Bourgou et Oueslati, 1987 ; Hamza, 1987 ; Ballais, 1991 ; Oueslati, 1993 ; Bourgou, 1993 ; Faust *et al.*, 2004 ; Boujarra *et al.*, 2006 ; Brahim, 2006 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ; Bkhairi, 2013).

II-2-1-3- L'emprise de la société romaine sur les milieux

Aux forçages climatiques s'ajoutent l'impact de la société romaine sur le milieu naturel à travers l'accroissement de la population et ses besoins et le développement de la culture céréalière puis de l'arboriculture. Le Byzacium, fort de ces potentialités, a connu une occupation romaine clairement plus prononcée puisqu'il sera désormais investi aussi bien dans sa partie littorale que dans l'arrière-pays (Boujarra et Mrabet, 1999 ; Ben Baaziz, 1999 ; Mrabet, 1999).

L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil contient de nombreux vestiges de construction et plusieurs champs de tessons de céramique romains. L'analyse de la répartition spatiale, de la densité et du type du fonctionnement des sites dans leurs rapports avec les composantes environnementales, permet d'évaluer leur impact sur le

milieu. **L'hydrosystème dénombre plus de 703 sites ruraux** dont la plupart occupe une superficie de 1 à 2 ha. Il s'agit « d'une région d'une grande propriété et d'une concentration d'hameaux et de bourgs » (Ben Baaziz, 1999). **Quant aux sites urbains**, l'hydrosystème présente un seul toponyme antique : **Vlisipira** (Hanshir Zembra/Sidi Bou Ali) et pas loin à Hirgla et Sidi el Heni : **Horrea Caelea et Vicvs Avgvsti** (Fig. 106).



1. Vestiges de bassin et d'adduction d'eau (site Menenphess)

2. Vestiges d'une maison antique la plus conservée de l'hydrosystème (Qsour al Hammam)

Fig. 106 : Cadastration romaine, types et répartition géographique de vestiges et de monuments historiques dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

Les modes de construction sont variés en fonction de la nature des formations superficielles disponibles. Ils sont en terre battue, en pierres naturelles et en pierres de taille. **Les sites avec des constructions en dur dominent** dans le bassin de l'oued al Manfas as-Sod. La feuille des Sites Archéologiques et des Monuments Historiques de Sidi Bou Ali totalise 237 sites (Ben Baaziz, 1999). **Les croûtes calcaires pléistocènes et les affleurements grésifiés tyrrhéniens et oligocènes, sont exploités** dans plusieurs carrières

artisanales, mettant à nu les formations meubles sous-jacentes. Certainement l'étendue des affleurements encroûtés était plus importante. Quant à la mobilisation et la maîtrise des eaux, **les installations hydrauliques apparaissent comme l'une des composantes principales des établissements ruraux** de l'hydrosystème (bassins, citernes, puits). Les vestiges d'aqueducs, de barrages ou de canaux d'irrigation font défaut. Ils n'ont peut-être pas résister à la destruction. Leur absence ainsi que la présence de nombreux puits peuvent évoquer le problème de manque d'eau et de sécheresse et le recours aux nappes phréatiques abondantes.

L'hydrosystème a connu une mise en valeur générale des terres. Les trous de plantation antique ont été observés dans les paléosols brun et « *Hmari* ». Il semble y avoir une certaine corrélation entre la répartition géographique des sites et l'extension spatiale des terres les plus fertiles. Les traces de centuriations ne manquaient pas non plus dans des régions moins propices à l'activité agricole, où affleurent largement les croûtes calcaires surtout à Hanshirs al Hammam, al Fosquiyya et al Krari. **L'agriculture céréalière et arboricole était florissante**. Pour des raisons politiques et pour faire face à des famines et des émeutes, les romains ont dû développer la culture du blé (Hamza, 1987, 1988).

La présence des traces de fours de poterie et à chaux et des thermes (16 sur la feuille de Sidi Bou Ali ; Ben Baaziz, 1999), démontre l'importance du combustible sous forme de bois. Ce produit de chauffage ne peut que provenir d'**une arboriculture prospère**, dont « les produits de la taille seraient la fourniture principale en bois de chauffage » (Ben Baaziz, 1999). Le nombre important d'huileries et de contrepoids certifie notamment **le développement de l'oléiculture et la présence d'une forêt d'oliviers**. Le choix de cette culture, fort peu exigeante en eau, a transformé l'hydrosystème et le Sahel en général en de riches campagnes (Gsell, 1913 ; Despois, 1951 ; Hamza, 1987).

La forte emprise agricole a évidemment commencé par le défrichement de la végétation naturelle pour procurer des terres cultivables. Despois (1951) affirme que pour le Sahel et les Basses Steppes « l'époque romaine a certainement été beaucoup plus redoutable au tapis végétal que les temps numides ». Qui plus est, des mesures législatives ont incité l'exploitation excessive des forêts du relief atlasique (Carter et Dale, 1973 ; *in* Hamza, 1987). A cet égard, le défrichement et la forte emprise ont eu des effets sur les paramètres climatiques (humidité, vents) et le régime érosif, en rendant plus rapide et funeste le ruissellement. **Avec les romains, l'hydrosystème a connu l'apparition des premières expressions d'une érosion anthropique vigoureuse**. Vers 250 ap. J. C., Saint-Cyprien devient pessimiste et s'adresse au proconsul d'Afrique Demetrainus : « vous devez savoir que le monde vieillit et décline ». Néanmoins, **la lutte antiérosive opiniâtre des romains, n'a pas laissé ce « déclin » aboutir**. L'érosion a été contrariée par l'aménagement des terres (Poncet, 1961 ; Gsell, 1913 ; Hamza, 1987 ; Zerai, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008 ;..). Les fonds de vallées du Sahel sont aménagés en banquettes et plantés en oliviers (Tixeront, 1951 ; *in* Hamza, 1987).

II-2-1-5- En guise de conclusion

Le climat n'a pas changé depuis l'époque romaine. Mais, ceci n'exclut pas **une augmentation des pluies pendant des années**. On peut également penser à **une relative régularité de la pluviométrie**. Les pluies plus fréquentes ne devaient pas s'étendre beaucoup au-delà des régions montagneuses (Ben Tiba, 1995 ; Lebreton et Jaouadi, 2013).

Les nappes alluviales et colluvio-alluviales montrent une série de ruptures accompagnées de changements de faciès et enregistrent des inversions de tendances morphogéniques. La société romaine a fait subir aux milieux des transformations mais n'a pas modifié la tendance générale à la croissance de l'édifice et à la mise en place des

accumulations hydriques. **A travers les différents arguments, l'Homme n'a fait qu'accélérer la morphogenèse** et intervient autant comme **un catalyseur dans la phase de préparation du matériel en place**. Le rapport entre l'utilisation agricole des sols et l'érosion des pentes est tentant. La prise en charge des sédiments et leur mise en place n'ont pu s'effectuer que par des écoulements intermittents dont les plus compétents et torrentiels sont engendrés par des événements hydro-pluviométriques extrêmes.

II-2-2- La crise érosive post-romaine : incision majeure et ramification du chevelu hydrographique, érosion marine et dégradation environnementale

Une deuxième crise érosive holocène s'est déclenchée **au Ve siècle environ**. Elle s'exprime par la conjonction d'une incision généralisée, d'une ramification du chevelu hydrographique, d'une érosion marine marquée et d'une dégradation des environnements.

II-2-2-1- Incision majeure et ramification du chevelu hydrographique

Depuis le début de l'Holocène, ce n'est qu'au lendemain de la présence romaine, que le système fluvial a connu **une incision majeure et généralisée** des talwegs, des cônes d'épandage et des plaines. Elle est surprenante par son importance, **atteignant 3 à plus de 10 m** dans les bassins tributaires d'al Kalbiyya. Elle est responsable du **dégagement de la haute terrasse et des cônes-terrasses historiques (QH3b)**. Dans le même intervalle de temps, **le réseau hydrographique est devenu plus ramifié**. Un véritable chevelu de ravins s'est développé sur les versants et sur les rives des principaux axes d'écoulement. Il explique le développement de l'érosion ravinante, variable dans l'espace, dans les formations holocènes et surtout dans l'accumulation de la haute terrasse historique. **Une occurrence d'écoulements concentrés et peu chargés** a pu permettre cette érosion. Les ravins ouverts sont encaissés d'au moins 3 m et sont ultérieurement colmatés par les dépôts de la basse terrasse historique (QH3c).

II-2-2-2- Dégradation environnementale

Cette phase d'incision majeure et de ramification du chevelu hydrographique peut **être expliquée par deux facteurs**. D'une part, elle est contemporaine de la période du déclin des romains en Tunisie. Elle coïncide avec **la forte déprise rurale qu'a connu la Tunisie à l'Antiquité tardive**, sous la domination vandale et puis avec l'arrivée des byzantins (Decret et Fantar 1981 ; Mrabet, 1999). L'inversion des tendances morphogéniques est liée à l'abandon des terroirs et des pratiques agricoles romaines et le début du nomadisme, depuis environ 439 ap. J.C et jusqu'au milieu du VIe siècle. Dans le Sahel, « Quatre-vingts pour cent des habitats ont été abandonnés moins de deux siècles après leur fondation » dans un contexte de restructuration du système de peuplement et d'exploitation (Boujarra et Mrabet, 1999). L'absence d'une véritable mise culturale des sols et leur reconquête par la végétation naturelle ont pu contribuer à la diminution des charges solides des écoulements concentrés et au changement du rapport débit/charge. La cause anthropique de cette phase et sa concordance avec les crises socio-économiques de la Tunisie post-romaine ont été signalées par plusieurs chercheurs (Brun et Rouvillois-Brigol, 1984 ; Hamza, 1987 ; Bourgou, 1993 ; Faust et *al*., 2004 ; Zerai, 2006…).

D'autre part, la dynamique majeure de l'entaille linéaire semble aussi inféodée aux **variations des paramètres climatiques**. Dans le même intervalle de temps, **une tendance vers l'assèchement du climat** est ainsi soulignée (Hamza, 1987 ; Bourgou, 1993, Zerai, 2006 ; Boujarra et *al.*, 2006 ; Bkhairi et Karray, 2008…). A partir des Ve et VIe siècles, une évolution climatique dans le sens de l'aridité a pu changer le paysage botanique d'une façon notable, entraînant l'extension des steppes d'armoise dans le centre tunisien (Brun et Rouvillois-Brigol, 1984). Une **succession d'événements hydroclimatiques**

paroxysmiques et de pluies orageuses, rapides et agressives, a pu perturber les régimes et favoriser la concentration du ruissellement. **Un bilan s'établit en faveur d'une instabilité modérée**. Les sédiments corrélatifs à cette crise érosive sont responsables du remplissage fluviatile des cuvettes d'al Kalbiyya et Halq al Minjil, de l'aggradation alluviale des plaines et de l'édification des cônes d'épandage en trompettes et de leur progradation.

II-2-2-3- Elévation du niveau marin et érosion marine

Le retrait de la ligne de rivage et l'avancé de la mer sont prouvés par la situation de certains vestiges romains, en partie ou entièrement démolis par l'érosion marine. Tout le long du cordon littoral séparant la sebkha-lagune Halq al Minjil du large, des traces de murs déchaussés, des trous de plantation antiques et des amas de pierres calcinés d'anciens fours à chaux sont visibles au sommet de la falaise rongée par l'érosion.

A environ 200 m au nord du pont de Halq al Minjil, une carrière romaine d'extraction de grès tyrrhénien est submergée par la marée de vive-eau. Des citernes, des constructions et une bretelle de la voie littorale romaine sont également démantelées et en partie disparues par l'érosion marine (Pl. 14). Plus au nord, Horrea Caelia, l'actuel village de Hirgla, est un site à vocation d'entrepôt. Il est construit bien en deçà de la ligne de rivage. Le niveau marin était à quelques décimètres au-dessous de l'Actuel (Paskoff et Sanlaville, 1983 ; Ballais *et al.*, 1988). Le site implique l'existence d'établissements portuaires (Slim *et al.*, 2004) qui sont aujourd'hui sous une tranche d'eau de quelques mètres d'épaisseur (Boujarra et Mrabet, 1999).

Ces indices archéologiques témoignent d'une élévation relative du niveau marin depuis l'Antiquité tardive. Au vu des sites antiques non ultérieurement réoccupés par les musulmans, il ne subsiste pas de doute quant au **recul du trait de la côte depuis la fin de la période romaine**. Le nombre et la taille des sites d'habitat médiéval reconnus dans le littoral de Hirgla peuvent l'attester (Boujerra et Mrabet, 1999). Qui plus est, au sud la sebkha lagune Halq al Minjil et tout le long de la bande littorale de Shat Maryam, **une dune bordière jouxte le rivage actuel**. Elle masque des installations antiques. Elle est séparée de la dune préromaine par un fond interdunaire (Pl. 14.6). **Elle est d'âge post-antique et sa mise en place fut commencée entre le IIIe et le Ve s. ap. J.-C.** (Boujarra et Mrabet, 1999 ; Boujarra *et al.*, 2006).

II-2-2-4- Dégradation des conditions morphopédologiques

Les changements de la dynamique fluviatile, l'inversion des tendances morphogéniques et l'assèchement du climat ont eu pour conséquence **la dégradation des conditions morphopédologiques**. Localement, au nord de la sebkha al Kalbiyya dans les Hanschir al Hammam et Mshimsh, **le paléosol brun isohumique est recouvert par des sables fins rougeâtres éoliens, dits « *Hmour* »** (Boujelben, 2002). En outre, dans le plateau de Sidi Bou Ali-Kandar, à Hanshir al Krari et Dar Bel Ouar, l'érosion aréolaire a entraîné le remplacement des sols rendzinique brun-rouge et brun isohumique sur croûte par des lithosols (Boujarra et Mrabet, 1999). Dans cette partie de l'hydrosystème, les traces de cadastration et les trous de plantation antiques rendent compte de l'ancienne exploitation de ces sols. De même, les marges d'al Kalbiyya et la sebkha-lagune Halq al Minjil, sont touchées par la centuriation (Karray, 1993 ; Boujarra et Mrabet, 1999). Ces données laissent conclure qu'à l'Antiquité, l'espace cultivé était absolument plus étendu à celui qui fut exploité postérieurement. Elles traduisent également **le repli de l'agriculture et le développement de l'activité pastorale et de nomadisme depuis l'Antiquité tardive** (Boujarra et Mrabet, 1999).



Pl. 14 : En côtoyant le cordon tyrrhénien de Hirgla et la bonde littorale de Shat Maryam, des vestiges romains et une dune bordière post-antique témoignent du retrait de la ligne de rivage

Légende *: 1 : Vestiges d'une citerne antique démantelée par l'érosion marine ; 2 : Mur déchaussé et vestiges d'une structure bâtie au sommet de la falaise en recul ; 3 : Traces d'un four à chaux tronqué par le front de la falaise ; 4 : Bretelle de la voie littorale romaine en partie disparue par l'érosion marine ; 5 : Carrière romaine d'extraction de grès tyrrhénien perpétuellement submergée à marée haute ; 6 : Une dune bordière post-antique jouxte le rivage actuel, le long de la bande littorale de Shat Maryam.*

II-2-3- Le moyen-âge : un bilan érosion-alluvionnement généralement faible et une période d'interférence des forçages climatique et anthropique

Des remblaiements grossiers de la deuxième phase historique d'accumulation succèdent à la phase post-romaine d'incision des talwegs et des cônes. Ils **correspondent au dépôt de la basse terrasse historique (QH3c)**. Ils ont éventuellement **débuté vers le VIIe siècle et se sont plausiblement achevés à la transition Moyen Âge-Temps modernes (XVIe siècle**). Au cours de cette longue période, l'alluvionnement est lent. Les nappes alluviales et colluvio-alluviales observables sont épaisses de 1,7 m en moyenne (*cf.*,

les coupes CmS-2, GmLG-2, CmG, CasSB-3). Les sédiments grossiers proviennent en grande partie d'une érosion développée sur des pentes et des versants vraisemblablement dénudés et sur les sites archéologiques dominant les berges. Leur prise en charge s'est effectuée par des écoulements intermittents, compétents voire torrentiels, générés principalement pendant des crues exceptionnelles. L'érosion et l'alluvionnement de la période médiévale sont-ils liés à l'action des sociétés arabes ou à l'augmentation de la fréquence des événements hydro-pluviométriques extrêmes?

II-2-3-1- L'instabilité de l'histoire agro-pastorale d'Ifriqiya

Dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil, les sites arabo-musulmans reconnus sont moins nombreux que les sites romains. Les historiens sont unanimes pour affirmer que **l'histoire agro-pastorale d'Ifriqiya était instable, au Moyen-Âge**. Des périodes de prospérité agricole, de développement et d'extension des cultures ont alterné avec des périodes d'anarchie, de repli cultural, de reprise et d'extension du nomadisme. Aux périodes aghlabide (800-909), fâtimide (909-972) et almohade (1159-1228), l'économie était florissante. Un essor a marqué également la céréaliculture et l'oléiculture (Lézine, 1971 ; Bonte *et al.*, 1991 ; Thiry, 1995 ; Mansouri, 1997…). Depuis le Ve siècle et notamment vers XIe et XIIe siècles, « la suprématie » de l'olivier est établie dans les diagrammes polliniques du centre tunisien (Brun et Rouvillois-Brigol, 1984). Les diverses périodes de prospérité agricole et d'exploitation des sols ont pu certainement nourrir les remblaiements. Quand les Hilaliens sont arrivés en 1048, ils ont détruit les villes et ruiné les compagnes en dévastant les cultures et détruisant les systèmes d'irrigation (Decret, 2003 ; Brun et Rouvillois-Brigol, 1984). Mais ils n'ont pas entraîné la dévastation systématique des oliveraies (Brun et Rouvillois-Brigol, 1984). Ils ont permis aux vastes domaines agricoles de regagner la Steppe (Decret, 2003). L'économie d'Ifriqiya s'est orientée vers un mode d'exploitation pastoral (Mansouri, 1997). Au XIe siècle, l'activité anthropique, dans son sens strict d'exploitation du sol, n'était pas véritablement pesante. Mais, elle a eu certainement un impact certain sur la végétation naturelle.

II-2-3-2- Poursuite des tendances climatiques à l'aridification

La tendance climatique à l'aridification des Ve et VIe siècles s'est poursuivie durant le Moyen Âge, au moins jusqu'aux XIII-XIVe siècles. Une telle aridification explique l'extension des steppes d'armoise dans le Centre tunisien et a favorisé la progression du nomadisme à l'intérieur du pays (Brun et Rouvillois-Brigol, 1984). Des pluies irrégulières et insuffisantes ont obligé à irriguer (Mansouri, 1997). Trente-six famines ont marqué la période 648-1881, dont un peu plus de la moitié est due à la sécheresse. Ainsi, quinze disettes corrélables avec les années sèches ont frappé les Xe et XIe siècles (Bois, 1946 ; *in* Hamza, 1988).

El Bekri (*in* Hamza, 1988) raconte au XIe siècle le caractère désastreux du débordement hivernal d'un oued de la région kairouanaise dévastant les villages des alentours. Il rapporte qu'en 921, des pluies violentes et torrentielles ont détruit des constructions à Rakkada et à Kairouan. Ces données permettent d'admettre la contemporanéité de l'invasion nomade des Beni Hilal et Beni Solaïm à la dégradation des environnements et à l'accentuation de l'aridité. Toutefois, pour expliquer la formation d'un sol dans la Medjerda vers 0,5 ka cal BP (Faust *et al.*, 2004) ou la genèse des remblaiements des terrasses historiques secondaire ou intermédiaire dans les bassins versants du Kébir-Miliane et de Kasserine (Bourgou, 1993 ; Bkhairi et Karray, 2008), des chercheurs ont supposé une courte période relativement humide, une pulsation climatique humide ou une récurrence pluviale au Moyen-Âge. Dans le bassin versant de l'oued Sbeitla, Zerai (2006) précise une courte phase humide et d'atténuation de la morphogenèse vers le IX-Xe siècle,

une période sèche et la recrudescence de la morphogenèse pendant l'invasion nomade au XIe siècle et enfin une amélioration des conditions climatiques vers la fin du Moyen Âge.

Dans l'hydrosystème, il y a lieu d'**établir un lien entre la morphogenèse et les périodes de paix et de stabilité** (IXe-X^{e} et XIIe-XIIIe siècles : mise en valeur généralisée du territoire), **de révoltes et d'invasions** (VIIe-VIIIe et XIe siècles : nomadisme, steppisation, lente dégradation anthropique des sols). **Les remblaiements grossiers** de la deuxième phase historique d'accumulation sont en grande partie **l'expression de l'occurrence d'événements hydro-pluviométriques extrêmes** du climat semi-aride (crues et orages automnaux et printaniers violents).

II-2-4- Recrudescence de l'activité éolienne durant la période moderne

A l'époque moderne (XVIe siècle-première moitié du XIXe siècle), **la tendance générale est de nouveau à l'incision linéaire**. Elle est responsable du **dégagement de la basse terrasse historique (QH3c)**. L'incision est moins notable que celle du Ve-VIe siècle et dépasse rarement les 3 m. Elle atteint parfois les formations mio-pliocènes et pléistocènes.

Au début et au cours du XVIe siècle, **Ifriqiya est en pleine décadence et crises politiques**. Elle a été énormément affectée par les épidémies de peste « donnant l'impression d'un pays vide démographiquement » (Boubaker, 1995 ; 2010). **Depuis 1574, la Tunisie est une régence ottomane**. Sous le règne des deys, des beys mouradites (1613-1702) puis husseinites (1705-1757), des grands moments conjoncturels (pouvoir central très fort, développement du commerce, d'une agriculture modeste et d'exportation des produits agricoles,…) ont fait régner une relative stabilité : 1605-1640/1655-1705/1762-1817 (Hamza, 1987 ; Cherfi, 1995 ; Boubaker, 2003, 2010 ; Guellouz *et al.*, 2010).

Ces conditions ainsi que l'amélioration de la sédentarisation de la population et l'affirmation du Sahel oléicole, **à partir du milieu du XVIIe siècle**, n'ont eu que **des effets positifs sur le milieu naturel** (Camps, 1980 ; Hamza, 1987 ; Boubaker, 2003). Il est probable que cette situation a favorisé la stabilité des pentes. Elle explique le matériel limité mis à la disposition de l'agent hydrique, dont la plupart des sédiments disponibles à charrier est épuisée par la phase précédente d'érosion et d'alluvionnement. L'écoulement dépourvu de charge solide, a dépensé son énergie en incisant les chenaux. **L'incision linéaire des talwegs et des cônes résulte vraisemblablement du rôle conjoint de deux facteurs.** Le premier est **le climat** qui a favorisé des écoulements actifs et rapides, engendrés lors des événements météorologiques exceptionnels. Le second est **la société moderne** qui a réduit la charge solide des oueds.

La recrudescence de l'activité éolienne s'est traduite par le recouvrement du sommet de l'accumulation de la basse terrasse par **un voile éolien épais de 50 cm** en moyenne. Des sables et des sables limoneux sont principalement remaniés sur les fonds et les zones d'épandage des oueds. Ils expliquent l'efficacité morphogénique des vents **pendant les épisodes prolongés et/ou d'accentuation de la sècheresse, de la diminution des précipitations et de la perturbation d'écoulements et d'environnement**. Localement le voile est raviné par un dépôt colluvial et/ou de débordement. La mise en place du voile et du dépôt fluviatile sus-jacent cessent à une date reste indéterminé, mais au plus tard au XIXe siècle. Elle est probablement conditionnée par **une courte ambiance sèche**. Elle est corrélable avec la dernière phase d'éolisation déclenchée il y a environ trois siècles dans le bassin versant de l'oued Sbeïtla et débuté vraisemblablement avec la dynastie des Husseinites (Zerai, 2006).

II-2-5- L'hydrosystème depuis environ la deuxième moitié du XIXe siècle : dégradation des environnements, exacerbation des processus morphodynamiques et intensification de l'érosion anthropique

Le déclenchement de **la troisième phase historique de l'accumulation remonte à 100-150 ans environ**. Des remblaiements grossiers de sables épais de 1,25 m au maximum ont comblé les talwegs principaux surtout de la rive est de l'oued al Manfas as-Sod. On estime **un rythme de comblement de 10 à 20 mm/an**. L'alluvionnement a été rapidement interrompu par **une phase d'incision qui date au plus tard au début du XXe siècle**. Elle **a dégagé la banquette subactuelle**. Tout au long du XIXe siècle, la Tunisie a connu périodiquement des années ou des périodes « noires » liées à des difficultés économiques, des crises climatiques, des révoltes et de troubles politiques. Dans les compagnes, l'insécurité, la fiscalité trop lourde, l'archaïsme des techniques agricoles, la structure foncière sont autant de facteurs responsables du déclin de l'agriculture. Elles ont aggravé l'impact des sécheresses, des mauvaises récoltes et des disettes, parfois même des famines et des épidémies diverses (Tabutin *et al.*, 2001 ; Guellouz *et al.*, 2010). Il est vraisemblable que ces crises ont eu des influences néfastes sur le milieu rural qui connaît des déséquilibres multiples d'ordre socio-économique et morphogénétique (Hamza, 1987). Les processus érosifs se sont trouvés renforcés par les actions anthropiques et ont abouti à la mise en place de la banquette.

Depuis le XXe siècle, **des dépôts de nature et d'origine différentes ont vu le jour** pour élargir la gamme des archives sédimentaires holocènes à actuelles. Le remplissage alluvionnaire des enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil et l'aggradation alluviale et colluvio-alluviale des talwegs et des plaines sont concomitants ou entrecoupés par des phases d'incision et d'action éolienne. **Les dépôts prennent la forme de plusieurs modelés en voie d'édification** (cône d'épandage, cône deltaïque, plaine d'accumulation, banquette, nebkas, voile et placage éoliens ; Annexe 3 ; Karray, 1993 ; Boujelben, 2002).

CONCLUSION DU CHAPITRE

A l'Holocène supérieur, l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil a hérité d'une variété d'archives sédimentaires et de modelés, surtout d'âge historique. Il a connu le développement des systèmes d'exploitation et d'occupation des sols et une emprise croissante des hommes sur les milieux, depuis la période punique. De telles données soulignent la complexité du fonctionnement de cet hydrosystème et mettent en évidence des fluctuations multiples des environnements et de la morphogenèse. L'étude de l'évolution des interactions Homme/climat/érosion durant les quatre derniers millénaires a permis de distinguer deux phases chronologiques différentes. Elles sont distinctes par les rythmes et les modalités de la morphogenèse et par le poids des différents facteurs dans la mutation des milieux.

La première phase couvre la Protohistoire et la période historique phénicienne et punique. Al Kalbiyya a fonctionné en deux systèmes de sebkhas (SK_{IV} et SK_{II}) et en un système de lacs temporaires-sebkhas (SK_{III}). Halq al Minjil a évolué en système de sebkha-littorale (SH_{II}). Des constructions hydroéoliennes sont édifiées sur les bordures orientales des enclaves. Une première crise érosive (incision majeure, plus de 7m) succédant une phase de remblaiement protohistorique et de pédogenèse (formation/paléosol « *Hmari* ») a marqué le système fluvial. L'évolution est conditionnée par les fluctuations d'un climat semi-aride. Les activités agro-pastorales des sociétés néolithiques à puniques ont évolué. Mais leur impact sur les milieux demeure difficilement mesurable.

