HAL
open science

Les Paysages du vent : géohistoire et géoarchéologie de la dépression de Kharga (désert Libyque, Égypte) du cinquième siècle avant notre ère à nos jours

Maël Crépy

▶ **To cite this version:**

Maël Crépy. Les Paysages du vent : géohistoire et géoarchéologie de la dépression de Kharga (désert Libyque, Égypte) du cinquième siècle avant notre ère à nos jours : 2 500 ans d'interactions entre dynamiques éoliennes et activités humaines dans un milieu hyperaride. Etudes de l'environnement. Université Lumière Lyon 2, France; Université de Lyon, 2016. Français. NNT : . tel-01490559

HAL Id: tel-01490559

https://hal.science/tel-01490559

Submitted on 15 Mar 2017

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Université Lumière Lyon 2
ED483 - Sciences Sociales
UFR Temps et Territoires
Département de géographie
UMR5133 - Archéorient

Les Paysages du vent : géohistoire et géoarchéologie de la dépression de Kharga (désert Libyque, Égypte) du cinquième siècle avant notre ère à nos jours

2 500 ans d'interactions entre dynamiques éoliennes et activités humaines dans un milieu hyperaride

Maël CRÉPY

Thèse de doctorat de « Géographie, Aménagement et Urbanisme »
préparée sous la direction de Yann CALLOT
présentée et soutenue publiquement le 2 décembre 2016

Jury :

M. Yann Callot	Univ. Lyon 2	(directeur)
M. Frédéric Colin	Univ. Strasbourg	(examinateur)
M. Morgan de Dapper	Univ. Gent	(rapporteur)
M. Bernard Geyer	CNRS, Lyon	(examinateur)
Mme Catherine Kuzucuoğlu	CNRS, Paris	(rapporteur)
M. Jean-Louis Rajot	IRD, Bondy	(examinateur)

Sauf mention contraire, toutes les illustrations de ce document ont été produites par l'auteur.

A la mémoire de Michel Wuttmann

« Ne pas dire : au Sahara, il y a des arbres partout, ne pas dire non plus : il n'y en a nulle part.»

Théodore Monod, Méharées, 1937[1]

[1]. Extrait du chapitre X "De la tique à l'éléphant" (p. 180) de Monod T. *Méharées*, Éditions J'ai Lu, Paris, 2008, 251 p.

Remerciements

La recherche centrée sur les interactions hommes/environnements en milieu aride sur le temps long développée dans ce travail a commencé à se dessiner il y a sept ans, en master 1, lors de ma rencontre avec Yann Callot. Fraîchement sorti de classes préparatoires, j'ignorais alors qu'il était possible de travailler sur ces milieux qui me passionnaient depuis mon plus jeune âge. Yann m'a d'abord mené dans le nord de l'Arabie-Saoudite, me transmettant avec patience une partie de son savoir-faire et de son savoir-questionner, puis en Égypte, sur le site archéologique de Douch, lors du master 2. Le potentiel géographique énorme de ce site m'a permis d'y réaliser mes travaux de thèse, toujours encadré par Yann. Merci à toi, en me guidant (tout en me laissant une grande liberté), en me soutenant dans les moments difficiles et en m'accordant ta confiance, tu es devenu pour moi bien plus qu'un directeur. Je suis heureux d'avoir passé ces sept années à travailler avec toi.

Cette thèse n'aurait pas pu naître sans terrain, et donc sans l'Institut Français d'Archéologie Orientale et ses membres, qui m'ont accueilli sur le terrain à Douch, et au laboratoire au Caire. Je voudrais en particulier remercier Michel Wuttmann, qui, le premier, nous orienta, Yann et moi, vers l'étude des dépôts de sédiments fins, à l'échelle du site de Tell-Douch. Ton absence, en cette fin de thèse, est particulièrement amère. Je veux également témoigner ma gratitude à Morgan de Dapper, qui m'a beaucoup appris, et dont les conseils sur le terrain en 2010 et en 2012 ont été précieux. Merci également à tous les collègues rencontrés dans le cadre des missions, Damien Agut, François Briois, Michel Chauveau, Tiphaine Dachy, Mohamed Gaber, Arnault Gigante, Thierry Gonon, Sylvie Marchand, Nicolas Michel, Béatrix Midant-Reynes, Mathilde Minotti, Hassân Mohammed et Olivier Onézime. Nos échanges sur le terrain sont pour beaucoup dans la construction du contenu de cette thèse et les moments partagés avec vous au quotidien ont été un réel plaisir. J'espère que cette mission reprendra lorsque les conditions le permettront. Compléter le grand projet de Michel d'une prospection exhaustive à l'échelle de la dépression de Kharga le justifie largement.

Le laboratoire de rattachement d'un doctorant conditionne une grande partie de son travail de thèse. J'ai eu la chance d'être rattaché à l'UMR5133 - Archéorient, dont le soutien financier, pratique et scientifique sans faille m'ont permis d'avancer. Les moyens mis à la disposition des doctorants, les temps de rencontre et les efforts d'intégration aux équipes sont des atouts

indiscutables dans l'apprentissage de la recherche. Merci à tous, et en particulier à Olivier Barge, Christophe Benech, Anne Benoist, Rémy Boucharlat, Lionel Darras, Hatem Djerbi, Bernard Geyer, Jean-Philippe Goiran, Linda Herveux, Nicolas Jacob-Rousseau, Marie Le Mière, Pierre Lombard, Sylvie Müller-Celka, Gwenaëlle Péquay, Emmanuelle Régagnon, Marie-Odile Rousset et Emmanuelle Vila. Merci également à Bérénice Chamel et Mina Dabbagh pour avoir représenté les doctorants au sein du laboratoire et organisé les rencontres doctorants/chercheurs.

Durant les cinq dernières années, une grande partie de mon temps a également été consacrée à des activités d'enseignement au sein du département de géographie de l'UFR Temps et Territoires de l'université Lyon 2. Je veux exprimer ma gratitude à tous les collègues enseignants-chercheurs en géographie pour leur aide et pour ce qu'ils m'ont appris. Je remercie en particulier Christina Aschan et Claire Cunty, qui ont été les premières à m'accorder leur confiance et à me confier le cours de méthodes d'enquête en géographie en 2011, Jérôme Lejot pour m'avoir proposé la tenue de cours passionnants lors de mes années d'ATER, Olivier Deslondes pour m'avoir formé à l'organisation et au suivi d'un groupe de stage de licence 3, et Christian Montes, qui m'a permis d'encadrer le stage de master 2 INS en 2015. Merci également aux étudiants rencontrés au fil de ces années : vos questions et vos réactions m'ont aidé à affiner mon travail d'apprenti enseignant-chercheur. J'ai tout particulièrement apprécié la possibilité de suivre certains d'entre vous année après année, de la licence 2 au master 2, de vous voir apprendre, progresser et évoluer.

L'élaboration d'une thèse est un travail long et stressant, mais la compagnie des collègues et des étudiants de la plateforme OMEAA, à Bron, me l'ont rendu moins difficile. Merci à Adrien Barra, Jean-François Berger, Camille « Poulain Praline » Bijon, Ninon Blond, Sylvain « Chouchou » Blondeau (alias Dragibus le Vil), Marie-Hélène Chevrier, Hugo Delile, Louise Dorignon, Vincent Gaertner, Blandine Lecomte-Schmidt, Mohamed Mezrag, Quentin "Hophéla" Morcrette, Franck Perret, Franck Ollivon, Férreol Salomon, Stéphanie Thorin et Cédric Venard. Je souhaite à mes camarades d'infortune de la salle des doctorants un temps de gestation plus court que le mien.

L'évaluation d'une thèse est une étape essentielle dans la vie d'un doctorant. Elle ne consiste pas seulement en l'octroi d'un diplôme : elle clôt symboliquement une première expérience de recherche. Je tiens donc à remercier les membres de mon jury, qui ont accepté de m'accompagner dans cette ultime expérience du doctorat : Yann Callot, Frédéric Colin, Morgan de Dapper, Bernard Geyer, Catherine Kuzucuoğlu et Jean-Louis Rajot.

Je voudrais également remercier Christian Charles dont les cours de géographie, en hypokhâgne, ont fait naître en moi la passion de cette discipline. Avec le recul, je constate que le récit de ses recherches dans la vallée de Hunza a largement influencé ma façon d'aborder mes propres terrains et de vivre la géographie.

Merci à Anne Benoist, Vincent Bernard, Carine Calastrenc, Julien Charbonnier, Sophie Costa, Michele Degli Esposti, Maria-Paola Pellegrino, Louise Purdue et Emmanuelle Régagnon, pour leur accueil au sein de la mission archéologique à Masafi, dans l'Émirat de Fujairah. Travailler là-bas avec vous m'a apporté de nouveaux éclairages sur l'évolution environnementale dans la dépression de Kharga.

Je ne peux clore ces remerciements sans une pensée pleine de gratitude en direction de mes nombreux relecteurs : Aurore, Bernard, Clélia, Evelyne et François-Marie, Kévin, Malo, Maman, Marine, « Fiston », Nicolas, Ninon, Papa, Pingouin, Yann. Merci à vous tous pour vos conseils et votre aide dans l'élimination d'un maximum de coquilles.

Enfin, merci à ma famille et à mes amis, qui m'ont soutenu et accompagné dans les joies comme dans les peines traversées durant ces cinq dernières années. Une pensée toute particulière pour Ninon, notre rencontre au laboratoire est sans conteste l'épisode le plus marquant de mon doctorat. Ton soutien de chaque instant dans la dernière ligne droite de la rédaction a limité la fatigue et le découragement.

Sommaire

Remerciements 5
Sommaire 8
Introduction 11
Première partie La dépression de Kharga entre dynamiques récentes et héritages 15
Introduction 15
Chapitre I. L'Égypte, une oasis fluviale cernée par les déserts ? 17
I.A. Déserts et oasis 18
I.B. L'Égypte entre aridité et hyperaridité 19
I.C. Une ressource allochtone capitale et renouvelable : le Nil 23
I.D. Les eaux du dessous : le Système aquifère des Grès de Nubie 24
I.E. « Les îles des bienheureux » 25
Chapitre II. Topographie, climats et hydrogéologie de la dépression de Kharga au Quaternaire 26
II.A. Une dépression fermée parsemée de collines et traversée par un erg 26
II.B. L'hyperaridité climatique et la prépondérance des phénomènes éoliens 29
II.C. Les grandes pulsations climatiques quaternaires 31
II.D. À l'origine des ressources en eau : géologie, hydrogéologie locale, reliefs et tectonique 34
Chapitre III. Un peuplement holocène centré sur les points d'eau 39
III.A. Contexte archéologique et historique de peuplement 39
III.B. Peuplement et pratiques agricoles contemporaines 47
Chapitre IV. Une grande variété de sites d'étude 56
IV.A. La butte témoin : KS046 - Gebel Bayyan el-Qibli 59
IV.B. Les sites de plaine 61
IV.C. Les sites de l'erg, malgré le sable ? 65
IV.D. Les collines de grès d'origine tectonique : des châteaux d'eau naturels 68
IV.E. Les buttes de sédiment fin : une genèse récente ? 73
IV.F. Les oasis actuelles 81
Conclusion : géomorphologie et activités humaines dans la dépression de Kharga, un jeu d'échelles complexe 85

Deuxième partie Analyse géomorphologique, géoarchéologique et géohistorique des relations hommes/vent durant l'Holocène.....87

Introduction 87

Chapitre V. Les pluies actuelles, des épisodes violents à l'impact morphogénétique limité dans le temps 90

V.A Les marques d'un ruissellement intense : ravinement et désorganisation des formations éoliennes 91

V.B. Stagnation et évaporation aux exutoires de petits bassins versants endoréiques 94

V.C. Un impact morphogénétique limité dans l'espace et le temps 96

Chapitre VI. Yardangs et buttes de sédiments fins du bassin sud de la dépression de Kharga : analyse sédimentologique de dépôts inattendus dans un désert hyperaride 100

VI.A. Travaux antérieurs sur les yardangs et les dépôts de la dépression de Kharga 103

VI.B. Des dépôts de lœss à Kharga ? Objectifs de l'analyse sédimentologique des dépôts de sédiments fins de la région de Douch et principales hypothèses de travail..... 108

VI.C. Méthodologie de terrain et de laboratoire..... 109

VI.D. Résultats et interprétation 117

Chapitre VII. Géomorphologie et stratigraphie des buttes de plaines associées à des puits historiques 170

VII.A. Des buttes d'apparence composite : une morphogenèse découlant de processus distincts ?. 173

VII.B. Un lien avec l'artésianisme ?..... 177

VII.C. Une mise en valeur agricole ancienne et durable dont témoignent les écrits des voyageurs et des scientifiques de passage 183

VII.D. Une genèse complexe, à la croisée entre facteurs hydrogéologiques, éoliens et anthropiques 187

Chapitre VIII. L'érosion éolienne de l'Antiquité à nos jours : taux de sédimentation et d'ablation dans le bassin sud de la dépression de Kharga 195

VIII.A. Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Égypte). 195

VIII.B. De nouveaux résultats grâce aux témoignages des voyageurs et des scientifiques (XIXe - XXe s) 221

Chapitre IX. Vivre et cultiver dans la dépression de Kharga : construire les paysages de l'artésianisme et du vent 223

IX.A. Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours 223

IX.B. Un erg moins hostile durant l'Antiquité ? 268

Conclusion : Le vent et l'agriculture, facteurs principaux de la morphogenèse oasienne 271

Troisième partie Décrire et modéliser les paysages du vent : essais de typologie et de synthèse 272

Introduction 272

Chapitre X. Typologie des formations hydro-éoliennes, anthropo-éoliennes et anthropo-hydro-éoliennes de la dépression de Kharga 274

X.A. Formations éoliennes d'accumulation et formes d'ablation 275

X.B. Formes d'accumulation anthropo-éoliennes et hydro-éoliennes 283

Chapitre XI. Morphogenèse anthropo-éolienne, types de sites et modélisation descriptive 294

XI.A. Synthèse de l'évolution morphogénétique régionale : les modèles à l'origine des paysages actuels 295

XI.B. Une évolution morphogénétique différenciée à l'échelle des sites 302

XI.C. Raréfaction régionale des ressources sur le temps long et profusion locale liée aux aménagements sur le temps court 308

Chapitre XII. Perspectives 311

XII.A. Étendre notre approche dans le désert Libyque 311

XII.B. Confronter les typologies et les modèles à d'autres régions du monde 314

Conclusion : un désert durablement marqué par les activités humaines ..316

Conclusion générale 317

Bibliographie 322

Table des figures 337

Table des tableaux 347

Table des matières 349

Liste des annexes 355

Annexe 1 - Cartes des sites de la dépression de Kharga et de sa région méridionale au format A3 .. 356

Annexe 2 - Coordonnées des sites, des coupes, et des lieux de prélèvement d'échantillons isolés .. 358

Annexe 3 - Tableau récapitulatif détachable des phases historiques régionales 361

Introduction

> « La Libye, de l'aveu général (et Gnaeus Pison qui fut gouverneur de ce pays nous l'a relaté aussi), ressemble à une peau de panthère, car elle est parsemée de points d'habitation qu'entoure une terre sans eau et déserte ; les Égyptiens donnent à ces points d'habitation le nom d'oasis »
>
> Strabon, *Géographie*, Livre 2[2]

L'impression perdure 2 000 ans plus tard : le vert sombre des oasis parsème les sables fauves et les roches stériles du désert Libyque. L'hyperaridité de ce désert qui occupe toute la partie ouest de l'Égypte et le contraste avec la luxuriance des installations agricoles qui s'y trouvent expliquent que le terme d'*oasis*, désignant initialement cette seule région, soit devenu générique. Ces oasis, citées dès le Ve s. avant notre ère par Hérodote[3], et encore peuplées de nos jours, constituent l'archétype des espaces agricoles en milieu aride.

Le désert qui les environne semble absolu au voyageur qui le traverse : dans certains secteurs, on peut parcourir plusieurs dizaines de kilomètres sans observer la moindre trace de vie végétale. Le climat y est extrêmement aride et les dynamiques éoliennes s'y exercent presque sans limite dans les étendues dépourvues d'eau et de végétation : le transport et l'ablation éoliens sont donc poussés à leur paroxysme. À l'approche des oasis, la végétation presque omniprésente leur opposant de nombreux obstacles, le dépôt des sédiments y est au contraire facilité. De la juxtaposition entre ces espaces, dont les processus dominants sont donc opposés (ablation et transport/transport et dépôt), découle une morphogenèse particulière à l'origine des paysages du vent, auxquels cette thèse est consacrée.

Centré sur la dépression de Kharga qui recèle l'un des groupes d'oasis les plus importants du désert Libyque, ce travail tire profit des nombreux travaux antérieurs, à commencer par les fouilles et les prospections menées par l'Institut Français d'Archéologie Orientale (IFAO) depuis 1976. Portant d'abord sur le temple de Douch, dans la partie méridionale de l'oasis, à

---

[2]. Strabon (-64 - entre 21 et 25) - *Géographie.* Tome 1 - 2ème partie. Trad. G. Aujac, Les Belles Lettres, Paris, 1969. Livre II, C5, 33.