La seconde phase de l'Holocène supérieur s'étale de la période romaine à l'Actuel. Elle se distingue par l'ampleur et l'hétérogénéité des formes et des formations qui dominent depuis l'Antiquité tardive les paysages géomorphologiques et par une interaction complexe des facteurs différents de la morphogenèse. Al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de lacs temporaires-sebkhas et de sebkhas (SK_I). Les phénomènes d'endoréisme sont de plus en plus accentués. Halq al Minjil, toujours sous une influence continentale prépondérante, fonctionne en système de sebkha-lagune. L'évolution du système fluvial est marquée par une succession de quatre phases d'accumulation entrecoupées par quatre périodes d'incision linéaire des talwegs et des cônes d'épandage, dégageant successivement la haute et la basse terrasses et deux banquettes. Une deuxième crise morphogénétique holocène est mise en évidence au Ve s. ap. J.-C. Le climat ne diffère pas de ce qu'il est aujourd'hui. L'évolution géomorphologique est principalement régie par l'occurrence d'événements hydro-pluviométriques paroxysmiques, la recrudescence de l'activité éolienne et les forçages anthropiques en accélérant la morphogenèse. L'élévation du niveau marin relatif et la néotectonique n'ont joué qu'un rôle secondaire et localisé.

CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE

Pendant l'Holocène inférieur, al Kalbiyya a fonctionné en système de lacs temporaires et pérennes. Halq al Minjil a connu l'installation d'un système de sebkha-lagune. Le système fluvial a montré des tendances générales à l'alluvionnement et des rythmes faibles à modérés de la morphogenèse. Les récurrences d'événements dans l'hydrosystème sont généralement de grandes amplitudes. A partir de l'Holocène moyen, une instabilité environnementale et des changements successifs ont caractérisé le fonctionnement hydromorphologique et éolien de l'hydrosystème. Les récurrences sont devenues de faibles amplitudes. Pendant l'Holocène supérieur, le développement et la succession de plusieurs formations et modelés surtout d'âge historique soulignent la complexité du fonctionnement de cet hydrosystème. Ils mettent en évidence des fluctuations multiples des environnements et de la morphogenèse. Des nouvelles interactions Homme/climat/érosion sont mises en évidence durant les quatre derniers millénaires.

Durant l'Holocène inférieur et la première moitié de l'Holocène moyen, les facteurs de la morphogenèse et la mutation des milieux semblent uniquement inféodés aux variations des paramètres bioclimatiques. Les données palynologiques et morphosédimentaires précisent un environnement assez proche de l'Actuel et un type de climat semi-aride. Les variabilités climatiques se sont exprimées par l'alternance des phases d'humidification et d'aridification relatives. Elles expliquent une saisonnalité plus ou moins marquée, des changements dans la répartition saisonnière des pluies et des modifications de très faible intensité dans les moyennes annuelles des températures et de la pluviométrie. Mais, les pluies n'étaient pas forcément plus importantes que maintenant. Les différents indicateurs géorachéologiques, archéozoologiques et malacologiques, et en dépit de la faible représentativité des données disponibles, indiquent une faible emprise anthropique sur les milieux. Le comportement alimentaire des sociétés épipaléolithiques était lié à des pratiques prédatrices de chasse, pêche, collecte et cueillette.

Pendant la deuxième moitié de l'Holocène moyen et l'Holocène supérieur, les résultats d'analyses multiparamètres ont établi des changements rapides et des discontinuités des dynamiques morphosédimentaires et paléohydrologiques dans les deux enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Ils ont mis en évidence de profondes modifications des milieux et des paysages surtout dans les fonds de vallées et les plaines. L'accélération de la morphogenèse et la succession des crises érosives surtout depuis la période romaine, permettent de conclure au changement du poids des différents forçages morphogéniques et à l'emprise croissante des hommes sur les milieux.

Depuis environ 5000 BP, le climat a connu une accentuation de l'aridité. Des événements pluvio-hydrologiques paroxysmiques sont à l'origine du développement de l'érosion et d'alluvionnement dans le système fluvial. Ici, les taux de sédimentation ont varié entre 3 et 6 mm/an. Deux variations eustatiques positives et rapides (durant environ 600 années) ont marqué le littoral de Hirgla. Elles sont responsables de deux incursions marines dans le bassin de Halq al Minjil et d'une remontée relative du niveau marin de +71 cm à 4965±35 BP (SacA 12810 ; 5749-5604 cal BP/3800-3655 cal BC) et de +187 cm à 4365±50 BP (SacA 12811 ; 5054-4838 cal BP/3309-2889 cal BC). Une subsidence lente a contrôlé la variation des niveaux de base locaux et a répercuté le comportement hydro-morphodynamique des oueds tributaires des sebkhas. A partir du IIIème millénaire BC, la

palynologie a révélé les premiers indices d'emprise des sociétés néolithiques pratiquant des activités agro-pastorales.

Pendant la Protohistoire et la période phénicienne et punique, l'accélération de la morphogenèse et l'aboutissement à la première crise érosive très sévère (7 m d'encaissement) semblent avoir été conditionnés par une péjoration climatique et une récurrence des événements pluvio-hydrologique extrêmes. Les effets des activités agro-pastorales, des mutations socio-économiques et des modes d'occupation et d'utilisation du sol sur les milieux sont incontestables. Mais ils n'ont fait qu'exacerber les effets de l'érosion. Après 3874±201 BP et avant 3410±40 BP et à la fin de la protohistoire, l'hydrosystème a connu les environnements les mieux équilibrés. Le développement des paléosols brun et « Hmari » permet de souligner une amélioration des milieux, de l'atténuation de la morphogenèse à son minimum, du retour de conditions plus humides ou d'une meilleure répartition des précipitations et d'une végétation plus vigoureuse.

Depuis la période romaine, le fonctionnement de l'hydrosystème est de plus en plus complexe. Les deux phases majeures de remblaiements grossiers et d'incision (V^{e} et XVIe s. ap. J.-C. ; 3-10 m), la recrudescence de l'activité éolienne, les remplissages épais et hétérogènes des sebkhas et la mise en place de huit générations de dépôts hydriques et éoliens attestent une morphogenèse active. Le climat a montré une tendance générale à l'accentuation de l'aridification et une forte récurrence des événements météorologiques extrêmes. La morphogenèse reste contrôlée par la variabilité des facteurs du climat semi-aride marqué par l'alternance des périodes de déficit d'écoulements et de sécheresse avec celles de forts débits et d'abondance hydrologiques. A cela s'ajoute la dimension humaine et les forçages eustatiques. Avec les romains, l'hydrosystème a connu l'apparition des premières expressions d'une érosion vigoureuse, mais sans modification, durant les 2000 dernières années, des tendances morphogéniques générales. Une élévation du niveau marin depuis l'Antiquité tardive est mise en évidence par les différents indices archéologiques. A travers les différents arguments, on relativise le rôle de l'anthropisation et on privilège le facteur tectono-climatique. Malgré la multiplicité des indices, les arguments de terrain solides d'une activité néotectonique holocène bien marquée ne sont pas encore mis en évidence.

CONCLUSION GENERALE

La thèse s'est focalisée sur la sebkha al Kalbiyya, la sebkha-lagune Halq al Minjil et leur système fluvial immédiat. L'ensemble, hydrologiquement lié, forme un hydrosystème qui charge la partie aval d'un grand bassin hydrographique, drainant l'ensemble de la Tunisie centrale depuis les frontières tuniso-algériennes. Cet hydrosystème pose d'importants problèmes concernant l'évolution de son fonctionnement hydrologique, l'instabilité de la morphogenèse, les successions paléoenvironnementales et les changements paysagers durant l'Holocène.

L'objectif spécifique de la thèse est double : 1) reconstituer l'histoire hydro-morphosédimentaire d'anciens lacs et lagunes, évoluant aujourd'hui en sebkhas ; 2) comprendre l'ambigüité de la morphogenèse protohistorique et historique dans le système fluvial. La recherche est une contribution à la connaissance de l'évolution des dynamiques érosives, paysagères et environnementales, dans une région des marges nord du Sahel septentrional, en Tunisie centre-orientale.

Le travail a répondu à ces objectifs en quatre parties en déployant une approche pluridisciplinaire et multiscalaire d'analyse et d'observation.

On récapitule les principaux résultats relatifs aux archives pédosédimentaires et les modelés ainsi qu'à l'évolution de la morphodynamique et du fonctionnement hydrologique et éolien d'al Kalbiyya, de Halq al Minjil et de leur système fluvial immédiat (Annexe 4). On résume les successions morphogéniques et paléoenvironnementales en mettant l'accent sur les parallélismes chronologiques d'événements. On présente également quelques conclusions concernant l'évolution des rapports érosion/climat/homme dans l'hydrosystème durant l'Holocène.

I- Les remplissages sédimentaires des enclaves al Kalbiyya et Halq al Minjil : des stratigraphies intéressantes et des répartitions spatio-temporelles complexes de sédiments très hétérogènes

Durant l'Holocène, les deux enclaves d'al Kalbiyya et Halq al Minjil ont connu des fluctuations d'apports hydro-sédimentaires et l'évolution des remplissages, enregistrées dans des stratigraphies complexes et intéressantes de sédiments très hétérogènes.

L'examen lithoséquentiel haute résolution des sondages (trois carottes et quarante-quatre tarières à main), a permis l'établissement des logs lithostratigraphiques détaillés. Ils ont montré des changements verticaux parfois rapides de caractéristiques pédosédimentaires des remplissages. Sur les bordures est, nord et nord-est d'al Kalbiyya, les tarières à main ont recoupé, à des profondeurs variées, des niveaux à *Cerastoderma glaucum*. Deux niveaux fossilifères distincts ont été également reconnus dans le fond et sur les bordures de Halq al Minjil. Ils contiennent des *Cerastoderma glaucum*, des *Cerithium vulgatum* et des *Donax trunculus*.

Des analyses sédimentologiques, minéralogiques, géochimiques et micromorphologiques, complétées par une étude malacologique et six datations ^{14}C ont permis de bien caractériser les remblaiements, apprécier la provenance de la matière et expliquer les mécanismes et les contextes de la morphodynamique et de la pédogénèse. L'enclave d'al Kalbiyya est comblée de sédiments exclusivement continentaux, d'origine fluviatile et éolienne et d'une provenance proche et lointaine. A l'interface terre/mer, la

dépression littorale de Halq al Minjil est remplie d'une sédimentation de plus en plus complexe. Les sédiments sont d'origine fluviatile, marine, éolienne et mixte. On souligne que dans les fonds, les matériaux éoliens (agrégats, quartz) ont fourni des données exploitables mais sans intérêt spatio-stratigraphiques. Dans les deux cuvettes, la structure souvent laminaire, la répartition spatiale et l'organisation stratigraphique des dépôts ont expliqué des apports irréguliers et discontinus, une instabilité morphodynamique ainsi que la succession et la juxtaposition des conditions et des environnements différents de remplissage. Les sédiments ont été charriés par des écoulements et des flux marins à forte variabilité de compétence et de capacité de transport. Ils ont été déposés en milieux ombilicaux, fluviatiles, deltaïques et fluvio-deltaïques. L'évolution post-dépôt des sédiments est surtout de type « hydromorphique de surface » et puis « évaporatique ».

Sur chaque log litho-chronostratigraphique, les résultats d'analyses multiparamètres ont permis la distinction de quatre à douze ensembles de séquences successives et génétiquement liées, ainsi que leur regroupement en six grandes catégories de faciès sédimentaires. Les remplissages d'al Kalbiyya ont été attribué à des faciès fluvio-lacustre (FFL), fluvio-palu-lacustre (FPL), fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA), de colmatage vaseux (FCV), fluviatile de comblement aux lits grossiers-fins (FGF) et proximal colluvio-alluvial (FCA). Les remblaiements de Halq al Minjil ont été accordés à des faciès fluvio-marin(mixte) aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF), sulfato-carbonaté (FSC), mixte aux influences marines notables (FMM lagunaire (FL), « évaporatique » (FE), fluviatile ou d'épandage fluviatile (FF) et éolien (FEO). Chaque faciès explique la réponse d'une enclave à un période donnée à des changements significatifs et à des variations parfois cycliques des dynamiques et du contexte morpho-pédogénitique. Il définit la provenance de la matière, les processus sédimentaires et pédogéniques, le milieu de sédimentation et le fonctionnement hydromorphologique et/ou éolien de l'enclave.

II- Dynamiques sédimentaires et fonctionnement hydrologique complexes d'al Kalbiyya et Halq al Minjil durant l'Holocène

La reconstitution des différentes phases holocènes de sédimentation et d'évolution du fonctionnement hydrologique a constitué un enjeu important pour comprendre les paléodynamiques et les changements environnementaux. La corrélation spatio-temporelle des faciès sédimentaires est appuyée sur les résultats d'analyses multiparamètres, la présence des marqueurs bio-litho-chronostratigraphiques dans le sédiment (mollusques lagunaires et lacustres, « évaporites », aragonite, dolomite…) et sur la réalisation de datations au ^{14}C. Elle a permis l'établissement de deux échelles lithostratigraphiques de synthèse des enclaves littorale et continentale. Chaque échelle a montré la succession de quatorze unités litho-chronostratigraphiques, traduisant des changements importants de dynamiques et d'environnements. Les deux échelles ont précisé les différents stades du remplissage sédimentaire, la nature et les systèmes de fonctionnement hydrologique des sebkhas actuelles durant l'Holocène.

II-1- Dynamiques sédimentaires et évolution du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya

Durant deux périodes distinctes de l'Holocène, al Kalbiyya a évolué en systèmes de lacs pérennes et temporaires, de lacs temporaires-sebkhas et de sebkhas. Sur les bordures ouest, nord et centre-est d'al Kalbiyya, la présence de *Cerastoderma glaucum* dans les sédiments a servi à décrire des niveaux de référence et de réaliser la corrélation spatio-temporelle des faciès fluvio-palu-lacustre (FPL) et fluvio-lacustre (FFL). Elle a permis la définition sur la partie inférieure et supérieure de l'échelle lithostratigraphique de la succession de sept unités sédimentaires ($UK_{XIV\text{-}VIII}$) ainsi que la caractérisation des épisodes

de fonctionnement lacustre. Durant l'Holocène inférieur et jusqu'à environ 5632±218 BP (âge du dépôt lacustre le plus récent), neuf phases majeures de sédimentation ont été également distinguées. Al Kalbiyya a connu l'installation de cinq stades de lacs pérennes ($SK_{XIV,}$ SK_{XII-1}, SK_{XII-3}, SK_X, SK_{VIII}), séparée par trois phases lacustres temporaires ($SK_{XIII,}$ SK_{XI} et SK_{IX}). Un interstade palu-lacustre a été identifié (SK_{XII-2}). La cuvette exoréique à semi-endoréique était le siège d'accumulation de sédiments hétérogènes, généralement grossiers et d'une provenance lointaine prépondérante. Les apports latéraux étaient plus importants sur les marges des lacs temporaires. Les dynamiques fluvio-lacustres étaient souvent actives. De fréquentes traces d'hydromorphie et d'émersion ont marqué les dépôts.

La partie supérieure de l'échelle litho-chronostratigraphique s'est divisée en sept unités corrélant les dépôts et les faciès du centre et des bordures orientale et méridionale. Ces dépôts étaient dépourvus de restes malacologiques. Ils ont exprimé des nouvelles tendances d'évolution et des grands changements de dynamiques, de milieux et d'environnements, suite au dysfonctionnement ou l'atténuation des processus biocénotiques depuis environ 5632±218 BP. Al Kalbiyya a connu l'installation d'une phase lacustre temporaire (SK_{VII}) et de trois systèmes de lacs temporaires-sebkhas (SK_V, SK_{III} et SK_I) séparés par trois stades de sebkhas (SK_{VI}, SK_{IV} et SK_{II}). L'enclave semi-endoréique à endoréique a montré un granoclassement notable des sédiments. Dans l'ombilic, les argilo-limoneuses laminaires et d'origine lointaine prépondérante passent souvent à des sables limoneux sur les bordures. Les signes d'une évolution post-dépôt en milieu exondé et asséché sont plus marqués dans le sédiment en comparaison des périodes holocènes antérieures. Les apports latéraux sont remarquables sur les marges orientales Les dynamiques de progradation et d'aggradation alluviales des zones distales des cônes d'épandage des oueds de la rive est d'al Kalbiyya étaient occasionnellement actives. Une épaisse sédimentation fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA4-7) plus ou moins dilatée (plus 2,3 m) a marqué les milieux fluvio-deltaïques et intertidaux.

II-2- Dynamiques sédimentaires et évolution du fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil

Quatre milieux ou systèmes paraliques de type lagune, sebkha littorale, lagune-sebkha et sebkha-lagune, se sont succédés dans Halq al Minjil pendant l'Holocène. Le système sebkha-lagune a fonctionné sur une longue durée de l'histoire holocène de la cuvette littorale.

La corrélation des faciès sufato-carbonaté (FSC), « évaporatique » (FE), fluviatile (FF) et fluvio-marin d'influence fluviatile notable (FMF) des parties médianes et inférieures des carottes C1 et C3 a permis de reconstituer sept phases de sédimentation ($SH_{XIV\text{-}VIII}$). Depuis 25120±120 BP et jusqu'à 4965±35 BP , Halq al Minjil a connu l'installation de quatre stades de sebkha-lagune ($SH_{XIV,}$ SH_{XII}, SH_X et SH_{VIII}) séparés par trois systèmes de sebkha-littorale (SH_{XIII}, SH_{XI} et SH_{IX}). Des formations dilatées d'argiles et de limons fluvio-marins chargés de sels (gypse et halite) et de carbonates (dolomite, ankérite) ont rempli le fond. Sur les bordures et à l'exutoire des oueds, s'intercalent des sédiments terrigènes plus grossiers et hétérogènes, traduisant des dynamiques plus actives.

Les deux niveaux lagunaires fossilifères FL1 et FL2, le niveau fluvio-marin aux apports fluviatiles notables FMF3 et les deux niveaux fluvio-marins aux influences marines notables FMM1 et FMM2 des parties moyennes et supérieures des carottes C1 et C3, ont marqué des nouvelles tendances de l'évolution hydromorphologique et climato-eustatique. Ils ont rétabli la succession de cinq unités sédimentaires ($UH_{VII\text{-}III}$) au cours de la deuxième moitié de l'Holocène moyen. Depuis 4965±35 BP et jusqu'à avant 3410±35 BP, Halq

al Minjil a fonctionné en deux stades lagunaires (SH_{VII}, SH_V), deux stades de lagune-sebkha (SH_{VI}, SH_{IV}) et un stade de sebkha-lagune (SH_{III}).

Le niveau « évaporatique » FE4 de la partie supérieure de la carotte C3 a indiqué la réinstallation d'un système de sebkha côtière (SH_{II}) au début de l'Holocène supérieur et pendant la Protohistoire. Durant les temps historiques, Halq al Minjil a fonctionné en système de sebkha-lagune (SH_I). Son évolution est complexe.

III- Pluralité des modèles hydroéoliens polyphasés des bordures d'al Kalbiyya et Halq al Minjil

Des analyses sédimentologiques, une datation au ^{14}C et des niveaux d'occupation épipaléolithiques calés chronologiquement ont permis d'apprécier l'origine, la dynamique et l'âge des dépôts et constructions hydroéoliens holocènes.

III-1- Modelés et fonctionnement hydroéoliens d'al Kalbiyya

Sur les bordures orientales d'al Kalbiyya, un bourrelet d'âge holocène supérieur préromain (QH3a ; 2079±240 BP ; LRAE-LH1 ; 2620-1538 cal BP/671 BC-412 AD), a remarquablement marqué le paysage. Au sud-est de la dépression, des voiles argilo-silteux discontinus du même âge que le bourrelet ont recouvert les Dhras Zmenka, ar-Rommana, ash-Shrashir et ach-Sh'ir. Les sédiments fins de limons et d'argiles silteuses ont été mis en place par les vents actifs du secteur nord-ouest. Les changements verticaux des caractères sédimentologiques et pédologiques des dépôts ont expliqué l'instabilité des conditions et des mécanismes sédimentaires et une mise en place polyphasée des édifices éoliens. Pendant l'Holocène supérieur-préromain, al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de sebkhas et de lac-temporaire-sebkha et a connu des épisodes de surcreusement éolien. Des lits millimétriques à centimétriques de sables et de limons éoliens ont été reconnus dans les accumulations alluviales des terrasses historiques des oueds descendant Dhras Laghmas-ash-Shraif. Ils ont mis en évidence des épisodes d'activité éolienne et de discontinuités des dynamiques hydriques pendant l'Historique. Aujourd'hui, les phénomènes de la surélévation éolienne des formes et des dépôts éoliens anciens de bordures d'al Kalbiyya ne sont plus à exclure.

III-2- Modelés et fonctionnement hydroéoliens de Halq al Minjil

Halq al Minjil a hérité d'une multitude de modelés hydroéoliens de natures et d'âges différents (dunes, bourrelet, guataya, nebkhas,). Un premier bourrelet longe les bordures occidentale et méridionale. Il a montré la superposition de deux générations de dépôts certifiant deux phases holocènes d'accumulation éolienne. La première génération, d'âge holocène inférieur, est antérieure à la première moitié du VIIe millénaire cal BC. La seconde génération vient en dessus et fossilise des niveaux d'occupation épipaléolithique. Elle est postérieure à la deuxième moitié du VIe millénaire cal BC. Elle traduit le fonctionnement des processus éoliens de surélévation et d'évolution de l'édifice, depuis l'Holocène moyen. Les niveaux « évaporatiques » identifiés sur les carottes C1 et C3, sont les plus convenables à la fourniture de la matière vannée. Les caractères microstratigraphiques des dépôts ont évoqué la complexité des rythmes d'évolution et du fonctionnement des processus de sédimentation et d'évolution post-dépôt des sédiments.

Un deuxième bourrelet hydroéolien surbaissé et discontinu a à peine marqué les rives orientales de Halq al Minjil. Il témoigne de l'activité des vents des secteurs ouest et nord-ouest, avec peut-être des vents secondaires des secteurs sud et sud-est. Il contemporain du faciès « évaporatique » FE4 (3410±35 BP) de la partie supérieure de la carotte C3 et du système sebkha littorale SH_{II}. Le bourrelet est d'âge flandrien supérieur.

D'autres modelés typiques mais très localisés ont marqué l'enclave littorale. Des petites constructions hydroéoliennes longent les bordures occidentales de petits bas fonds fermés. Elles forment un cordon dunaire à peine marqué dans le paysage. Ce cordon est probablement postérieur à l'Holocène moyen. Une construction hydroéolienne en îlot (guataya), vraisemblablement d'âge préromain, s'est engagée dans le centre du bassin méridional de Halq al Minjil. Au nord de la localité d'al Aribat, un bourrelet probablement d'âge holocène inférieur, marque les marges septentrionale et nord-orientale de l'enclave littorale.

IV- Ampleur des dépôts et diversité des modelés holocènes du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil est marqué par l'ampleur de ses héritages géomorphologiques et par la multiplicité des caractères morphométriques et formationnels d'une variété de modelés pléistocènes et holocènes. L'essentiel des paysages géomorphologiques actuels est le résultat d'une évolution morphogénétique principalement historique. Ces données ont posé les problèmes de l'ambiguïté de la morphogenèse holocène et de l'origine des dépôts historiques.

IV-1- Cadre topo-structural et héritages géomorphologiques pléistocènes : un contexte pré-holocène particulier du fonctionnement du système fluvial

Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil a montré la prédominance d'une topographie de plaines, bordée par une boucle d'alignements collinaires contrastée et possédant un réseau hydrographique peu développé. Les affleurements géologiques sont jeunes, peu étendus et réduits à l'Oligo-Néogène. Les formations d'âge mio-pliocène dominent. Les contrastes lithologiques sont limités. Une prédominance sablo-argileuse forme le substratum. Seulement trois binômes ont été constatés. Le paroxysme tectonique mio-plio-quaternaire a confié à l'hydrosystème une structure simple et récente. Le relief est conforme. L'érosion a suffisamment profité de la faible résistance des couches. Les formes structurales sont peu nombreuses. Le rôle de la tectonique pléistocène dans la structuration de la plateforme sahélienne et dans la genèse des cuvettes synclinales, accueillant les sebkhas, est admis. Les arguments de terrain (pli, décrochements,) et les indices indirects (ruptures de pente, tracés préférentiels des talwegs,…) de cette tectonique sont nombreux.

La morphologie dissymétrique du système fluvial, les caractéristiques des terrains géologiques et l'organisation du chevelu hydrographique sont responsables d'une différence d'ampleur et de diversité du modelé pléistocène. Des formations hydriques hétérogènes et parfois dilatées ont marqué les fonds de vallées et les plaines. Deux générations de croûtes calcaires et trois formations détritiques à nodules et à concrétions calcaires ont marqué les rives méridionales et orientales des bassins d'al Kalbiyya, de l'oued al Manfas as-Sod et de Halq al Minjil. Elles sont à l'origine de la construction des nappes, des terrasses et des cônes d'épandage ou des cône-glacis. Aujourd'hui, ces modelés sont, pour la plupart, enfouis sous les sédiments holocènes.

IV-2- Ampleur et variété des dépôts holocènes dans le système fluvial

Les contrastes lithologiques, les oppositions orohydrographiques, les variations climatiques et les impacts morphodynamiques locaux et anthropiques étaient à l'origine d'une différenciation spatio-temporelle des caractéristiques morphométriques et formationnelles des héritages géomorphologiques holocènes.

Les quinze coupes étudiées et les analyses sédimentologiques ont souligné l'ampleur, l'hétérogénéité et l'originalité des archives sédimentaires holocènes des fonds de

vallées, des sommets d'interfluves et dans les plaines. Elles ont montré de forts changements latéraux et séquentiels des dépôts et de leurs agencements morphologiques. Dans les cours amont et moyen des principaux affluents de la rive droite de l'oued al Manfas-as-Sod et dans les oueds tributaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil, des dépôts grossiers, emboîtés et superposés d'âge holocène ancien à historique prédominent. Dans les vallées des oueds tributaires d'al Kalbiyya, trois générations de dépôts historiques, généralement fins, s'emboîtent. Les dépôts holocènes préhistoriques sont en nappes alluviales. Dans les plaines et les bordures bases des sebkhas, se superposent des dépôts fins à moyens, notamment d'âge protohistorique et historique. La nature du substrat, la topographie et la morphodynamique locales y sont à l'origine.

Une coupe de synthèse a été établie montrant l'emboîtement et la superposition de dix formations organisées en six modelés morphologiques différents. Les dépôts d'âge holocène préhistorique, pourtant variés, sont peu étendus. Exception faite des sables bruns et « Hmari » qui ont évolué en sols de type brun-isohumique et rébufié. Ces dépôts tendent souvent à la superposition et appartiennent à quatre générations bien séparées dans le temps. Ils correspondent à des garâas perchées, un cône deltaïque et surtout à une terrasse d'accumulation qui passe dans les zones d'épandage à une morphologie de cône-terrasse et de cône d'épandage. Cette terrasse d'âge holocène antéhistorique couvre une longue période qui s'étale sur environ les 2/3 de l'Holocène *senso-lato*.

Les héritages géomorphologiques se développent et prennent de l'ampleur depuis l'Historique sur les bordures ouest d'al Kalbiyya, sur la rive sud du bassin de l'oued al Manfas as-Sod et au sud et au nord-ouest du système littoral Halq al Minjil. Dans les fonds de vallées, deux terrasses d'âge romain et post romain-médiéval et une banquette subactuelle s'emboîtent. A la sortie du relief collinaire et dans les plaines, ces modelés passent à une morphologie de cônes-terrasses, cônes et plaines d'épandage et cônes deltaïques. Contre les berges et sur les interfluves des cours avals de quelques oueds, des placages et des voiles éoliens subactuels prennent place.

Une banquette d'accumulation et d'érosion, deux autres cônes deltaïques à l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod, des petits cônes d'épandage et deltaïques et un voile-placage éolien sont en cours de formation.

V- Instabilité morphogénique, successions paléoenvironnementales et dynamiques paysagères de l'hydrosystème durant l'Holocène

Le couplage et la concordance des différents résultats d'analyses géomorphologique, stratigraphique, sédimentologique, micromorphologique, géochimique, minéralogique, palynologique, archéozoologique et archéologique couplés à des données historiques et des datations absolues et relatives, ont permis d'établir la chronostratigraphie holocène des paléoenvironnements et de la morphogenèse et d'évaluer les facteurs de contrôle.

La corrélation spatio-temporelle des différentes formes et archives sédimentaires de l'ensemble de l'hydrosystème a permis l'établissement d'un schéma synthétique. Celui-ci a permis la reconstitution des différentes phases d'évolution diachronique de la morphogenèse, des dynamiques, des environnements et des forçages climatiques, eustatiques et anthropiques essentiellement durant les 10000 derniers ans. Les archives de la base de la carotte C3 ont permis de reconstituer l'histoire hydrosédimentaire de l'enclave littorale depuis 25120±120 BP.

V-1- L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil du 25120±120 BP et durant l'Holocène inférieur (1000-7000 BP)

Au Pléistocène supérieur terminal et à la transition Pléistocène-Holocène, Halq al Minjil a fonctionné en systèmes de lac temporaire-sebkha et de sebkha littorale. Elle a connu sur ses bordures méridionale et occidentale la mise en place de la première génération de dépôt d'un bourrelet hydroéolien. Une incision linéaire majeure préholocène a marqué les fonds de vallées. A l'Holocène inférieur, la sebkha al Kalbiyya a connu l'installation d'un premier système lacustre majeur. Halq al Minjil a évolué en système de sebkha-lagune sous une influence fluviatile notable. Une dynamique de remblaiement fluviatile a marqué les fonds de vallées. Des dépôts hydromorphes et des garâas perchées font la distinction des sommets d'interfluves des bordures sud-est de l'hydrosystème.

Depuis 25120±120 BP (Beta-290410 ; 28341-27611 cal BC) et durant l'Holocène inférieur, les facteurs de la morphogenèse semblent uniquement inféodés aux variations des paramètres bioclimatiques. Le paysage était ouvert de type steppique influencé par un climat semi aride fluctuant. Les dépôts lacustres et palu-lacustres et les niveaux fluviomarins sulfato-carbonatés (FMC2), peuvent expliquer l'augmentation de l'humidité et des pluies régionales abondantes et régulières à l'Holocène inférieur dans un contexte général d'optimum climatique à la fois hydrique et thermique.

Les données géorachéologiques, archéozoologiques et malacologiques ont suggéré une faible emprise anthropique sur le milieu. Le comportement alimentaire des sociétés épipaléolithiques était lié à des pratiques prédatrices de chasse, pêche, collecte et cueillette. Ces sociétés ont incontestablement contribué au maintien local de l'équilibre de l'environnement.

V-2- L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil durant l'Holocène moyen (7000-3500 BP)

A la différence de l'Holocène inférieur, l'Holocène moyen a été caractérisé par des changements successifs, de courte durée, du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et Halq al Minjil. Les récurrences sont généralement de faibles amplitudes.

Durant la première moitié de l'Holocène moyen al Kalbiyya a connu l'installation du deuxième système lacustre majeur. Halq al Minjil a fonctionné en systèmes de sebkha-lagune et de sebkha. La morphogenèse et l'évolution des milieux étaient sous la seule contrainte des forçages climatiques. Les résultats d'analyses palynologique et morphosédimentaire ont indiqué un type d'environnement assez proche de l'Actuel et un climat semi-aride très variable. L'alternance des phases d'humidification et d'aridification s'est exprimée par une saisonnalité plus ou moins marquée, des modifications dans la répartition saisonnière des pluies et des changements de très faible intensité des moyennes annuelles de la pluviométrie et des températures. Pourtant, les pluies n'étaient pas forcément plus importantes et plus fréquentes qu'aujourd'hui.

Après environ 5000 BP, le changement du fonctionnement hydrologique d'al Kalbiyya et Halq al Minjil en systèmes de lacs temporaires-sebkha et de lagunes et l'accélération de la morphogenèse ont mis en évidence l'intervention d'autres facteurs dans l'évolution des environnements et des paysages. Le climat a connu une accentuation de l'aridité. Des événements pluvio-hydrologiques exceptionnels sont à l'origine du développement de l'érosion et du remblaiement dans le système fluvial. Les taux de sédimentation ont varié entre 3 et 6 mm/an. Deux variations eustatiques positives et rapides de +71 cm à 4965±35 BP (3903-3655 cal BC) et de +187 cm à 4365±50 BP (3309-2889 cal BC), sont responsables de deux incursions marines dans l'enclave littorale. A partir du

IIIème millénaire BC, des sociétés humaines néolithiques pratiquant des activités agro-pastorales ont commencé à faire sentir leurs effets sur le milieu.

Après 3874±201 BP et avant 3410±40 BP, l'hydrosystème a connu les environnements les mieux équilibrés depuis le début de l'Holocène. La pédogénisation de la formation des sables bruns témoigne de l'atténuation de la morphogenèse, du retour de conditions plus humides ou d'une meilleure répartition des précipitations.

V-3- L'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil pendant l'Holocène supérieur (depuis 3500 BP)

Durant l'Holocène supérieur l'hydrosystème a connu le changement des rythmes, des modalités et des facteurs d'une morphogenèse fluctuante et mouvementée. La participation de l'Homme à l'édification des formes majeures et de plus en plus marquante. Depuis le IIe millénaire av. J.-C, l'évolution de la morphogenèse, des paysages et des environnements est devenue indissociable de la dialectique homme/climat/érosion.

Pendant la Protohistoire et la période phénicienne et punique, al Kalbiyya a fonctionné en deux systèmes de sebkhas (SK_{IV} et SK_{II}) et en un système de lacs temporaires-sebkhas (SK_{III}). Halq al Minjil a évolué en système de sebkha-littorale (SH_{II}). Des constructions hydroéoliennes ont été édifiées sur les bordures orientales des enclaves. Une première crise érosive (incision majeure, plus de 7m) succédant à une phase de remblaiement protohistorique et de pédogenèse (formation/paléosol « *Hmari* ») a marqué le système fluvial. L'évolution est conditionnée par les fluctuations d'un climat semi-aride. Les activités agro-pastorales des sociétés néolithiques à puniques ont évolué. Mais leur impact sur les milieux demeure difficilement mesurable.

Depuis la période romaine et jusqu'à l'Actuel, l'hydrosystème a connu la mise en place d'une variété de formes et de formations qui ont marqué profondément les paysages géomorphologiques ainsi qu'une interaction complexe des facteurs différents de la morphogenèse. Al Kalbiyya a fonctionné en systèmes de lacs temporaires-sebkhas et de sebkhas (SK_{I}). Les phénomènes d'endoréisme sont de plus en plus accentués. Halq al Minjil, toujours sous une influence continentale prépondérante, a fonctionné en système de sebkha-lagune. L'évolution du système fluvial est marquée par une succession de quatre phases d'accumulation entrecoupées par quatre périodes d'incision linéaire des talwegs et des cônes d'épandage, dégageant successivement la haute et la basse terrasses et deux banquettes. Une deuxième crise morphogénétique holocène est mise en évidence au Ve s. ap. J.-C. Le climat ne diffère pas de ce qu'il est aujourd'hui. L'évolution géomorphologique est principalement régie par l'occurrence d'événements hydro-pluviométriques paroxysmiques, la recrudescence de l'activité éolienne et les forçages anthropiques en accélérant la morphogenèse. L'élévation du niveau marin relatif et la néotectonique n'ont joué qu'un rôle secondaire et localisé.

BIBLIOGRAPHIE

A

Abichou A. (2002)- Les changements de paysages du bassin-versant de l'oued tataouine Fessi (Sud-est tunisien) : étude multiscalaire et micromorphologie des remplissage des sebkhas et étude des états de surface. *Thèse de Doctorat* de Géog. Phys., Univ. Michel de Montaigne, Bordeaux II, Vol. I, Bordeaux, 368 p.

Amami L. (2009)- Evolution morphologique quaternaire d'un bassin fermé en milieu continental (Sabkhet Mechiguig, Tunisie centrale ; Ed. Zeitschrift für Geomorphologie ; Berlin ; Vol. 53 ; N°1 ; p. 81-108

Amari A. et **Bédir M.** (1989)- Les bassins quaternaires du Sahel central de la Tunisie. Genèse et évolution des sabkhas en contexte décrochant compressif et distensif ; Géodynamique ; N° 4 ; p. 49-65.

Amoros C. et Petts G. E. (1993)- Hydrosystèmes fluviaux ; Masson, Paris ; 300 p.

Aouadi N. (2004)- Etude paléontologique du matériel osseux de Sabkhet Halk el Menjel ; Rapport de mission 2002-2003 ; 9 p.

Aouadi N., Dridi Y., Maini E., Curci A., Brugal J.-Ph., Mannai-Tayech B. (2013)- La faune de la *rammadiya* capsienne de SHM-1 (Hergla-Tunisie) ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; 320-332 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (1999a)- Etude des périmètres de protection pour la gestion des zones sensibles (Sousse-Mahdia) : Maîtrise foncière ; Rapport final de 1ère phase : Evaluation des flux d'extension ; URBACONSULT ; Tunis ; 95 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (1999b)- Etude des sites naturels sensibles des zones humides et lagunaires du littoral du Golfe d'Hammamet ; Phase II : Les propositions ; METAP et IARE ; Tunis ; 66 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2000)- Etude des périmètres de protection pour la gestion des zones sensibles littorales ; Lot 2 : de Hammamet sud à Sousse ; Rapport de phase II : Terrains soumis à des pressions foncières ; Version définitive ; BETBEL et GEOIDD ; Tunis ; 54 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2001)- Etude des périmètres de protection pour la gestion des zones sensibles (Sousse-Mahdia) : Maîtrise foncière ; Rapport final de la 2ème phase : Terrains soumis à des pressions foncières ; URBACONSULT ; Tunis ; 70 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2002)- Etude de gestion de la zone sensible de Sebkhet Halk el Menjel ; Phase I : Caractérisation du milieu naturel ; Rapport définitif ; Arab Tunisian Studies et Betbel ; Tunis ; 60 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2003a)- Etude de gestion de la zone sensible de Sebkhet Halk el Menjel ; Phase II : Schéma de Gestion Détaillée ; Rapport définitif ; Arab Tunisian Studies et Betbel ; Tunis ; 73 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2003b)- Etude des périmètres de protection pour la gestion des zones sensibles (Sousse-Mahdia) : Maîtrise foncière ; Rapport final de la 3ème phase ; URBACONSULT ; Tunis ; 50 p.

APAL, Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2003c)- Etude de gestion de la zone sensible de Sebkhet Halk el Menjel ; Phase II : Schéma de Gestion Détaillée ; Résumé ; Arab Tunisian Studies et Betbel ; Tunis ; 16 p.

APAL : Agence de Protection et d'Aménagement du Littoral (2003d)- Etude générale pour la protection du littoral tunisien contre l'érosion marine ; Site n°4 : Littoral nord de Sousse ; Avant projet sommaire ; SCET-Tunisie/NEDECO ; Tunis ; 46 p.

Armynot du Châtelet E., Debenay J-P., Degré D. et Sauriau P-G. (2005)- Utilisation des foraminifères benthiques comme indicateurs de paléo-niveaux marins ? Étude du cas de l'anse de l'Aiguillon ; C. R. Palevol ; Vol. 4 ; p 209-223.

Ayari A., Regaya K., Zagrarni M. F., Hichri N., Chehimi M. et Ourari R. (2008)- Les croûtes saumon à hélicidés d'âge Pléistocène inférieur (J. Hemaima et Khechem el Artsouma en Tunisie centrale) : sédimentogenèse et argilogenèse ; Quatrième Conférence Internationale de la Géologie du Tethys ; Université de Caire ; p. 75-82

B

Bahri A. (1982)- Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan (Tunisie) ; Thèse ; Diplôme de docteur-ingénieur ; Institut National Polytechnique ; Toulouse ; 156 p.

Baize D. (2000)- Guides des analyses en pédologie ; 2ème édition ; INRA éditions ; Paris ; 257 p.

Baize D. (2004)- Petit lexique de pédologie ; Ed. INRA ; Paris ; 272 p.

Ballais J. L. (1991)- Evolution holocène de la Tunisie saharienne et présaharienne ; Rev. Méditerranée ; N° 4 ; p 31-38.

Ballouche A. et Carruesco C. (1986)- Evolution holocène d'un écosystème lagunaire : la lagune de Oualidia (Maroc atlantique) ; Rev. Géologie Dynamique et de Géographie Physique ; Vol. 27 ; Fasc. 2 ; Paris ; p 113-118.

Barrot J. (1972a)- Contribution à l'étude morphologique du Sahel (Tunisie orientale) ; Thèse de Doctorat de 3ème Cycle ; Université de Paris VII ; 218 p.

Barrot J. (1972b)- Les enseignements du modelé quaternaire de la Sebkhet Halk el Menzel (Sahel de Sousse-Tunisie) ; Bull. de la Société Languedocienne de Géographie ; 3ème série ; T. 6 ; Fasci. 3 ; p. 277-303.

Bédir M. (1995)- Mécanismes géodynamiques des bassins associés aux couloirs de coulissements de la marge atlasique de la Tunisie ; Thèse d'Etat ; Université de Tunis

Béji Sassi A. (1995)- Les séparations des argiles et leur préparation en vue d'une étude minéralogique ; Livret à l'usage des étudiants ; Labo. Ressources Minérales ; Fac. Sc. Tunis ; 18 p.

Belkhouja K. (1972)- Origine, évolution et caractère de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale) : contribution à l'étude de leur mise en valeur. Rev. Sols de Tunisie ; Tunis ; N° 4 ; 105 p.

Ben Amor R., Brahim M. et Gueddari M. (2003)-Essai d'interprétation de la dynamique sédimentaire par l'analyse granulométrique et minéralogique au large du Golfe de Gabès ; Bull. Inst. Nat. Scien. Tech. Mer de Salammbô ; Vol. 30 ; p 143-151.

Ben Baaziz S. (1999)- Les établissements ruraux du Sahel antique ; Colloque : Du Byzacuim au Sahel : itinéraire historique d'une région tunisienne ; Textes réunis par Mrabet A. ; Série histoire ; vol. I ; p. 31-47.

Ben Baaziz S. (2000)- Rohia et le Sraa Ouertane dans l'antiquité ; IMEN ; INP. ; Tunis.

Ben Jmaa H. (2008)- Le système endoréique de Sidi al Hani, Cherita et Mechertate : paléoenvironnements et dynamique récente ; Thèse Doctorat ; Université de Tunis ; 251 p.

Benkaddour A., Rhoujjati A. et Nour el Bait M. (2008)- Hydrologie et sédimentation actuelles au niveau des lacs Iffer et Aguelmam Azigza (Moyen Atlas, Maroc) ; Actes de la 4ème Rencontre des Quaternaristes Marocains RQM4) : « Le Quaternaire marocain dans son contexte méditerranéen » ; 15, 16 et 17 novembre 2007 ; Oujda ; Maroc ; p. 108-118.

Ben Ouezdou H. (1987)- Etude morphologique et stratigraphique des formations quaternaires des alentours du Golfe de Gabès ; Rev. Sc. Terre ; Vol. 5 ; Centre des Sciences de la Terre ; Tunis ; 165 p.

Ben Tiba B. (1995)- Cinq millénaires d'histoire de la végétation à djebel El Ghorra, Tunisie septentrionale ; In. Palynologie africaine, CIFEG ; Ed. Le Thomas & E. Roche ; Publications occasionnelles ; 31 ; Orléans ; p 49-55.

Bkhairi A. et Karray M. R. (2008)- Les terrasses historiques du bassin de Kasserine (Tunisie centrale) ; Rev. Géomorphologie : relief, processus, environnement ; N° 3 ; p

Bkhairi A. et Karray M. R. (2012)- Suffosion et érosion hydrique en milieux semi-arides, le cas des Hautes Steppes tunisiennes (Tunisie centrale) ; Revue Pysio-Géo ; Vol. 6 ; p

Bois Ch. (1944)- Années de disettes, années d'abondance, sécheresse et pluies e Tunisie de 648 à 1881 ; Rv. Pour l'étude des calamités ; p 3-26.

Bonifay M. (2004)- Etudes sur la céramique romaine tardive d'Afrique ; BAR International ; Series 1301.

Bonn F. et Rochon G. (1992)- Précis de télédétection ; Vol. 1 : principes et méthodes ; Ed. AUPELF-UREF ; Presses Universitaire du Québec ; Montréal ; 485 p.

Bonte P., Conte E., Hamés C., Ould Cheikh A. (1991)- Al-Ansâb : La quête des origines. Anthropologie historique de la société tribale arabe ; Ed. Maison des Sciences de l'Homme et Cambridge University Press ; Paris ; 260 p.
http://books.google.tn/books?id=62ylIU3KQccC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false

Boubaker S. (1995)- La peste dans les pays du Maghreb : attitudes face au fléau et impacts sur les activités commerciales (XVIe-XVIIIe siècles) ; Revue d'Histoire Maghrébine ; N° 79-80 ; p 311-341.

Boubaker S. (2003)- Négoce et enrichissement individuel à Tunis du XVIIe siècle au début du XIXe siècle » ; Revue d'histoire moderne et contemporaine ; N°50-4 ; p. 29-62.

Boubaker S. (2010)- Activités économiques des morisques et conjoncture dans la régence de Tunis au XVIIe sicèle ; *In.* Cartas de la Goleta ; p 129-137.
http://moriscostunez.blogspot.com/2010/01/activites-economiques-des-morisques-et.html

Boujarra A et **Gammar A.** (1993)- Contribution à l'étude géomorphologique des niveaux à croûtes dans les environs de Sousse ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 23/24 ; p. 49-67.

Boujarra A., Boujelben A., Ben Amor I. et Abid M. (2005)- Etudes de quantification de l'érosion linéaire dans les bassins versants du Sahel septentrional et l'analyse des facteurs qui la contrôlent ; Actes des deuxièmes journées d'étude sur les risques naturels du laboratoire CGMED : Risques naturels et environnement, Hammamet-Zaghouan 11-12-13 octobre 2002 ; p. 37-52.

Boujarra A., Boujelben A. et TaabniM. (2006)- Sur l'ampleur de la morphogenèse historique dans les bassins versants du Sahel tunisien (Tunisie orientale) ; Actes de la table Ronde en l'honneur de R. Neboit-Guilhot : « L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement » ; Clermont-Ferrand ; 25-27 Mars 2004 ; Presses Universitaires Blaise-Pascal ; France ; p. 429-434.

Boujelben A. (2013a)- Cadre géographique de la sebkha-lagune Halk el Menjel ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; p 17-20.

Boujelben A. (2013b)- La sebkha-lagune Halk el Menjel (Tunisie centre-orientale) : fonctionnements, dynamiques morphosédimentaires et paléoenvironnements du Pléistocène terminal au Flandrien supérieur ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; p 28-47.

Boujelben A. (2009)- À propos de l'archivage morphosédimentaire des variations du niveau marin relatif dans la sebkha-lagune de Halq al Minjil (Tunisie centre orientale) durant le Flandrien moyen» ; Actes du Workshop : L'acqua in ambiente ario : adattamenti, risorse, e paesaggi nelle preistoria del maghreb : Libia e Tunisia ; Istituto Italiano per l'Africa e l'Oriente. 11 juin 2009. Rome, Italie ; Rev. Africa ; LXIV ; 3-4 ; 448-457 p.

Boujelben A., Karray M. R., Dinelli E., Mulazzani S., Lebreton V., Maquaire O. et Del Grande Carlo (2008)- Les niveaux à *Cersatoderma glaucum et Cerithium vulgatum* de Sabkhet Halq al Minjil (Tunisie centre-orientale) : reconstitution d'un système lagunaire holocène ; Actes RQM4 : Le Quaternaire marocain dans son contexte méditerranéen ; 15, 16 et 17 novembre 2007 ; Oujda ; Maroc ; p 49-61.

Boujelben A. (2002)- Le bassin de l'Oued al Manfas as-Sod et ses abords côtiers : aspects morphologiques et évolution des paysages de l'Holocène à nos jours; Mém. D.E.A. ; Fac. Sc. Hum. et Soc. Tunis I ; 117 p.

Boulvain F. (2006)- Eléments de Sédimentologie et de Pétrologie sédimentaire ; Laboratoire de Pétrologie sédimentaire ; Département de Géologie ; Faculté des Sciences ; Université de Liège ; Cours en ligne : http://www.ulg.ac.be/geolsed/geologie

Boulvain F. (2009)- Une introduction aux processus sédimentaires ; Laboratoire de Pétrologie sédimentaire ; Département de Géologie ; Faculté des Sciences ; Université de Liège ; Cours en ligne ; http://www2.ulg.ac.be/geolsed/processus/processus.htm

Bourgou M. (1993)- Le basin-versant du Kebir-Miliane (Tunisie nord-orientale) : étude géomorphologique ; Publ. Fac. Sc. Hum. et Soc. ; Série 2 Géogr. ; Vol. XXXIII Univ. Tunis I ; 435 p.

Bourgou M. et Oueslati A. (1987)- Les dépôts historiques de la vallée du Kébir Miliane (Nord-est de la Tunisie) ; Rev. Méditerranée ; N° 1 ; p 43-49.

Bourgou M. et **Oueslati A.** (1991)- Formes et dépôts continentaux d'âge holocène et historique en Tunisie : morphologie et stratigraphie à travers deux thèses d'Etat récemment soutenues ; Compte rendu ; p. 223-232.

Bourgou M. et **Oueslati A.** (1994)- les constructions éoliennes des bordures des sebkhas et dépressions fermées de la Tunisie nord-orientale : pour une chronologie plus fine à fin de mieux reconstituer les paléoenvironnements holocènes ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 25 ; p. 13-25.

Boyé M. et Nesson C. (1970)- Un problème de méthode : les particularités granulométriques d'un sédiment de sebkha, environs de Ouargla (Sahara algérien) ; Rev. Géomorphologie Dynamique ; N° 1 ; XIXème année ; S.E.D.E.S ; Paris ; p. 17-26.

Brahim F. (2001)- Le Sahel central et méridional : géomorphologie et dynamique récente du milieu naturel ; Thèse de Doctorat ; Fac. Sc. Hum. et Soc. Tunis I ; 439 p.

Brahim F. (2005)- Le Sahel central et méridional (Tunisie orientale) : géomorphologie et dynamique récente du milieu naturel ; Ed. FLSH de Sousse ; Finzi ; 302 p.

Bravard J. P. (1983)- Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône ; Rev. de géographie alpine ; Vol. 71 ; N° 4 ; p. 363 - 379

Breton G., Vincent T., Painblanc A. et Duchemin A. (2005)- L'endofaune des bassins du port du Havre (Manche orientale) ; Bull. Soc. géol. ; Normandie Amis Mus. Havre ; 92 ; 1 ; p. 5-18. http://www.scienceaction.asso.fr/img_fiche/endofaune-port-du-havre.pdf.

Brun A. (1989)- Microflores et paléovégétations en Afrique du Nord depuis 30.000 ans ; Bull. Soc. géol. Fr. ; T-5 ; n° 1 ; Paris ; p. 25-33.

Brun A. (1991)- Réflexions sur les pluviaux et les arides au Pléistocène supérieur et à l'Holocène en Tunisie ; Rév. Palaeoecology of Africa and the Surrounding islands; Vol. 22 ; Actes du premier symposium de palynologie Africaine ; Rabat, 15-21, 5, 1989 ; Edition A. A. Balkema ; Rotterdam ; p 157-170.

Brun A. (1992)- Pollens dans les séries marines du golfe de Gabès et du plateau des Kerkennah (Tunisie) : signaux climatiques et anthropiques. ; Rev. Quaternaire ; N° 3 (1) : p. 31-39.

Bullock P., Fedoroff N., Jongerius A., Stoops G. et Tursina T. (1985)- Handbook for soil thin description ; Waine Research Publications ; Wolverhampton ; United Kingdom ; 152 p.

Burollet P. F. (1956)- Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale ; Annales des Mines et de Géologie ; N° 18; 345 p.

C

Caillère S. et Hénin S. (1927)- Minéralogie des argiles; T. II : Classification et nomenclature ; 2ème éd. ; Masson ; Paris ; 189 p.

Cailleux A. et Tricart J. (1959)- Initiation à l'étude des sables et des galets ; T. I : Texte ; CDU ; Paris ; 375 p.

Camps G. (1964)- Notes de Protohistoire nord-africaine, III, Industries en obsidienne de l'Afrique du Nord ; Libyca ; 12 ; p 292-297

Carbonel P., Legigan P. H., Pujos M., Saubade A. M., Bobier C. et Jouirou M. (1981)- Evolution du lac de Tunis : un modèle de passage du milieu littoral à un milieu lagunaire ; Actes du 1er Congrès National des Sciences e la Terre ; Tunis ; p 91-100.

Carter V. G. et Dale T. (1973)- Topsoil and civilisation ; University of Okmahoma press.

Castany G. (1948)- Les fossés d'effondrement de Tunisie : géologie et hydrologie ; 1er fascicule : Plaine de Grombalia et cuvettes de la Tunisie orientale ; Tunis ; 126 p.

Castany G. (1952a)- Atlas tunisien oriental et Sahel; Monographies régionales ; 2ème série : Tunisie N°6 ; XIXème Congrès géologique international ; Tunis ; 152 p.

Castany G. (1952b)- Paléogéographie, tectonique et orogenèse de la Tunisie ; Monographies régionales ; 2ème série : Tunisie N°1 ; XIXème Congrès géologique international ; Tunis ; 63p.

Catuneanu O., Galloway W. E., Kendall Christopher G. St.C., Miall A. D., Posamentier H. W., Strasser A. et Tucker M. E (2011)- Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature ; Newsletters on Stratigraphy; Vol. 44/3; p 173-245.

Chahi A., Weber F., Prevot L. et Lucas J. (1993)- L'utilisation des résines échangeuses de cations (Amberlite -50H) dans la dispersion et la purification des argiles des roches à carbonates, phosphates et sulfates ; Rev. Clay Minerals ; N° 28 ; 585-601 p.

Chairi R. (2005)- Etude du remplissage sédimentaire d'un système hypersalin de la Tunisie orientale au cours du Quaternaire récent : la sebkha de Moknine ; Quaternaire ; 16 ; (2) ; p. 107-117. http://quaternaire.revues.org/index328.html?file=1

Chamley H. (2000)- Bases de sédimentologie (2èmeEdition) ; Ed. Dunod ; Paris ; 178 p.