[3]. Hérodote, *Histoires* III, 26, p. 246 ; P.-H. Larcher 1850.

l'initiative de S. Sauneron[4], les recherches se sont progressivement étendues à l'ensemble de la région de Baris. À la fin des années 1990, M. Wuttmann[5] a impulsé la prospection de l'ensemble de la dépression de Kharga. Les dizaines de chercheurs, qui se sont côtoyés et succédé dans le cadre de ces missions, sont parvenus à démontrer la persistance d'oasis depuis 2 500 ans, alors même que le contexte bioclimatique régional semble l'interdire. Parmi eux, B. Bousquet, géographe, a produit en 1996 un premier état des connaissances géoarchéologiques, centré sur la question de l'eau dans la région de Douch et de Baris : *Tell-Douch et sa région - Géographie d'une limite de milieu à une frontière d'Empire*. Faisant suite à un bilan géographique, hydrogéologique et géomorphologique décrivant l'importance des eaux du sous-sol et des dynamiques éoliennes dans l'évolution régionale, une analyse remarquable des terroirs et des méthodes d'irrigation à l'époque romaine y est proposée. Vingt ans plus tard, les nouvelles données de prospections recueillies par l'IFAO et une approche différente, centrée sur les interactions entre les hommes et le vent, justifient de consacrer une nouvelle étude géographique à la région. Cette thèse s'inscrit donc dans la continuité des recherches menées auparavant dans le désert Libyque. Elle vise à retracer les grandes tendances de l'évolution environnementale et paysagère de la dépression de Kharga au fil du temps, sur un terrain qui s'inscrit entre 25°45' N et 24°14' N du nord au sud et entre 30°55' E et 30°23' E d'est en ouest.

On y observe de nos jours de nombreux parcellaires abandonnés, dont beaucoup datent de plusieurs siècles ou millénaires. Certains d'entre eux couvrent plusieurs dizaines d'hectares et suggèrent un passé plus prospère. Dans le contexte mondial actuel, traversé par l'angoisse du changement climatique, l'image d'un déclin des oasis semble *a priori* convaincante mais elle se révèle rapidement peu satisfaisante : aujourd'hui encore, certaines oasis ou certaines parcelles sont abandonnées pendant que d'autres sont au contraire colonisées ou en plein essor. De ces évolutions du finage, modifiant les limites entre le désert et les oasis, découlent des changements morphogénétiques majeurs : les zones principalement soumises à l'ablation et celles plutôt sujettes au dépôt se sont déplacées au fil du temps.

Expliquer les paysages du vent, construits à la fois par des facteurs anthropiques et environnementaux mouvants, implique d'étudier les interactions entre activités humaines et dynamiques éoliennes sur le temps long de l'implantation des oasis, apparues il y a environ

[4]. Serge Sauneron, égyptologue, a dirigé l'IFAO de 1969 à 1976 et a initié la première mission de fouilles à Tell-Douch en 1976.

[5]. Michel Wuttmann, ingénieur de recherche à l'IFAO de 1992 à 2013, responsable du laboratoire de restauration et de datation radiocarbone, et responsable de la mission de l'IFAO à Douch jusqu'à son décès en 2013.

2 500 ans. Identifier les persistances, les ruptures et les évolutions de l'environnement désertique, des oasis et de la relation entre les hommes et leur milieu dans la dépression de Kharga depuis 25 siècles constitue ainsi un véritable défi. Tenter de le relever, de découvrir ce qui a changé et ce qui s'est maintenu, implique le développement d'un raisonnement multiscalaire, diachronique et pluridisciplinaire.

Multiscalaire parce que certains changements locaux ont peu d'effets régionaux et que des évolutions régionales ne s'expriment pas de manière identique sur tous les sites, mais aussi parce qu'étudier les oasis sans le désert, ou le désert sans les oasis, n'aurait pas de sens : ces milieux s'influencent mutuellement et leurs délimitations respectives évoluent rapidement.

Diachronique afin d'éviter d'étudier des périodes trop courtes qui ne permettraient pas d'observer des changements, des évolutions, des ruptures ou des persistances assez durables pour être significatifs. Pratiquer une analyse sur le temps long est donc l'une des clefs pour comprendre la relation hommes/vent.

Pluridisciplinaire parce que la géographie seule et ses champs développés dans ce travail (géomorphologie, géohistoire, géoarchéologie) ne permettraient pas de résoudre les questions au cœur de notre sujet sans recourir aux recherches égyptologiques, épigraphiques, archéologiques, céramologiques et historiques sur la région. Leur confrontation avec les données géographiques, de même que l'échange direct avec des spécialistes de ces disciplines, conditionne l'élaboration d'une réponse satisfaisante à la question de l'évolution plurimillénaire de la relation entre hommes et environnements.

Fondé sur une approche actualiste et sur des méthodes de géomorphologie, de géoarchéologie et de géohistoire, ce travail vise à expliquer la formation des paysages originaux de la dépression de Kharga, et à déterminer quelles sont les modalités de la relation entre les activités de culture et les dynamiques éoliennes depuis 2 500 ans. Son objectif est donc triple :

- identifier les principaux processus morphogénétiques à l'œuvre dans les oasis et dans le désert environnant ;
- déterminer le rôle respectif des activités anthropiques, liées à des enjeux économiques, politiques et sociaux, et des facteurs climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques, topographiques et éoliens dans l'évolution environnementale de la dépression de Kharga et le développement ou l'abandon des oasis ;
- expliquer les modalités de la combinaison plurimillénaire des dynamiques éoliennes et des activités agricoles oasiennes ayant mené à la formation des paysages du vent.

Afin de permettre une analyse rigoureuse tirant parti des conclusions et des données produites dans d'autres cadres disciplinaires, la première partie (chapitres I à IV) présente le contexte de l'étude, visant à rendre compte à la fois des héritages de périodes anciennes et des dynamiques les plus récentes. La seconde partie (chapitres V à IX) est consacrée à l'ensemble des axes de recherches développés et aux résultats obtenus depuis le début de cette thèse en 2011 (et à certains résultats obtenus en 2010, lors de la réalisation du Master 2). Seul l'axe sédimentologique était inclus dans le projet de thèse initial, mais des opportunités inattendues (telles que la survenue d'une pluie) et des découvertes au fil des prospections nous ont incités à multiplier les axes de recherche. La situation politique égyptienne et les contraintes pratiques, d'abord obstacles pour la recherche, se révélèrent progressivement un excellent moteur en nous poussant à trouver des données accessibles sans se rendre sur place et à développer de nouvelles directions de recherche. La troisième partie (chapitres X à XII) constitue une synthèse des hypothèses explicatives de la formation des paysages du vent, sous la forme de typologies et de modèles descriptifs de l'évolution environnementale et morphogénétique de la région depuis 2 500 ans.

Première partie
La dépression de Kharga entre dynamiques récentes et héritages

Introduction

L'Égypte fascine, si l'on en juge par les nombreux documentaires réalisés à son sujet et par les très nombreux films et ouvrages dont elle constitue le cadre. Il s'agit d'une contrée dont la seule évocation suffit à enflammer les imaginations : contrastes entre les terres désertiques et la vallée du Nil, civilisation millénaire, mystères et malédictions des pharaons. Ces poncifs, nés de la culture populaire, du tourisme et de l'extraordinaire patrimoine naturel et culturel égyptien guident encore nos représentations actuelles, bien qu'ils se révèlent souvent exagérés ou inexacts. Les oasis sont également porteuses d'images et de stéréotypes forts : on les croit généralement anciennes et isolées, comme figées dans le temps et dans l'espace. On s'imagine la lutte immuable de l'homme contre le désert, ou, bien au contraire, « un jardin d'Éden », don de la nature au cœur des désolations arides, pays d'abondance cerné par l'âpreté des sables brûlants.

Réaliser une étude géographique concernant une région d'Égypte où les oasis sont nombreuses nécessite en conséquence une conduite particulièrement prudente, et rend essentielle, afin d'éviter de retomber soi-même dans les clichés susmentionnés, une analyse fine du contexte. Quitter le champ des représentations et construire un discours scientifique sur l'Égypte supposent autant d'accepter de désapprendre ce que l'on pensait savoir (et ce que l'on aimait à croire), que de se documenter sur des éléments factuels.

Mener l'étude des oasis et de l'environnement dans la dépression de Kharga depuis 2 500 ans et construire des axes de recherche efficients impliquent donc, avant toute chose, une présentation construite, multiscalaire et diachronique du pays et de la dépression de Kharga.

Notre première partie sera donc consacrée à la présentation du contexte d'étude et montrera que la dépression de Kharga est un espace construit à la fois par l'héritage de dynamiques anciennes (qu'elles soient encore à l'œuvre ou non) et par des phénomènes beaucoup plus récents. Nous reviendrons d'abord sur la géographie de l'Égypte (chapitre I), avant de présenter le milieu physique et les dynamiques naturelles de la dépression de Kharga (chapitre II). Nous décrirons ensuite les occupations humaines de la région à l'Holocène (chapitre III), puis nous décrirons les différents sites d'étude (chapitre IV).

Chapitre I.
L'Égypte, une oasis fluviale cernée par les déserts ?

Située à l'extrémité orientale du Sahara, l'Égypte couvre un territoire d'environ 1 001 449 km^2. Sa population était de 72,82 millions lors du recensement de 2006 et elle est estimée par la *Central Agency for Public Mobilization and Statistics* (*CAPMAS*, équivalent égyptien de l'INSEE) à plus de 85,8 millions d'habitants en 2014[6]. La population est très inégalement répartie sur le territoire égyptien : en 1996, la densité moyenne était de 59 habitants/km^2, mais la densité moyenne des surfaces utiles (habitées ou cultivées) était d'environ 1 700 habitants/km^2 (Denis 1998). Ces surfaces sont principalement concentrées dans les secteurs où les ressources en eau sont exploitables.

L'Égypte reçoit peu de précipitations, par des épisodes irréguliers et violents. Le développement de la flore et de la faune s'en trouve réduit, de même que l'activité microbienne. La pédogenèse est lente et, en l'absence d'éléments (végétation, humidité, couverture d'éléments grossiers) protégeant les surfaces de l'ablation, l'érosion peut être très active. L'ensemble de ces caractères est à l'origine d'un milieu de type désertique qualifié par une biocénose réduite et adaptée au manque d'eau, par la rareté des sols, par une hydrologie dichotomique (les cours d'eau sont en crue, ou à sec, sans connaître d'états intermédiaires) et par une géomorphologie en grande partie héritée de paléoclimats (Demangeot 2006). Au contraire, les zones bénéficiant d'apports plus importants constituent des refuges pour la végétation et la faune, et concentrent les processus de dépôts et de pédogenèse. La rareté des précipitations fait des apports non météoriques une ressource capitale pour les écosystèmes et les activités humaines. La présence d'eau, sa profusion par endroit, dépendent de différents facteurs se combinant selon différentes échelles spatiales et temporelles : le relief, le climat, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la géomorphologie, la structure des sols et les innovations techniques d'extraction, de traitement et de gestion de l'eau.

[6]. La population est indiquée dans le chapitre 2 du *Statistical Yearbook, Issue September 2014* produit par le CAPMAS.
http://www.msrintranet.capmas.gov.eg/pdf/Electronic%20Static%20Book2014//PDF/population/Untitled.pdf

I.A. Déserts et oasis

L'Égypte (figure 1) est un pays dont la grande majorité de la surface est occupée par des espaces désertiques. Le pays est découpé en quatre régions principales : le delta et la vallée du Nil, le Sinaï, le désert Arabique (ou désert Oriental, ou Eastern Desert) et le désert Libyque (ou désert Occidental, ou Western Desert). Le delta et la vallée du Nil représentent seulement 3,5 % de la surface du pays mais cette région a eu un rôle central dans l'histoire de l'Égypte (Embabi 2004). Elle correspond à une oasis fluviale qui s'étend sur plus de 1000 km de long entre Assouan et la Méditerranée.

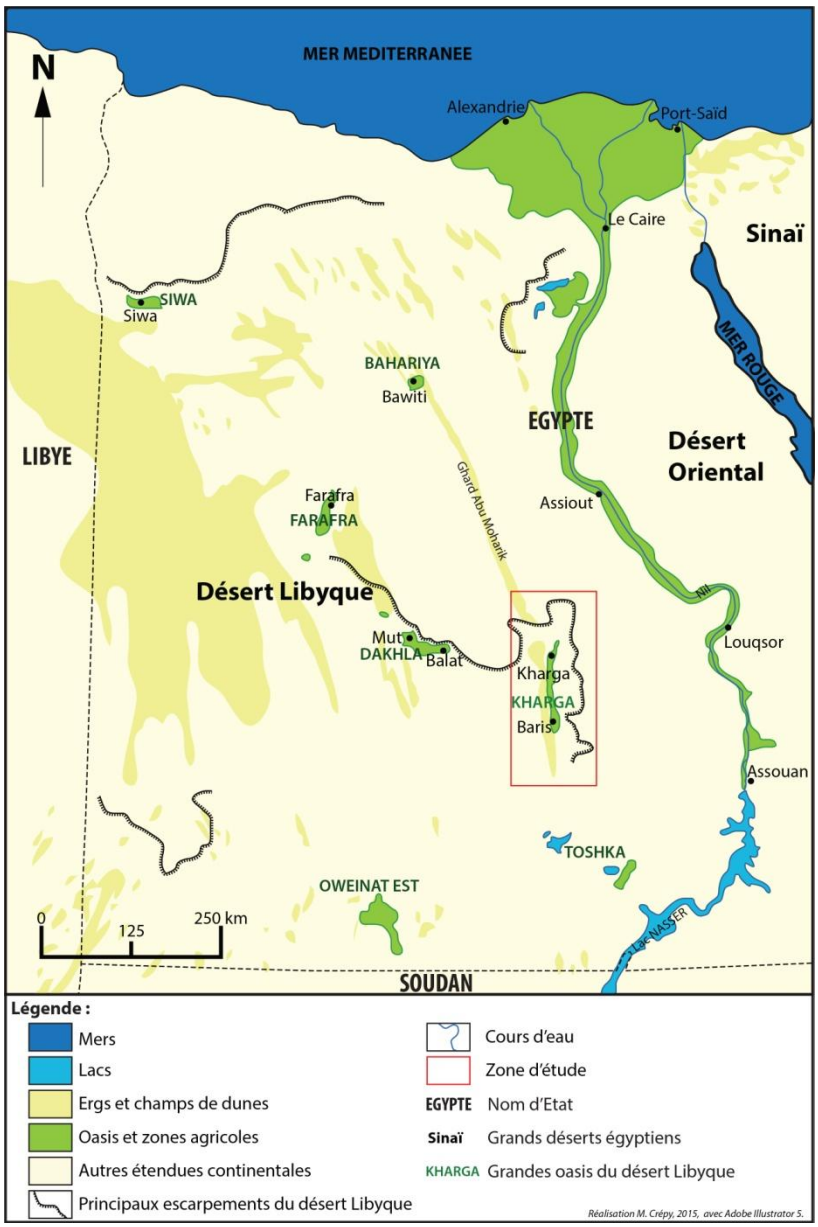


Figure 1 - Grandes unités géographiques de l'Égypte.

La péninsule du Sinaï correspond à environ 6 % du territoire, dans le nord-est du pays. Il s'agit d'une zone montagneuse au sud, et d'une plaine occupée par un erg au nord (Embabi 2004). Le désert Oriental occupe presque un quart du territoire. Situé entre le Nil et la Mer Rouge, il est constitué de montagnes et de plateaux largement disséqués par des paléo-drainages (Embabi 2004). Enfin, le désert Libyque occupe plus de deux tiers du territoire égyptien. Il s'étend à l'ouest du Nil jusqu'en Libye, et de la côte méditerranéenne jusqu'au Soudan. Cette région est principalement constituée de plateaux, de plaines et de quelques grandes dépressions. Les ergs occupent une part non négligeable de cet espace (Embabi 2004). Les nombreuses oasis de ce désert (Dakhla, Farafra, Siwa, Bahariya et Kharga), accueillent les seules zones de culture étendues à l'écart de la vallée du Nil et du delta.

I.B. L'Égypte entre aridité et hyperaridité

L'Égypte se situe dans une zone de climat tropical et subtropical aride (Embabi 2004). L'aridité climatique est caractérisée par des précipitations réduites et irrégulières (grande variabilité inter et intra-annuelle) insuffisantes pour compenser l'évaporation potentielle. Les espaces arides sont donc des zones concernées par des périodes de sécheresses de durée et de récurrence variées. Différents degrés d'aridité sont définis (Demangeot 2006), qu'on peut distinguer entre eux par le calcul d'un indice xérothermique qui repose sur une approximation du nombre de jours secs dans une année[7] (créé par Gaussen et Bagnouls 1952 ; modifié par Bagnouls et Gaussen 1957). L'aridité concerne l'ensemble du territoire égyptien suivant trois degrés selon la classification proposée par J. Demangeot (2006):

- de rares zones semi-arides (indice xérothermique compris entre 100 et 290) sur les littoraux. La végétation y est généralement steppique et les nappes phréatiques sont au mieux saisonnières ;

[7]. Le calcul s'effectue à partir de diagrammes ombrothermiques. On détermine d'abord des indices mensuels pour les mois considérés comme secs. Un mois est sec si la moyenne des températures est au moins le double, en valeur absolue, des précipitations mensuelles. L'indice mensuel correspond au nombre de jours secs dans le mois, estimé à partir du nombre de jours qui le composent corrigé en prenant en compte l'état hygrométrique moyen du mois (par exemple si le taux d'hygrométrie moyen est compris entre 40 et 60 %, chaque jour compte pour seulement 9 dixièmes de jour sec), le nombre de jours de pluie (un jour où il a plu ne compte pas pour un jour sec) et le nombre de jours de brume ou de rosée (comptant pour un demi-jour sec). L'addition des indices mensuels de l'année donne le nombre de jours secs annuel, que l'on appelle indice xérothermique. Il est compris entre 0 (aucun jour sec) et 365 (tous les jours sont secs) et permet de concevoir différents degrés d'aridité et de définir des types climatiques (Bagnouls et Gaussen 1957).

- des espaces arides (indice xérothermique compris entre 290 et 350) en se rapprochant du sud. La végétation y est rare et seules des espèces adaptées (plantes xérophytes et plantes grasses peuvent s'y développer ;

- une grande région hyperaride (indice xérothermique compris entre 350 et 365) englobant la majeure partie du pays. La végétation y est encore plus rare et peut être complètement absente.

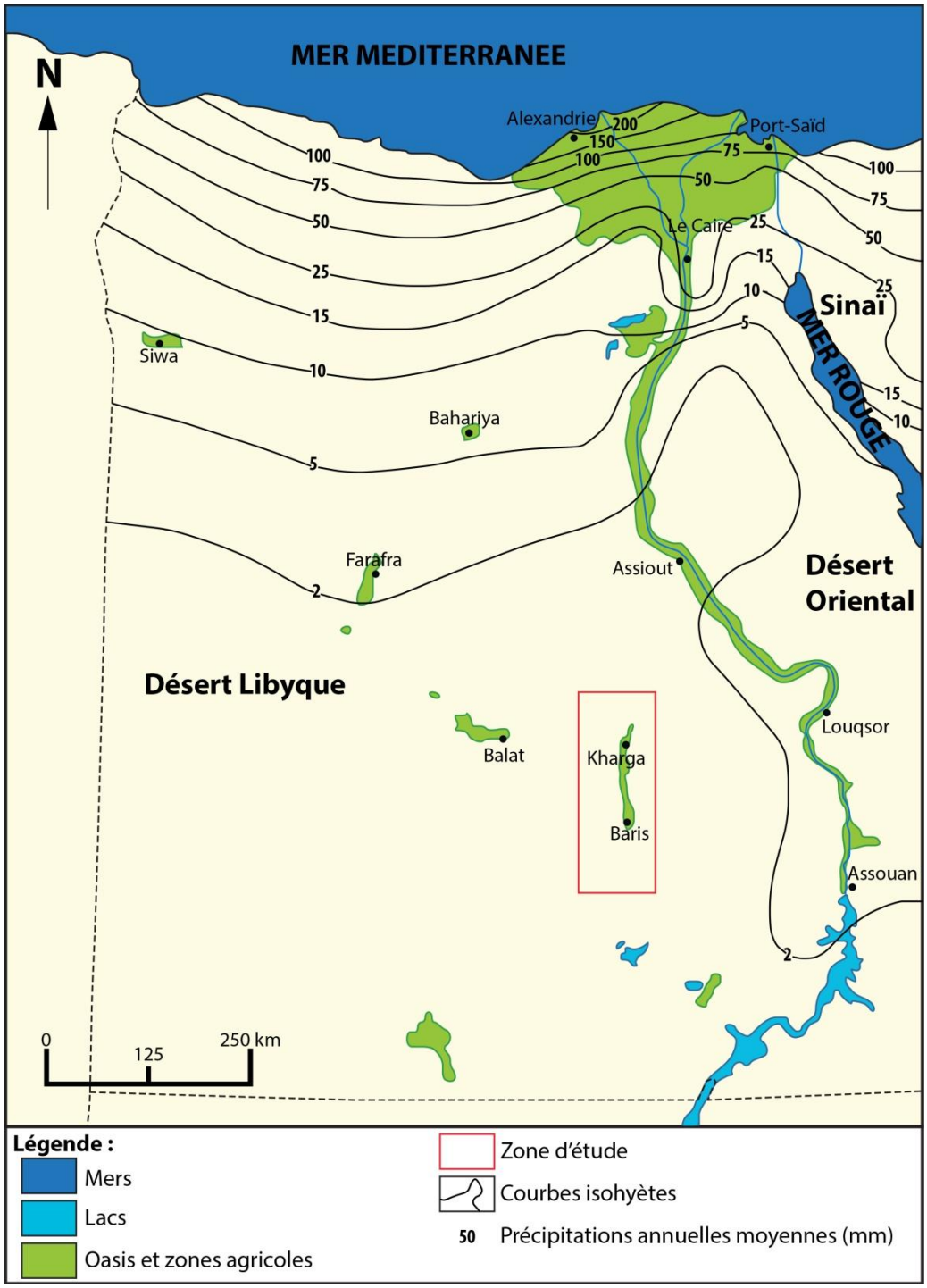


Figure 2 - Carte des isohyètes des précipitations annuelles moyennes en Égypte d'après Embabi (2004).

La faiblesse des précipitations et les températures extrêmes sont liées à des facteurs zonaux renforcés par une grande continentalité : située dans une zone de subsidence anticyclonique et trop au nord pour bénéficier de pluies de mousson, l'Égypte est également isolée de l'influence de la mer Rouge, à l'est, par les montagnes du désert Oriental. Les principales masses d'air chargées d'humidité proviennent donc de la mer Méditerranée, mais leur impact sur le territoire égyptien est limité par la latitude et les trajectoires suivies par les perturbations. Les précipitations, majoritairement hivernales, et secondairement d'automnales (dans l'extrême nord du pays uniquement) ou printanières (Traboulsi *et al.* 1997), s'échelonnent, le long d'un gradient nord/sud, entre 200 mm sur la côte méditerranéenne et moins d'1 mm de précipitations annuelles moyennes au cœur du désert Libyque (figure 2). À la latitude du Caire, à seulement 170 km de la côte, les précipitations annuelles moyennes atteignent tout juste 30 mm (Goudie 2002). En raison de ce gradient lié à la fois aux latitudes et à la continentalité, le désert Libyque compte parmi les régions les moins arrosées du monde (Alex 1985 ; Kehl et Bornkamm 1993 ; Goudie 2002 ; Embabi 2004).

Le régime des vents est unimodal ou bimodal, selon les régions (figure 3). Les vents de nord-ouest sont très largement majoritaires dans la partie nord du pays. Dans sa partie centrale, les vents sont de secteur nord. Enfin, dans le sud, les vents proviennent majoritairement du nord-ouest. Les principales périodes d'activité éolienne se situent en hiver et au printemps. Un vent particulier, en provenance du désert Libyque, souffle depuis le sud et le sud-ouest au printemps, généralement une cinquantaine de jours, le *Khamsin*[8]. Ce vent chaud et sec exporte de nombreuses particules fines (limons et poussières éoliennes) hors du désert Libyque (Embabi 2004).

Les températures élevées, associées aux vents secs, sont à l'origine de taux d'évaporation annuelle atteignant 6 000 mm, qui dépassent largement les apports en eaux météoriques (Ezzat 1974). En dehors de certaines zones semi-arides du littoral méditerranéen et des régions septentrionales arides, l'hyperaridité est donc omniprésente en Égypte.

Malgré cela, toute l'Égypte n'est pas un immense désert. Au contraire, l'agriculture y est florissante par endroits. L'aridité climatique seule ne permet pas de rendre compte des conditions environnementales égyptiennes et d'autres facteurs entrent en compte, aggravant ou atténuant l'aridité climatique : le relief, les ressources allochtones en eau de surface, les ressources « fossiles » et les propriétés des sols (conditionnant l'infiltration, la conservation et

[8]. *Khamsin* signifie littéralement « cinquante » en arabe.

la circulation de l'eau), ainsi que leur couverture végétale. La combinaison de ces facteurs détermine l'aridité édaphique d'un milieu (Floret et Pontanier 1984). Leur variabilité spatiale et temporelle implique des disparités locales importantes, là où l'aridité climatique est plus étendue dans le temps et dans l'espace. Dans les mêmes conditions d'aridité climatique, on peut donc observer, à l'échelle locale, une mosaïque de situations géographiques très différentes[9]. Étudier l'hydrologie et l'hydrogéologie égyptienne est donc essentiel.

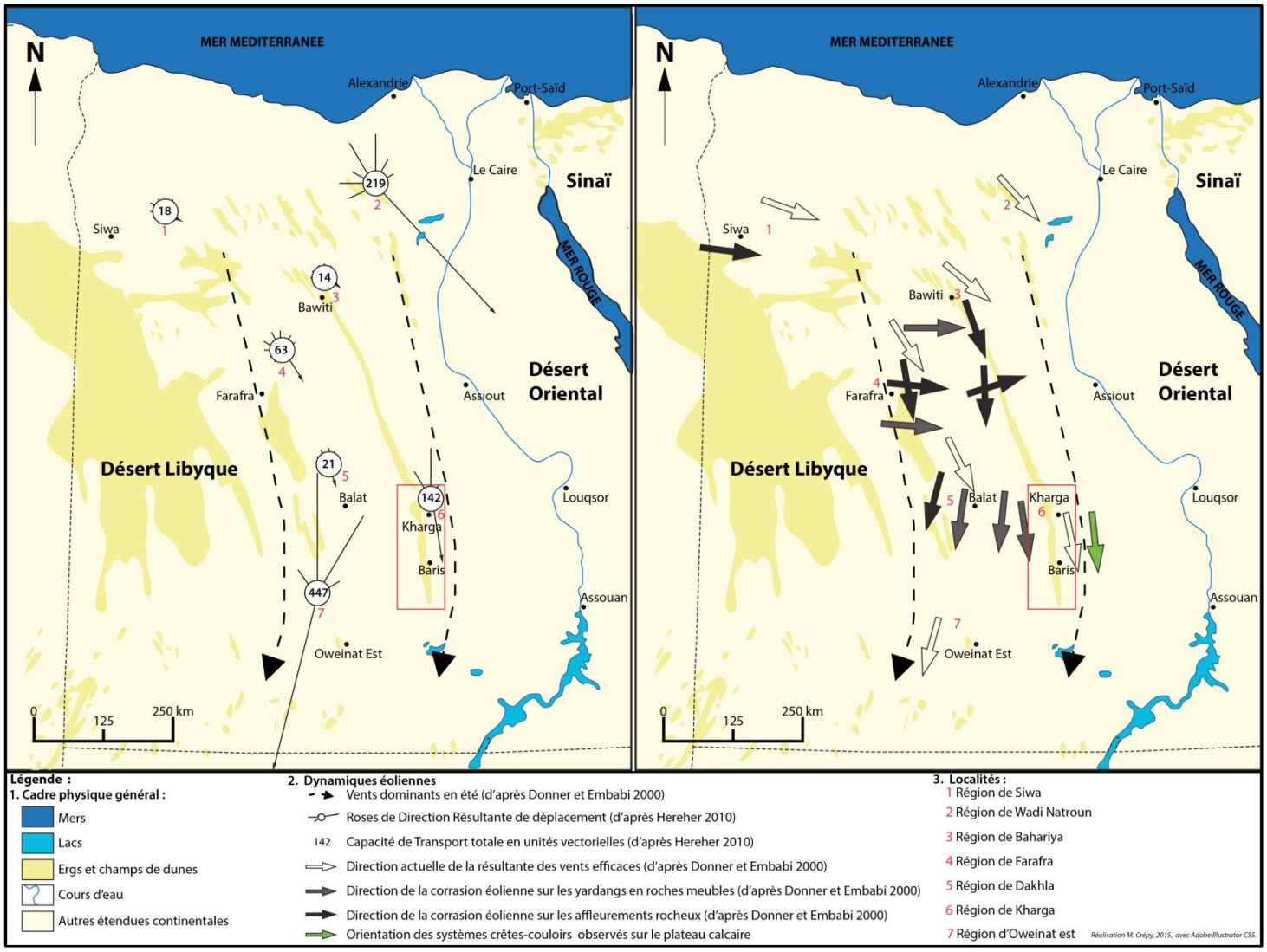


Figure 3 - Carte de direction des vents actuels et des paléo-vents holocènes.
Modifié d'après Donner et Embabi (2000) et Hereher (2010).

[9] À l'image de ce qui a été démontré par J. Besançon et B. Geyer (2006) à propos des marges arides syriennes. Pour des précipitations annuelles moyennes identiques (200 mm), la diversité des conditions édaphiques permet d'observer des situations très différentes : certains espaces semblent complètement abiotiques, alors que d'autres correspondent à des parcours pastoraux ou même à des zones agricoles.

I.C. Une ressource allochtone capitale et renouvelable : le Nil

Le Nil, grand fleuve allochtone, revêt une très grande importance pour les activités humaines. Né de la confluence du Nil Blanc, prenant sa source dans le lac Victoria, et du Nil Bleu en provenance du lac Tana en Éthiopie, il traverse des régions de climat équatorial où les précipitations sont très importantes (Whittington et Guariso 1983). Sur les 1 530 km qu'il parcourt en Égypte, sur un cours total d'environ 6 825 km, il ne reçoit aucun affluent, et ce depuis au moins 5 000 ans (Embabi 2004). Son écoulement pérenne depuis le début de l'Holocène au moins, après des périodes d'intermittence[10] (Saïd 1993 ; Embabi 2004), en a fait un élément structurant du développement des activités humaines dès la préhistoire (Kuper et Kröpelin 2006). Durant la période prédynastique (5 500-3 300 avant notre ère), la plupart des sites d'occupation inclus dans le territoire égyptien actuel se trouvaient le long de la vallée du Nil, qui a constitué un axe de développement majeur (Kuper et Kröpelin 2006). La construction du barrage d'Assouan (achevé en 1970) et la formation du lac Nasser ont permis des apports et un écoulement plus réguliers. Le réservoir a donc permis d'irriguer certains secteurs de manière pérenne, d'éviter la longue inondation d'une partie des terres arables due aux crues du Nil et a permis à l'agriculture égyptienne de bien résister à la sécheresse des années 1970-1980. Cette construction a aussi entraîné des effets négatifs, tels qu'un déficit sédimentaire à l'aval, le recours massif à des intrants (pour compenser l'absence des limons fertiles du Nil autrefois apportés par la crue), un taux d'évaporation et une vitesse de comblement dans le lac Nasser très élevés et la modification des écosystèmes (Sutcliffe et Parks 1999). Du fait de la dépendance de son agriculture au Nil, l'Égypte est tributaire des pays situés à l'amont pour subvenir à ses besoins en eau. Le pays connaît donc régulièrement des périodes de tension avec les pays de l'amont (Soudan, Éthiopie, Tanzanie, Ouganda, Kenya, Rwanda, Burundi et Congo) autour de la question du partage des eaux du fleuve (Boëdec 2003 ; Ayeb 2011).

Dans ce contexte, les gouvernements égyptiens successifs ont développé l'exploitation d'autres sources d'eau : recyclage des eaux d'irrigation, de drainage et des eaux usées, dessalement de l'eau de mer, et surtout, exploitation des aquifères profonds (Ayeb 2011).

[10].La dernière est datée de 18 000 BP à 16 880 BP (Saïd 1993)

I.D. Les eaux du dessous : le Système aquifère des Grès de Nubie

L'autre grande source d'eau en Égypte est liée à sa géologie : la partie ouest du pays comporte de nombreuses couches aquifères antérieures au Cénozoïque qui constituent le Système aquifère des Grès de Nubie. Il occupe une surface de plus de 2,2 millions de km^2, partagés entre le Soudan, le Tchad, la Libye et l'Égypte (Thorweihe 1990 ; Bakhbakhi 2006) dont 630 000 km^2 en Égypte (Thorweihe 1990). Le Système aquifère des Grès de Nubie peut se décomposer en deux sous-systèmes : le système aquifère nubien et le système aquifère post-nubien. Ces deux sous-systèmes sont partiellement cloisonnés par des couches sédimentaires peu perméables (Bakhbakhi 2006). Le volume d'eau contenu dans cette nappe a été estimé à 3 000 km^3 par R.P. Ambroggi (1966), à 20 000 km^3 par C.E. Gischler (1976) et 50 000 km^3 par U. Thorweihe (1990). Seule une partie réduite de cet aquifère est exploitable, en raison de sa grande profondeur (Ebraheem *et al*. 2002) et des limites techniques et économiques de son exploitation (Thorweihe 1990). La décharge naturelle (hors prélèvements humains) est supérieure à la recharge (Brinkmann et Heinl 1986 ; Thorweihe 1990). La dernière recharge, insuffisante pour remplir l'aquifère (Ebraheem *et al.* 2002) daterait du début de l'Holocène, période durant laquelle les précipitations étaient plus importantes dans la région (Littmann 1989 ; Heinl et Thorweihe 1993). Les nappes du Système aquifère des Grès de Nubie connaîtraient une baisse continuelle depuis environ 7 000 BP (Gasse 2000), liée à la fois à l'évaporation dans les secteurs d'affleurement, à une décharge dans la vallée du Nil entre Qena et Assouan, où la surface piézométrique dépasse l'altitude d'écoulement du fleuve (Thorweihe 1990) et à l'exploitation agricole de cette ressource en eau[11] (Faggi 1983 ; Faggi et Maury 1987 ; Bakhbakhi 2006 ; Tallet *et al.* 2011). La partie égyptienne du Système aquifère des Grès de Nubie serait rechargée, depuis le nord du Soudan, par une circulation dans les porosités des grès. Une telle recharge est aussi supposée depuis le bassin de Koufra (Libye), mais les données piézométriques manquent pour la confirmer. La formation du lac Nasser a permis la recharge du Système aquifère des Grès de Nubie sur cette partie du cours du Nil (Thorweihe 1990).

Parmi les quatre États concernés par ce système aquifère, seul le Tchad n'a pas encore commencé à l'exploiter (Bakhbakhi 2006), alors que d'importants projets ont été mis en place

[11]. L'ampleur de la décharge naturelle ne peut être calculée en l'état actuel des connaissances. Il est donc impossible de définir la part de la décharge liée aux activités humaines et la part dépendant uniquement de processus naturels.

en Libye, comme la Great Man Made River (Salem 1992 ; Mainguet 1995 ; Palluault 2012) et en Égypte, dès la fin des années 1950 (Gumuchian 1975 ; Thorweihe 1990 ; Burmil 2003 ; Tallet *et al.* 2011). En Libye et en Égypte, 97 % des sources et des puits d'écoulements libres ont été remplacés par des forages profonds. Près de 40 milliards de m^3 d'eau auraient ainsi été extraits en quarante ans, entraînant un rabattement moyen de la nappe de l'ordre de 60 m (Bakhbakhi 2006).