Chaouti A. et Bayed A. (2005)- Diversité taxonomique et structure de la macrofaune benthique des substrats meubles de la lagune de Smir ; Ecosystèmes côtiers sensibles de la Méditerranée : cas du littoral de Smir ; Travaux de l'Institut Scientifique ; Editeurs Bayed A. et Scapini F ; Rabat ; Série générale ; N°4 ; p. 33-42.
http://www.israbat.ac.ma/html/PublicationsIS/tis_sg_4/Chaouti%20et%20Bayed%20Smir%202005.pdf.

Cherif M. H. (1995)- Le Beylik, les populations et le commerce maritime dans la Tunisie du XVIIIe siècle ; in « Histoire économique et sociale de l'Empire ottoman et de la Turquie (1326-1960) ; Sous la responsabilité de Daniel Panzac ; Ed. Peeters ; Collection Turcica ; Vol. VIII ; p 106-117.

CLERC E. (2008)- Caractérisation sédimentologique et géochimique des sédiments du Rhône Etude de quatre sites sur le Rhône : la lône de La Morte, la retenue du Grand Large,

la darse de Crépieux et la lône de l'Ile-du-Beurre ; Master recherche ; Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSE) de l'ENTPE ; 79 p.
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique (1966)- Légende des cartes géomorphologiques détaillées ; Recherches Coopérative sur Programme : carte géomorphologique ; France ; 41 p.
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique (1970)- Légende pour la carte géomorphologique de la France au 1/5000 ; France ; 76 p.
Cojan I. et Renard M. (1999)- Sédimentologie ; Ed. DUNOD ; Paris ; 418 p.
Colombié C. (2002)- Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et cyclostratigraphie du Kimméridgien du Jura suisse et du Bassin vocontien (France): relations plate-forme – bassin et facteurs déterminants ; Thèse de Doctorat ; Département de Géosciences-Géologie et Paléontologie ; Université de Fribourg (Suisse) ; Ed. Multiprint SA, Fribourg ; 198 p. ; *http://ethesis.unifr.ch/theses/downloads.php?file=ColombieC.pdf*
Conti C., Müller Y. et Lamare V. (2014)- *Cerasterderma edule* Linnaeus ; in DORIS, 1758 ; http://doris.ffessm.fr/fiche2.asp?fiche_numero=1378
Coque R. (1962)- La Tunisie présaharienne : étude géomorphologique ; Thèse Lettres ; Paris ; Colin ; 476 p.
Coque R. (1979)- Sur la place du vent dans l'érosion en milieu aride : l'exemple des lunettes (bourrelets éoliens) de la Tunisie ; Rev. Méditerranée ; N° 1 et 2 ; Paris ; p. 15-21.
Coque R. (1998)- Géomorphologie ; 6ème édition ; Armand Colin ; Paris ; 502 p.
Coudé-Gaussen G., Olive P. et Rognon P. (1983)- Datation de dépôts lœssiques et variations climatiques à la bordure nord du Sahara algéro-tunisien ; Revue de Géologie Dynamique et Géographie Physique ; vol. 24 ; N°1 ; p.61-73.
Coudé-Gaussen G. (1984)- Mise en place des basses terrasses holocènes dans les Matmata et leurs bordures (Sud tunisien) ; *Bull. AFEQ ; Quaternaire* ; 1-2-3 ; p 173-180.
Coudé-Gaussen G. (1991)- Les poussières sahariennes : cycles sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques ; Ed. John Libbey Eurotext ; Paris ; 489p.
Crema E.R. (2006)- Campagna di survey 2006 per la missione ad hergla, Tunisia, Relazione preliminare ; Rapport inédit; 16 p.

D

Dabouineau L. et Ponsero A. (2009)- Synthèse sur la biologie des coques *Cerastoderma edule* ; Version 2 ; Réserve Naturelle Baie de St-Brieuc ; 23 p.
Dacharry M. (1993)- Hydrosystème ; Encyclopédie AXIS ; Hachette ; Paris (France). http://91.121.162.160/glu/FRDIC/DICHYDRO.HTM
Dacharry M. (1996)- Hydrosystème ; http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DICHYDRO.HTM
Decramer L. R., Elhaj R., Hilton R. et Plas A. (2002)- Approche géométrique des centuriations romaines. Les nouvelles bornes du Bled Segui ; Rev. Histoire de la mesure ; Vol. XVII ; N°1-2 ; Ed. EHESS ; p 109-162.
Decret F. et Fantar H. (1981)- L'Afrique du nord dans l'Antiquité : histoire et civilisation des origines au Ve siècle ; Payot ; 391 p.
Decret F. (2003)- les invasions hilaliennes en Ifrîqiya ; Clio. http://www.clio.fr/BIBLIOTHEQUE/les_invasions_hilaliennes_en_ifriqiya.asp
DEGTH : Direction des Etudes et des Grands Travaux Hydrauliques (1979)- Aménagement de la sebkha Kelbia. Etude préliminaire ; Rapport HYDRATEC, CEDRAT, SOTUETEC, SOTINFOR ; Tunis ; 112 p.
Desanges J. (1963)- Etendue et importance du Byzacium avant la création sous Dioclétien, de la province de Byzacène ; Les Cahiers de Tunisie ; Rev. Sc. Hum. ; N° 44 ; 4ème trimestre ; Tome XI ; Tunis ; p. 7-22.

Desanges J. (1984)- Byzacium, Byzacène ; Encyclopédie berbère ; p. 1674-1677 ; http://encyclopedieberbere.revues.org/1886.
Despois J. (1955)- La Tunisie orientale : Sahel et Basses steppes : étude géographique ; Thèse es-lettres ; Institut des Hautes Etudes ; Tunis ; 606 p.
Despois J. (1980)- Essai sur l'habitat rural du Sahel tunisien ; Les Cahiers de Tunisie ; Rev. des Sciences Humaines ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Tome XXVIII ; N° 113-114 ; 3ème et 4ème Trimestres ; Tunis ; p. 231-252.
Direction des Etudes et des Grands Travaux Hydrauliques D.E.G.T.H (1979)- Aménagements de la sebkha Kelbia : étude préliminaire ; Rapport HYDRATEC, CEDRAT, SOTUETEC ; Tunis ; 112 p.
DORIS (2008)- *Cerastoderma edule Linnaeus*, 1758; http://doris.ffessm.fr/fiche2.asp?fiche_numero=1378
Drake N. A. et Bryan R. G. (1994)- Monitoring the flooding ratio of Tunisian playas using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery ; Environmental-change in drylands: biogeographical and geomorphological perspectives; Edited by A. C. Millington and K. Pye ; p 347-364
Ducassou E. (2003)- Taux de sédimentation holocènes exceptionnels sur la marge nord islandaise : Interaction entre sédimentation volcanoclastique et circulation océanique ; Mém. DEA ; Département de Géologie et Océanographie ; UMR5805-EPOC ; 52 p.
Duchaufour Ph., Souchier B. et Bonneau M. (1977)- Pédologie ; tome 1 : Pédogénèse et classification ; Masson ; 477p.
Dussart B. (1992)- Limnologie : l'étude des eaux continentales ; Ed. Boubée N. et Cie ; 2ème édition ; Paris ; 623 p.

E

El Batti J. (1974)- Hydrologie de la plaine d'Enfidaville ; Thèse de Doctorat de 3ème Cycle ; Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble ; Paris ; 122 p.
El Faleh E. M., Moulay Lahsen M. (2001)- La croûte zonaire des encroûtements carbonatés tertiaires du bassin de Jbel Rhassoul (Maroc) : caractérisation et mode de formation ; Géomorphologie : relief, processus, environnement ; vol. 7, n°4 ; p. 271-279.
Encyclopédie de Géographie . (1992) ; sous la direction de Bailly A., Ferras R. et Pumain D. ; Economica ; Paris ; 1132 p.
Encyclopedia of Geomorphology (2006); Edited by A.S. Goudie ; International Association of Geomorphologists; Taylor & Francis e-Library ; Vol. 1& 2 ; 1156 p.

F

Farhat B. et Ben Mammou A. (2010)- Etude du remplissage sédimentaire d'une sebkha côtière tunisienne au cours du Quaternaire récent: la Sebkha Bou Zid (Nord-Est du Cap Bon) ; Geo-Eco-Trop. ; 34 ; p 97-102
Faust D., Zielhofer C., Baena R. et 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; p 1757-1775.
Fedoroff N. et Courty M. A. (1992)- Organisation du sol aux échelles microscopiques ; Labo. Sc. des Sols et Hydrologie ; Institut National Agronomique Paris-Grignon ; 41 p.
Ferron J. L. (1963)- La Byzacène à l'époque punique, état actuel des connaissances ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 44 ; Tome XI ; Tunis ; p. 31-46.
Fischesser Raymond (1955)- Données des principales espèces minérales ; 9ème édition ; Editeurs, imprimeurs : J. et R Sennac ; Paris ; 682 p.

FOLK, R.L. & WARD, W.C., 1957 - Brazors rivers bars, a study in the significance of grains size parameters. Journal of Sedimentology and Petrology, 27, 3-27

Frézouls Ed. (1963)- Pour une enquête sur les villes de la Byzacène ; Les Cahiers de Tunisie ; Rev. Sc. Hum. ; N° 44 ; 4ème trimestre ; Tunis ; p. 75-84.

G

Gargani J. (2004)- Contribution à l'étude de la vitesse critique d'érosion des sols cohésifs ; C. R. Géoscience ; 336 ; p.561-566.

Gaucher G. et Burdin S. (1974)- Contribution aux techniques d'amélioration des terrains salés : géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés ; Collection « Techniques vivantes » ; Presses Universitaires de France ; 230 p.

Gautier E. et Touchart L. (1999)- Fleuves et lacs; Collection « Synthèse » ; Série « Géographie » ; Sous la direction de Mathieu J.-L. ; Armand colin ; Paris ; 95 p.

George P. (1970)- Dictionnaire de la géographie ; Presses universitaires de France ; Paris ; 448 p.

Ghanmi M, Ben Youssef M., Rabia M. Ch. et Gaied M. S. (2004)- Carte géologique de Sebkha Kelbia, échelle 1/50 000 ; Feuille N° 56 ; Direction du Service Géologique ; Office National des Mines ; Tunis.

Ghilardi M., Fouache E., Syrides G., Styllas M., Stiros S. et Kozlakidis Z (2009)- Évolution des paysages de la plaine de Macédoine centrale : entre géographie historique et approche paléoenvironnementale ; Cybergeo : European Journal of Geography ; Environnement, Nature, Paysage ; 19 p.
http://www.cybergeo.eu/index22529.html ;

Glossaire national des SDAGE (2009)- Définition de l'hydrosystème
http://www.aquaportail.com/definition-4446-hydrosysteme.html

Goddas R. (1962)- Etude pédologique de Chott Mariem, zone II ; Section spéciale d'études de pédologie et d'hydrologie ; Tunis ; 18 p.

Gsell S. (1913)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Les conditions du développement historique, les temps primitifs, la colonisation phénicienne et l'empire de Carthage; T1 ; Librairie Hachette ; Paris ; 534 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1918a)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : l'état carthaginois ; T2 ; Librairie Hachette ; Paris ; 467 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1918b)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Histoire maritime de Carthage ; T3 ; Librairie Hachette ; Paris ; 415 p.
http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1920)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : la civilisation carthaginoise ; T4 ; Librairie Hachette ; Paris ; 505 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1927a)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Les royaumes indigènes : organisation sociale, politique et économique ; T5 ; Librairie Hachette ; Paris ; 290 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1927b)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Les royaumes indigènes : vie matérielle, intellectuelle et morale ; T6 ; Librairie Hachette ; Paris ; 294 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm.

Gsell S. (1928a)- Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : La république romaine et les rois indigènes ; T7 ; Librairie Hachette ; Paris ; 305 p.
http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm

Gsell S. (1928b)-Histoire ancienne de l'Afrique du Nord : Jules César et l'Afrique fin des royaumes indigènes ; T8 ; Librairie Hachette ; Paris ; 296 p. ; http://www.algerie-ancienne.com/livres/gsell/gsell.htm

Guellouz A., Masmoudi, Smida M. et Saadaoui A. (2010)- Histoire générale de la Tunisie ; Tome III ; Les temps modernes (1534-1881) ; Sud éditions ; Tunis ; 495 p.

H

Hachicha M., Stoops G. et M'Hiri A. (1987)- Aspects micromorphologiques de l'évolution des sols de lunettes argileuses en Tunisie ; Actes de la VII Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols ; Paris ; Juillet 1985 ; Edité par N. Fedoroff, L.M. Bresson et M. A. Courty ; Imprimerie Schiffer ; Paris ; p193-197

Hachicha M. (1991)- Efficacité des pluies torrentielles dans le lessivage des sels ; Bull. Assoc. Géogr. Tun. ; 12ème année ; N° 11 ; 47-70 p.

Haddoumi H., Aouraghe H., Limondin-Lozouet N., EL Harradji A., Sala R., et El Haller P (1983)- Structure profonde du Sahel tunisien ; Interprétation géodynamique ; Thèse de 3ème cycle ; Besançon ; 163 p.

Hammouti K. (2008)- La malacofaune continentale holocène du bassin de l'oued El Haï (hauts plateaux septentrionaux, Maroc oriental) : premières données paléontologiques et paléoenvironnementales. Actes RQM4 : Le Quaternaire marocain dans son contexte méditerranéen ; 15, 16 et 17 novembre 2007 ; Oujda ; Maroc ; p. 280-290.

Hamon Y. (2004)- Morphologie, évolution latérale et signification géodynamique des discontinuités sédimentaires, Exemple du Lias de la marge Ouest du Bassin du Sud-Est (France) ; Thèse de Doctorat ; Université Montpellier II ; 294 p.
http://tel.archives-ouvertes.fr:80/docs/00/04/82/30/PDF/tel-00009709.pdf

Hamza A. (1987)- Etude préliminaire de l'évolution de l'érosion dans les Hautes Steppes tunisiennes depuis l'Holocène ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 15 ; p 29-66.

Hamza A. (1988)- Erosion et lutte anti-érosive dans le bassin versant de l'oued Zeroud (Tunisie centrale) de l'approche exogène à la stratégie techico-paysanne ; Thèse de doctorat d'Etat ; Strasbourg ; 3 vol. ; 1191 p.

Harbi M. et Zoughlami J. (1971)- La Rammadya de Sebkhat Halk el-Menzel ; *Africa*, 3-4 ; p 181-184.

Hopkins J. (1960)- Sousse et la Tunisie orientale médiévales vues par les géographes arabes ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 31 ; Tome VIII ; Tunis ; p. 83-95.

Horchani A. (1994)- Reflexions sur l'aménagement des lacs et sebkhas en Tunisie ; Rev. Sols de Tunisie ; Bull. division des sols ; Tunis ; N° 15 ; p 271-281.

I

Ibouhouten H., Mahjoubi R., Mikdad A., Kamel S., Linstädter J., Bussmann J. et Zielhoffer Ch. (2008)- Résultats préliminaires de l'étude géoarchéologique des dépôts fluviatiles de la Basse Moulouya (Rif oriental, Maroc) ; Actes RQM4 : Le Quaternaire marocain dans son contexte méditerranéen ; 15, 16 et 17 novembre 2007 ; Oujda ; Maroc ; p62-74

ICDD: International Centre for Diffraction data (1981)- Selected powder diffraction data for minerals ; Data book ; Suppliment I ; Published by the JCPDS ; USA ; 463 p.

J

Jaouadi S. (2009)- Etude palynologique du site holocène Sabkhet Halk El Menjel (Tunisie centrale) ; Master Erasmus Mundus in Quaternario e Preistoria ; Università Degli Studi di Ferrara; 43 p.

Jaouadi S., Lebreton V., Mulazzani S., Boussoffara R. et Mannai-Tayech B. (2010)- Analyses polliniques en contexte anthropisé : le cas du site holocène SHM-1 (Hergla,

Tunisie centrale) ; Peretto C (Eds) ; Annali dell'Università di Ferrara; Sez. Museologia Scientifica e Naturalistica ; Vol. 6 ; p 25-32.
Jaouadi S. et Lebreton V. (2013)- Analyses polliniques du site holocène SHM-1 ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; p. 362-366.
Jauzein A. (1967)- Contribution à l'étude géologique des confins de la Dorsale tunisienne (Tunisie septentrionale) ; Ann. Min. Géol. ; Tunisie ; N° 22 ; 475 p.
Jauzein A. et Perthuisot J. P.(1972)- Quelques réflexions sur la sédimentation marine à propos de la Sebkha el Melah (Zarzis-Tunisie) ; Extrait de C. R. sommaire des Séances de la Société Géologique de France ; Fascicule 2 ; p. 86-87.
Jeddi Z., Belhouchet L., Mulazzani S. (2013)- Les techno-complexes lithiques de SHM-1 ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; 156-220 p.
Jédoui Y., **Davaud E.** et **Strasser A.** (1987)- Sédimentation et Diagenèse du cordon littoral tyrrhénien de la Sebkha de Halk el Menzel (Hergla, Tunisie) ; Notes Ser. Géol. ; N° 55 ; Tunisie ; p 45-74.
Joly F. (1997)- Glossaire de Géomorphologie : Base de données sémiologiques pour la cartographie ; Ed. Masson et Armand Colin ; Paris ; 325 p.

K

Kaemmerer M. et Revel J.-C. (1989)- Signification des précipitations d'origine biologique de fer et de manganèse dans les alluvions quaternaire du Sébou (Maroc) ; Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire ; Vol. 26 ; N° 4 ; p. 213-218.
Kamoun Y. (1981b)- Néotectonique dans le domaine du Sahel (Tunisie orientale) ; Actes du 1er Cong. Nat. des Sc. de la Terre ; vol.I ; Tunis ; p. 433-455.
Kamoun Y. (2001)- Un témoin de l'importante lunette d'el Kelbia : Draa Lakhmès-Ech Chraïef (Tunisie orientale) ; Notes Ser. Géol. de Tun. ; N° 67 ; Tunisie ; p 107-119.
Kamoun Y. et Karray M. R. (2001)- Exploitation des cartes topographiques pour l'établissement d'une esquisse morphostructurale ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 32 ; Fac. Sc. Hum. et Soc. Tunis I ; p. 45-56.
Karray M. R. (1990a)- Un dépôt lacustre à cardium d'âge holocène dans la sabkha Kelbia (Tunisie orientale) ; Notes Ser. Géol. ; N° 56 ; Tunisie ; p 85-90.
Karray M. R. (1990b)- L'évolution du fond d'el Kelbia depuis 1892; Rev. Tun. Géogr. ; N° 19 ; p. 167-180.
Karray M. R. (1990c)- Alignements morphostructuraux en Tunisie nord-orientale; Rev. Tun. Géogr. ; N° 18 ; Fac. Sc. Hum. et Soc. Tunis I ; p. 181-199.
Karray M. R. (1993)- Sebkhet el Kelbia (Tunisie orientale) : dynamique récente et changements actuels 1892-1992 ; Actes de 2ème Congrès des Géographes Africains ; Rabat et Agadir 19-24 avril 1993 ; p. 141-166.
Karray M. R. (2006)- Mouvements du sol dans l'arrière pays du Golfe d'Hammamet (Tunisie) ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 37 ; Fac. Sc. Hum. et Soc. Tunis I ; p. 75-104.
Karray M. R. (2010)- Sahel et Kairouanais septentrionaux et leurs abords montagneux (Tunisie orientale) : étude géomorphologique ; Thèse pour le Doctorat d'Etat ; FSHS de Tunis ; 737 p.
Kervazo B. et Laville H. (1988)- Caractéristiques physico-chimiques d'une séquence sédimentaire en milieu karstique et signification : exemple de la grotte Vaufrey ; Annales de la Société géologique de Belgique ; J. IM ; p. 41-49.

Khattali H. (1996)- Erosion éolienne en Tunisie aride et désertique : analyse des processus et recherches des moyens de lutte ; Thèse de Doctorat ; Fac. Des Sciences Biologiques appliquées ; Université de Gent ; 178 p.

L

Lakhdar R., Soussi M., Ben Ismail M. H. et M'Rabet A. (2006)- A Mediterranean Holocene restricted coastal lagoon under arid climate : Case of the sedimentary record of Sebkha Boujmel (SE Tunisia) ; Rev. Palaeogeography, Paleeoclimatology, Palaeoecology ; N° 241 ; Elsevier ; p. 177-191.

Lamti L. (1988)- Analyse morphostructurale par techniques cartographiques et télédétection spatiale sous SIG : application à la Sebkha el Kelbia et ses environs ; Mém. D.E.A. ; Fac. Sc. de Tunis ; Université de Tunis II ; 70 p.

Langlois C. (2006)- Foraminifères ; 6 p.
http://step.ipgp.fr/images/b/b3/Langlois_biogeopal_TD5_FicheForams.pdf

Lebreton V. (2006)- Prélèvements pour analyses paléobotaniques à Sebkha Halk el Menjel (Hergla – Tunisie) ; Rapport ; 10 p.

Lebreton V. (2009a)- Résultats préliminaires de l'analyse palynologique du carottage C3 de la Sebkha Halk el Menjel ; Rapport ; 8 p.

Lebreton V. (2009b)- Résultats préliminaires de l'analyse palynologique du site épipaléolithique SHM-1 (Sebkha Halk el Menjel, Hergla, Tunisie) ; Rapport ; 8 p.

Lebreton V., Messager E., Marqueur L. et Renault-Miskovsky J. (2010)- A neotaphonomic experiment in pollen oxidation and its implications for archaeopalynology ; Review of paleobotany and palynology ; 162 ; p 29-38.

Lebreton V. et Jaouadi S. (2013)- Histoire holocène de la végétation sur le littoral de la Tunisie centrale : analyse pollinique des sédiments de la sebkha-lagune Halk el Menjel ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; 48-56 p.

Lebreton V., Jaouadi S., Mulazzani S., Boujelben A., Belhouchet L., Gammar A. M., Combourieu Nebout N., Saliège J.-F., Karaay M.R. et Fouache E. (2015)- Early oleiculture or native wild *Olea* in Eastern Maghreb: new pollen data from the sebkha-lagoon Halk-el-Menjel (Hergla, Central Tunisia); Environmental Archaeology. DOI 10.1179/1749631414Y.0000000046

Lefère D. et Ballouche A. (1991)- Evolution des paléoenvironnements de la marge nord-saharienne à l'Holocène : exemple du bassin de Ksabi (Moyenne Moulouya, Maroc) ; Actes des symposiums 11 et 17 de la 11ème R.S.T. : « Datation et caractérisation des milieux pléistocènes » ; Clermont-Ferrand, 1986 ; Cahiers du Quaternaire ; N°16 ; p 451-477

Lespez L. (1998)- Le bassin versant du Xéropotamos (Macédoine orientale), contribution à l'étude des rythmes de l'érosion holocène en Grèce ; ; Bull. Assoc. Géogr. Franç. ; 75ème année ; Paris ; p. 109-120.

Lespez L. et Dalongeville R. (1998)- Morphogenèse würmienne en Grèce du Nord : le piémont des montagnes deLékani ; Revue Géomorphologie : relief, processus, environnement ; N° 4 ; p 331-350

Lespez L. (1999)- L'évolution des modelés et des paysages de la plaine de Drama et de ses bordures au cours de l'Holocène (Macédoine orientale, Grèce) ; Thèse ; Université de Clermont II ; 539 p.

Lespez L., Dalongeville R., Pastre J.-F. et Müller S. (2003)- Le site de Malia et la mer, approche paléoenvironnementale. Résultats préliminaires : l'analyse sédimentologique du sondage VI ; Topoi ; 11 ; p 613-633.

Lespez L., Clet-Pellerin M., Davidson R. et Marcigny C. avec la collaboration de Hardel B. et Levalet F. (2004)- Evolution des paysages et anthropisation depuis le Néolithique dans la péninsule de la Hague (Normandie, France) ; Rév. D'Archéométrie ; N°28 ; p71-88

Lespez L., Clet-Pellerin M., Limondin-Lozouet N., Pastre J.-F. et Fontugne M (2005)- Discontinuités longitudinales des dynamiques sédimentaires holocènes dans les vallées de l'Ouest du Bassin Parisien, l'exemple de la Mue (Basse-Normandie ; Quaternaire ; N°16 (4) ; p. 273-298.

Lézine A. (1971)- Deux villes d'Ifriqiya : études d'archéologie, d'urbanisme, de démographie : Sousse, Tunis ; éd. Geuthner ; Paris ; p 77-82.

Losson B. et Corbonnois J. (2006)- Les modes de sédimentation détritique : nouvelle méthode de détermination appliquée à des remplissages endokarstiques ; Rev. Geologica Belgica ; 9/3-4 ; p. 257-265.

M

Mahmoudi M. (1986)- Stratigraphie, sédimentologie et diagenèse des dépôts tyrrhéniens du Sahel tunisien (Tunisie orientale) ; Thèse 3ème cycle ; Uni. Paris sud ; Centre d'Orsay ; 292p.

Malet J.-Ph. et Remaître A. (2003)- Module de traitement des données brutes issues du granulomètre laser Coulter; module voie fluide ; Laboratoire d'Analyses des Sols ; Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre.

Mannino M. A. et Mazzanti C. (2013)- Studi ed osservazioni preliminari sulla malacofauna dal sito capsiano costiero SHM-1 (Tunisia centrale); Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie » ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag, Frankfurt.

Mansouri T. (1997)- Produits agricoles et commerce maritime en Ifrīqiya aux XIIe-XVe siècles ; In: Médiévales ; N°33 ; Cultures et nourritures de l'occident musulman. p. 125-139.

Martinez C. et Paskoff R. (1984)- Indices de distension pendant le Quaternaire récent en Tunisie : leur signification dans un régime de compression généralisée ; Cah. O.R.S.T.O.M. ; série Géol. ; Vol. XIV; N° 2 ; p. 153-161.

Mathieu C. et Pieltain F. (1998)- Analyse physique des sols : Méthodes choisies ; Edi. Europe Media Duplication S.A. ; Paris ; 275 p.

Mathieu C. et Lozet, J. (2011)- Dictionnaire de Science du Sol ; 4ème édition ; Ed. Lavoisier ; Coll. Tec et Doc ; Paris ; 733 p.

Mejri H. (2012)- Paléorivages marins pléistocènes du littoral est tunisien : chronologie IRSL, paléoenvironnements et régime tectonique ; Thèse de Doctorat ; Lille 1 ; 390 p.

Mkina H. (2006)- Etude comparée de l'évolution des phénomènes érosifs dans la plaine de l'oued Merguellil ; Mémoire de Mastère ; FSHS de Tunis ; 124 p.

Mrabet A. (1995b)- L'état économique de l'Afrique byzantine d'après les récits des chroniqueurs arabes ; Africa XIII ; Institut National du Patrimoine ; Tunis ; 123-133 p.

Mrabet A. et **Boujarra A.** (1999)- Archéologie et géomorphologie : contribution à l'étude d'évolution des paysages du Sahel nord depuis l'antiquité ; Colloque : Du Byzacuim au Sahel : itinéraire historique d'une région tunisienne ; Textes réunis par Mrabet A. ; Série histoire ; vol. I ; p. 83-96.

Mrabet A. (1999)-De la Byzacène au Muzaq : état économique d'une province d'Afrique ; Actes du colloque de Sbeitla : Histoire des hautes Steppes, Antiquité-Moyen-âge (sessions 1998-1999). p. 151-159.

Mulazzani S. (2010)- L'habitat épipaléolithique de SHM-1 et les sites environnants au bord de la sebkha-lagune de Halk el Menjel (Hergla-Tunisie) entre le VIIe et le VIe millénaire Cal BC ; Thèse de Doctorat ; Université Paris 1 ; Vol. I ; 568 p.