I.E. « Les îles des bienheureux »

L'exploitation de ces ressources hydrogéologiques a permis la création de plusieurs oasis en dehors de la vallée du Nil dès l'Antiquité[12]. L'image répandue d'un pays dichotomique scindé entre l'oasis nilotique et les déserts n'est donc pas l'exact reflet de la réalité. Les déserts, surtout le désert Libyque, sont parsemés d'oasis dont le développement dépend de l'amélioration des techniques d'exploitation de l'eau.

Les oasis du désert Libyque appartiennent aujourd'hui au gouvernorat de la Nouvelle Vallée et au projet « Nouvelle Vallée » (« *New valley project* », aussi appelé *« El wadi el Gedid project* ») de développement de l'agriculture, lancé dans les années 1950 (Gummuchian 1975 ; Faggi 1983 ; Faggi et Maury 1987 ; Burmil 2003). La création de certaines de ces oasis est pourtant plus ancienne, nettement antérieure aux forages profonds : l'historien grec Hérodote, lors de ses voyages au Ve s. avant notre ère, désigna les oasis du désert Libyque comme « les îles des bienheureux »[13]. Notre terrain d'étude se situe dans la dépression de Kharga, qui appartient à cet ensemble d'oasis.

[12]. Par « Antiquité », nous désignons dans cette thèse la période comprise entre la première domination perse (525 av. J.-C. ou 2475 BP) et la fin de la période romaine (Ve s. de notre ère), parce qu'il s'agit des seules périodes de l'Antiquité durant lesquelles la dépression de Kharga a accueilli un peuplement sédentaire développé, en dehors de rares sites du nord.

[13]. *Histoires*, Livre 3, XXVI

Chapitre II. Topographie, climats et hydrogéologie de la dépression de Kharga au Quaternaire

Creusée par l'érosion hydro-éolienne, la dépression de Kharga **(**figures 4 et 5) se situe dans l'un des secteurs les plus arides du monde. Malgré les fluctuations climatiques holocènes, la dépression est soumise à l'aridité et à l'hyperaridité depuis la fin du Pléistocène.

II.A. Une dépression fermée parsemée de collines et traversée par un erg

La dépression de Kharga, située dans le sud du désert Libyque, s'étend sur 200 km du nord au sud et entre 40 et 85 km d'est en ouest. Les altitudes varient entre 2 m dans les secteurs les plus déprimés et plus de 471 m au sommet du plateau (Embabi 2004). Creusée par l'érosion hydro-éolienne, la dépression est bien délimitée au nord et à l'est par un escarpement, mais ses limites sont moins nettes vers l'ouest et le sud car la surface s'élève en pente douce dans ces directions. Le fond de la dépression, loin d'être uniformément plan, est parsemé de collines liées à des plissements et à des mouvements tectoniques, de buttes témoins, de yardangs[14] et de dunes vives. A l'ouest, un erg, prolongement de l'erg linéaire de Ghard Abu Moharik, traverse la dépression vers le sud-sud-est. Cet erg, dont la longueur totale atteint 500 km (Embabi 1998) voire 700 km si l'on prend en compte les petits cordons de barkhanes qui continuent leur route vers le sud (Embabi 2004), s'étend sur près de 200 km de long dans la dépression avec une largeur maximale de 15 km environ, pour une largeur minimale de 5 km environ. La densité du couvert sableux constitue un obstacle majeur aux déplacements et aux activités humaines depuis la latitude de l'oasis de Kharga jusqu'à 120 km au sud ; dans ce secteur, il n'est traversé par aucune route et les sites d'occupations sont rares (voir chapitre IX et X). Le sable constitutif de Ghard Abu Moharik provient de la dépression

[14]. Buttes profilées formées pat l'érosion éolienne aux dépens de roches ou de dépôts de sédiments. Généralement allongés dans le sens du vent, ils ont une face au vent abrupte, voire surplombante, et une face sous le vent en pente plus douce.

de Qattara, sous le vent de laquelle il se situe (Embabi 1998). Plusieurs cordons de barkhanes déconnectés de l'erg entrecoupent également la dépression ; le plus étendu d'entre eux mesure un peu plus de 20 km de long pour une largeur maximale de 3 km.

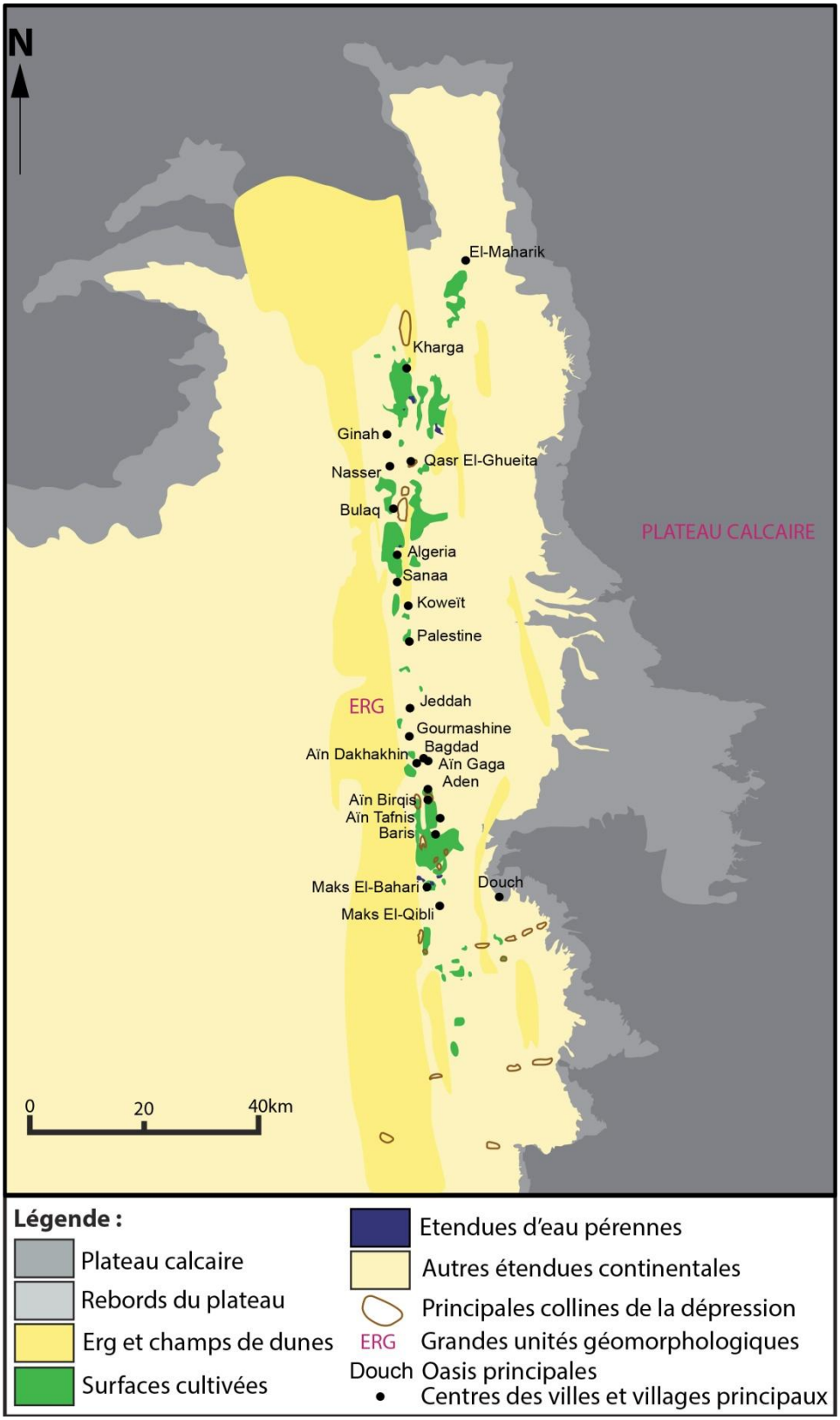


Figure 4 - Cartes des grandes unités et des oasis de la dépression de Kharga.

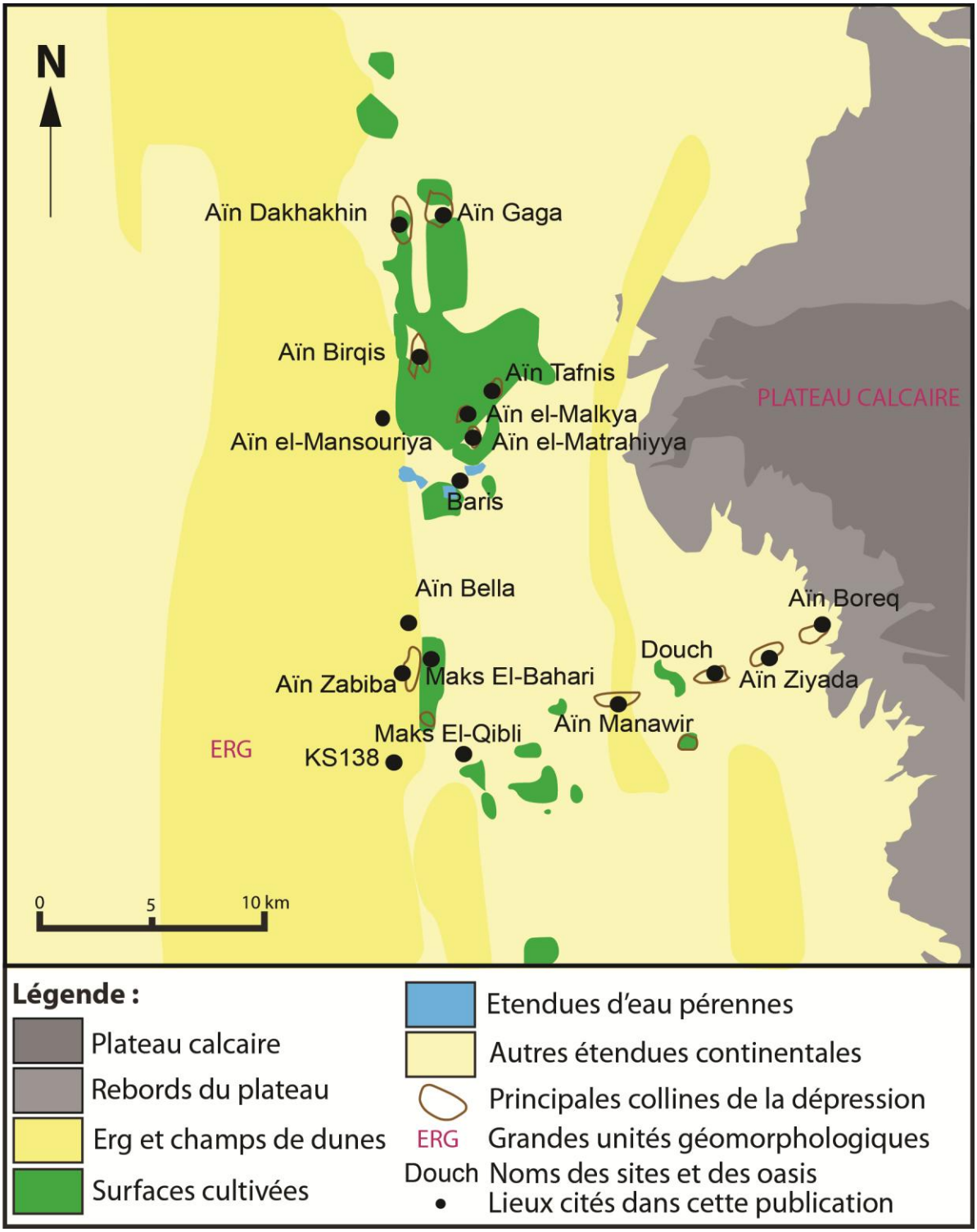


Figure 5 - Carte des grandes unités du bassin sud de la dépression de Kharga.

II.B. L'hyperaridité climatique et la prépondérance des phénomènes éoliens

La dépression de Kharga se situe dans l'une des parties les plus arides du désert Libyque. Les précipitations y sont si rares et localisées que l'estimation de moyennes annuelles est difficile. Il peut s'écouler plus de 5 ans sans la moindre pluie supérieure à 0,1 mm en 24 heures (Soliman 1972 ; Stahr *et al.* 1989). Les résultats obtenus par les différents auteurs varient donc : 0 mm (Burmil 2003), 0,8 mm (Barakat et Baum 1992), moins d'1 mm (Starh et *al* 1989 ; Traboulsi *et al.* 1997 ; Goudie 2002), 2 mm (Embabi 2004), 2,35 mm (Soliman 2013). Ces variations ont peu d'importance, car les quantités d'eau sont, quoi qu'il en soit, trop faibles pour permettre le développement de la végétation.

D'après S.M. Soliman (2013), la température moyenne de l'air atteint son maximum en juin (40,2°C) et son minimum en janvier (5,8°C). N.S. Embabi (2004) indique des températures maximales dépassant 50°C et minimales inférieures à 2,5°C et M. Wuttmann (communication personnelle) a mesuré, pendant plusieurs missions hivernales, des températures négatives en décembre et janvier. L'amplitude thermique annuelle est élevée, de même que l'amplitude thermique quotidienne qui peut atteindre presque 30°C en novembre et décembre.

Les taux d'évaporation potentielle sont très élevés : 14 à 15 mm par jour dans la région de Toshka au sud de la dépression de Kharga (Vogg et Wehmeier 1985). Dans cette dernière, les taux dépasseraient 413 mm par mois (environ 13,6 mm par jour) d'après Soliman (2013) et 6000 mm par an (environ 16,4 mm par jour) d'après Ezzat (1976). Ces écarts, plutôt faibles, s'expliquent par les différentes périodes de mesure et par des disparités locales. Ces taux d'évaporation potentielle dépassent largement les précipitations effectives. L'hyperaridité régionale est incontestable.

Dans ce contexte, les phénomènes éoliens sont essentiels. D'une part, ils renforcent l'évaporation et, d'autre part, les sols secs et peu protégés par la végétation sont particulièrement sensibles à la déflation et à la corrasion éolienne (Coudé-Gaussen 1995 ; Callot 2008). Le vent constitue donc l'agent d'érosion, de transport et de dépôt principal pour comprendre la formation des paysages de la dépression de Kharga (Embabi 2004). Les données relatives au vent indiquent un régime unimodal de secteur nord : entre janvier 1968 et juillet 2007, le vent a soufflé 78 % du temps depuis le secteur nord[15], entre 315 et 44 degrés

[15]. Le secteur nord inclut le nord, le nord-nord-est et le nord-nord-ouest.

d'azimut. Il vient du nord-ouest et du nord-nord-ouest (azimuts 315 à 344) 34,2 % du temps, et du nord (azimuts 345 à 14) 32,6 % du temps (Nofal 2002 ; Hereher 2010). Mais le vent ne déplace pas systématiquement le sédiment. Pour être efficace, c'est-à-dire susceptible de déplacer des sables dunaires, le vent doit dépasser une vitesse de 5 à 6 mètres par seconde (m.s), soit 18 à 21,6 km/h ou environ 10 à 12 nœuds. A partir des données fournies par M.E. Hereher (2010), il a été possible de calculer que le vent a été efficace durant 25,6 % du temps entre janvier 1968 et juillet 2007. 96,5 % du temps de vent efficace est lié à des vents de secteur nord (azimuts 315 à 44), 3,1 % de ce temps est lié à des vents de secteurs ouest et seuls 0,4 % sont liés à des vents de secteur sud. Pour la même période, aucun vent de secteur est n'a été efficace. Le déplacement potentiel de sable est élevé dans la région (figure 3).

Figure 6 - Yardangs fins orientés nord-sud formés dans des dépôts de sédiment, à l'est de Baris, dans le sud de la dépression de Kharga. Image satellitaire de mars 2010.

L'étude morphométrique des yardangs et des stries de corrasion sur les affleurements rocheux de la dépression de Kharga, menée par J. Donner et N.S. Embabi (2000), a démontré la stabilité de cette orientation depuis la fin du Pléistocène au moins (figure 3). L'observation sur les images satellitaires des yardangs (figure 6) et des grands Systèmes Crêtes-Couloirs

(figure 7) situés à proximité, ou au sein de la dépression, confirment la prédominance de vents de secteur nord durant tout l'Holocène, au moins**.**

I.A. Brookes (2003) confirme cette tendance, en ajoutant des flux de nord-ouest (« *palaeowesterlies* ») pour l'extrême nord de la dépression et de flux de nord-est le long du plateau, liés à des perturbations topographiques.

Figure 7 - Système Crêtes-Couloirs sur le plateau calcaire au nord-est de Baris. Image satellitaire de mars 2004.

II.C. Les grandes pulsations climatiques quaternaires

Afin de comprendre la formation des paysages actuels de la dépression de Kharga et de cerner les modalités des relations entre les hommes et le milieu, il est essentiel de déterminer à quelle époque les conditions climatiques actuelles se sont mises en place et quelles ont été les changements climatiques pour la période étudiée. Les données ne manquent pas grâce aux travaux de F. Wendorf et R.Schild (1980, 2001), d'une part, et des différents membres du centre de recherche *Arid Climate Adaptation and Cultural Innovation in Africa* (ACACIA) de l'université de Cologne, d'autre part. La fin du Pléistocène a été une période d'aridité extrêmement prononcée et étendue pour l'ensemble du Sahara (Rognon 1994), la

limite entre Sahara et Sahel se trouvait donc plus au sud aux alentours de 11°N (Adams et Faure 1997).

Lors de l'Holocène, la remontée des pluies de mousson vers le nord et la descente des pluies méditerranéennes d'hiver vers le sud (Brookes 2003) auraient renforcé les précipitations dans le désert Libyque, et notamment sur la dépression de Kharga. F. Wendorf et R. Schild (1980) dataient approximativement trois phases « humides » dans le sud du désert Libyque :

- 9 000 à 8 500 BP ;
- 8 200 à 7 900 BP ;
-7 700 à 5 800 BP.

Ces deux auteurs ont continué leurs travaux dans la région, et ont modifié ces dates à partir des résultats de nouvelles fouilles et de nouvelles datations. R. Schild et F. Wendorf (2001) indiquent, tout en mentionnant une variabilité importante des dates selon les sites, les phases humides suivantes :

- 9 500 à 8 850 BP ;
- 8 400 à 8 200 BP ;
- 8 050 à 7 300 BP ;
- 7 200 à 6 600 BP ;
- 6 550 à 5 800 BP ;
- de 5 750 ou 5 450 à 4 500 BP

Si l'on fie à ces résultats, les périodes sèches auraient donc été très brèves durant la première moitié de l'Holocène.

Dans le même temps, de nombreuses études ont permis d'affiner la connaissance de ces pulsations et d'identifier plus clairement les grandes tendances du changement climatique holocène et sa variabilité locale. H. Riemer (2006) date le début de la première pulsation humide holocène à 11 500 BP environ, période d'apparition des premiers lacs de playa[16] holocènes du désert Libyque. Au delà de 22°N, ces playa ne sont pas occupées par des lacs pérennes (Embabi 1999), contrairement à celles situées plus au sud (Pachur et Hoelzmann 1991). Le premier optimum holocène aurait été atteint aux alentours de 9 000 BP, suivi par un second optimum entre 8 000 et 7 300 BP. L'aridification progressive du désert Libyque, liée

[16]. Dépressions endoréiques occupées plus ou moins durablement par des eaux douces ou salées. On y observe généralement des dépôts lacustres alternés avec des dépôts éoliens, plus grossiers.

au retrait vers le sud de la limite des pluies de moussons, aurait commencé dès 7 300 BP (Riemer 2006) et les conditions d'hyperaridité auraient été atteintes dès 5 000 ou 4 500 BP (Sanlaville 1997). L'aridification, touchant d'abord les latitudes les plus hautes, aurait peu à peu gagné le sud et des conditions similaires à l'actuel auraient été atteintes dans le Gilf Kebir et le nord du Soudan aux alentours de 5 500 BP (Abell et Hoelzmann 2000).

L'importance des fluctuations holocènes doit cependant être nuancée. Il est plus juste de parler de périodes moins arides que de périodes humides : les précipitations auraient atteint 50 mm au début de l'Holocène et 100 mm au maximum, durant l'Holocène moyen (Neumann 1989 ; Kindermann *et al.* 2006). Même les estimations les plus hautes ne dépassent pas 150 mm (Bousquet 1996 ; Kuper et Kröpelin 2006) et le Sahara n'aurait reculé que jusqu'à 24°N entre 10 500 et 7 300 BP (Bubenzer et Riemer 2007), excluant ainsi la dépression de Kharga. Elle serait donc restée aride, voire hyperaride, durant l'ensemble de l'Holocène avec des conditions climatiques peu variables durant les temps historiques.

L'Afrique du Nord aurait pourtant connu une légère amélioration climatique durant la période romaine (Leveau 2009), mais il paraît douteux qu'un changement dans les marges sahariennes ait eu un réel impact au cœur du Sahara. À Douch, B. Bousquet (1996) a interprété certains dépôts éoliens comme les témoins d'une aridification climatique à la fin de la période romaine. Néanmoins, ces dépôts peuvent aussi être le fait de variations locales du transport éolien (présence ou absence d'obstacles, sédiments disponibles pour le transport éolien) ou de l'occupation humaine (destruction de la végétation, fin de l'irrigation, type de cultures, etc.).

Enfin, des travaux récents sur le site d'El-Deir, dans le nord de la dépression (Garcier et Bravard 2014) suggèrent un optimum climatique à l'époque romaine. La publication n'explicite malheureusement pas suffisamment les éléments interprétés dans ce sens, et ne cite que l'identification de deux événements catastrophiques semblables à des *flash-floods* en 85 et 235 de notre ère. L'occurrence de *flash-floods* est incontestable durant la période historique. Des événements de ce type se produisent encore de nos jours : des pluies importantes suivies d'un impact morphogénétique remarquable ont ainsi eu lieu le 16 novembre 1996, le 25 octobre 1997 (Robin et Bousquet 2000), le 27 octobre 2002 où un orage violent détruisit partiellement un village au sud de Kharga et en avril 2005 où les pluies furent suffisantes pour entraîner la formation de quelques étangs temporaires (M. Wuttmann, communication personnelle). Enfin, l'épisode de pluie de la nuit du 6 au 7 novembre 2012 a également eu un impact morphogénétique important qui sera détaillé dans le chapitre V**.** Il semble donc pour le moins aventureux d'interpréter deux *flash floods* espacés de 150 ans comme une preuve

d'amélioration climatique et d'augmentation des précipitations, d'autant plus que les périodes d'amélioration climatique impliquent plutôt des événements violents d'une moindre ampleur.

II.D. À l'origine des ressources en eau : géologie, hydrogéologie locale, reliefs et tectonique

Malgré un climat hyperaride depuis des millénaires, il apparaît que la dépression de Kharga n'est pas dépourvue d'eau : la présence du Système aquifère des Grès de Nubie offre une ressource en eau qui varie localement. La prise en compte de la géologie, du relief, de la tectonique et de l'hydrogéologie est essentielle pour comprendre et quantifier cette ressource.

II.D.1. L'alternance entre aquifères et aquicludes

L'escarpement (figure 8) qui délimite la dépression à l'est et au nord est constitué d'un double (triple par endroits) front de cuesta où affleurent de bas en haut les formations suivantes : Duwi, Dakhla, Kurkur, Tarawan, Garra, Esna et El Rufuf (tableau 1). Ce double front se prolonge par des glacis entaillés par des paléo-oueds jusqu'au fond de la dépression. Ce dernier se compose majoritairement de la formation Quseir (grès, siltites et argilites) en dehors d'un secteur d'affleurement de la formation Maghrabi au nord, de quelques buttes témoins des formations de Duwi, de Dakhla et de Kurkur, et de collines d'origine tectonique constituées par le soulèvement localisé de la formation sous-jacente de Taref (tableau 1).

Dans le fond de la dépression, l'épaisseur totale de la couverture sédimentaire varie entre 1 500 m environ dans le nord, à proximité de l'oasis de Kharga, et moins de 100 m dans le sud (Thorweihe 1990). Ces écarts s'expliquent par le bombement du socle précambrien (dôme de Kharga - *Kharga uplift*) qui a considérablement limité les dépôts dans les secteurs portés en altitude. Dans le secteur du Gebel Abu Bayan, des mouvements tectoniques mésozoïques ont provoqué l'affleurement du socle et la formation de collines de granit précambrien (Hermina 1990). Ce dôme explique également l'absence, dans la partie sud de la dépression, de certaines formations présentes au nord : la zone du bombement demeurait émergée.

De nombreux dépôts quaternaires recouvrent les formations mentionnées précédemment, principalement sous la forme de tufs, de dunes et d'épandages de sables vifs, de dépôts de

playas, d'épandages de galets pléistocènes, de vestiges de sources artésiennes (*spring mounds*[17]) et de yardangs formés à partir de dépôts de sédiments fins (Caton-Thompson et Gardner 1932 ; Gardner 1932 ; Gardner et Caton-Thompson 1952 ; Hermina 1990, Goudie 2002 ; Embabi, 2004). Ces formations seront traitées plus en détail dans la seconde partie.

Tableau 1 - Formations géologiques de la dépression de Kharga. Les traits discontinus indiquent les lacunes (entre le Précambrien et le Jurassique supérieur, et entre le Turonien et le Campanien). Le rôle hydrologique est indiqué à l'échelle des formations. Au sein de chacune d'entre elles, certaines strates sont aquicludes, d'autres sont aquifères. Par exemple, les grès de la formation de Taref sont aquifères, alors que les schistes argileux sont aquicludes. Les noms des formations et la composition des séries sont tirées de M. Hermina (1990).

Formations géologiques de la dépression de Kharga				
Nom	**Position topographique**	**Étage**	**Composition de la série**	**Rôle hydrogéologique de la formation**
El Rufuf	Sommet du plateau	Éocène	Marnes, calcaires marneux et calcaires avec lits siliceux	Aquiclude (sauf circulation karstique)
Esna	Dépressions sur le plateau et rebord du plateau. Kharga nord	Éocène	Marnes et schistes argileux avec carbonates intercalés	Aquiclude
Garra	Rebord du plateau. Kharga sud seulement	Paléocène supérieur et Eocène inférieur	Calcaires avec schistes argileux intercalés	Aquiclude (sauf circulation karstique)
Tarawan	Rebord du plateau. Kharga nord	Paléocène	Calcaires marneux et crayeux	Aquiclude (sauf circulation karstique)
Kurkur	Rebord du plateau et buttes témoins. Kharga sud	Paléocène	Calcaires gréseux avec schistes argileux intercalés	Aquiclude (sauf circulation karstique)
Dakhla	Rebord du plateau, fond de la dépression et buttes témoins	Paléocène et Maastrichtien	Marnes, schistes argileux et argiles avec lits calcaires, sableux et limoneux intercalés	Aquiclude
Duwi	Rebord du plateau, fond de la dépression et buttes témoins	Maastrichtien et Campanien	Schistes argileux avec phosphates et d' argilites (*mudstones*) intercalés	Aquiclude
Quseir	Fond de la dépression	Campanien	Argilites (*claystones*), siltites et grès	Aquiclude
Taref	Collines d'origine tectonique dans le fond de la dépression	Turonien	Grès fluviatiles et dunaires avec des interlits de schistes argileux	Aquifère
Maghrabi	Sous-sol. Affleurements localisés (dôme de Kharga et nord de la dépression)	Cénomanien	Argilites, siltites et grès	Aquiclude
Sabaya	Kharga nord seulement. Sous-sol. Affleurements localisés (dôme de Kharga)	Albien	Grès fluviatiles	Aquifère
Abu Ballas	Kharga nord seulement. Sous-sol. Affleurements localisés (dôme de Kharga)	Aptien	Argiles et schistes argileux avec croûtes ferrugineuses intercalées	Aquiclude
Six Hills	Sous-sol. Affleurements localisés (dôme de Kharga)	Barrémien, Néocomien et Jurassique supérieur	Grès continentaux avec lits d'argiles	Aquifère
Socle	Sous-sol. Affleurements localisés (dôme de Kharga)	Précambrien	Granites et microgranites principalement (dans les affleurements)	Aquiclude

[17]. Tertres de sources artésiennes pouvant mesurer plusieurs mètres d'épaisseur et plusieurs dizaines de mètres de diamètre.

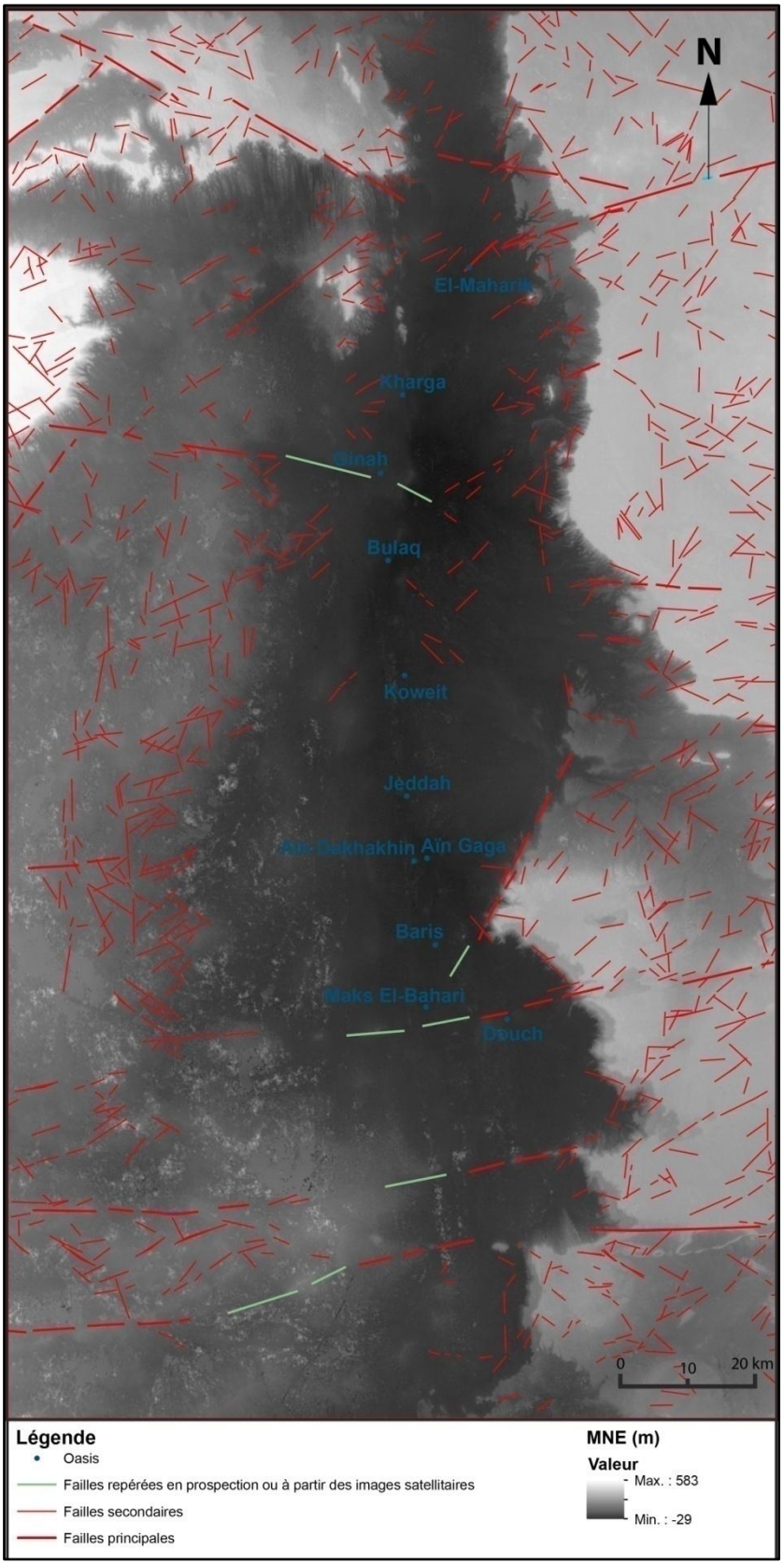


Figure 8 - Modèle numérique d'élévation d'une résolution de 30 m (GDEM ASTER, source : NASA) et principales failles connues de la dépression de Kharga. Les failles sont en apparence moins nombreuses dans les parties les plus basses, mais il s'agit d'un biais lié au comblement sédimentaire de ces zones qui masque la plupart des accidents touchant les formations sous-jacentes. Réalisé avec ArcMap 10 à partir du GDEM ASTER et de la carte géologique numérique vectorielle de l'Égypte (échelle la plus fine d'environ 1:8000).

II.D.2. Eaux « fossiles » et artésianisme

L'alternance de ces formations de perméabilité variable a entraîné la formation d'un système aquifère complexe qui appartient au Système aquifère des Grès de Nubie. Les eaux issues de ces aquifères présentent des âges apparents compris entre 20 000 et 48 000 ans, avec plusieurs modes repérables (22-24 000, 25-26 000, 28-36 000 ans). Ces données d'âge permettent d'estimer un déplacement moyen de 3 m/an dans la nappe depuis l'infiltration de l'eau (Thorweihe 1990). Les aquifères plus profonds contiendraient des eaux plus anciennes : avec les méthodes de datation Helium/Argon, P. Simons (1973) a obtenu les âges de 451 000 ans pour un aquifère intermédiaire et de 1 580 000 ans pour l'aquifère le plus profond. Ces datations confirment que la nappe connaît une recharge minime et constitue donc une ressource héritée de pluviaux pléistocènes.

La majeure partie de l'eau est contenue dans les formations de Six-Hills et de Sabaya dont la perméabilité atteint environ 10^{-5}m.s. La formation de Taref, pourtant moins perméable, (environ 10^{-6}m.s) joue un rôle capital, car elle constitue un aquifère proche de la surface que les mouvements tectoniques ont, par endroits, porté en position dominante au-dessus du fond de la dépression (Hermina 1990 ; Thorweihe 1990 ; Bousquet 1996). Les nombreux aquicludes confinant la nappe sont à l'origine d'un artésianisme essentiel pour expliquer le fonctionnement des sources et des puits de la région : dans ce système où la surface piézométrique se situe au minimum à 50 m au-dessus du niveau de la mer (Thorweihe 1990) toute percée des aquicludes permet une remontée de l'eau vers la surface. Des sources artésiennes peuvent, théoriquement, se former partout où l'altitude est inférieure à 50 m et où les aquifères sont en contact avec la surface. Le système aquifère des grès de Nubie connaissant une décharge continue depuis 7 000 BP (Gasse 2000), la surface piézométrique atteignait probablement des altitudes nettement supérieures il y a quelques millénaires. Les secteurs dans lesquels l'eau affleurait ou jaillissait étaient donc plus nombreux. Ce facteur et la persistance du phénomène durant tout l'Holocène expliquent le nombre important de sources fossiles, de puits et de forages repérables sur le terrain.