Mulazzani S., Belhouchet L. et Jeddi Z. (2009)- Aspects techno-typologiques de l'industrie lithique des chasseurs-pécheurs-cueilleurs de SHM-1 (Hergla, Tunisie) ; *Africa* **LXIV (3-4)** ; p 458-473.

Mulazzani S., Boussoffara R., Azzarà V., Belhouchet L., Boldrin M., Boujelben A., Crema E.R., Mannino M. A., Del Grande C., Mazzanti C. Et Scaruffi S (2008) : «Between the Sahara and the Mediterranean: a Study of the Middle Holocene Communities of the Sebkhet Halk al Menzel (Tunisia). The first three Campaigns 2002-2004» ; Proceedings of the IX Symposium on Mediterranean Archaeology ; Chieti (Italy), 24-26 February 2005 ; Edited by Menozzi O., Di Marzio M. L. and Fossataro D. ; BAR International Series 1739; p 383-390.

Mulazzani S., Boussoffara R., Aouadi N., Azzarà V., Belhouchet L., Boujelben A., Crema E.R., Curci A., Del Grande C., Maini E., Mannino M. A., Mazzanti C. Et Scaruffi S (2007)- «Entre Sahara et Méditerranée : Le peuplement de Sebkhet Halk el Menjel (Tunisie orientale) pendant l'Holocène (campagnes 2002-2005)» ; Africa ; XXI ; p 19-42.

Mulazzani M., Sidéra I. avec la collaboration de Monthel G. (2013)-L'industrie osseuse de SHM-1 : approche technologique ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; 249-262 p.

O

Ollivier V., Roiron P., Balasescu A., Nahapetyan S., Gabrielyan Y. et Guendon J.L. (2009)- Milieux, processus, faciès et dynamiques morphosédimentaires des formations travertineuses quaternaires en relation avec les changements climatiques et les occupations humaines entre Méditerranée et Caucase ; Studii de Preistorie ; N°5 ; p 15-35.

Oueslati A. (1984)- La côte à lagunes de la presqu'île du Cap Bon; Rev. Tun. Géogr. ; N° 12 ; Note ; Tunis ; p. 183-204.

Oueslati A. (1993)- Les côtes de la Tunisie : géomorphologie et environnement et aptitudes à l'aménagement ; Publ. Fac. Sc. Hum. et Soc. ; Tunis ; 387 p.

Oueslati A. (1995a)- Sur la richesse des côtes tunisiennes en industries lithiques préhistoriques : signification chronostratigraphique et paléoenvironnementale des formes et des dépôts hérités des 100000 dernières années ; Rev. Tun. Géogr. ; N° 28 ; p. 173-197.

Oueslati A. (1995b)- New data about the Holocene and historical continental deposit in Tunisia. Revue tunisienne de géographie ; N° 25 ; p 139-161.

P

Paskoff R. et Sanlaville P. (1983)- Les côtes de la Tunisie, variations du niveau marin depuis le Tyrrhénien ; Coll. Maison Orient Médit. ; 14 ; Série Géogr. et Préhist. ; 2 ; 192 p.

Passega R. (1957)- Texture as characteristic of clastic deposition. Bulletin of the Amercican Association of Petroleum Geologists; vol. 41; N° 9; p 1952-1984.

Perthuisot J. P., Floridia S. et Jauzein A. (1972)- Un modèle récent de bassin côtier à sédimentation saline : la sebkha el Melah (Zarzis, Tunisie) ; Rev. Géogr. phys. Géol. dyn. ; (2), Vol. XVI ; Fasc. 1 ; Paris ; p. 67-84.

Perthuisot J. P. (1974)- Les dépôts salins de la sebkha el Melah de Zarzis : conditions et modalités de la sédimentation évaporatique ; Rev. Géogr. phys. Géol. dyn. ; (2), Vol. XVI ; Fasc. 2 ; Paris ; p. 177-188.

Perthuisot J. P. et Jauzein A (1975)- Sebkhas et dunes d'argiles : l'enclave endoréique de Pont deu Fahs, Tunisie ; Rev. Géogr. phys. Géol. dyn. ; 14 ; série Géogr. et Préhist. ; Vol. XVII ; Fasc. 3 ; p. 295-306.

Perthuisot J. P. (1976)- Une sebkha sulfatée sodique en pays sédimentaire. La sebkha Oum el Krialate (Sud tunisien); Géol. Méditer. ; III ; 4 ; p. 265-274.
Petit-Maire N., Burollet P. F., Ballais J.-L., Fontugne M., Rosso J.-C. et Lazaar A. (1991)- Paléoclimats holocènes du Sahara septentrional. Dépôts lacustres et terrasses alluviales en bordure du Grand Erg Oriental à l'extrême-Sud de la Tunisie ; Comptes rendus de l'Académie des sciences ; Série 2 ; Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre ; vol. 312 ; N° 13 ; p. 1661-1666.
Pomel S., Abichou A. et Schulz E. (2004)- La signification paléo-impluviométrique des sédiments de la Sebkha Mhabeul (Sud-Est de la Tunisie) ; Table ronde en l'honneur du Professeur René NEBOIT-GUILHOT: « L'Érosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement » ; Clermont-Ferrand 25-26-27 mars 2004 ; Presses Universitaires Blaise-Pascal ; *Collection « Nature et Sociétés »*. p. 437-444.
Poncet J. (1961)- Aux sources de l'histoire nord-africaine : prospérité et décadence ifrikiyennes ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 33, 34, 35 ; Tome IX ; Tunis ; p. 221-243.
Poncet J. (1970)- La catastrophe climatique de l'automne 1969 en Tunisie ; Ann. de Géogr. ; N° 435 ; p. 581-595.

R

Rabhi M. et Maamri R. (2003)- Carte géologique de Sidi Bou Ali, échelle 1/50 000 ; Feuille N° 49 ; Direction du Service Géologique ; Office National des Mines ; Tunis.
Regaya K. (2000)- L'interférence pédogenèse-sédimentogenèse dans les carbonates continentaux : contribution à l'étude de la lithogenèse des calcretes et formations calcaires associées quaternaires de Tunisie ; Thèse d'Etat Es-Sciences Géologiques ; Fac. Sc. de Tunis ; Université de Tunis II ; 442 p.
Regaya K. (1992)- Les croûtes calcaires de Tunisie orientale aux environs de Sousse : signification climatique et historique ; Bull. Sci. Géol. ; N° 45-2 ; Strasbourg ; p. 99-107.
Rey T., Lefevre D. et Vella C. (2005)- Données nouvelles sur les lobes deltaïques du paléogolfe d'Aigues-Mortes à l'Holocène (Petite Camargue, France) ; Quaternaire ; 16 ; (4) ; p. 329-338. http://quaternaire.revues.org/index529.html?file=1.
Ricq M. (1966)- Mise au point d'une méthode d'analyse rapide des silicates ; *In* Revue de géographie alpine ; Tome 54 ; N°4 ; p. 631-636.
Rivière A. (1952)- Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles Notions de faciès granulométriques ; Bull. Soc. Géol. France ; T.6 ; p 155-167.
Rollet A.-J. (2007)- Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain ; Thèse ; Université jean Moulin ; Lyon 3 ; 305 p.
Romdhane M. S. (1997)- Importance écologique de la Sabkha d'el Kelbia ; Actes du séminaire gestion et conservation des zones humides tunisiennes ; Sousse octobre 1997 ; p 145-154.
Rosique T., Pous F. et Charles-Dominique P. (2000)- Évolution morphogénique holocène d'un bassin versant de la Forêt guyanaise : la Nourague occidentale (Guyane française) ; C. R. Acad. Sci., Sciences de la Terre et des planètes ; 330 ; Paris ; p. 333-340
Rougerie G. (1994)-Biogéographie des milieux aquatiques ; Armand Colin Editeur ; Paris ; 252 p.
Rouire A.-M.-F. (1889)- Historique de la découverte du bassin hydrographique de la Tunisie centrale et de son identification à l'ancien bassin du Triton ; C. R. Soc. Geogr. ; N°1 ; Paris ; p 14-20.

S

Saaidi E. (1988)- Traité de sédimentologie : pétrographie, environnements sédimentaires ; Afrique Orient ; Maroc ; 399 p.

Saliège J.-F., Magnani G. et Mulazzani S. (2013)- Datations ^{14}C de la r*ammadiya* SHM-1 ; Ouvrage collectif, *In Mulazzani S. (éd.) :« Le Capsien de Hergla (Tunisie) - Culture, environnement et économie.» ;* Reports in African Archaeology 4 ; Africa Magna Verlag ; Frankfurt ; p 145-150.

Saumagne Ch. (1962a)- La centuriation rurale de l'Afrique ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 37, 38, 39, 40 ; Tome X ; Tunis ; p. 207-212.

Saumagne Ch. (1962b)- Sur le colonat byzantin en Afrique ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 37, 38, 39, 40 ; Tome X ; Tunis ; p. 295-298.

Saumagne Ch. (1963)- Le Byzacium proto-romain : villes libres, Stipendiarii, Liberi Massinissae ; Les Cahiers de Tunisie ; Fac. Let. Sc. Hum. ; Université de Tunis ; N° 44 ; Tome XI ; Tunis ; p. 47-62.

Schowengerdt R. A. (1983)- Techniques for image processing and classification in remote sensing ; Academic Press ; San Diego ; California; 249 p.

Schütt B. (1998)- Reconstruction of Holocene paleoenvironments in the endorheic basin of Laguna de Gallocanta, central Spain by investigation of mineralogical and geochemical characters from lacustrine sediments ; Journal of Paleolimnology ; N° 20 ; p. 217-234.

Schütt B. (2000)- Holocene paleohydrology of playa lakes in northern and central Spain: a reconstruction based on the mineral composition of lacustrine sediments ; Quaternary International ; 73/74 ; p 7-27.

Schütt B. (2004)- The chemistry of playa-lake-sediments as a tool for the reconstruction of Holocene environmental conditions –as case study from the central Ebro basin ; Paleoecology of Quaternay drylands; Lecture Notes in Earth Sciences; 102; p 5-30.

Schütt B. et Thiemann S. (2004)- Modern Water leve and sediment accumulation changes of lake Abaya, southern Ethiopia – A case study from the Bilate River delta, northern lake area ; In Jansky L., Haigh M.J., Prasad H. ; Sustainable management of headwater resources: research from Africa and India; UNU Series on Water resourse Management and Policy; Paris; United nations University Press; p 137-154.

SIRUS : Société d'Ingénierie Rurale Urbaine et Sanitaire (1997)- Aménagements hydrauliques de Sebkhat el Kelbia ; Etude d'exécution ; Ministère de l'Agriculture, C.R.D.A de Sousse ; . Tunis ; 67 p.

Slim H., Trousset P., Paskoff R. et Oueslati A. (2004)- Le littoral de la Tunisie : éude géoarchélogique et historique ; Etudes d'Antiquités africaines ; CNRS éditions ; 308 p.

Solignac M. (1934)- Carte géologique provisoire de Sousse, échelle 1/200 000 ; Service des Mines ; Directions des travaux publics ; Tunis.

Stuiver M. et Reimer P.J. (1993)- Extended ^{14}C data base and revised *CALIB* 3.0 ^{14}C Age calibration program ; Rév. Radiocarbon ; I ; 35 ; p. 215-230.

Stuiver M. et Reimer P. J. (2005)- Radiocarbon Calibration Program Calib. Rev. 5.0.1. http://calib.qub.ac.uk/calib/calib.html

Stuiver M. et Reimer P. J. (2010)- Radiocarbon Calibration Program Calib. Rev. 6.0.1. http://intcal.qub.ac.uk/calib/

Stuiver M., Reimer P. J. et Reimer R. (2015)- Calib Radiocarbon Calibration http://calib.qub.ac.uk/calib/

T

Tabutin D., Vilquin E. et Biraben J.-N. (2001)- L'histoire de la population de l'Afrique du Nord pendant le deuxième millénaire ; Communication présentée à Conférence : « The History of World Population in the Second Millennium » ; Florence 28-30 juin 2001 ; 17 p.

https://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/sped/documents/dt15.pdf
Tagorti M. A. (1990)- Dynamique de couverture, genèse et évolution du complexe lagunaire Sebkha Halk el Mengel- Sabkha Assa el Jeriba (Sahel de Sousse) : analyse séismostratigraphique, géochimie et échanges hydrologiques saisonniers ; Thèse de Doctorat ; Fac. des Sci. Tunis, 162 p.
Thiry J. (1995)- Le Sahara libyen dans l'Afrique du nord médiévale ; Ed. Peeters Publishers ; Louvain ; 166 p.
http://books.google.fr/books?id=qy4PBt7m3uAC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
Tixeront J. (1951)- Conditions historiques de l'érosion en Tunisie ; Ass. Int. Hyd. Sc. Ag. De Bruxelles ; T2 ; p 73-81.
Touchart L. (2002)- Limnologie physique et dynamique : une géographie des lacs et des étangs ; Ed. L'Harmattan ; France ; 396 p.
Touchart L. (2005)- Hydrosystème ; Hypergéo ; Relations Sociétés/Environnement-Concepts ; 3 p. http://www.hypergeo.eu/article.php3?id_article=313#
Toumi A. (1999)- Mutations socio-économiques dans les petites localités du Sahel : le cas de Hergla ; Rev. Assoc. Géog. Tun. ; Numéro spécial ; 15-16 mars 1999 ; Textes réunis par Belhareth T. et Toumi A. ; p. 247-258.
TRASK P.D. (1932)- Origin and environment of source sediments of petroleum; Gulf Publishing Company, Houston, 67 p.
Tricart J., Raynal R. et Besançon J. (1972)- Cônes rocheux, pédiments, glacis ; Annales de Géographie ; T 81, n°443 ; p. 1-24.

V

Vatan A. (1967)- Manuel de sédimentologie ; Ed. Technip ; Paris ; 397p.
Vella C. (1999)- perception et évaluation de la mobilité du littoral holocène sur la marge orientale du delta du Rhône ; Thèse de Doctorat ; 1ère Partie ; Université d'Aix-Marseille I et Université de Provence ; 226 p. http://www.cerege.fr/IMG/pdf/these_vella_partie1.pdf.
Vizier J.F., (1974)- Contribution à l'étude des phénomènes d'hydromorphie, Recherche de relations morphogénétiques existant dans un type de séquence de sols hydromorphes peu humifères au Tchad ; 1ère Partie : Étude des caractères morphologiques et analytiques des sols de la séquence de Gole ; Cah. ORSTOM ; Sér. Pédol. ; Vol. XII, N° 2 ; p 171-206.
Vizier J.F. (1984)- Les phénomènes d'hydromorphie en régions tropicales à saisons contrastées : Application à une meilleure caractérisation des concepts de gley et de pseudogley ; Bul. AFES ; Sci. du Sol ; N° 3 ; p 225-238.
Vorenger J. (Sous presse)- L'ichtyofaune de SHM-1 ; *Ouvrage collectif, In Mulazzani S. (éd.) :« L'habitat épipaléolithique de SHM-1 (Hergla, Tunisie) au VIIe-Vie millénaire cal BC : environnement, culture et économie » ;* Antiquités Africaines ; CNRS-Aix-en-Provence, 4 p.

Z

Zerai K. (2006)- Les environnements holocènes et actuels dans le bassin versant de l'oued Sbeïtla (Tunisie centrale) ; Thèse de Doctorat ; Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591 ; Université Paris VII-Denis Diderot ; 333 p.
Zielhofer C., Faust D. et Linstadter J. (2008)- Late Pleistocene and Holocene alluvial archives in the Southwestern Mediterranean: Changes in fluvial dynamics and past human response; Quaternary International ; N° 181 ; p 39-54.

TABLE DES FIGURES

	Page
Fig. 1 : Croquis de localisation, contexte régional et organisation de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	3
Fig. 2 : Comparaison des distributions granulométriques des échantillons gypseux après l'élimination du gypse selon deux méthodes différentes de prétraitement chimique	11
Fig. 3: La sebkha al Kalbiyya dans son contexte régional	25
Fig. 4 : Contexte orohydrographique de la Sebkha al Kalbiyya	27
Fig. 5 : Cadre géologique de l'enclave semi-endoréique d'al Kalbiyya	29
Fig. 6 : Localisation des sondages, faciès et stratigraphie séquentielle des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya	30
Fig. 7 : Analyses lithoséquentielles et sédimentologiques des tarières T48 et T50 des bordures occidentales de la sebkha al Kalbiyya	34
Fig. 8 : Distribution granulométrique des sédiments des séquences lithostratigraphiques S3-4 et S10-12 de la tarière T56 de la rive est de la sebkha al Kalbiyya	35
Fig. 9 : Modes d'accumulation des sédiments des tarières T48 et T50 (marges occidentales de la sebkha al Kalbiyya)	36
Fig. 10 : Caractéristiques sédimentologiques des dépôts de la tarière T56 (rive est d'al Kalbiyya)	37
Fig. 11 : Distribution granulométrique des sédiments dans les séquences lithostratigraphiques S2, S4, S8 et S12 de la tarière T48	38
Fig. 12 : Caractéristiques sédimentologiques des séquences lithostartigraphique de la tarière T52	40
Fig. 13 : Modes d'accumulation et diagramme de Passega des sédiments de la tarière T52 (rive ouest de la sebkha al Kalbiyya)	42
Fig. 14 : Distribution granulométrique des sédiments fluvio-palu-lacustres de la tarière T52	44
Fig. 15 : Faciès et caractéristiques sédimentologiques des remplissages sédimentaires de la tarière T55 (marge septentrionale de la sebkha al Kalbiyya)	46
Fig. 16 : Mécanismes morphodynamique de transport et d'accumulation des sédiments de la tarière T59 (rive sud d'al Kalbiyya)	49
Fig. 17 : Caractéristiques sédimentologiques des séquences lithostratigraphiques de la tarière T59 (rive sud d'al Kalbiyya)	51
Fig. 18 : Faciès et caractéristiques sédimentologiques du remplissage sédimentaire de la tarière T49 (le centre méridional de l'ombilic d'al Kalbiyya)	55
Fig. 19: Modes d'accumulation et typologie des sédiments de la tarière T49 en fonction de leur tri granulométrique et leur médiane	56
Fig. 20 : Zonage schématique des remplissages sédimentaires d'al Kalbiyya et des mécanismes morphodynamiques associés	59
Fig. 21 : Corrélations spatio-temporelle des faciès et unités sédimentaires des remplissages holocènes de la sebkha al Kalbiyya	62
Fig. 22 : Échelle litho-chronostratigraphique de synthèse et systèmes holocènes de fonctionnement hydromorphologique d'al Kalbiyya	65
Fig. 23: Distribution des coquilles en œuf d'autriche et de l'industrie lithique dans la zone prospectée III-JP de l'extrémité septentrionale de Dhra Laghmas-ash-Shraif	71
Fig. 24 : Héritages hydroéoliens des bordures de la sebkha al Kalbiyya	81
Fig. 25 : Bourrelet hydroéolien de la rive est d'al Kalbiyya : localisation, caractéristiques morphosédimentologiques et âge	84

Fig. 26 : Distribution granulométrique des sédiments du bourrelet holocène d'al Kalbiyya	85
Fig. 27 : Les voiles éoliens antiques des Dhras ar-Rommana et Zmenka sur les bordures sud-est d'al Kalbiyya-Halq Minjil	86
Fig. 28 : Cadre orohydrographique de Halq al Minjil	93
Fig. 29 : Depuis le Langhien, un contexte géologique prédisposant à l'accueil des domaines déprimés	95
Fig. 30 : Genèse et phases d'installation de Halq el Minjil : essai de reconstitution (Tagorti, 1991, redessiné et complété)	96
Fig. 31 : Formations tyrrhéniennes du cordon littoral de Halq al Minjil	98
Fig. 32: Milieux géographiques et états de surface de l'enclave littorale de Halq al Minjil	100
Fig. 33 : Sites d'Implantation des sondages carottés et à la tarière à main dans l'ombilic et sur les rives de la sebkha-lagune Halq al Minjil	102
Fig. 34 : Stratigraphie séquentielle haute résolution des remplissages sédimentaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil	103
Fig. 35 : Caractéristiques sédimentologiques et datations des remplissages sédimentaires de la carotte C3 du centre de Halq al Minjil	106
Fig. 36 : Typologie et modes d'accumulation des sédiments du faciès mixte sulfato-carbonaté de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)	108
Fig. 37 : Distribution granulométrique des échantillons du faciès « évaporatique » (FE) de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)	109
Fig. 38 : Concentration des éléments géochimiques majeurs des remplissages sédimentaires du fond de Halq al Minjil (Carotte C3)	110
Fig. 39 : Traits micromorphologiques du dépôt « évaporatique » de la séquence lithostratigraphique S14-C3 (Lame mince L5, carotte C3, l'ombilic de Halq al Minjil)	111
Fig. 40 : Micromorphologie du faciès mixte aux influences marines notables de l'ombilic de Halq al Minjil (Lame mince L2, séquence S21, carotte C3)	114
Fig. 41 : Courbes granulométriques sur la fraction 4 µm-2 mm des sédiments du faciès fluviatile reconnu sur la carotte C3 de l'ombilic de Halq al Minjil	115
Fig. 42 : Mode d'accumulation des sédiments de la carotte C3 (l'ombilic de la sebkha-lagune Halq al Minjil)	116
Fig. 43 : Aspects micromorphologiques du premier niveau lagunaire de Halq al Minjil (la séquence lithostratigraphique S16-C3, l'ombilic de la sebkha-lagune)	120
Fig. 44 : Caractéristiques sédimentologiques des remplissages des marges orientales de Halq al Minjil : investigation par la carotte C1	123
Fig. 45 : Mode d'accumulation et typologie des sédiments de la carotte C1 en fonction du tri et de la médiane granulométriques (bordures est de Halq al Minjil)	124
Fig. 46 : Concentration des éléments géochimiques majeurs (en %) des remplissages sédimentaires de la rive est de Halq al Minjil (la carotte C1)	126
Fig. 47 : Distributions granulométriques des sédiments du faciès mixte sulfato-carbonaté issus de la carotte C1 (rive est de Halq al Minjnil)	128
Fig. 48 : Modes de transport des sédiments de la carotte C1 de la rive est de Halq al Minjil	129
Fig. 49 : La morphoscopie du quartz et la distribution granulométrique du dépôt éolien du sommet de la carotte C1	134
Fig. 50: Echelle litho-chronostratigraphique de Halq al Minjil : corrélation des faciès, unités sédimentaires et systèmes du fonctionnement hydromorphologique de Halq al Minjil	139
Fig. 51 : Croquis de localisation de la dune hydroéolienne de la rive centre-ouest de Halq al Minjil	150
Fig. 52 : En fonction des rapports molaires K/Al et Ti/Al, les provenances des sédiments dans la carotte C2 sont beaucoup moins variées que dans les carottes C1 et C3	151
Fig. 53 : Morphoscopie et distribution granulométrique des sédiments du premier ensemble éolien de la carotte C2 (rive centre-ouest de Halq al Minjil)	152

Fig. 54 : Morphoscopie des sables et distribution granulométrique des sédiments du deuxième ensemble éolien du sommet de la carotte C2 (rive centre-ouest de Halq al Minjil)	154
Fig. 55 : Lames minces confectionnées et données micromorphologiques préliminaires sur le deuxième ensemble éolien de la partie supérieure de la Carotte C2	155
Fig. 56 : Caractéristiques sédimentologiques des remplissages de la carotte C2 de la rive centre-ouest de la sebkha-lagune Halq al Minjil	161
Fig. 57 : Modes de transport d'échantillons des dépôts d'épandage fluviatile la carotte C2 (Image CM)	163
Fig. 58 : Constructions hydroéoliennes holocènes des bordures de la sebkha-lagune Halq al Minjil	165
Fig. 59 : Croquis topographique du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	174
Fig. 60 : Le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil : organisation hydrographique et densité de drainage	176
Fig. 61 : Les formations géologiques superficielles du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil : Prédominance des terrains récents, meubles et hétérogènes	179
Fig. 62 : Histoire paléogéographique Eocène-Pliocène de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil (D'après Castany, 1952a et Tagorti, 1990)	181
Fig. 63 : Accidents tectoniques et indices des tectonolinéaments pléistocènes dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	186
Fig. 64 : Structure et relief morphostructural de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	188
Fig. 65 : Vestiges de glacis d'ablation encroûté déconnecté et réduit à des buttes et des lanières de plus en plus en plus effilées sur les marges méridionales de la sebkha lagune Halq al Minjil	192
Fig. 66 : Eléments géomorphologique et archéologique pour une attribution chronologique relative des formations encroûtées des bordures sud-est de Halq al Minjil	193
Fig. 67 : Les dépôts à nodules et à concrétions calcaires QP3e et QP3g : faciès sédimentaires et chronostratigraphie	195
Fig. 68 : Croquis de localisation des coupes levées et du sondage à la tarière à main effectué dans le système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	199
Fig. 69 : La coupe CaS, levée sur la rive droite du cours amont de l'oued as-Souriyya	203
Fig. 70 : La coupe transversale CmM levée sur la rive droite du cours moyen de l'Oued al Msid-ar-Ramla : agencement morpho-stratigraphique des formations pléistocènes-holocènes	205
Fig. 71 : La coupe CmS-2 levée dans le cours moyen de l'oued as-Souriyya à l'est de Ragad al Hanshir	207
Fig. 72 : Caractéristiques sédimentologiques et minéralo-géochimiques du dépôt hydromorphe de la coupe CaK (affluent de la rive gauche du cours amont de l'oued al Kouz)	209
Fig. 73 : Agencement, caractéristiques et évolution latéro-verticale des accumulations alluviales dans la moyenne vallée de l'oued al Gharig	210
Fig. 74 : La coupe CmL levée sur la rive gauche du cours moyen de l'Oued Lahmar	212
Fig. 75 : La coupe CmLG-1 levée sur la rive gauche du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga	215
Fig. 76 : La coupe CmLG-2 levée sur la rive droite du cours moyen de l'oued Lahmar-Ghuirga	216
Fig. 77 : La coupe CmLG-3 levée sur la banquette du cours moyen de l'oued Lahmar-Ghuirga	217
Fig. 78 : La coupe CaLG levée sur la berge gauche du cours aval de l'oued Lahmar-al Ghuirga	218
Fig. 79 : Les coupes du cours aval de l'oued Salah Bou Giddida : niveaux alluviaux et	220

caractéristiques morphosédimentologiques des dépôts

Fig. 80 : La coupe CaMR du cours aval de l'oued al Msid-ar-Ramla et les caractéristiques sédimentologiques des sédiments de la séquence éolienne 1d	222
Fig. 81 : Le placage/voile éolien « Trab es-Saffi » : position morphologique et caractéristiques sédimentologiques	223
Fig. 82 : Lithostratigraphie et calage chronologique relatif des dépôts de l'ancien cône deltaïque de l'oued al Manfas as-Sod	224
Fig. 83 : Coupe de synthèse des modelés holocènes du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	228
Fig. 84 : Carton géomorphologique du bassin de l'oued al Msid-ar-Ramla	230
Fig. 85 : Le paléosol brun et la formation « Hmari » : extension spatiale, position morphologique, rapport stratigraphique et éléments de calage chronologique	236
Fig. 86 : Une morphologie de flèche d'embouchure caractérise l'ancien cône deltaïque préromain de l'oued al Manfas as-Sod	239
Fig. 87 : Carton géomorphologique du bassin de l'oued Lahmar-al Ghuirga	241
Fig. 88 : Mode de transport des sédiments de la haute terrasse (la coupe CmLG-1) selon l'image CM	242
Fig. 89 : Modes de transport des échantillons de la coupe CmS-2 (Image CM)	246
Fig. 90 : Schéma synthétique de l'évolution diachronique de la morphogenèse, des dynamiques, des environnements et des forçages de contrôle dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil depuis environ 25120±120 BP	254
Fig. 91: Déviation du cours aval de l'oued al Manfas as-Sod, avant d'avoir son exutoire holocène, ou défluviation de l'un de ses bras, autrefois fonctionnel pendant le Pléistocène supérieur terminal	256
Fig. 92 : Pourcentages des taxons polliniques déterminés dans les spectres isolés des séquences lithostratigraphiques S4, S6 et S9 de la carotte C3	258
Fig. 93 : Diagramme pollinique des taxons les plus significatifs des séquences lithostratigraphiques S4, S6 et S9 de la carotte C3 de l'ombilic la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton, 2009a)	261
Fig. 94 : Evolution en profondeur des teneures en CaCO3 et du ratio Mg/Ca dans les carottes C1 et C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil	267
Fig. 95 : Sites préhistoriques et champs de concentration du matériel lithique : premiers résultats de la prospection géoarchéologique 2002-2007 (Mulazzani, 2010 ; observations de terrain)	268
Fig. 96 : Diagramme pollinique détaillé des coupes DI-47 et DE-46 du site SHM-1 (Jaouadi et Lebreton, 2013)	270
Fig. 97 : Dépôt de plage à Cerastoderma glaucum du stade lacustre SK_{VIII} de la première moitié de l'Holocène moyen (bordures sud-ouest de la sebkha al Kalbiyya)	278
Fig. 98 : Zone susceptible d'être submergée lors de l'élévation du niveau du plan d'eau lacustre à 20 m au-dessus du zéro marin	279
Fig. 99 : Cortège pollinique de la séquence S9 du niveau « évaporatique » FE2 de la carotte C3 (400-432 cm de profondeur)/stade sebkha littorale SH_{XI}	283
Fig. 200 : Variations bathymétriques des niveaux lagunaires flandriens FL1 et FL2 de Halq al Minjil	285
Fig. 101 : Evolution paysagère de Halq al Minjil et ses environs durant le Flandrien moyen et supérieur (Boujelben, 2013, modifié)	286
Fig. 102 : Des mouvements de sol et un système de fracturation actif expliquant la variation latérale de la profondeur d'un niveau lagunaire	288
Fig. 103 : Paléobathymétrie et niveau marin relatif dans les lagunes flandriennes et évolution des paléograus septentrionaux de Halq el Minjil depuis 4365±50 BP	295
Fig. 104 : Diagramme pollinique détaillé (arbres et arbustes) du sommet de la carotte C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton et Jaouadi, 2013, Faciès sédimentaires et stades	296

de fonctionnement hydrologique ajoutés)	
Fig. 105 : Diagramme pollinique détaillé (végétation steppique, herbacées et aquatiques) du sommet de la carotte C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil (Lebreton et Jaouadi, 2013, Faciès sédimentaires et stades de fonctionnement hydrologique ajoutés)	297
Fig. 106 : Cadastration romaine, types et répartition géographique de vestiges et de monuments historiques dans l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	314
Fig. 107 : Aspects de la morphodynamique actuelle et édification des cônes d'épandage et « deltaïques » sur les rives sud et sud-est de la sebkha al Kalbiyya	XXXI
Fig. 108 : Carton géomorphologique de l'oued as-Souriyya	XXXII

TABLE DES TABLEAUX

	Page
Tab. 1: Typologie des faciès des remplissages sédimentaires de la sebkha al Kalbiyya	31
Tab. 2 : Caractéristiques sédimentologiques de deux échantillons du faciès proximal colluvio-alluvial de la tarière T54	39
Tab. 3 : Caractéristiques sédimentologiques des dépôts fluviatiles d'épandage alluvionnaire reconnus sur la tarière T58 (rive sud-est d'al Kabiyya)	48
Tab. 4 : Le faciès de colmatage vaseux de l'ombilic d'al Kalbiyya(T53): organisation litho-séquentielle et caractéristiques sédimentologiques	53
Tab. 5 : Calage chronologique de la séquence fluvio-lacustre S24-T52 (rive ouest d'al Kalbiyya)	63
Tab. 6 : Typologie des faciès sédimentaires de la sebkha-lagune Halq al Minjil	104
Tab. 7 : Minéralogie des argiles du faciès mixte sulfato-carbonaté (FMC) de la base de la carotte C3 de l'ombilic de Halq al Minjil	107
Tab. 8 : Teneurs en éléments géochimiques mineurs du faciès mixte aux influences marines notables de l'ombilic de Halq al Minjil (carotte C3)	113
Tab. 9 : Caractéristiques sédimentologiques du faciès mixte aux influences fluviatiles notables de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)	117
Tab. 10 : Cortège minéralogique du faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)	118
Tab. 11 : Composition géochimique des niveaux lagunaires et de la séquence intermédiaire non fossilifère de la carotte C3 (l'ombilic de Halq al Minjil)	119
Tab. 12 : Caractéristiques géochimiques du faciès mixte sulfato-carbonaté de la carotte C1 (rive est de Halq al Minjil	120
Tab. 13 : Des caractéristiques sédimentologiques hétérogènes du faciès mixte d'influence marine notable de la carotte C1 (bordure est de Halq al Minjil)	130
Tab. 14 : Le premier remplissage lagunaire de la carotte C1 de la rive est de Halq al Minjil : une forte concentration des éléments géochimiques dosés	131
Tab. 15 : Datations ^{14}C et radiométriques des remplissages sédimentaires du fond de la sebkha-lagune Halq al Minjil	137
Tab. 16 : Datations ^{14}C des niveaux d'occupation épipaléolithique du site SHM-1 sur la rive centre-est de Halq al Minjil (Saliège et al., 2013)	138
Tab. 17 : Deux ensembles éoliens superposés présentent des caractéristiques sédimentologiques différentes (carotte C2, rive centre-ouest de Halq al Minjil)	152
Tab. 18 : Datation radiométrique ^{14}C des Helix d'une séquence alluviale séparant les deux dépôts à nodules et concrétions calcaires QP3e et QP3g	196
Tab.19 : Schéma chronostratigraphique des héritages géomorphologiques pléistocènes	197
Tab. 20 : Datations radiométriques ^{14}C des niveaux alluviaux du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Hal al Minjil	201
Tab. 21 : Composition minéralogique du paléosol brun et de la formation « Hmari »	206
Tab. 22 : Composition géochimique du paléosol brun et de la formation « Hmari »	226
Tab. 23 : Distribution des données polliniques sur la carotte C3 de l'ombilic de la sebkha-lagune Halq al Minjil	258
Tab. 24 : Evolution séquentielle des teneurs en CaO dans les carottes C1 et C3 de la sebkha-lagune Halq al Minjil	266

TABLE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

	Page
Pl. 1 : Des Halocnemum strobilaceum concourent à la genèse, l'étalement et la surélévation de la dune hydroéolienne devançant le bourrelet des bordures ouest de Halq al Minjil	159
Pl. 2 : Manifestations tectoniques pléistocènes associées aux régimes décrochants compressifs et distensifs	184
Pl. 3 : Faciès sédimentaire et chronostratigraphie de la première génération de dépôt pléistocène à nodules et à concrétions calcaires (QP1)	189
Pl. 4 : Les croûtes et les encroûtements calcaires pléistocènes : faciès et stratigraphie	191
Pl. 5 : Modifications des paysages de la vallée de l'oued as-Souriyya (rive sud de l'oued al Manfas as-Sod) par une forte emprise anthropique des milieux	200
Pl. 6 : Position morphologique et caractéristiques morphométriques de la terrasse Holocène antéhistorique dans les cours moyen et amont des oueds Lahmar-al Ghuirga et Salah Bou Giddida	231
Pl. 7 : Répartition géographique et extension des sols hydromorphes et des paléogarâas au sud et au sud-est du système fluvial des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	234
Pl. 8 : Caractéristiques sédimentologiques et morphométriques de l'accumulation de la haute terrasse historique	243
Pl. 9 : La basse terrasse historique : extension et position morphologique dans les oueds Lahmar-al-Ghuirga et Sha'abit el Ong	245
Pl. 10 : Un voile éolien postmédiéval recouvre l'accumulation alluviale de la basse terrasse historique, à l'est d'al Ghitha, sur la rive droite du cours aval de l'oued as-Souriyya	247
Pl. 11 : La banquette subactuelle : type et position morphologique dans le cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga	248
Pl. 12 : Des restes osseux déterminables appartenant à la famille des Bovidae (Mulazzani, 2010)	271
Pl. 13 : Les Artiodactyles de grandes dimensions ont été également attestés dans le site SHM-1 (Mulazzani, 2010)	272
Pl. 14 : En côtoyant le cordon tyrrhénien de Hergla et la bonde littorale de Shat Maryam, des vestiges romains et une dune bordière post-antique témoignent du retrait de la ligne de rivage et de l'avancé de la mer	349
Pl. 15 : A la sortie de l'oued al Gharig (rive est d'al Kalbiyya), Les galets roulés d'argiles limoneuses correspondent aux dépôts de décharge de crues et peuvent témoigner des événements de remaniement et d'érosion de surface	XXIX

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET DE L'ETUDE	1
I- CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL	3
II- PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE ET ETAT SCIENTIFIQUE DE LA QUESTION	4
III- LES OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
IV- LES PARTIES DE LA THESE	7
CADRE METHODOLOGIQUE : APPROCHE ET OUTILS D'ANALYSES	8
I- L'INVENTAIRE ET L'ANALYSE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES ET DES MODELES	9
I-1- Le travail de terrain	9
I-1-1- L'investigation géomorphologique du système fluvial et des bordures de sebkhas	9
I-1-2- Les moyens et les méthodes d'auscultation dans les sebkhas	9
I-2- La caractérisation et les analyses sédimentologiques des sédiments	10
I-2-1- La granulométrie des sédiments : la nécessité des prétraitements chimiques spécifiques	10
I-2-2- La calcimétrie, la morphoscopie et les couleurs des sédiments	12
I-2-3- La géochimie et la minéralogie : déterminer les provenances des sédiments et les milieux de dépôts	12
I-2-4- La micromorphologie : pour une approche multiscalaire des processus morphosédimentaires	13
II- L'ELABORATION DES SYNTHESES SPATIO-TEMPORELLES : LA CARTOGRAPHIE GEOMORPHOLOGIQUE	14
II-1- La photo-restitution automatique des clichés aériens	14
II-2- L'emploi de la télédétection et de l'imagerie satellitaire	15
II-3- Le Système d'Information Géographique et la finalisation cartographique	16
III- LE CALAGE CHRONOLOGIQUE DES SEDIMENTS, DES MODELES, DES SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES ET DES PHASES MORPHOGENIQUES	16
III-1- Les datations au carbone 14 (^{14}C)	17
III-2- Les éléments archéologiques	18
III-3- Notations chrono-lithostratigraphiques des dépôts et des modelés dans le texte	19
IV- LA RECHERCHE SUR L'EVOLUTION DES PAYSAGES, DES PALEOENVIRONNEMENTS ET DES RAPPORTS SOCIETES HUMAINES/MILIEUX	20
IV-1- L'archivage sédimentaire de l'évolution paysagère et	20

paléoenvironnementale

IV-2- Les données archéologiques et les témoignages historiques : l'anthropisation des milieux	20
IV-3- Bio-marqueurs malacologiques et archéozoologiques sur l'évolution des paléoenvironnements	21
IV-4- Etudier l'évolution du couvert végétal holocène afin de reconstituer les environnements passés : apport de la palynologie	22
PREMIERE PARTIE : L'ENCLAVE SEMI-ENDOREIQUE D'AL KALBIYYA : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET EVOLUTION HOLOCENE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN	24
INTRODUCTION	25
CHAPITRE I : LES REMPLISSAGES HOLOCENES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE	26
I-LE CADRE TOPO-STRUCTURAL D'AL KALBIYYA	26
I-1- Physiographie du système semi-endoréique	26
I-2- Genèse et morphostructure d'al Kalbiyya : un contexte géologique prédisposant à l'installation d'un domaine déprimé	28
II- TYPOLOGIE DES FACIES DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES	28
II-1- Le faciès fluvio-lacustre (FFL)	32
II-2- Le faciès fluvio-palu-lacustre (FPL)	32
II-3- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)	32
II-4- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)	32
II-5- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)	32
II-6- Le faciès proximal colluvio-alluvial (FCA)	32
III- LES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES DES RIVES OCCIDENTALE, SEPTENTRIONALE ET ORIENTALE D'AL KALBIYYA : UNE FORTE HETEROGENEITE SPATIO-TEMPORELLE DES FACIES	32
III-1- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)	33
III-1-1- Caractérisation sédimentologique du faciès	33
III-1-2- Signification morphodynamique et pédologique du faciès	35
III-2- Le Faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)	36
III-2-1- Caractéristiques sédimentologiques du faciès	38
III-2-2- Mécanismes et conditions de la morphodynamique et de la pédogenèse	38
III-3- Le Faciès proximal colluvio-alluvial (FCA)	39
III-3-1- Un Dépôt grossier très hétérogène	39
III-3-2- Interprétation morphodynamique et pédologique du faciès	41
III-4- Le Faciès fluvio-lacustre (FFL)	41
III-4-1- Un faciès aux caractéristiques sédimentologiques différentes	42
III-4-2- Signification morphodynamique et conditions de mise en place du faciès	43

III-5- Le faciès fluvio-palu-lacustre (FPL)	43
III-5-1- Des remplissages sédimentaires très hétérogènes	44
III-5-2- Interprétation morphodynamique et évolution post-dépôt des sédiments	44
III-6- Le Faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)	45
III-6-1- Des séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes	45
III-6-2- Signification morphodynamique pédologique des dépôts	47
IV- LES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES DES RIVES SUD ET SUD-EST D'AL KALBIYYA : LE POIDS DES ENVIRONNEMENTS LOCAUX	47
IV-1- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)	48
IV-1-1- Caractérisation sédimentologique du faciès	48
IV-1-2- Signification morphodynamique des sédiments	49
IV-2- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)	50
IV-2-1- Caractérisation sédimentologique du faciès	50
IV-2-2- Signification morphodynamique des dépôts	50
IV-3- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)	52
IV-3-1- Alternance des paires de lits aux caractéristiques sédimentologiques différentes	52
IV-3-2- Implications morphodynamiques du faciès	52
	52
V- LES REMPLISSAGES DU FOND D'AL KALBIYYA : PREDOMINANCE DES SEDIMENTS D'ORIGINE ESSENTIELLEMENT LOINTAINE	52
V-1- Le faciès de colmatage vaseux (FCV)	52
V-1-1- Un faciès aux caractéristiques sédimentologiques généralement homogènes	53
V-1-2- Mécanismes et conditions de mise en place et d'évolution post-dépôt des sédiments	53
V-2- Le faciès fluviatile de comblement en lits grossiers-fins (FGF)	54
V-2-1- Caractérisation sédimentologique du faciès	54
V-2-2- Signification morphodynamiques du faciès	54
V-3- Le faciès fluviatile d'épandage alluvionnaire (FEA)	54
V-3-1- Deux séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes	56
V-3-2- Indications morphodynamiques et traits d'évolution post-dépôt des sédiments	56
CONCLUSION DU CHAPITRE	57
CHAPITRE II : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DURANT L'HOLOCENE : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE	58
I- ZONAGE ET PROCESSUS GENERATEURS DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES D'AL KALBIYYA	58
I-1- Une première zone supra et intertidale des rives est, nord et ouest	58
I-2- Une deuxième zone méridionale	59
I-3- Une troisième zone ombilicale	60

II- UNITES SEDIMENTAIRES ET PROBLEMES DE CORRELATION SPATIO-TEMPORELLE DES FACIES	60
II-1- Les parties ouest, nord et centre-est d'al Kalbiyya : une malacofaune abondante sert des jalons bio-chronostratigraphiques	60
II-2- La partie centrale, orientale et méridionale d'al Kalbiyya : des problèmes méthodologiques persistes	61
II-3- Datations et problèmes de calage chronostratigraphique	61
III- SYNTHESE STRATIGRAPHIQUE ET DEFINITION DES SYSTEMES HOLOCENES DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA	63
III-1- Le premier temps holocène antérieur à 5632±218 BP	63
III-1-1- Le système de lac pérenne ou permanant	64
III-1-2- Le système de lac temporaire	64
III-2- Le second temps holocène postérieur à 5632±218 BP	64
III-2-1- Le système de lac temporaire-sebkha	66
III-2-2- Le système de sebkha	66
	66
IV- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA JUSQU'A ENVIRON 5632±218 BP	66
IV-1- Les stades de lacs pérennes $SK_{XIV,}$ $SK_{XII,}$ SK_X et SK_{VIII}	66
IV-1-1- Le premier stade de lac pérenne SK_I	66
IV-1-2- Le deuxième stade de lacs pérennes SK_{XII}	68
IV-1-3- Le troisième stade de lacs pérennes SK_X	68
IV-1-4- Le quatrième stade lacustre pérenne SK_{VIII} (5632±218 BP)	68
IV-2- Les stades de lacs temporaires $SK_{XII,}$ SK_{XI} et SK_{IX}	69
IV-2-1- Le premier stade de lac temporaire SK_{XIII}	69
IV-2-2- Le deuxième stade de lac temporaire SK_{XI}	69
IV-2-3- Le troisième stade de lac temporaire SK_{IX}	70
IV-3- Essai de calage et de corrélation chronologiques	70
V- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'AL KALBIYYA DEPUIS ENVIRON 5632±218 BP	72
V-1- Le quatrième stade de lac temporaire SK_{VII}	72
V-2- Les stades de sebkha SK_{VI}, SK_{IV} et SK_{II}	73
V-2-1- Le premier stade de sebkha (SK_{VI})	73
V-2-2- Le deuxième stade de sebkha (SK_{IV})	73
V-2-2- Le troisième stade de sebkha (SK_{II})	74
V-3- Les stades SK_V, SK_{III} et SK_I de lac temporaire-sebkha	74
V-3-1- Le premier stade SK_V	74
V-3-2- Le deuxième stade SK_{III}	75
V-4- Le dernier stade SK_I de lac temporaire-sebkha et de sebkha	77
CONCLUSION DU CHAPITRE	78
CHAPITRE III : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS D'AL KALBIYYA	79

I- DES MODELES HYDROEOLIENS ONT LARGEMENT EVEILLE L'INTERET DES CHERCHEURS	79
II- LES HERITAGES HYDROEOLIENS PLEISTOCENES	80
II-1- La lunette pléistocène des Dhras Laghmas-ash-Shraif (QP3f)	80
II-1-1- Caractérisation morphologique et sédimentologique	80
II-1-2- Attribution chronologique	80
II-1-3- Contexte de mise en place	
II-2- Les placages et les voiles éoliens des bordures méridionales et occidentales d'al Kalbiyya (QP3f)	82
III- LES MODELES HYDROEOLIENS D'AGE HOLOCENE	82
III-1- Le bourrelet hydroéolien de la rive est d'al Kalbiyya (QH3a) : identification et essai de précision chronologique	82
III-1-1- Localisation, extension et caractéristiques morpho-sédimentologiques	83
III-1-2- Interprétation morphodynamique et évolution post-sédimentaire	83
III-1-3- Attribution chronologique de l'édifice	85
III-2- Les voiles éoliens des Dhras sud-est d'al Kalbiyya (QH3a)	85
IV- FONCTIONNEMENT HYDROEOLIEN D'AL KALBIYYA PENDANT L'HOLOCENE : ESSAI DE SYNTHESE	86
CONCLUSION DU CHAPITRE	87
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	88
DEUXIEME PARTIE : LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL : REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET EOLIEN : COMPLEXITE D'UN SYSTEME A L'INTERFACE TERRE/MER	90
INTRODUCTION	91
CHAPITRE IV : REMPLISSAGES DU FOND ET DEPOTS DES RIVES DE HALQ AL MINJIL : FACIES SEDIMENTAIRES ET INTERPRETATION MORPHODYNAMIQUE	92
I- PHYSIOGRAPHIE, GENESE ET MILIEUX GEOGRAPHIQUES DE HALQ AL MINJIL	92
I-1- Caractéristiques physiographiques et morphologie de Halq al Minjil	92
I-2- Genèse et étapes de la configuration morphologique de l'enclave littorale de Halq al Minjil	94
I-2-1- Une subsidence ancienne, moteur majeur de la genèse des zones déprimées	94
I-2-2- Dynamiques littorales, paléogéographie et étapes de la configuration morphologique de la dépression littorale	95
I-3- Milieux géographiques et situations hydrologiques de Halq al Minjil	99
I-3-1- Le milieu méridional de lagune	99
I-3-2- Le milieu septentrional de sebkha	99

I-3-3- L'auréole externe de Chott	100
II- TYPOLOGIE DES FACIES DES REMPLISSAGES SEDIMENTAIRES	101
II-1- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)	102
II-2- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)	102
II-3- Le faciès mixte aux influences marines notables (FMM)	104
II-4- Le faciès lagunaire (FL)	104
II-5- Le faciès d'évaporites ou « évaporatique » (FE)	104
II-6- Le faciès fluviatile ou d'épandage fluviatile (FF)	105
II-7- Le faciès éolien (FEO)	105
III- LES REMPLISSAGES DE L'OMBILIC DE HALQ AL MINJIL : FACIES, MORPHODYNAMISME ET ENVIRONNEMENTS SEDIMENTAIRES	105
III-1- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)	105
III-1-1- Caractéristiques sédimentologiques et datation du dépôt	105
III-1-2- Une composition minéralogique marquée par l'importance des carbonates	107
III-1-3- Des concentrations géochimiques hétérogènes	107
III-1-4- Signification morphodynamique et pédologique des sédiments	107
III-2- Le faciès « évaporatique » (FE)	109
III-2-1- Caractéristiques sédimentologiques, calage chronologique et cortège minéralogique du faciès	109
III-2-2- Des éléments géochimiques moyennement concentrés révélant l'importance des sels	110
III-2-3- Description micromorphologique de la séquence S14-C3 (lame mince L5)	111
III-2-4- Implications morphodynamiques et environnement sédimentaire	112
III-3- Le faciès mixte aux influences marines notables (FMM)	112
III-3-1- Caractéristiques sédimentologiques du remplissage sédimentaire	112
III-3-2- Une association minéralogique relativement homogène	112
III-3-3- Une composition géochimique hétérogène	113
III-3-4- Aspects micromorphologiques du faciès FMM (lame mince L2)	113
III-3-5- Signification morphodynamique et évolution post-dépôt des sédiments	113
III-4- Le faciès fluviatile (FF)	114
III-4-1- Nature sédimentologique et aspects macroscopiques du faciès	114
III-4-2- Association minéralogique du faciès	115
III-4-3- Faciès géochimique de la séquence S12-C3	115
III-4-4- Signification morphodynamique des remplissages fluviatiles	116
III-5- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)	117
III-5-1- Caractéristiques sédimentologiques des remplissages	117
III-5-2- Cortège minéralogique des dépôts	117
III-5-3- Composition géochimique des sédiments	117
III-5-4- Signification morphodynamique et pédologique des sédiments	118
III-6- Le faciès lagunaire (FL)	118
III-6-1- Le premier niveau du remplissage lagunaire	119
III-6-2- Le deuxième niveau du remplissage lagunaire	121

IV- DEPOTS DE RIVES DE HALQ AL MINJIL : LITHOSTRATIGRAPHIE, FACIES SEDIMENTAIRES ET IMPLICATIONS MORPHODYNAMIQUES	122
IV-1- Le faciès mixte aux apports fluviatiles et/ou latéraux notables (FMF)	122
IV-1-1- Caractéristiques sédimentologiques et morphoscopiques	122
IV-1-2- Cortège minéralogique et concentration d'éléments géochimiques	124
IV-1-3- Implication morphodynamique et signification pédologique des sédiments	124
IV-2- Le faciès « évaporatique » (FE)	125
IV-2-1- Des séquences aux caractéristiques sédimentologiques différentes	125
IV-2-2- Compositions minéralogiques et géochimiques généralement homogènes	125
IV-2-3- Signification morphodynamique et conditions d'évolution post-dépôt des sédiments	127
IV-3- Le faciès sulfato-carbonaté (FSC)	127
IV-3-1- Dépôts aux caractéristiques sédimentologiques distinctes	127
IV-3-2- Minéralogie et géochimie du faciès	127
IV-3-3- Mécanismes et conditions de la morphodynamique et d'évolution post-sédimentaire des dépôts	127
IV-4- Le faciès mixte d'influence marine notable (FMM)	129
IV-4-1- Caractérisation sédimentologique du faciès : une forte hétérogénéité séquentielle	129
IV-4-2- Cortège minéralogique et composition géochimique du faciès	130
IV-4-3- Signification morphodynamique et environnement de sédimentation	130
IV-5- Le faciès lagunaire	130
IV-5-1- La première sédimentation lagunaire	131
IV-5-1- La deuxième sédimentation lagunaire	132
IV-6- Le faciès éolien	133
IV-6-1- Des caractéristiques sédimentologiques homogènes	133
IV-6-2- Des phases minéralogiques et une composition géochimique non différenciées	133
IV-6-3- Interprétation morphodynamique et contexte de mise en place des sédiments	134
CONCLUSION DU CHAPITRE	135
CHAPITRE V : DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL : ESSAI D'INTERPRETATION D'ENSEMBLE	136
I- CADRE ET PROBLEMES METHODOLOGIQUES DE L'INTERPRETATION CHRONO-ENVIRONNEMENTALE ET HYDROMORPHOLOGIQUE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES	136
I-1- Corrélations spatio-temporelles des faciès et définition des unités sédimentaires	136
I-1-1- Calage chronologique des remplissages sédimentaires	136
I-1-2- Marqueurs bio-lithostratigraphiques, corrélation des faciès et définition des unités sédimentaires	137
I-2- Définir les systèmes du fonctionnement hydrologique de Halq al Minjil	140
I-2-1- Le système lagunaire	140
I-2-2- Le système de sebkha littorale	140