La répartition des sources n'est pas aléatoire, mais semble liée aux secteurs de fracturation de la roche. Le réseau de failles et les diaclases de la dépression de Kharga rendent possible la communication entre les différents aquifères et la surface. Les fortes concentrations de sources se trouvent donc dans les secteurs faillés, à basse altitude. Le dôme de Kharga, par son influence sur l'épaisseur des couches géologiques, joue également un rôle majeur dans le

fonctionnement local de l'aquifère : dans la partie sud de la dépression, l'épaisseur du système aquifère est moindre. Thorweihe (1990) y voit un facteur limitant de la recharge locale de l'aquifère, car le socle, affleurant à l'ouest de la dépression, empêche tout déplacement de l'eau d'ouest en est dans le sud de la dépression de Kharga. On peut également supposer deux autres effets du dôme de Kharga et de cette faible épaisseur du système aquifère :

- la pression artésienne peut être plus importante en raison de la moindre épaisseur des formations et de leur fracturation. Les sources peuvent donc donner une grande quantité d'eau ;

- dans les secteurs où l'aquifère est le moins épais, les cônes de rabattement de la nappe atteindront plus rapidement l'aquiclude inférieur (ou le socle) entraînant un tarissement plus rapide des sources, des puits ou des forages si la décharge est supérieure à la recharge. Pour les mêmes raisons, la recharge des cônes de rabattement est plus rapide en cas d'apports d'eau et la roche parviendra plus rapidement à saturation, apportant de nouveau de l'eau dans les sources du secteur ;

Enfin, les mouvements tectoniques ayant formé des collines constituées de compartiments de la formation aquifère de Taref sans les déconnecter complètement de l'aquifère artésien, des nappes perchées ont pu se former (Bousquet 1996). B. Bousquet supposait également une recharge de ces nappes par les précipitations mais une telle recharge est peu probable en raison de l'hyperaridité régionale et de la faible surface des collines.

Chapitre III.
Un peuplement holocène centré sur les points d'eau

III.A. Contexte archéologique et historique de peuplement

Malgré des conditions d'aridité mises en place tôt dans l'Holocène, la dépression de Kharga présente un patrimoine archéologique riche et varié : elle a été peuplée, selon des modes de vie nomades d'abord, puis sédentaires, avec des périodes de contraction et des périodes de développement des implantations humaines. L'histoire du peuplement de la dépression permet de distinguer deux zones géographiques différentes : la partie nord qui semble avoir toujours été au moins un lieu de passage, si ce n'est un lieu de vie, et la partie sud qui connaît au moins un hiatus franc, dans l'état actuel des prospections archéologiques (tableau 2).

De nombreux sites d'occupation datés de l'Épipaléolithique et du Néolithique ont ainsi été découverts dans l'ensemble de la dépression, à proximité de sources artésiennes (figure 9) et de playas (figure 10) (Caton-Thompson 1952 ; Wendorf et Schild 1980 ; McDonald *et al.* 2006 ; Briois *et al.* 2008, 2012 ; Midant-Reynes et Briois 2009 ; Midant-Reynes 2010). Durant les périodes pré et protodynastiques, les sources artésiennes et certaines playas demeurent des points de passage et de séjour, dans le nord (Caton-Thompson 1952) comme dans le sud (Bousquet 1996 ; Reddé 2004 ; Briois et Midant-Reynes 2010).

Au contraire, les indices textuels et les vestiges d'une occupation durant l'Ancien Empire (Goedicke 1981 ; Ikram et Rossi 2004; Rossi et Ikram 2013 ; Riemer et Kindermann 2008), le Moyen Empire et le Nouvel Empire (Habachi 1972 ; Smith et Smith 1976 ; Manassa 2012) sont concentrés dans le nord de la dépression de Kharga. Pour l'heure, très peu de vestiges ont été découverts dans la partie sud : seuls quelques tessons datés de la fin de l'Ancien Empire (environ 2 200 avant notre ère) ont été découverts à Aïn Manawir. Il ne semble pas y avoir eu d'occupation dans la région entre cette époque et le milieu du Ve s. avant notre ère (Wuttmann 2001 ; Tallet 2014). Parmi les causes probables, on peut supposer que les sources se sont taries, que l'environnement est devenu plus hostile ou que les hommes ont simplement

délaissé cette région pour des raisons politiques ou économiques. Enfin, les prospections ont peut-être été insuffisantes pour retrouver les vestiges de ces périodes.

Figure 9 - Tertre d'une ancienne source artésienne (*spring mound*) à l'est de KS060 - Tell-Douch. A proximité, se trouvent des concentrations lithiques, vestiges d'occupations préhistoriques, et, à quelques centaines de mètres vers l'est, des parcellaires antiques. Sauf indication contraire, les clichés sont réalisés par l'auteur. Prise de vue : novembre 2010.

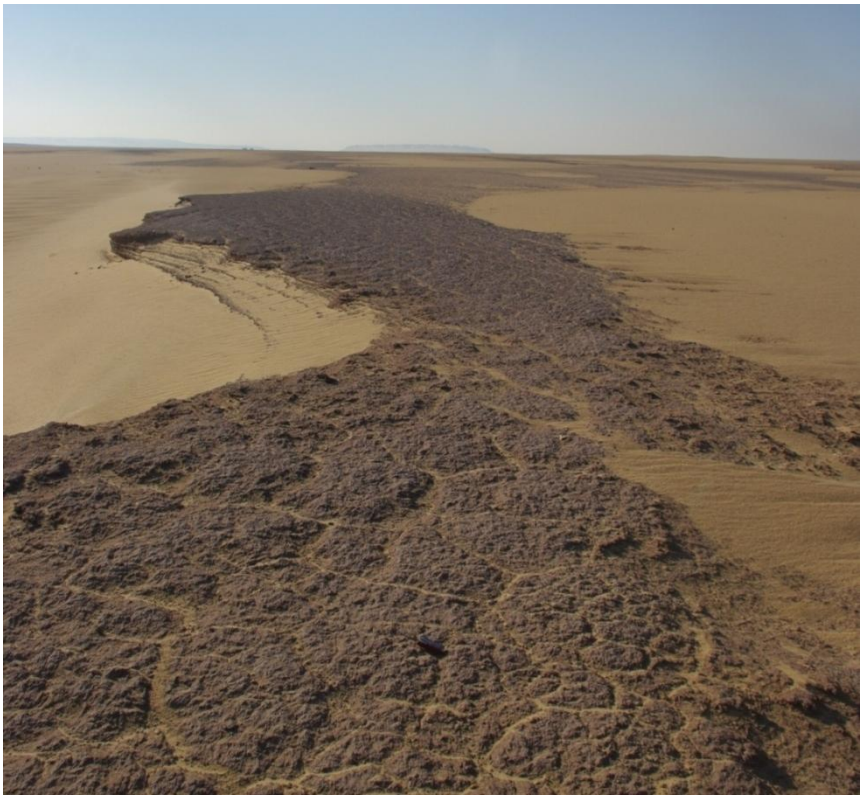


Figure 10 - Dépôts de playas érodés sur le site KS097. Les polygones de dessiccation, profonds et comblés par des sables fins, résultent de l'assèchement des dépôts. La corrasion éolienne est à l'origine de l'érosion des dépôts. Les concentrations lithiques, vestiges d'occupations préhistoriques, sont nombreuses dans le secteur. Prise de vue : décembre 2011.

Tableau 2 - Périodes historiques de l'Holocène, bornes chronologiques et occupation de la dépression de Kharga. Les périodes indiquées en gras sont celles mentionnées dans cette thèse. Pour plus d'informations sur la périodisation de la préhistoire holocène, voir Dachy 2015. La basse époque a été subdivisée en deux pour mettre en évidence la reprise du peuplement du bassin sud à l'époque perse. La période «arabe pré-mamelouke» est une époque pour laquelle l'occupation et le statut exact de la dépression de Kharga sont encore peu connus, et les vestiges découverts rares.

Dénomination des périodes		Bornes chronologiques			Peuplement connu	
Période générale	**Période**	**Calendrier grégorien**	**Millénaires et siècles**	**BP (Correspondance approximative)**	**Dépression de Kharga**	**Bassin sud (Baris et Douch)**
Préhistoire holocène (Épipaléolithique, Néolithique, Prédynastique)		-9 750 à *ca.* -3 100	10e millénaire - 31e siècle	11 700 à *ca.* 5 050	Oui	Oui
Antiquité	Période thinite	*Ca.* 3 100 à *ca.* -2 650	31e - seconde moitié du 27e	*Ca.*5 050 à *ca.*4 600	Oui	Oui
	Ancien Empire	*Ca.* -2 650 à *ca.* -2 200	Seconde moitié du 27e - 22e	*Ca.* 4 600 à *ca.* 4 150	Oui	Oui
	Première période intermédiaire	*Ca.* -2 200 à *ca.* -2 030	22e - deux premiers tiers du 21e	*Ca.* 4 150 à *ca.* 3 980	Oui	Non
	Moyen Empire	*Ca.* -2 030 à *ca.* -1 785	Dernier tiers du 21e - début du 18e	*Ca.* 3 980 à *ca.* 3 735	Oui	Non
	Deuxième période intermédiaire	*Ca.* -1 785 à *ca.* -*1 550*	18e - première moitié du 16e	*Ca.* 3 735 à *ca.* 3 500	Oui	Non
	Nouvel Empire	*Ca.* -1 550 à *ca.* -*1 080*	Seconde moitié du 16e - début du 11e	*Ca.* 3 500 à *ca.* 3 030	Oui	Non
	Troisième période intermédiaire	*Ca.* -*1 080* à *ca.* -*750*	11e -première moitié du 8e	*Ca.* 3 030 à *ca.* 2 700	Oui	Non
	Basse époque - avant la période perse	*Ca.* -750 à -*475*	Seconde moitié du 8e - premier quart du 5e	*Ca.* 2 700 à 2 425	Oui	Non
	Basse époque - période perse	-475 à - 332	Trois quarts du 5e - deux premiers tiers du 4e	2 425 à 2 282	Oui	Oui
	Période ptolémaïque	-332 à - 30	Dernier tiers du 4e - deux premiers tiers du 1er av.	2 282 à 1 980	Oui	Oui
	Période romaine	-30 à 395	Dernier tiers du 1er av. - fin du 4e ap.	1 980 à 1 555	Oui	Oui
Transition	**Période byzantine**	395 à 642	Fin du 4e - première moitié du 7e	1 555 à 1 308	Oui	Oui
Moyen-Âge	**Période arabe pré-mamelouke**	642 à 1 250	Seconde moitié du 7e - première moitié du 13e	1 308 à 700	Oui	Oui
	Période mamelouke	1 250 à 1 517	Seconde moitié du 13e début du 16e	700 à 433	Oui	Oui
Époque moderne et contemporaine	**Période ottomane**	1 517 à 1 811	Début du 16e - début du 19e	433 à139	Oui	Oui
	Périodes moderne et actuelle	1 811 à nos jours	Début du 19e - début du 21e	139 à nos jours	Oui	Oui

L'occupation de la partie sud de la dépression est de nouveau attestée à partir de la seconde domination perse au Ve s. avant notre ère (tableau 2 et figure 11) : des vestiges d'installations sédentaires en lien avec une agriculture pérenne ont été découverts, tant au nord (Caton-

Thompson et Gardner 1932 ; Cruz-Uribe 1986, 1987 ; Osing 1990 ; Tallet *et al.* 2011 ; Rossi et Ikram 2013 ; Tallet 2014) qu'au sud de la dépression (Bresciani 1995 ; Wuttmann *et al.* 1996, 1998 ; Reddé 2004 ; Leveau 2009 ; Chauveau 2011 ; Newton *et al.* 2013 ; Agut-Labordère et Newton 2013 ; Agut-Labordère 2014). Cette occupation pérenne s'est prolongée et développée jusqu'à la fin de la période romaine, au Ve s. de notre ère, où de nombreux sites furent abandonnés (Reddé 1987 ; Bousquet 1996). La recolonisation de l'ensemble de la région est associée à la mise en œuvre d'une nouvelle technique d'exploitation de l'eau : le qanât (Bousquet 1996 ; Wuttmann *et al.* 2000 ; Wuttman 2001 ; Gonon *et al.* 2005), appelé foggara dans le Sahara maghrébin.

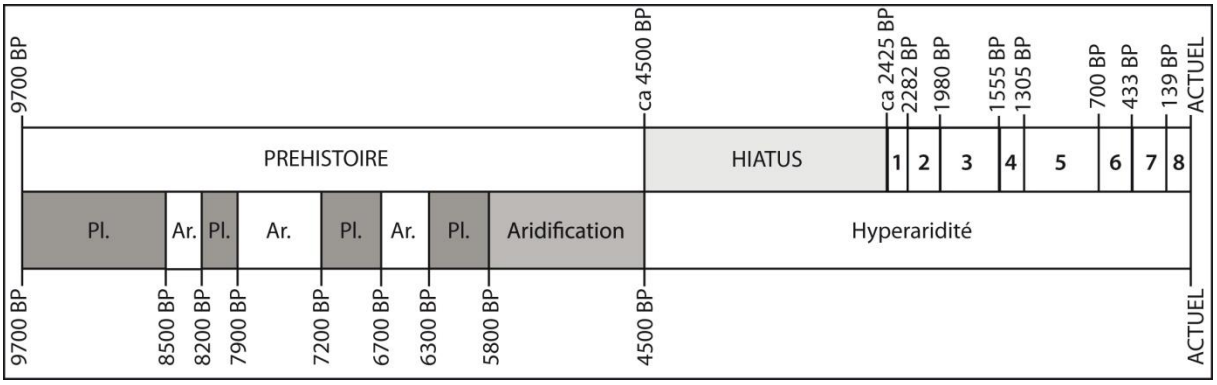


Figure 11 - Frise chronologique représentant les principales variations climatiques et les principaux repères chrono-culturels dans le sud de la dépression de Kharga. Pour plus de précisions sur la périodisation relative à la Préhistoire, voir Dachy (2015). Le gris sombre indique les données tirées de Wendorf et Schild (1980), le gris moyen indique les données tirées de Sanlaville (1997) et le gris clair met en évidence le hiatus d'occupation de la région (correspondant à l'Ancien Empire, au Moyen Empire et au Nouvel Empire dans la vallée du Nil).
Ar. : période aride à hyperaride ; Pl. :période dite « pluviale », période moins aride.
1. Époque perse ; 2. Époque ptolémaïque ; 3. Époque romaine ; 4. Époque byzantine ; 5. Époque arabe pré-mamelouke ; 6. Époque mamelouke ; 7. Époque ottomane ; 8. Époques moderne et actuelle. Figure tirée de Crépy et Callot 2016.

Cette technique repose sur le percement d'une galerie souterraine de pente faible, dont l'exutoire se situe à proximité et au niveau des terrains à irriguer. Elle se manifeste, sur le terrain, par une succession de regards et de tas de déblais correspondant aux puits de creusement, d'entretien et d'aération (figures 12 et 13). La galerie vise à drainer et à capter les eaux d'une couche aquifère : profitant d'un relief ou du pendage des couches géologiques, la galerie peut atteindre le plafond d'une nappe pour permettre un écoulement. La galerie est ainsi le plus souvent profonde et étroite, maximisant la surface de drainage, tout en limitant le temps de travail nécessaire (figure 14). R. Boucharlat (2001) précise que la couche aquifère exploitée par cette technique est « indécelable en surface par le non-spécialiste », ce qui n'est pas le cas à Aïn Manawir, où l'aquifère affleure, et où des sources naturelles préexistaient. R. Boucharlat affirme pourtant que les galeries de captage d'Aïn Manawir doivent bien être considérées comme des qanâts.

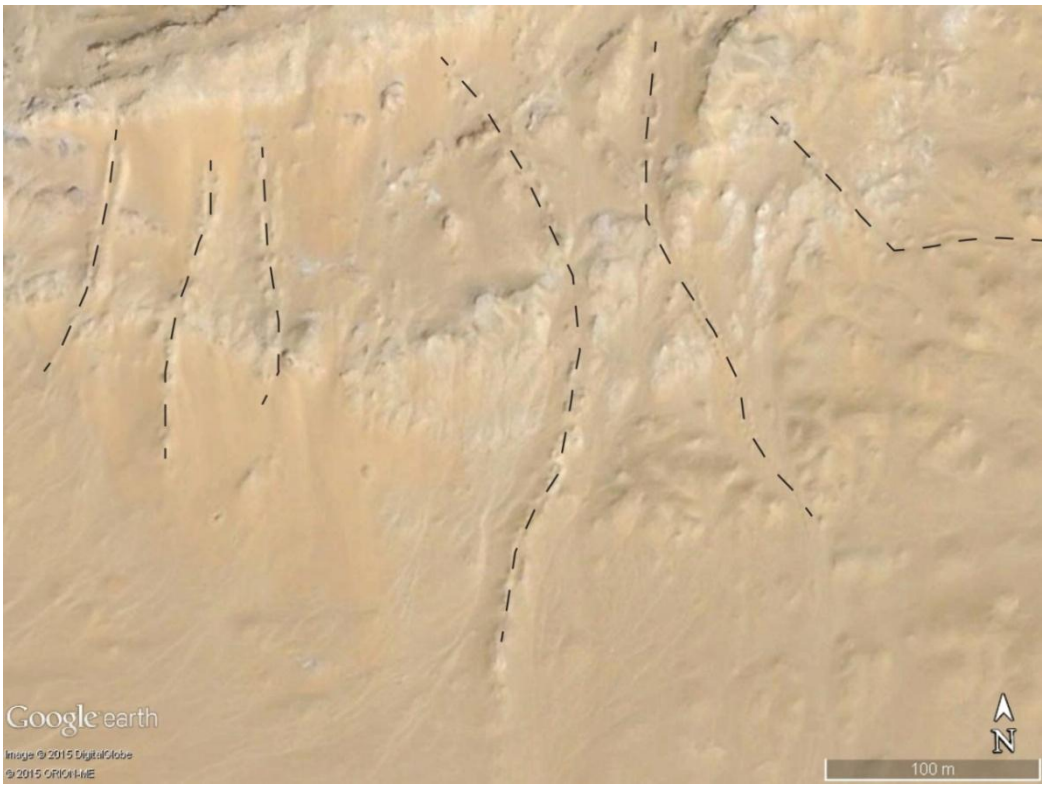


Figure 12 - Versant sud de KS060 - Tell-Douch. Au moins six qanâts différents, indiqués par les pointillés, sont identifiables. Leur sens d'écoulement va du nord vers le sud. Image satellitaire de mars 2004.

Le creusement de galeries de captage, qu'il s'agisse ou non de qanâts selon la définition de R. Boucharlat, est connu dans de nombreuses régions du monde. On trouve en effet des systèmes de ce type (portant des noms différents selon les endroits) en Iran et dans la péninsule arabique (Humlum 1965 ; Boucharlat 2001 ; Magee 2005 ; Briant 2001), en Libye (Humlum 1965 ; Magee 2005), au Maghreb (Capot-Rey 1953 ; Humlum 1965 ; Bisson 2003), en Espagne (Bazzana *et al.* 1987 ; Bazzana et Meulemeester 2009), en Israël (Issar 1990, Issar et Zohar 2007), en Syrie (Geyer 1999, 2009 ; Geyer et Rousset 2001 ; Geyer *et al.* 2006) en Asie Centrale, en Afghanistan (Humlum 1965 ; Balland 1992) et en Chine (Humlum 1965 ; Sohma et Wushiki 2011), et même sur le continent américain (Goblot 1979 ; Barnes et 1991).

La question de son modèle de diffusion (à partir du centre de l'empire Achéménide, à partir d'un autre centre de diffusion, à partir de divers centres, ou bien avec simple convergence de formes) ne sera pas discutée dans cette thèse, les travaux menés depuis 2010 n'ayant pas permis de découvrir des éléments utiles à ce sujet. Cette technique de collecte de l'eau comporte une limite : si le toit de la nappe passe en dessous des niveaux à irriguer, il devient nécessaire de relever l'eau, ou de situer les champs plus bas dans les dépressions, au risque de voir augmenter la salinité des sols en raison de l'absence de drainage. Si le toit de la nappe passe en dessous de l'altitude du fond de la dépression, le système devient complètement

inutile, en dehors du recours à de nouvelles innovations techniques facilitant la remontée de l'eau vers la surface (Bisson 2003).

L'abandon de nombreux sites est associé à cette limite : après une exploitation sur au moins 700 ans et un surcreusement des galeries de plusieurs mètres pour suivre l'abaissement de la nappe (Wuttmann 2001 ; Newton *et al.* 2013), les qanâts sont devenus inefficaces et ont été remplacés par des puits en fond de dépression (Bousquet 1996). Les vestiges de types de puits bien distincts ont été observés, en lien avec la baisse du niveau des nappes : puits à chadouf, puits cubique à escalier et puits foré (Bousquet et Robin 1999). Aucun signe d'utilisation des qanâts depuis la fin de la période romaine n'a été découvert pour le moment dans le sud de la dépression de Kharga. Au contraire, au moins l'un de ceux situés dans la partie nord de la dépression aurait été réemployé avec succès au XIXe et au XXe s. (Beadnell 1909).

A partir de la fin de la période romaine, le nombre de sites semble diminuer, au nord comme au sud, mais des oasis organisées autour de puits ont continué d'exister jusqu'au milieu du XX ^{e}s., malgré des périodes d'abandon ou de contraction (Wuttmann 2006).

Figure 13 - Lignes de regards restaurés par l'IFAO et exutoire du qanât MQ5 à KS089 - Aïn Manawir. Cet ouvrage, comme la plupart des autres qanâts du site, a été remanié entre l'époque perse et la fin de l'époque romaine. Prise de vue : novembre 2012

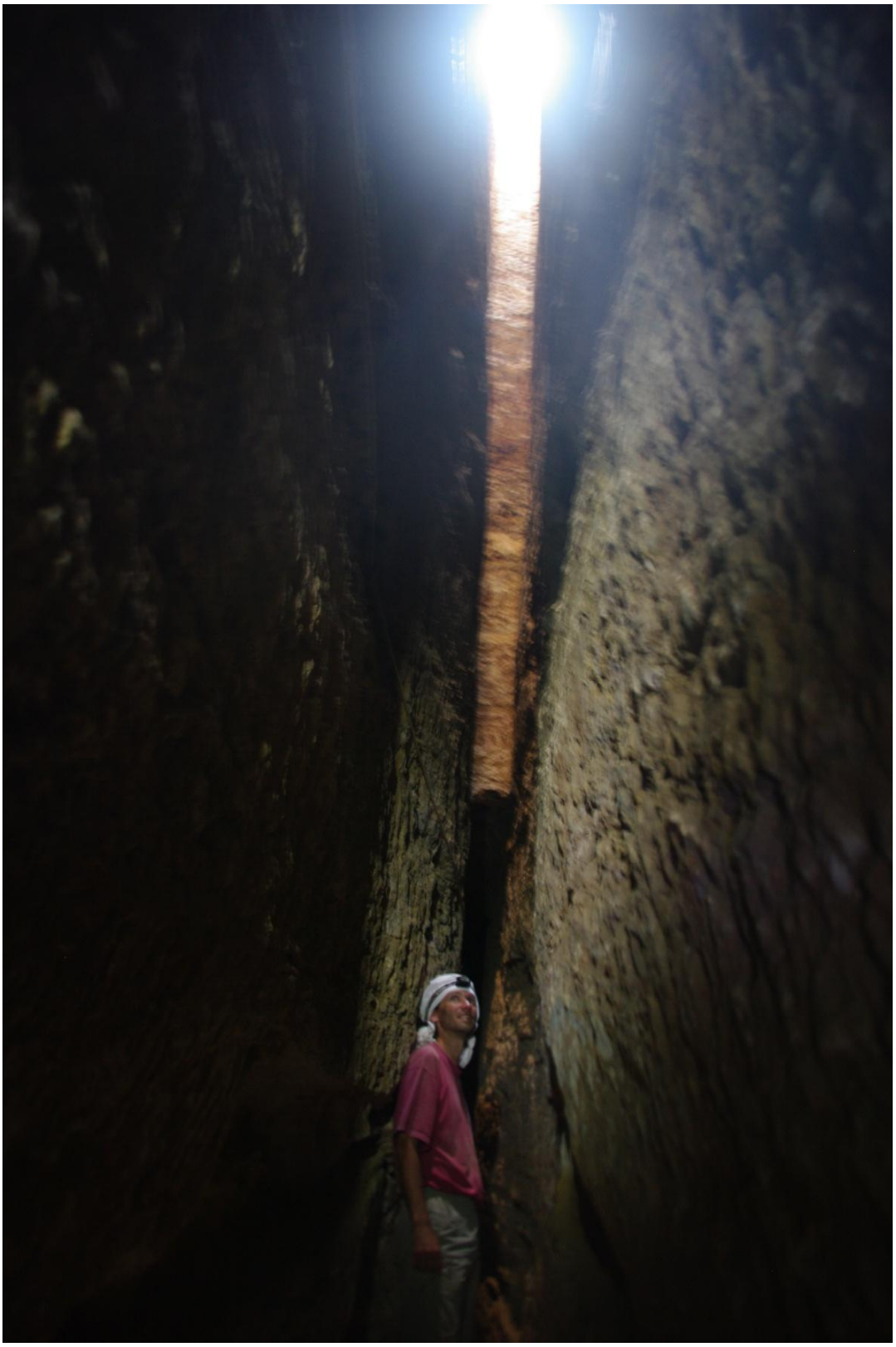


Figure 14 - Intérieur de la galerie du qanât MQ4, fouillé par l'IFAO, sur le site de KS089 - Aïn Manawir. La photographie a été prise en partie avale de l'ouvrage (ce qui explique la profondeur relativement faible), au droit d'un regard. Prise de vue : novembre 2010.

Les oasis ont connu une nouvelle période de développement au XVIIIe et XIXe s., lorsque le pouvoir ottoman a relancé un front de colonisation et a installé à Douch, dans le sud de l'oasis, des familles en provenance d'Arabie (Bousquet 1996). L'occupation de la région n'a cessé depuis, malgré de grandes difficultés dans l'approvisionnement en eau et la contrainte représentée par l'ensablement (Beadnell 1909 ; Caton-Thompson et Gardner 1932 ; Caton-Thompson 1952 ; Gummuchian 1975 ; Tallet *et al.* 2011).

Pour l'ensemble de ces périodes, de nombreux vestiges (céramiques, restes de bâtiments, canaux, etc.) sont concentrés au sommet de yardangs (ou dans les secteurs de déflation entre les yardangs, où ils sont rarement en place : amas de briques, épandages de débris de céramiques libérés des dépôts entaillés en yardangs par l'érosion éolienne), et il est possible, sur certains sites, de suivre un même niveau d'un yardang à l'autre (figures 15 et 16). Certains yardangs ont même été « armés » et protégés par une couverture sommitale d'origine anthropique (déblais de qanâts ou de puits, bâtiments, parcellaires indurés, etc.). Certains vestiges, au contraire, sont recouverts de yardangs, parfois coiffés de vestiges plus récents. La surface topographique a donc beaucoup évolué durant l'Holocène dans une alternance de phases de dépôt et d'érosion.

Figure 15 - Versant sud de la colline d'Aïn Ziyada, photographié depuis le sommet d'un yardang (visible au premier plan). La zone rectangulaire sableuse visible à son sommet correspond au comblement d'un regard de qanât antique. Le sommet des autres yardangs visibles présente régulièrement des vestiges d'occupation humaine, à l'image du bâtiment au loin, daté de l'époque perse à ptolémaïque (V^{e}-IVe s. avant notre ère). Prise de vue : novembre 2010.

Figure 16 - Bâtiment daté de l'époque perse à ptolémaïque (V^{e}-IV^{e}s. avant notre ère) photographié depuis le nord et situé, comme le bâtiment de la figure 15, au sommet d'un grand yardang. Les dépôts de sédiment fin ont été protégés par les vestiges, ce qui explique le profil atypique de ce yardang et la largeur de sa face au vent. Prise de vue : décembre 2012.

III.B. Peuplement et pratiques agricoles contemporaines

III.B.1. La « Nouvelle Vallée », un moteur pour la démographie et les activités humaines

Depuis l'essor de politiques volontaristes liées au projet de « Nouvelle Vallée », l'emprise des occupations humaines connaît une nouvelle période d'extension, fondée à la fois sur l'exploitation d'eau dérivée du lac Nasser, et sur l'utilisation des eaux artésiennes. On constate donc une extension rapide des surfaces cultivées dans la dépression de Kharga, alors que les conditions environnementales n'ont pas changé.

L'occupation de la dépression de Kharga s'est largement développée depuis 1958 avec le lancement par Gamal Abdel Nasser du projet de « Nouvelle vallée », dans le désert Libyque, regroupant les oasis de Kharga, Dakhla et Farafra. Ce projet s'est développé en trois temps principaux :

- le lancement du projet par Gamal Abdel Nasser avec le développement de forages artésiens profonds entraînant un nouvel essor pour l'agriculture dans la dépression de Kharga tout en précipitant le déclin de plusieurs oasis préexistantes (Gummuchian 1975 ; Faggi 1983 ; Faggi et Maury 1987 ; Burmil 2003 ; Tallet *et al.* 2011).

- une première relance du projet par Hosni Moubarak en 1997 (Drozdz 2011) visant à mettre en culture 540 000 *feddans*[18] supplémentaires dans le désert (environ 226 800 ha). En 2014, seulement 55 000 nouveaux *feddans* (environ 23 000 ha) avaient effectivement été mis en culture.

- le projet du président actuel Abdel Fattah al-Sissi qui vise dans un premier temps à faire cultiver 108 000 *feddans* (environ 45 360 ha) supplémentaires puis à terme près de 4 millions de *feddans* (environ 1 680 000 ha), tout en installant des infrastructures et des services dans des secteurs actuellement marginaux.

Ce projet a bénéficié de nombreux financements et a d'abord rendu cette zone très attractive, en raison de l'installation d'infrastructures et de services nombreux (écoles, cliniques, emplois publics, etc.). La première phase du projet a ainsi nourri une croissance démographique très rapide jusqu'en 1986. De 1986 à 1996, la population a connu au contraire un recul net lié à la baisse des investissements étatiques dans l'oasis. Entre 1996 et 2006, la mise en place de la seconde phase du projet a permis de relancer l'attractivité de la région, qui a connu une nouvelle hausse de la population (Drozdz 2011). On peut supposer que le projet du président égyptien actuel aura également des effets positifs sur la démographie dans la dépression de Kharga, en attirant de nouveau les investisseurs et les populations. Dans cet espace situé sur les marges de l'œkoumène, le contexte politique et économique semble donc avoir un impact net sur les dynamiques démographiques.

Dans le cadre du projet de « Nouvelle Vallée », des villages ont été créés ex-nihilo depuis 1958. Leurs noms rendent fréquemment hommage à des villes et des États du monde arabe, dans un esprit teinté de panarabisme : du nord au sud, il s'agit de Nasser, d'Algeria, de Sanaa, de Kuwait, de Palestine, de Jeddah, de Bagdad et d'Aden. Certains villages préexistants ont aussi été doublés de villages plus modernes, à l'image de Gourmashine, de Douch et de Bulaq (création d'un village à proximité de l'ancien et déplacement de la population), ou de Baris (création du village de New-Baris par Hassan Fathy[19]). Ces créations de villages n'ont pas

[18]. Le *feddan* est une unité de mesure de surface utilisée en Égypte et qui équivaut à 0,42 ha.

[19]. Hassan Fathy (1900-1989) est un architecte égyptien connu pour le mélange d'influences modernes et vernaculaires dans ses réalisations. Sa création la plus aboutie est probablement le village de *New Gourna*, non loin de Louxor.

toutes été couronnées de succès. Les travaux de Douch ont été stoppés brusquement lors de la révolution de 2011. Le projet ambitieux du complexe Hassan Fathy et du village de New-Baris n'ont jamais été terminés : le projet a été stoppé par la guerre des Six jours en 1967 (El-Wakil 2003).

III.B.2. Une économie fondée sur l'agriculture et le tourisme

En dehors de la ville de Kharga, véritable capitale saharienne concentrant de nombreux commerces, services et administrations, la majorité des actifs travaillent dans le domaine agricole et dans la fonction publique, malgré le développement de projets touristiques initiés par la seconde phase du projet « *New Valley* » La majorité des communes a donc une vocation agricole (Drozdz 2011). En raison des événements politiques qui secouent le pays, le tourisme recule, et les efforts pour l'emploi public sont limités. L'économie régionale repose presque exclusivement sur l'exploitation agricole des ressources en eau « fossile » et en sol.

Après la première phase du projet « *New Valley* », fondée sur des investissements publics, la seconde phase a reposé sur l'apport d'investissements privés issus des grandes villes égyptiennes mais aussi de la diaspora égyptienne et d'investisseurs étrangers (Pays du Golfe, Union Européenne). Naturellement, ces investisseurs se sont tournés vers des cultures à fortes valeurs ajoutés, visant à fournir des produits de contre-saison aux marchés européens (Drozdz 2011) : les pratiques agricoles et les modes d'occupation du sol ont donc été considérablement modifiés.

III.B.3. Une agriculture en proie à des changements profonds

Les logiques d'investissement à l'œuvre depuis 1997 ont entraîné le développement de cultures ex-nihilo généralement constituées d'une unique strate herbacée (figures 17 et 18). L'agriculture traditionnelle des oasis, combinant plusieurs strates de culture (figure 19), encore visible dans certaines vieilles palmeraies (Kharga, Ezbet Gaga, Aïn Dakhakhin, Baris, Maks-El-Bahari, etc.), est donc en recul.

Actuellement, pour ouvrir de nouvelles zones de cultures, les agriculteurs rasent les yardangs au bulldozer ou à la pelle mécanique (figure 20), tracent des canaux d'irrigation (parfois tubés) et mettent directement en place des cultures maraîchères, fruitières ou céréalières.

Figure 17 - Vue depuis le nord des champs récents de l'oasis ancienne d'Ezbet Gaga. La végétation rase et l'absence de strate arbustive ou arborescente, au premier plan, contrastent fortement avec les champs traditionnels sous palmeraies que l'on devine sur la butte, au fond. Prise de vue : novembre 2014.

Figure 18 - Cultures ex-nihilo entre l'oasis ancienne d'Ezbet Gaga (ou Ezbet Aïn Gaga) au nord et le nouveau village d'Aden au sud. La plupart des parcelles sont de grande taille et une seule strate de culture est présente : on trouve ainsi des plantes fourragères, maraîchères ou des céréales dans certaines parcelles, des palmiers dans d'autres, mais la culture traditionnelle en parcelles contenant à la fois des palmiers et une strate herbacée est très rare dans ce modèle. Les cultures sur pivot, dont l'image donne un exemple, semblent amenées à se développer, avec la création entre 2012 et 2014 d'un second ensemble sur pivot à proximité du premier. Image satellitaire de février 2010.

Cette évolution explique l'absence ou la rareté des palmiers dans la plupart des champs récents qui s'étendent sur des terres qui n'étaient pas cultivées auparavant. L'abandon des parcelles, en l'absence d'un drainage efficace et de protections contre le vent, peut-être rapide et des quantités d'eau importantes peuvent être gaspillées dans ce nouveau système agraire : certains secteurs déprimés sont perpétuellement ou temporairement inondés en raison d'un drainage insuffisant (figure 21).