I-2-3- Les systèmes mixtes : sebkha-lagune et lagune-sebkha	140
II- HALQ AL MINJIL DE 25120±120 BP A 4965±35 BP : DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE	141
II-1- Le stade lac temporaire-sebkha SH_{XIV} et le stade sebkha-lagune H_{XII}	141
II-2- Les stades sebkhas-lagunes SH_X et SH_{VIII}	142
II-3- Les stades sebkhas littorales SH_{XIII}, SH_{XI} et SH_{IX}	142
II-4- Essai de calage et de corrélation chronologiques	143
III- DYNAMIQUES SEDIMENTAIRES ET FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE HALQ AL MINJIL ENTRE 4965±35 BP ET 3874±201 BP	144
III-1- Les stades lagunaires SH_{VII} et SH_V	144
III-1-1- Le premier Stade lagunaire SH_{VII}	144
III-1-2- Le deuxième stade lagunaire SH_V	144
III-1-3- Calage et essai de corrélation chronologiques	145
III-2- Les stades lagunes-sebkhas SH_{VI} et SH_{IV}	145
III-2-1- Le premier stade lagune-sebkha SH_{VI}	145
III-2-2- Le second stade lagune-sebkha SH_{IV}	146
III-2-3- Essai de calage chronologique	146
III-3- Le stade sebkha-lagune SH_{III}	147
III-3-2- Chronologie	147
IV- FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DE HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE SUPERIEUR	147
IV-1- Halq al Minjil à l'Holocène supérieur antéhistorique : la réinstallation d'un stade de sebkha littorale (SH_{II})	148
IV-1-1- Dynamique hydrosédimentaire	148
IV-1-2- Essai de calage et de corrélation Chronologiques	148
IV-2- Halq al Minjil à l'Holocène supérieur historique-l'Actuel : l'installation du système sebkha-lagune SH_I	148
IV-2-1- Dynamique hydrosédimentaire	148
IV-2-2- Dynamique éolienne	149
CONCLUSION DU CHAPITRE	149
CHAPITRE VI : MODELES ET FONCTIONNEMENT HYDROEOLIENS DE LA SEBKHA-LAGUNE HALQ AL MINJIL	150
I- CONSTRUCTION HYDROEOLIENNE DE LA RIVE CENTRE-OUEST DE HALQ AL MINJIL : ETUDE MULTISCALAIRE D'UN MODELE TYPIQUE DE BORDURES DE SEBKHA	150
I-1- Le faciès éolien (FEO) : nature, processus et dynamiques de formation des dunes de bordures de sebkha	151
I-1-1- Le premier ensemble éolien	151
I-1-2- Le deuxième ensemble éolien	153
I-1-3- Interprétation morphosédimentaire d'ensemble et essai d'attribution	157

chronologique des ensembles éoliens	
I-1-4- Genèse et évolution de la construction hydroéolienne : essai de synthèse	158
I-2- Les faciès archéologique et d'épandage fluviatile	160
I-2-1- Le faciès archéologique (FAR): marque d'atténuation ou d'arrêt de la l'accumulation éolienne	160
I-2-2- Le faciès d'épandage fluviatile (FF): substrat de la construction hydroéolienne	160
II- MODELES HYDROEOLIENS DE BORDURES DE HALQ AL MINJIL	164
II-1- Bourrelet et dunes des rives occidentale et méridionale de Halq al Minjil: des constructions hydroéoliennes polyphasées	164
II-1-1- Le bourrelet occidental et méridional : Superposition de deux générations de dépôts éoliens	164
II-1-2- Les dunes hydroéoliennes du centre-ouest de Halq al Minjil: un cordon dunaire à peine marqué dans le paysage	166
II-2- Le bourrelet hydroéolien des rives orientales de Halq al Minjil : contribution à la configuration morphologique actuelle de la sebkha-lagune	166
II-2-1- Localisation et caractéristiques morphosédimentologiques de l'édifice	166
II-2-2- Chronologie et signification morphodynamique des sédiments	167
II-3- D'autres modelés typiques mais très localisés	167
II-3-1- La dune îlot ou guataya de l'ombilic de Halq al Minjil	167
II-3-2- Le Bourrelet des marges nord et nord-orientales de Halq al Minjil	168
CONCLUSION DU CHAPITRE	168
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	170
TROISIEME PARTIE : LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES, FONCTIONNEMENT ET DYNAMIQUES MORPHOSEDIMENTAIRES	171
INTRODUCTION	172
CHAPITRE VII : HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES ET CONTEXTE PREHOLOCENE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL	173
I- CADRE OROHYDROGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL	173
I-1- Un Système fluvial cerné par une topographie molle, mais contrastée et possédant un réseau hydrographique peu développé	173
I-1-1- Le relief collinaire : des contrastes topographiques peu marqués	173
I-1-2- Les plaines : élément topographique caractéristique du paysage de « piémonts » et de bordures des sebkhas	177
I-1-3- Le plateau bas et laniéré de Sidi Bou Ali-Kandar	177

I-2- La lithostratigraphie : Prédominance des terrains superficiels récents, meubles et peu hétérogènes	178
I-2-1- Les sédiments oligo-mio-pliocènes des Dhras as-Satour-Khsham al Kalb et de Satour al Ghorfa	178
I-2-2- Les formations mio-pliocènes des collines de Qal'a al Kbira-al Bal'oum et de Kroussiyya	180
I-2-3- Les formations pontiennes et astiennes des collines de Sidi Bou Ali et de Hirgla	180
I-3- Paléogéographie, orogenèse et étapes de Structuration de l'hydrosystème	180
I-3-1- La phase pré-orogénique du Nummulitique supérieure	180
I-3-2- La phase aquitanienne : une orogenèse a complètement modifié les structures antérieures	182
I-3-3- La phase miocène marine : une subsidence accentuée annonçant l'installation des aires déprimées au Vindobonien	182
I-3-4- La phase majeure de plissement mio-plio-quaternaire et l'établissement de l'hydrosystème	182
I-4- Le rôle de la tectonique pléistocène dans le façonnement de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil	183
I-5- Structures et relief morphostructural: témoins d'une tectonique de faible intensité et d'un substrat homogène	185
I-5-1- Les anticlinaux de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum et de Kroussiyya-Sidi al Hani	185
I-5-2- La structure monoclinale de Dhra as-Satour	186
I-5-3- La gouttière synclinale d'al Kalbiyya-Hirgla	187
I-5-4- Le pli anticlinal de l'extrême nord-ouest de l'hydrosystème	187
II- LES HERITAGES GEOMORPHOLOGIQUES PLEISTOCENES : DISPOSITIFS MORPHO-SEDIMENTOLOGIQUES ET CHRONOSTRATIGRAPHIE	187
II-1- La première génération de dépôt détritique à nodules et à concrétions calcaires (QP1)	189
II-1-1- Répartition spatiale et caractéristiques morpho-sédimentologiques	189
II-1-2- Chronologie, signification morphodynamique et paléoenvironnementale	189
II-2- Les croûtes et les encroûtements calcaires	189
II-2-1- Les croûtes et les encroûtements calcaires du Pléistocène ancien à moyen (QP1-2)	190
II-2-2- Un niveau encroûté d'âge pléistocène moyen (QP2)	192
II-3- Deux nouveaux dépôts à nodules et à concrétions calcaires (QP3e, QP3g): l'enchaînement des processus de nodulation au Pléistocène supérieur	194
*II-3-1- Un deuxième dépôt d'extension spatiale réduite (*QP3e*)*	194
*II-3-2- Un troisième dépôt à nodules et à concrétions calcaires (*QP3g*) témoigne d'importantes dynamiques d'aggradation*	194
II-3-3- Contexte de mise en place et d'évolution post-dépôt	194
II-3-4- Chronologie relative	195
CONCLUSION DU CHAPITRE	196
CHAPITRE VIII : AMPLEUR ET VARIETE DES DEPOTS HOLOCENES DANS LE SYSTEME	198

FLUVIAL : PRESENTATION DES COUPES SIGNIFICATIVES

I- PROBLEMES ET METHODES D'ETUDE DES FORMES ET DES FORMATIONS HOLOCENES 198
I-1- Les problèmes d'investigation géomorphologique 198
I-2- Des analyses de laboratoire s'appuient principalement sur la granulométrie laser des sédiments 200
I-3- Le contrôle chronologique reste limité 201

II- LES COUPES DES COURS AMONT ET MOYEN DES AFFLUENTS DU COURS PRINCIPAL DE L'OUED AL MANFAS-AS-SOD : DES DEPOTS PRE ET PROTOHISTORIQUES BIEN DEVELOPPES 201
II-1- La coupe CaS du cours amont de l'oued as-Souriyya 201
II-2- La coupe CmM du cours moyen de l'oued al Msid-ar-Ramla 204
II-3- La coupe CmS-2 du cours moyen de l'oued as-Souriyya 206
II-3-1- Les dépôts de la première terrasse 206
II-3-2- L'accumulation de la deuxième terrasse 207
II-3-3- Les dépôts de la troisième terrasse 207

III- LES COUPES DES COURS AMONT ET MOYEN DES OUEDS TRIBUTAIRES DE LA SEBKHA AL KALBIYYA : UNE PRESENCE PARTICULIERE DES DEPOTS HISTORIQUES 208
III-1- La coupe CaK du cours amont de l'oued al Kouz 208
III-2- La coupe CmG du cours moyen de l'oued al Gharig 209
III-3- La coupe CmL du cours moyen de l'oued Lahmar 211
III-4- Les coupes du cours moyen de l'oued Lahmar-al Ghuirga 213
III-4-1- La coupe CmLG-1 213
III-4-2- La coupe CmLG-2 214
III-4-3- La coupe CmLG-3 216

IV- LES COUPES DES COURS AVAL DES OUEDS : UNE TENDANCE A LA SUPERPOSITION DE NOMBREUX DEPOTS HOLOCENES 217
IV-1- La coupe CaLG du cours aval de l'oued Lahmar-al Ghuirga 217
IV-2- Les coupes du cours aval de l'oued Salah Bou Giddida 218
IV-2-1- La coupe CaSB-1 219
IV-2-2- La coupe CaSB-2 219
IV-2-3- La coupe CaSB-3 221
IV-3- Coupes et tarière des cours aval des oueds al Msid-ar-Ramla, as-Souriyya et al Manfas as-Sod 221
IV-3-1- La coupe CaMR du cours aval de l'oued al Msid-ar-Ramla 221
IV-3-2- La coupe CaSM du cours aval de l'oued as-Souriyya 222
IV-3-3- Le sondage à la tarière à main T45 dans le cône deltaïque de l'oued al Manfas as-Sod 223

CONCLUSION DU CHAPITRE 226

CHAPITRE IX : LES MODELES HOLOCENES DU SYSTEME FLUVIAL : ETUDE DE 227

SYNTHESE ET INTERPRETATION D'ENSEMBLE

I- LES MODELES D'AGE HOLOCENE PREHISTORIQUE : QUOIQUE PEU NOMBREUX ILS INDIQUENT DES VARIATIONS DES CONDITIONS LOCALES ET DU CLIMAT 227
I-1- La terrasse d'accumulation QH1-3 227
I-1-1- Extension géographique et caractéristiques morphométriques du modelé 229
I-1-2- Stratigraphie et caractéristiques sédimentologiques de l'accumulation 229
I-1-3- Implications morphodynamique et morphogénique des dépôts et du modelé 231
I-1-4- Calage et essai de corrélation chronologiques 232
I-2- Les dépôts hydromorphes et les paléogarâas perchées (QH1-2) 232
I-2-1- Localisation et extension géographiques 232
I-2-2- Faciès et caractéristiques sédimentologiques 233
I-2-3- Signification morphodynamique et hydropédologique 233
I-2-4- Essai de calage chronologique 233
I-3- Le paléosol brun et la formation « *Hmari* » 235
I-3-1 Position morphologique et extension spatiale 235
I-3-2- Faciès sédimentaires et traits pédologiques 235
I-3-3- Signification morphodynamique et évolution pédologique des dépôts 235
I-3-4- Calage et corrélation chronologiques 237
I-4- La première génération de cône deltaïque à l'embouchure de l'oued al Manfas as-Sod *(QH3a)* 238
I-4-1- Localisation et caractéristiques morphologiques 238
I-4-2- Caractéristiques sédimentologiques et implications morphodynamiques 238
I-4-3- Calage chronologique 238

II- LES MODELES D'AGE HISTORIQUE : QUOIQUE MIS EN PLACE DANS UN LAPS DE TEMPS RESTREINT, ILS INDIQUENT DE RAPIDES VARIATIONS ENVIRONNEMENTALES ET DE GRANDES INSTABILITES MORPHOGENIQUES 238
II-1- La haute terrasse et les cônes d'épandage (QH3b) 240
II-1-1- Extension géographique et caractéristiques morphologiques 240
II-1-2- Faciès sédimentaires et significations morphodynamiques 240
II-1-3- Calage et corrélation chronologiques 242
II-2- La basse terrasse historique (QH3c) 244
II-2-1- Caractéristiques morphométriques et extension géographique 244
II-2-2- Caractérisation des dépôts et signification morphodynamique 244
II-2-3- Attribution et corrélation chronologiques 245
II-3- Voile éolien, remblaiement fluviatile et banquette d'âge moderne à subactuel 246
II-3-1- Un voile éolien et un dépôt fluviatile postmédiévaux très localisés 246
II-3-2- Une banquette d'accumulation subactuelle 247

CONCLUSION DU CHAPITRE 249
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE 250

QUATRIEME PARTIE : LES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL ET LEUR SYSTEME FLUVIAL IMMEDIAT : MORPHOGENESE, SUCCESSIONS PALEOENVIRONNEMENTALES 251

ET DYNAMIQUES PAYSAGERES

INTRODUCTION	251
CHAPITRE X : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS 25120±120 BP ET DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR	255
I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DU 25120±120 BP JUSQU'AU DEBUT DE L'HOLOCENE	255
I-1- Fonctionnement hydromorphologique et dynamiques sédimentaires au Pléistocène supérieur terminal	255
I-1-1- Le stade lac-temporaire-sebkha SH_{XIV} de Halq al Minjil	255
I-1-2- L'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod : dynamique et évolution morphologique	256
I-1-3- Morphogenèse et paléoenvironnements : interprétation de l'enregistrement sédimentaire et pollinique des dynamiques	257
I-2- Evolution hydro-géomorphologique et environnements à la transition Pléistocène-Holocène	259
I-2-1- Le premier stade de sebkha paralique SH_{XIII} et la mise en place de la première génération de dépôt du bourrelet des bordures ouest et sud de Halq al Minjil	259
I-2-2- L'incision des fonds de vallées à la transition Pléistocène-Holocène: témoin de l'activité torrentielle des oueds	259
I-2-3- Un climat semi-aride qui tend à l'accentuation de l'aridité	260
II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DURANT L'HOLOCENE INFERIEUR (10000-7000 BP)	260
II-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamique paysagère	260
II-1-1- L'installation des stades lacustres permanents et temporaires SK_{XIV}, SK_{XIII} et SK_{XII}	260
II-1-2 La réinstallation d'une sebkha-lagune (stade SH_{XII})	263
II-1-3- Les garâas perchées, le remblaiement des vallées et l'aggradation des plaines d'inondation	263
II-2- Morphogenèse et paléoenvironnements à l'Holocène inférieur	264
II-2-1- Environnements améliorants et morphogenèse modérée durant l'optimum holocène	264
II-2-2- Les rapports sociétés épipaléolithiques/milieu à l'Holocène inférieur	266
CONCLUSION DU CHAPITRE	273
CHAPITRE XI : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE MOYEN (7000-3500 BP)	274
I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT LA PREMIERE MOITIE DE L'HOLOCENE MOYEN (7000-5000BP)	274
I-1- Dynamiques hydro-géomorphologiques et paysagères	274
I-1-1- L'installation des stades lacs temporaires SK_{XI} et sebkha littorale SH_{XI} et la surélévation du bourrelet hydroéolien de l'enclave paralique	274
I-1-2- L'installation de l'épisode lacustre pérenne SK_X et du stade sebkha-lagune	276

SH_X	
I-1-3- Le stade lacs temporaires SK_{IX} et le stade sebkha littorale SH_{IX}	276
I-1-4- La réinstallation d'un épisode de lacs pérennes (SK_{VIII}) et d'un stade de sebkha-lagune (SH_{VIII})	277
I-1-5- La continuité du remblaiement des vallées et des plaines	279
I-2- Morphogenèse et paléoenvironnements durant la première moitié de l'Holocène moyen	280
I-2-1 Une morphogenèse modérée à peu active	281
I-2-2- L'Homme : un facteur encore non déterminant dans le système morphogénique	281
I-2-3- Un climat semi-aride aux temps variables a marqué la première moitié de l'Holocène moyen	282
II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DURANT LA DEUXIEME MOITIE DE L'HOLOCENE 3500 BP)	284
II-1- Dynamiques hydro-géomorphologiques et évolution des paysages	284
II-1-1- L'installation du premier stade lagunaire SH_{VII} et du stade lacs temporaires SK_{VII} d'al Kalbiyya	284
II-1-2- Le premier stade lagune-sebkha SH_{VI} de Halq al Minjil	287
II-1-3- L'installation du deuxième stade lagunaire SH_V et du premier stade de sebkha SK_{VI}	287
II-1-4- Le stade lagune-sebkha SH_{IV}	290
II-1-5- La mise en place de la formation des sables bruns : une phase de remblaiement généralisé dans le système fluvial	290
II-1-6- L'installation du stade sebkha-lagune SH_{III} et du premier stade lacs temporaires-sebkhas SK_V d'al Kalbiyya	291
II-2- Morphogenèse et paléoenvironnements pendant la deuxième moitié de l'Holocène moyen : changements des facteurs de forçage ?	292
II-2-1- Une morphogenèse active et accélérée entre 4965±35 et 3874±201BP	292
II-2-2- Variations eustatiques flandriennes : deux élévations du niveau marin relatif à 4965±35 BP et 4365±50 BP	293
II-2-3- Tendances climatiques générales au renforcement de l'aridité	293
II-2-4- Depuis environ 4365±50 BP, le forçage anthropique s'ajoute aux effets des variations climatiques	298
II-2-5- Pédogenèse et pulsation climatique humide à la fin de l'Holocène moyen	298
CONCLUSION DU CHAPITRE	299
CHAPITRE XII : L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL PENDANT L'HOLOCENE SUPERIEUR (DEPUIS 3500 BP)	300
I- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL A L'HOLOCENE SUPERIEUR PREROMAIN	300
I-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamiques paysagères	301
I-1-1- L'installation du stade sebkha littorale SH_{II} et la construction du bourrelet hydroéolien des bordures orientales de Halq al Minjil	301
I-1-2- Le rétablissement d'un système de sebkha continentale SK_{IV}	302

I-1-3- La réinstallation des systèmes de lacs temporaires-sebkhas (SK_{III}) et de sebkha-lagune (SH_I)	302
I-1-4- Aggradation des lits fluviaux et des plaines et la mise en place de la formation « Hmari »	303
I-1-5- L'installation du stade sebkha SK_{II} et l'édification d'un bourrelet et des voiles hydroéoliens sur les bordures est et sud-est d'al Kalbiyya	304
I-1-6- L'édification du premier cône deltaïque de Halq al Minjil QH3a	305
I-2- Morphogenèse et environnements pendant l'Holocène supérieur préromain	305
I-2-1- Un pic d'aridité et une morphogenèse modérée au début de l'Holocène supérieur	305
I-2-2- Alluvionnement, érosion et amélioration relative des conditions hydro-pluviométriques pendant la Protohistoire	306
I-2-3- Une courte phase biostasique et de pédogenèse à la fin de la Protohistoire et au début de l'Historique	307
I-2-4- Une phase préromaine d'incision majeure des vallées, de dégradation des milieux et de recrudescence de l'activité éolienne : peut-on parler d'une première crise morphogénique historique ?	307
II- L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL DEPUIS LA PERIODE ROMAINE A L'ACTUEL : TRANSFORMATION EN MILIEU ANTHROPISE ?	309
II-1- Evolution hydro-géomorphologique et dynamiques paysagères	309
II-1-1- L'installation du stade lacs temporaires-sebkhas et sebkhas (SK_I)	309
II-1-2- Le système sebkha-lagune SH_I	310
II-1-3- Une première phase principale d'alluvionnement et d'incision	311
II-1-4- Une deuxième phase de remblaiement suivi de l'incision des lits fluviaux et l'activation des processus éolien	311
II-1-5- Une troisième phase modeste de remblaiement et d'incision de talwegs	311
II-1-6- Le comblement récent du fond des cuvettes littorale et continentale et les modelés en voie d'édification dans le système fluvial	312
II-2- Morphogenèse et dynamiques environnementales	312
II-2-1- Une morphogenèse active pendant l'époque romaine : entre le contrôle climatique et les causes anthropiques	312
II-2-2- La crise érosive post-romaine : incision majeure et ramification du chevelu hydrographique, érosion marine et dégradation environnementale	316
II-2-3- Le moyen-âge : un bilan érosion-alluvionnement généralement faible et une période d'interférence des forçages climatique et anthropique	318
II-2-4- Recrudescence de l'activité éolienne durant la période moderne	320
II-2-5- L'hydrosystème depuis environ la deuxième moitié du XIXe siècle : dégradation des environnements, exacerbation des processus morphodynamiques et intensification de l'érosion anthropique	
CONCLUSION DU CHAPITRE	321
CONCLUSION DE LA QUATRIEME PARTIE	323
CONCLUSION GENERALE	325

BIBLIOGRAPHIE	333
TABLES	349
TABLE DES FIGURES	I
TABLE DES TABLEAUX	VI
TABLE DES PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES	VII
TABLE DES MATIERES	VIII
ANNEXES	XXIV
ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LA GRANULOMETRIE LASER LS 200 ET LS 230	XXV
ANNEXE 2 : PRETRAITEMENTS CHIMIQUES DES SEDIMENTS GYPSEUX	XXVI
ANNEXE 3 : DES MODELES ET DES DEPOTS, VARIES MAIS LOCALISES, SONT EN VOIE D'EDIFICATION DANS LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL	XXVIII
ANNEXE 4 : CARTE GEOMORPHOLOGIQUE DE L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL AU 1/50000	XXXIV

ANNEXES

ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LA GRANULOMETRIE LASER LS 200 ET LS 230

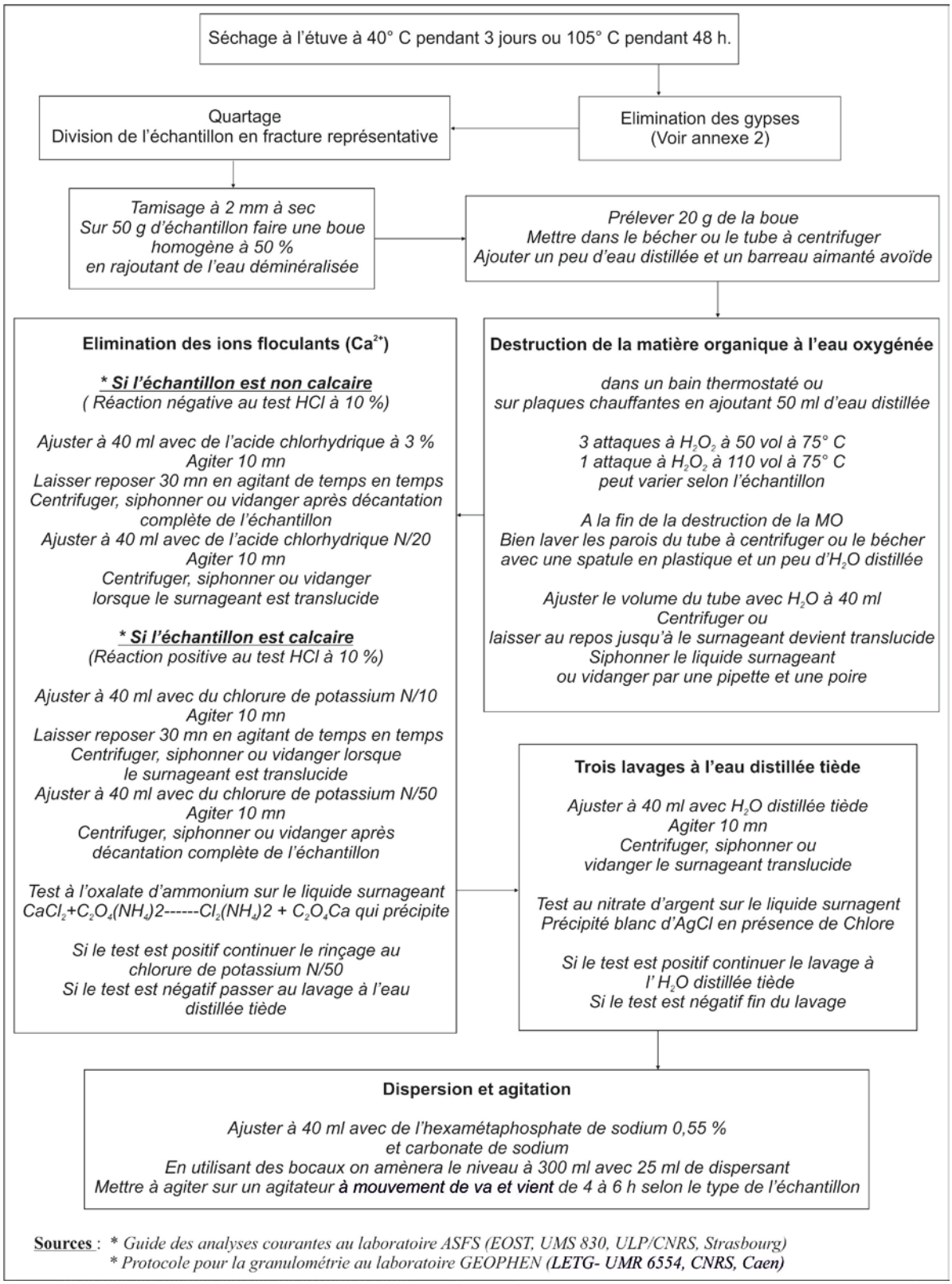
ANNEXE 2 : PRETRAITEMENTS CHIMIQUES DES SEDIMENTS GYPSEUX

ANNEXE 3 : DES MODELES ET DES DEPOTS, VARIES MAIS LOCALISES, SONT EN VOIE D'EDIFICATION DANS LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

ANNEXE 4 : CARTE GEOMORPHOLOGIQUE DE L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL AU 1/50000

ANNEXE 1 :

PROTOCOLE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LA GRANULOMETRIE LASER LS 200 ET LS 230



Sources : * *Guide des analyses courantes au laboratoire ASFS (EOST, UMS 830, ULP/CNRS, Strasbourg)*
* *Protocole pour la granulométrie au laboratoire GEOPHEN (**LETG- UMR 6554, CNRS, Caen**)*

ANNEXE 2 :

PRETRAITEMENTS CHIMIQUES DES SEDIMENTS GYPSEUX

I- PREMIERE METHODE D'ELIMINATION DU GYPSE : MODE OPERATOIRE (*Chahi et al., 1993*)

1- Préparer une concentration de NaCl de 100g/l.
2- Mettre l'échantillon dans un bécher et ajouter la concentration pour une durée de traitement d'une heure.
3- Laisser décanter le liquide clair surnageant puis éliminer le surnageant.
4- Répéter ces opérations deux à trois fois.
5- Le traitement pourrait entraîner la néoformation de chlorures. Laver maintes fois l'échantillon à l'eau permutée pour les faire disparaître.

II- ESTIMATION DE LA TENEUR EN GYPSE (*Vieillefon, 1979*)

II-1- Mode opératoire

1- Placer 10 g de l'échantillon séché à l'air dans une capsule tarée préalablement séchée une heure à 60° C (P_0), et mettre à l'étuve ventilée à 60° C pendant 24 h.
2- Refroidir en dessiccateur et peser (P_1).
3- Si P_1 est inférieur à P_0, la perte de poids correspond à l'humidité de l'échantillon; passer alors directement à 4.
Si P_1 est supérieur à P_0, placer la capsule en « chambre humide » (enceinte close remplie d'eau à la base) pendant 6 heures puis 24 h à l'étuve à 60° C ; refroidir et peser (P_2).
4- Ajouter 10 ml d'eau distillée dans la capsule, passer en chambre humide pendant 1 h puis encore 24 h à 60° C en étuve ventilée; refroidir et peser (P_3).
5- Placer la capsule dans une étuve classique à 105° C pendant 3 h, laisser réhydrater en chambre humide pendant 6 heures puis mettre à l'étuve ventilée à 60° C pendant 24 h; refroidir et peser (P_4).

II-2- Calcul

Soient :
$P = P_1 - P_0 + 10$ le poids de sol séché a 60° C
$P_4 - P_1 = a$; $P_3 - P_2 = b$; $P_4 - P_0 = c$

On obtient :
1/ si $P_1 < P_0$

$$\text{Gypse G \%} = \frac{637\ a}{P}$$

2/ si $P_1 > P_0$

$$\text{Gypse G \%} = \frac{637\ (c-b)}{P_0}$$

III- DEUXIEME METHODE D'ELIMINATION DU GYPSE (*Mathieu et Pieltain, 1998*)

III-1- Elimination du gypse des échantillons en contenant moins de 10 %

1- Peser 30 g de l'échantillon dans un tube à centrifuger de 250 ml.
2- Ajouter 120 ml d'eau déminéralisée et agiter pendant 20 minutes.
3- Centrifuger à 2500 tours/minute durant 10 minutes.
4- Déterminer la conductivité électrique du surnageant ; si la conductivité est supérieure à 2.5 $mS.cm^{-1}$, répéter le lavage.
5- Passer la prise d'essai à l'étuve à 105° C durant 24 h, refroidir au dessiccateur.

III-2- Elimination du gypse des échantillons en contenant plus de 10 %

1- Peser 20 g de l'échantillon dans un tube à centrifuger de 250 ml.
2- Ajouter 20 ml de chlorure de baryum ($BaCl_2$) 5% et 40 ml de triethanolamine
3- Agiter pendant une heure avec un agitateur à mouvement de va et vient.
4- Centrifuger pendant 10 minutes à 200 t/min, jeter le liquide surnageant.

ANNEXE 3 :

DES MODELES ET DES DEPOTS, VARIES MAIS LOCALISES, SONT EN VOIE D'EDIFICATION DANS LE SYSTEME FLUVIAL DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL

Dans les axes d'écoulement, les phénomènes d'ablation prédominent (Boujelben, 2002 ; Boujarra *et al.*, 2006). Les manifestations d'accumulation sont localisées dans les secteurs avals et aux débouchés des oueds et dans les plaines de bordures des sebkhas. Les dépôts fonctionnels prennent la forme de cônes deltaïques, de cônes et de plaines d'épandage et de placages et/ou de voiles éoliens.

II-4-1- Les modelés liés aux eaux courantes

II-4-1-1- Une banquette d'accumulation et d'érosion peu développée

Dans certaines sections des oueds, on souligne la présence d'une banquette d'accumulation et/ou d'érosion en cours de dégagement à la suite du surcreusement des talwegs (*cf.*, Pl. 11). Elle est composée de sables récents ou de sables et d'argiles pléistocènes et mio-pliocènes. Elle est très discontinue, de quelques décimètres de largeur et d'une dizaine de centimètres de hauteur.

II-4-1-2- Deux autres cônes deltaïques à l'exutoire de l'oued al Manfas as-Sod

Dans le milieu lagunaire méridional de Halq al Minjil, deux bras de l'oued al Manfas as-Sod se sont développés et ont participé au colmatage récent de la dépression littorale et à la formation de deux cônes deltaïques actuels. Le premier s'individualise au nord du cône deltaïque préromain (*cf.*, Fig. 86.1). Le colmatage fluviatile est antérieur aux **crues de 1969** puisque l'édifice est bien visible sur les clichés aériens de 1963. Il est vraisemblablement liée aux crues du début du siècle précédent en 1870, 1883, 1892, 1904, 1921 et 1932 (Despois, 1955 ; Barrot, 1972, D.E.G.T.H, 1979 ; Karray, 1993). Le second, plus développé au nord et au sud du cône préromain, a participé activement à **l'exhaussement des planchers alluviaux** et au colmatage de la lagune méridionale sur plus d'un tiers de sa superficie. Il est lié aux **inondations exceptionnelles de 1969**.

Ainsi, sous l'impulsion des facteurs climato-anthropiques, d'importantes modifications morphologiques et hydrologiques se sont répercutées sur le système d'embouchure de l'oued al Manfas as-Sod. L'oued a dévié ses anciens bras, a recoupé la base du cône préromain et a entraîné une rapide progradation de son embouchure. Il a édifié un cône deltaïque étendu, induisant un changement morphologique spectaculaire du bassin méridional de Halq al Minjil. Ce cône s'étend sur environ 6,3 km² de superficie et présente plusieurs millions de mètre-cube de matériaux alluviaux (Barrot, 1972 ; Boujelben, 2002). Ainsi, sur la bordure de la sebkha-lagune, des petites brèches sont ouvertes aux dépens des bourrelets hydroéoliens. **Des petits cônes deltaïques actifs**, à peine marqués dans le paysage et de quelques dizaines de mètre-carrés de superficie sont **en cours de développement**.

II-4-1-3- De petits cônes d'épandage s'édifient dans les plaines d'inondation

A la sortie des entailles des oueds al Msid ar-Ramla et Hlig ar-Rizg, **des cônes emboîtés en trompettes** dans les anciens cônes holocènes antéhistoriques et historiques sont en cours de construction (*cf.*, Fig. 84 et 87). Ils sont formés de sables et de limons aux graviers et cailloux calcaires, friables, de couleur jaune et épais de quelques décimètres. Ils s'étendent sur 72 ha à plus de 3 km² de superficie. Ils témoignent de l'aggradation alluviale localisée des plaines d'al Bal'Oum-al Qal'a. Ces constructions doivent leur origine aux

crues exceptionnelles de l'automne de 1969. Elles se sont étendues à l'occasion des inondations torrentielles de septembre 1995.

Sur la rive centre-est d'al Kalbiyya, l'oued al Gharig a incisé son cône historique. Il débouche aujourd'hui dans la plaine d'al Hanya, là où il épande ses charges et contribue à l'exhaussement des bordures de la sebkha. **Des dépôts fins de débordement** sont mis en place par des écoulements non chenalisés, en nappe ou divagant. Ici, la pente est très faible, la défluviation des eaux est remarquable et l'écoulement se fait souvent à la surface du sol. Un trait particulier de la sédimentation réside en la présence des galets roulés d'argiles limoneuses dépassant parfois 30 cm de diamètre. Ces galets témoignent des décharges de crues et/ou des événements d'érosion de surface et de remaniement, pratiquement sur place, d'éléments fins. Les flux d'eau sont de faible compétence charriant les sédiments à proximité du fond puis par roulage (Pl. 15).



Pl. 15 : A la sortie de l'oued al Gharig (rive est d'al Kalbiyya), Les galets roulés d'argiles limoneuses correspondent aux dépôts de décharge de crues et peuvent témoigner des événements de remaniement et d'érosion de surface

II-4-1-4- Des cônes deltaïques sur les marges de la sebkha al Kalbiyya

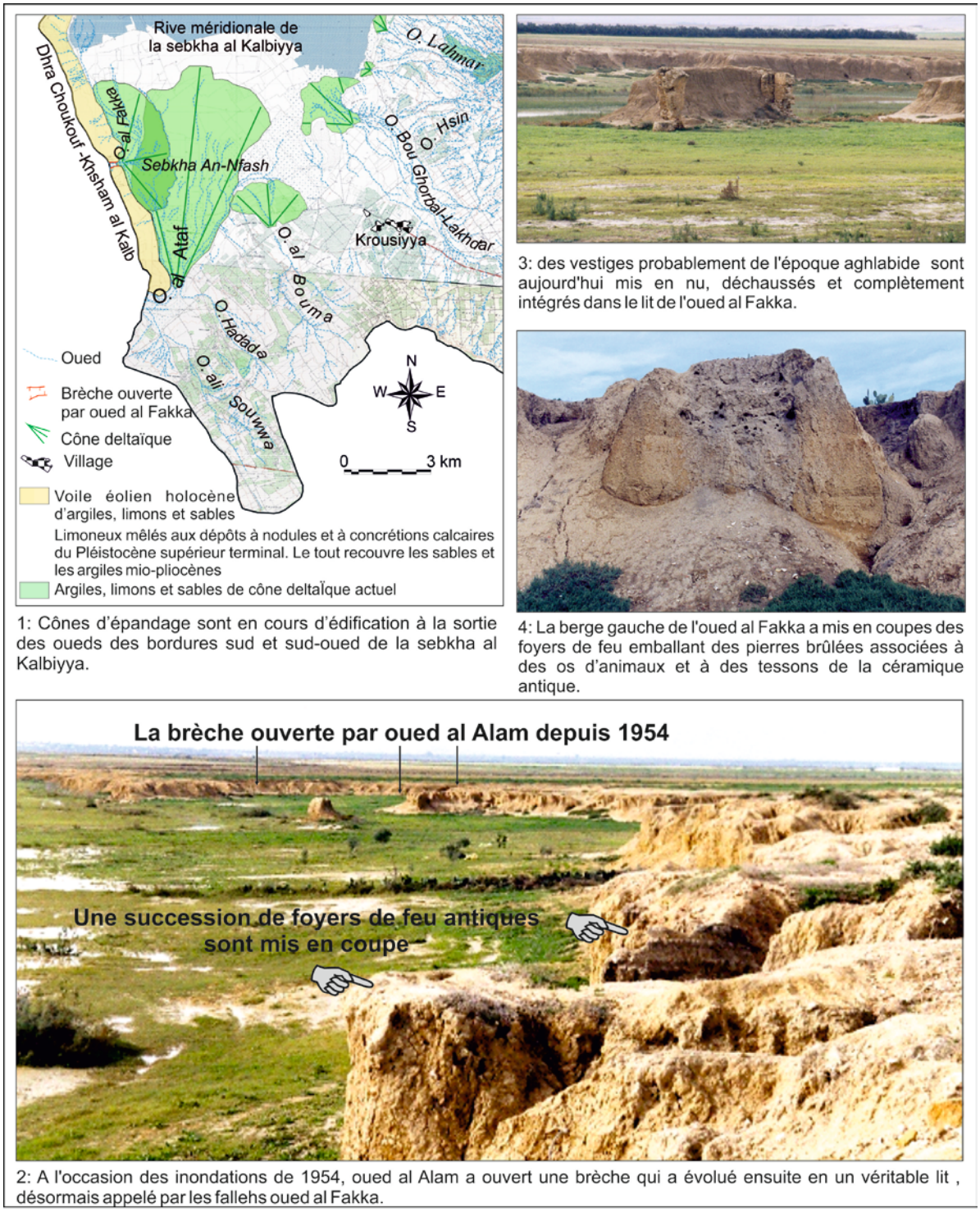
Sur les rives orientale et occidentale de la sebkha al Kalbiyya, la plupart des oueds endoréiques incisent leurs anciens cônes et continuent à alluvionner à leurs débouchés. Ils donnent lieu à **des petits cônes deltaïques sur les marges de la sebkha**. L'oued Khaled débouche sur la rive nord-est de la sebkha. Il a pu construire **deux cônes deltaïques emboîtés en trompettes**. Le premier, ayant une forme classique, est composé d'une

succession litée de sables et de limons et d'argiles. Il s'étend sur 0,12 km² et montre dans ses parties médiane et distale la présence en surface des **tessons de céramique romaine remaniés**. Toute tentative d'attribution chronologique reste délicate. Son incision témoigne de **l'inversion des tendances morphogéniques**, de l'interruption de l'accumulation et de la mise en action de l'érosion linéaire. Le second cône, de petites dimensions, indique **la reprise des dynamiques d'épandage**. Il s'étend sur 4 ha. Il présente, sur quelques décimètres d'épaisseur apparente, un faciès fin de limons et d'argiles limoneuses intercalés parfois de séquences centimétriques de sables. L'accumulation est mise en place par une succession d'écoulements boueux à plus au moins faible capacité de transport et d'écoulements compétents et chenalisés. La photo-interprétation diachronique des clichés aériens de 1963 et 1988 montre **une progradation alluviale** de plus de 100 m du cône-deltaïque dans l'enclave d'al Kalbiyya, effectuée surtout à l'occasion des **crues catastrophiques de 1969**.

A l'entrée méridionale de la sebkha, la pente est presque nulle. Oued al Atef devient plus hésitant et se divise en une multitude de bras. L'ennoyage divaguant ou en nappe entraîne des sédiments allogènes dans la cuvette et provoque son exhaussement. Au débouché de l'oued, Hanshir al Magroun correspond à **un immense cône deltaïque** (Fig. 107.1). Au niveau de la sebkha an-Nfash et à la lisière méridionale de la sebkha al Kalbiyya proprement dit, les courants d'eau ralentissent progressivement et déposent leurs charges entraînant ainsi la progradation aussi bien latérale que longitudinale du cône qui passe latéralement à une morphologie de **plaine d'épandage**. La sédimentation est formée d'alternances de séquences centimétriques (2-5 cm) d'argiles et d'argiles limoneuses, intercalées d'horizons de sel et de gypse et des lits sableux et sablo-limoneux.

L'importance de l'érosion dans le bassin amont d'al Kalbiyya et la persistance d'une subsidence lente peuvent expliquer aujourd'hui le maintient du colmatage alluvial de l'enclave endoréique (Belkhodja, 1972 ; Bahri, 1982, Karray, 1990 b, 1993). Les taux et les rythmes d'exhaussement de l'enclave sont très variables allant de quelques mm à plus de 4,2 cm/an (Karray, 1993). Le labour et la mise en céréaliculture du cône a augmenté la vulnérabilité des sédiments fins à l'action du vent.

Sur les bordures sud-ouest de la sebkha al Kalbiyya, **oued al Alam-al fakka** a pu construire **un cône deltaïque** étendu sur plus de 1,86 km². Cet oued draine un bassin potentiel de plusieurs milliers de km^2 et prend sa source sur les versants méridionaux des reliefs périsahéliens. A la veille des inondations de 1954, l'oued s'écoulait en arrière de l'alignement des Dhras as-Satour-Choukouf, puis il s'est détourné au sud de Dhra Khasham al Kalb avant de s'épandre dans Hanshir al Magroun et se jeter dans la sebkha. A l'occasion **des inondations de 1954**, les eaux conduites par l'oued al Alam et accumulées en derrière de Dhra Khasham al Kalb ont ouvert, par le phénomène de chasse d'eau, une brèche (enquête auprès des habitants de la localité de Sidi Nasr). Cette dernière a évolué ensuite en un véritable lit de plus de 160 m de largeur et plus de 350 de longueur (Fig. 107.2). Son encaissement est d'environ 3 m. On estime **le déblaiement à plus de 168000 m^3 de sédiments**. Il en résulte **un grand cône deltaïque au débouché de l'oued**. Le dépôt est composé essentiellement d'argiles et de limons. Dans le talweg, des vestiges probablement de l'époque aghlabide (citernes, puits) sont aujourd'hui mis à nu, déchaussés et complètement intégrés dans le lit actuel de l'oued (Fig. 107.3). Aussi, la berge gauche de l'oued a mis en coupes des **foyers de feu** emballant des pierres brûlées associées à des os d'animaux et à **des tessons de poterie antique de type commune et sigillé** (Fig. 107.4).



1: Cônes d'épandage sont en cours d'édification à la sortie des oueds des bordures sud et sud-oued de la sebkha al Kalbiyya.

3: des vestiges probablement de l'époque aghlabide sont aujourd'hui mis en nu, déchaussés et complètement intégrés dans le lit de l'oued al Fakka.

4: La berge gauche de l'oued al Fakka a mis en coupes des foyers de feu emballant des pierres brûlées associées à des os d'animaux et à des tessons de la céramique antique.

2: A l'occasion des inondations de 1954, oued al Alam a ouvert une brèche qui a évolué ensuite en un véritable lit , désormais appelé par les fallehs oued al Fakka.

Fig. 107 : Aspects de la morphodynamique actuelle et édification des cônes d'épandage et « deltaïques » sur les rives sud et sud-est de la sebkha al Kalbiyya

II-4-2- Les modelés et les dépôts liés aux vents

II-4-2-1- Le voile-placage éolien « Trab es-Saffi »

Dans le cours aval des oueds al Manfas as-Sod et as-Souriyya et aux débouchés des oueds ar-Ramla et al Hfor, un dépôt éolien décimétrique (souvent inférieur à 50 cm) vient se plaquer contre les berges et couvrir en partie les interfluves. Il est particulièrement développé à l'ouest d'al Ghitha, ad Dgagza et Ragad al Hanshir et au sud de Dowwar al

Labyar (Fig. 108). Il s'agit de sables (en arabe « *Trab* ») et de sables limoneux. Ils ont presque les mêmes caractéristiques sédimentologiques que celles de la formation éolienne postmédiévale et expliquent les mêmes mécanismes de mise en place (*cf.*, la coupe CaSM). Ici les dépôts prennent la forme de **voile et** de **placage éoliens fonctionnels**.

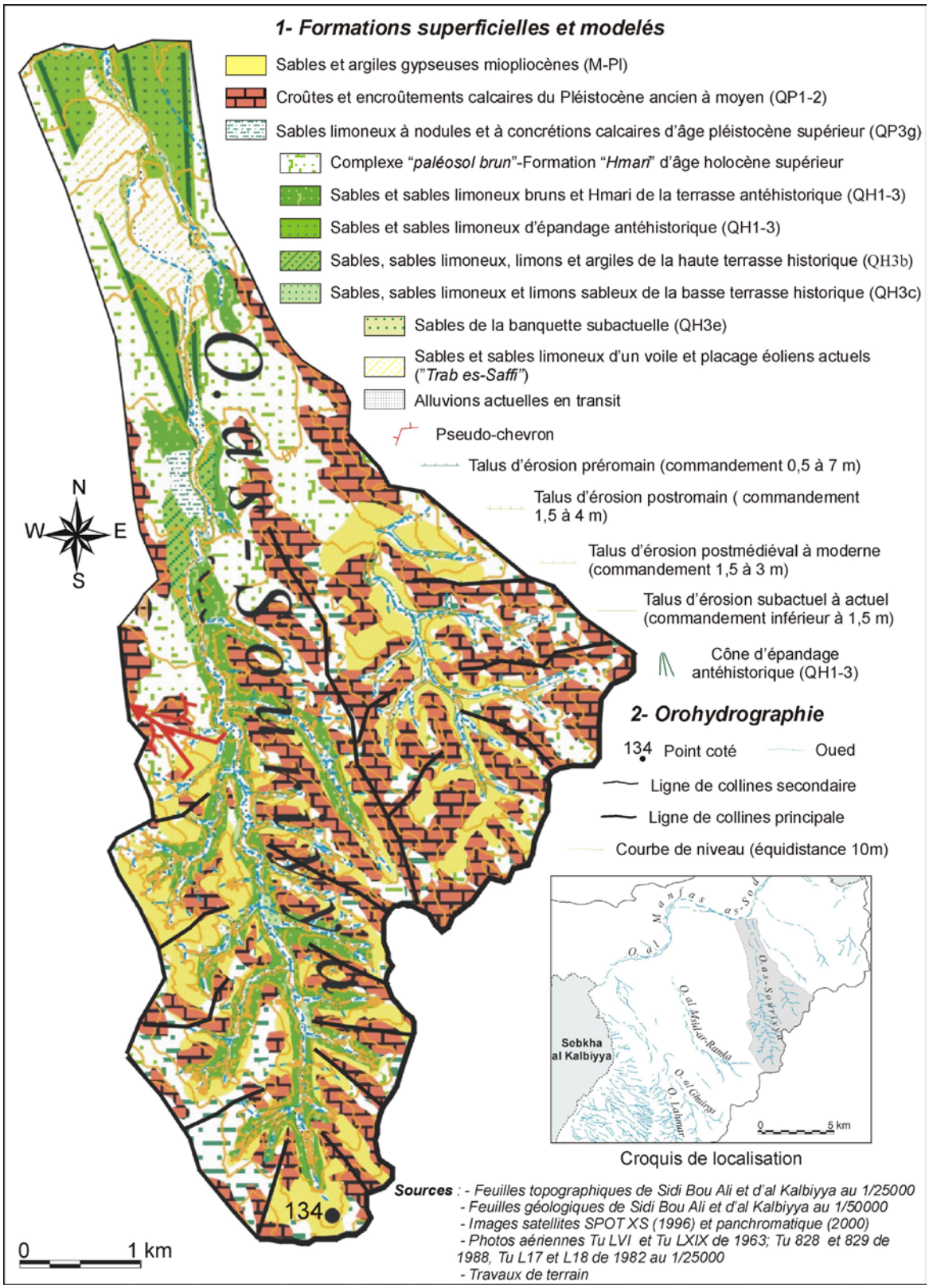


Fig. 108 : Carton géomorphologique de l'oued as-Souriyya

« ***Trab es-Saffi*** » prend de l'ampleur particulièrement sur la rive droite des oueds. Il est principalement déposé par les vents du secteur nord-ouest. Le caractère friable et fonctionnel des sédiments, permet de lui attribuer un âge actuel.

II-4-2-2- Les nebkas et les sables « Hmour »

Sur les bordures des sebkhas, des particules fines composées de sables fins, de limons et d'argiles roses (7.5YR 7/4) et jaunes rougeâtres (7.5YR 7/8) sont piégées par des touffes de végétation halophile. Elles donnent lieu à **des nebkas de tailles variables**. Leurs pointes sont dirigées particulièrement en direction du sud-est, de l'ouest et du sud-ouest. Les vents du côté est, nord-ouest et nord-est sont responsables de leur mise en place.

A l'est et au nord-est de l'agglomération de Kondar, **des sables fins mobiles** viennent ensevelir sous quelques centimètres d'épaisseur les sables à nodules et à concrétions calcaires, le paléosol brun et la formation « *Hmari* ». Ils sont de couleur brun clair (7.5YR 6/4) à jaune rougeâtre (7.5YR 6/6). La morphoscopie des quartz a montré une prédominance des grains émoussés mats (48%) et émoussés luisants (36%). Les quartz ronds mats ne dépassent pas 12% des éléments examinés. Ceci peut affirmer l'origine proche des sédiments et/ou de leur courte histoire de transport éolien. En dépit de sa faible extension, **le voile pelliculaire** qui prend localement le nom d'***Hmour*** (en arabe *rougeâtre*) désigne une dégradation locale des sols.

ANNEXE 4 :

CARTE GEOMORPHOLOGIQUE DE L'HYDROSYSTEME DES SEBKHAS AL KALBIYYA ET HALQ AL MINJIL AU 1/50000

(Consultez le CD-ROM ci-joint)

Carte géomorphologique de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil au 1/50000

530000 540000 550000

320000 310000 300000 290000 280000

N W E S

Golfe de Hammamet

Sebkha Assit aj-J riba

O. al Gli i

O. al Gobtan

O. al Mjinin

Awlad Tlil

Al Ghwilat

Manzil Dar Bilwa'ir

Sebkha-lagune Halq al Minjil

Al Aribat

Hirgla

Ml-s-t

Le monoclinal de Dhra as-Satour

Ml

Ml-s-t

Al Mzawgha

Gmata

Kandar

Al Krad

Manfas asSad

Dowwar Labyar

Sidi Bou Ali

Ad-Dgagza

Dowwar Ash-shyab

Awlad Farjan

Ahl Jmi

Al Boura

O. Sabkhat

Le monoclinal de Dhra as-Satour

O

Ma

Bir aj-Jdid

Al Bshashma

Sebkha al Kalbiyya

Dhras Laghmas-ach-Shraif

O. al Ghdiriga

O. Hwi sli

O. Lahmar

O. Sala h Bou G iddida

Dhra Chouk ouf-Khsham al Kalb

O. Al Fakk o

Sabkhit An-Nfash

Dhra Ash-shrashir

Dhra Zmenka

Dhra Ash-Ch'ir

Dhra ar-Rommana

O. Al Aiss

O. Hadada

O. Al Bouma

O. Ali Souwwa

L'anticlinal de Qal'a al Kbira-Ras Bal'oum

Le synclinal de Laya-Hammam

L'antclinal de Kroussiyya-Sidi al Hani

25 82 30 20 35 51 26 50 55 66 17 16 10 25 134 165 113 22 45 74 88

0 1 5 km

Légende de la carte géomorphologique de l'hydrosystème des sebkhas al Kalbiyya et Halq al Minjil

1- Données structurales

Gouttière synclinale — Pli anticlinal — Chevauchement — Faille probable — 55 Direction et valeur de pendage

Faille décrochante sûre principalement dextre — Crêt — Combe — Val — Couloir monoclinal — Hog-back

Pseudo-chevron

2- Dépôts et modelés littoraux

Dépôt grésifié marin et d'éolianite d'âge tyrrhénien — Plage sableuse — Falaise

3- Formations et modelés liées aux eaux courantes

Sables limoneux à nodules et à concrétions calcaires d'âge pléistocène supérieur (QP3g) — Complexe paléosol brun-Formation "Hmari" d'âge holocène supérieur — Limons sableux, limons et argiles gypseux d'âge holocène inférieur à moyen — Dépôt hydromorphe de Garâa d'âge holocène inférieurà moyen (QH1-2) — Argiles limoneuses, limons et sables de la terrasse antéhistorique (QH1-3) — Sables de plage à *Cerastoderma glaucum* de la première moitié de l'Holocène moyen — Argiles, limons et sables de la haute terrasse historique (QH3b) — Sables, sables limoneux et argiles limoneuses d'un cône d'épandage historique (QH3b) — Sables, sables limoneux et limons sableux de la basse terrasse historique (QH3c) — Sables et limons de cône deltaïque préromain — Sables de la banquette subactuelle (QH3e) — Argiles et limons subactuels de cône d'épandage — Sables et limons de cône deltaïque antérieur aux crues de 1969 — Argiles, limons et sables actuels de cône d'épandage (QH3g) — Sables de cône deltaïque des crues de 1969 — Sables, limons, argiles et concrétions d'une plaine alluviale — Argiles et limons sablo-gypseux — Argiles et limons gypseux de sebkha et de sebkha-lagune — Alluvions actuelles — Talus d'érosion préromain (Commandement : 0,5-3,5 m) — Talus d'érosion postromain (Commandement : 2-5 m) — Talus d'érosion postmédiéval à moderne (Commandement : 1,5-2,5 m) — Talus d'érosion subactuel à actuel (Commandement : inférieur à 1,5 m) — Cône d'épandage historique (QH3b) — Cône d'épandage subactuel (QH3e) — Cône d'épandage actuel — Paléovallée pléistocène supérieur

4- Formes et formations éoliennes

Lunette du pléistocène supérieur terminal — Dunes ou bourrelet probablement d'âge pléistocène supérieur — Voile éolien des sommets d'interfluves d'âge pléistocène supérieur terminal — Témoins de placages éoliens d'âge pléistocène supérieur terminal à holocène avec localement des sédiments de saupoudrage éolien et voile d'âge holocène — Deux générations de dépôts éoliens superposés (FEO1 et FEO2) d'âge holocène inférieur et moyen — Dune hydroéolienne d'âge holocène moyen — Bourrelet protohistorique — Bourrelet antique — Voile éolien antique — Dune-îlot (Guataya) d 'âge historique — Argiles et limons gypseux de saupoudrage éolien historique à actuel, recouvrant l'ancien cordon tyrrhnien — Champs de nebkas

5- Orohydrographie, données humaines et végétation

25 Point coté — 165 Point culminant — Oued — Petits fonds isolés — Végétation de chott — Reboisement — Village — Carrière de sables ou de croûte et d'encroûtement calcaires — Station d'aquaculture — Route — Autoroute