Figure 19 - Vue de la partie traditionnelle de l'oasis de Douch. Au premier plan, parcellaire ensablé par les apports éoliens, séparé des parcellaires cultivés par un canal d'irrigation par gravité. Sur les parcellaires cultivés, on repère trois strates de végétation : une strate herbacée constituée d'oignons, de salades et de plantes fourragères ; une strate arbustive constituée de jujubiers (*Ziziphus spina-christi*), de jeunes palmiers-dattiers (*Phoenix dactylifera*) et d'autres arbres fruitiers ; une strate arborescente constituée de palmiers-dattiers matures (palmes longues vert pâle et stipe unique) et des palmiers doums (*Hyphaene thebaica*), reconnaissables à leurs palmes plus courtes, vert vif et à la ramification du stipe). Prise de vue : novembre 2011.

Figure 20 - Préparation de futures parcelles agricoles au sud du site de KS241 - Aïn Gaga entre Ezbet Gaga et Aden. Après un premier aplanissement à l'origine des marques visibles au premier plan et de la dispersion de débris de yardangs, une pelle mécanique, au second plan, finit le travail. L'oasis visible au fond est Aïn Tafnis. Enfin, au dernier plan, les collines de KS060 - Tell-Douch (à gauche) et de KS089 - Aïn Manawir (à droite) s'élèvent au-dessus du fond de la dépression. Photographie : Tiphaine Dachy, novembre 2012.

Figure 21 - Zone d'épandage des eaux de drainage (et d'une partie des eaux usées, parfois apportées par camions citernes) située à l'est d'Ezbet Gaga. Prise de vue : novembre 2014.

Parmi les investisseurs, des agriculteurs en provenance du delta ont commencé à planter, dans le nord de la dépression, des pastèques en culture non irriguée, profitant du haut niveau des nappes superficielles (Rossi et Ikram 2013). De telles cultures ont été observées plus au sud, à proximité de Koweït, de Jeddah et de Gourmashine, dans des trous creusés à même le sable, dans un secteur où les *spring mounds* sont particulièrement nombreux, juste à côté de parcelles cultivées et irriguées (figure 22). La question se pose donc sur l'origine de l'eau permettant la croissance des pastèques : il pourrait s'agir d'eau issue d'une nappe superficielle rechargée par l'artésianisme, ou bien d'une nappe liée à l'infiltration des eaux d'irrigation.

Figure 22 - Cultures non irriguées de pastèques dans des fosses creusées dans le sable à Gourmashine. Le tracé suit les limites des fosses plantées de pastèques. Image satellitaire de février 2010.

Malgré l'impact très fort des politiques d'investissement sur les pratiques agricoles et sur l'évolution des paysages agraires de la dépression, certains agriculteurs continuent de planter de nombreux palmiers dans les oasis au fur et à mesure qu'ils mettent de nouvelles parcelles en culture, tout particulièrement dans le village de Douch et dans les différents hameaux de Maks El-Bahari et Maks-El-Qibli. Dans ces oasis, la plantation de palmiers peut même précéder la culture de la strate herbacée (figure 23).

Figure 23 - Plantation récente de palmiers sur une parcelle préparée pour la mise en culture de plantes céréalières, maraîchères ou fourragères dans la partie nord de Maks el-Bahari. Au dernier plan, cultures céréalières et maraîchère sous palmeraies (palmiers-dattiers et palmiers doum). Prise de vue : décembre 2012.

III.B.4. L'exploitation du système aquifère des grès de Nubie en question

La dépression de Kharga est une région où l'exploitation des eaux du sous-sol est attestée sur une très longue durée (Soliman 2013) : elle fut en effet utilisée et exploitée sous forme de puits et de qanâts, puis de forages profonds du Ve s. avant notre ère jusqu'à nos jours. Malgré des tarissements localisés et/ou limités dans le temps, la dépression est restée peuplée durant l'ensemble de la période. En 1960, pour la seule ville de Kharga, on comptait 279 puits et sources artésiens d'où l'eau s'écoulait naturellement et 12 puits profonds, exploitant un total de 51 millions de m^3 par an. En 1963, 101 millions de m^3 furent exploités.

Entre 1965 et 1978, les puits donnèrent 87 millions de m^3, en moyenne. Dès 1975, de nombreux puits étaient taris, ainsi que quelques forages profonds. Le débit a pourtant augmenté depuis 1978 en raison de la création de nouveaux forages, avant d'atteindre un nouveau pic en 1998 avec 118 millions de m^3 extraits à partir de 192 forages profonds et de 16 puits de surface ou sources presque systématiquement équipés de pompes. En 40 ans deux importants cônes de rabattement de la nappe se sont formés, l'un autour de Kharga et Malaa (rabattement de 60 m) et le second autour de Bulaq et Gourmashine (rabattement de 35 m). Ces cônes drainent les eaux souterraines à l'échelle de la dépression : la circulation se fait donc vers la ville de Kharga depuis toutes les directions (Soliman 2013). Pour l'ensemble de la dépression, Ebraheem *et al.* (2002) estiment que l'extraction d'eau représentait 203 millions de m^3 en 2000. Ces auteurs ajoutent que de nombreux cônes de rabattement de la nappe se sont formés autour des secteurs de pompages, et rappellent que la limite économique de pompage se situe aux alentours de 100 m de profondeur. Enfin, ils calculent que la décharge artificielle actuelle sur l'ensemble du système aquifère des grès de Nubie représente 22 fois la recharge naturelle.

Le développement agricole de la dépression ne peut pas être durable en l'état technologique actuel. L'avenir économique de la région est donc incertain.

III.B.5. L'Holocène dans la dépression de Kharga : du vent, de l'eau et des hommes

Les paysages de la dépression de Kharga, marqués par des formations géomorphologiques et des vestiges d'occupations humaines d'époques variées, constituent un palimpseste permettant d'étudier, fragment par fragment, les modalités de la relation hommes/milieu sur le temps long de l'Holocène. L'intérêt de l'étude géoarchéologique et géohistorique de cette région est donc lié à la possibilité d'étudier l'évolution d'un système morphogénétique complexe et des relations entre les hommes et leur milieu sur le temps long. Le vent, l'eau et les hommes ont agi et ont combiné leurs effets de manière variable durant l'Holocène, constituant ainsi les principaux facteurs d'évolution du paysage et de l'environnement à prendre en compte. Leur étude permet ainsi de retracer des trajectoires géomorphologiques différenciées par des variations temporelles ou locales des dynamiques éoliennes, de la fourniture en eau ou des aménagements anthropiques.

Ces différents facteurs ont déjà été largement étudiés par des spécialistes de disciplines variées[20] :

- la question de l'eau a été traitée, pour l'époque contemporaine (Burmil 2003 ; Soliman 2013), de manière prospective (Ebraheem 2002), et dans des démarches paléoenvironnementales (Thorweihe 1990 ; Wendorf et Schild 1980 ; Kuper et Kropelin 2006) ou géoarchéologiques (Bousquet 1996 ; Bousquet et Robin 1999 ; Tallet *et al.* 2011) ;

- les dynamiques éoliennes ont été largement étudiées par des géomorphologues (Bousquet 1996 ; Donner et Embabi 2000 ; Nofal 2002 ; Embabi 2004) et par des aménageurs égyptiens (Hereher 2010) ;

- les activités humaines ont été au centre des travaux des archéologues, des préhistoriens, des historiens et des géographes qui ont travaillé dans la région (missions de l'IFAO depuis 1976, Bousquet 1996 ; Wuttmann *et al.* 1996 ; Reddé 2004 ; Briois et *al.* 2008, Tallet et *al.* 2011).

Le travail présenté propose de relier ces trois facteurs dans une analyse systémique sur le temps long et constitue ainsi un prolongement dans le temps et dans l'espace du travail remarquable de B. Bousquet (1996) sur les sites de KS060 - Tell-Douch, de KS088 - Aïn Ziyada, de KS098 - Aïn Boreq et de KS089 - Aïn Manawir. Les 17 années de prospection de l'IFAO depuis la publication de sa monographie ont en effet permis de découvrir de nouveaux sites, permettant d'étendre la réflexion à une plus vaste échelle temporelle et spatiale, et facilitant la compréhension des grandes évolutions du (des ?) système(s) oasien(s) de la dépression de Kharga et de leur impact géomorphologique.

[20]. Les éléments bibliographiques cités ici ne sont pas exhaustifs, mais sont sélectionnés à titre d'exemple.

Chapitre IV.
Une grande variété de sites d'étude

Les prospections antérieures de l'IFAO ont facilité la sélection des sites étudiés et, en présence de jalons archéologiques clairs, la compréhension de l'évolution géomorphologique régionale récente. Quarante-cinq sites ont été étudiés, afin de représenter la diversité des situations existantes dans la dépression de Kharga (figures 24 à 27 et tableaux 3 à 9).

Nous n'avons pas pu les prospecter tous. La plupart des sites prospectés sont concentrés dans la partie sud de la dépression, secteur dans lequel se trouve la maison de fouilles de l'IFAO. Les sites localisés à proximité de Tell-Douch, Aïn Manawir et Aïn Gaga, sites sur lesquels les archéologues ont travaillé durant les missions de terrain, ont été privilégiés pour faciliter les déplacements. Le recours aux images satellitaires, aux cartes topographiques anciennes et à d'autres documents de la base de données de la mission a permis d'obtenir des informations complètes sur certains sites non prospectés. Ces 45 sites peuvent être regroupés en 6 types principaux : sur une butte témoin, des sites de plaines, des sites de l'erg, sur les collines tectoniques de grès, sur les buttes de sédiment fin et dans les oasis actuelles. Les informations sur les époques d'occupation des sites proviennent des rapports et du catalogue de prospection de l'IFAO, ainsi que de communications des membres des missions en 2010, 2011, 2012 et 2014. Sauf exception, les époques antiques et postérieures seront indiquées dans les tableaux par des codes correspondant aux phases d'occupation utilisées par les archéologues de la mission, tel qu'indiqué dans le tableau 3.

Code	Période correspondante	Code	Période correspondante
0	Ancien empire	**7**	Fin IIIe et IVe de notre ère : période romaine
1	Ve s. avant notre ère : 27e dynastie/première domination perse	**8**	Ve s. de notre ère : fin de la période romaine, début de la période byzantine
2	Première moitié du IVe s. avant notre ère : 28-30e dynasties	**9**	VIe-VIIe s. de notre ère: périodes byzantine et islamique
3	Seconde moitié du IVe s. avant notre ère	**10**	VIIIe-XIe s. de notre ère : période médiévale/pré-mamelouk
4	Fin IVe et IIIe s. avant notre ère : époque ptolémaïque	**11**	XIIIe-XVe s. de notre ère : période médiévale/mamelouk
5	IIIe-II^{e}s. avant notre ère : époque ptolémaïque	**12**	XVIe-XIXe s. de notre ère : période ottomane
6	Ier-IIe et début IIIe s. de notre ère : époque romaine	**13**	XIXe-XXe s. de notre ère

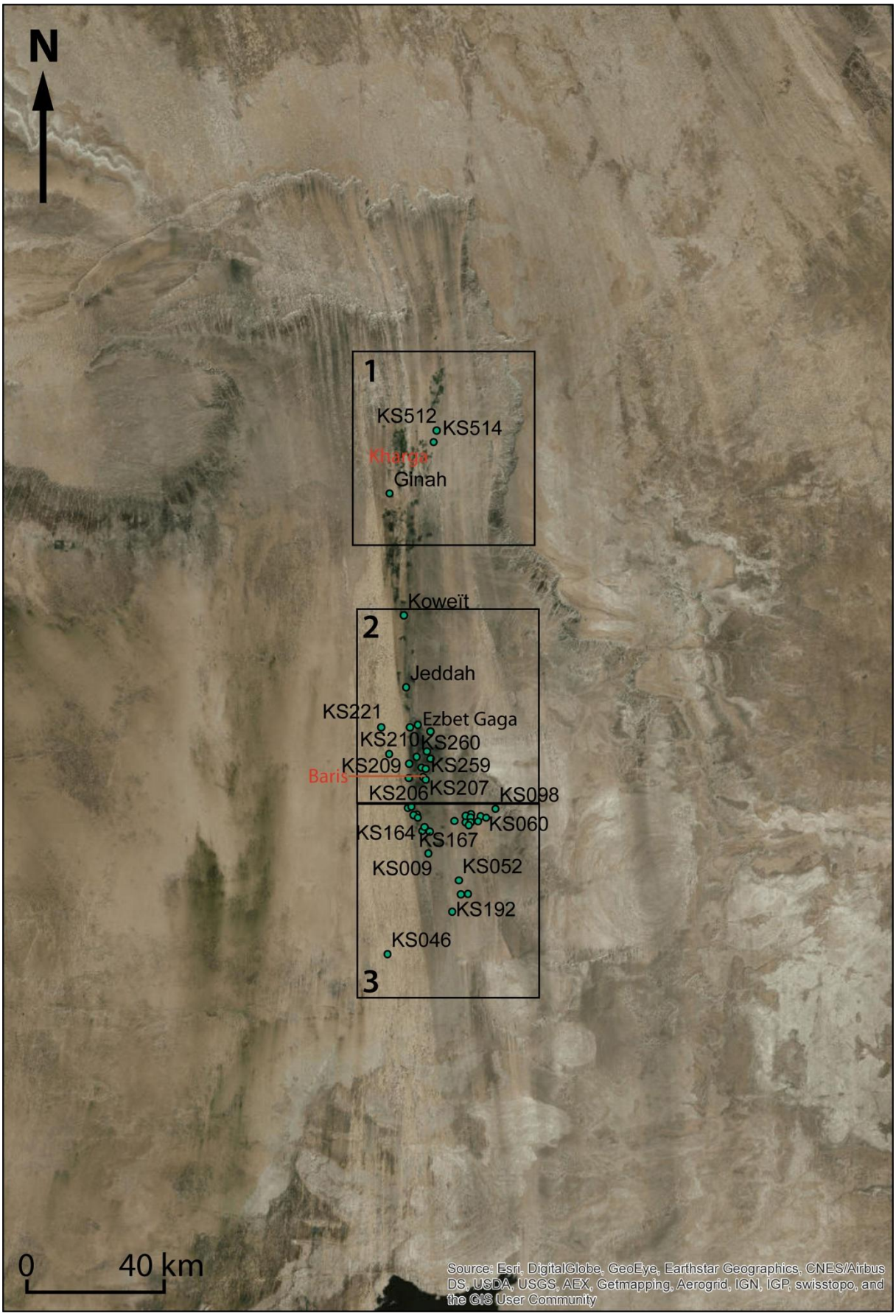


Figure 24 - Cartes des sites étudiés. Les trois cadres d'emprises correspondent aux figures 25 à 27.

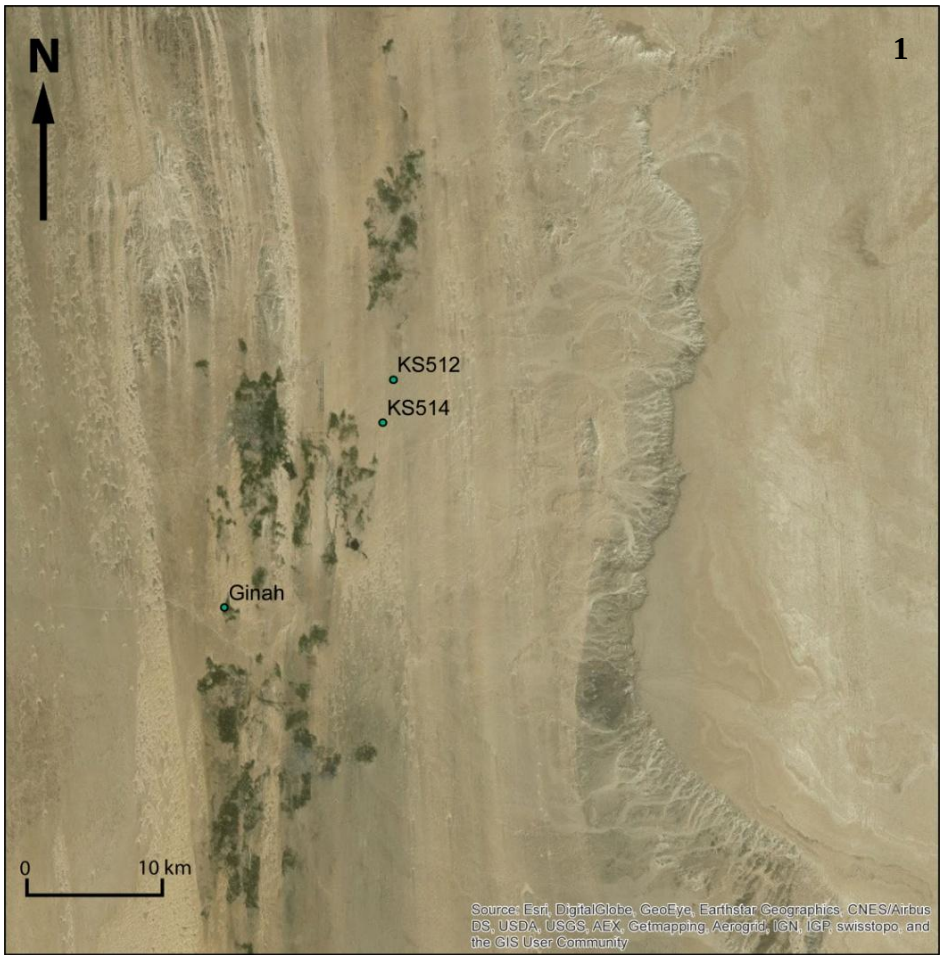


Figure 25 - Carte des sites étudiés dans le nord de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 1 de la figure 24).

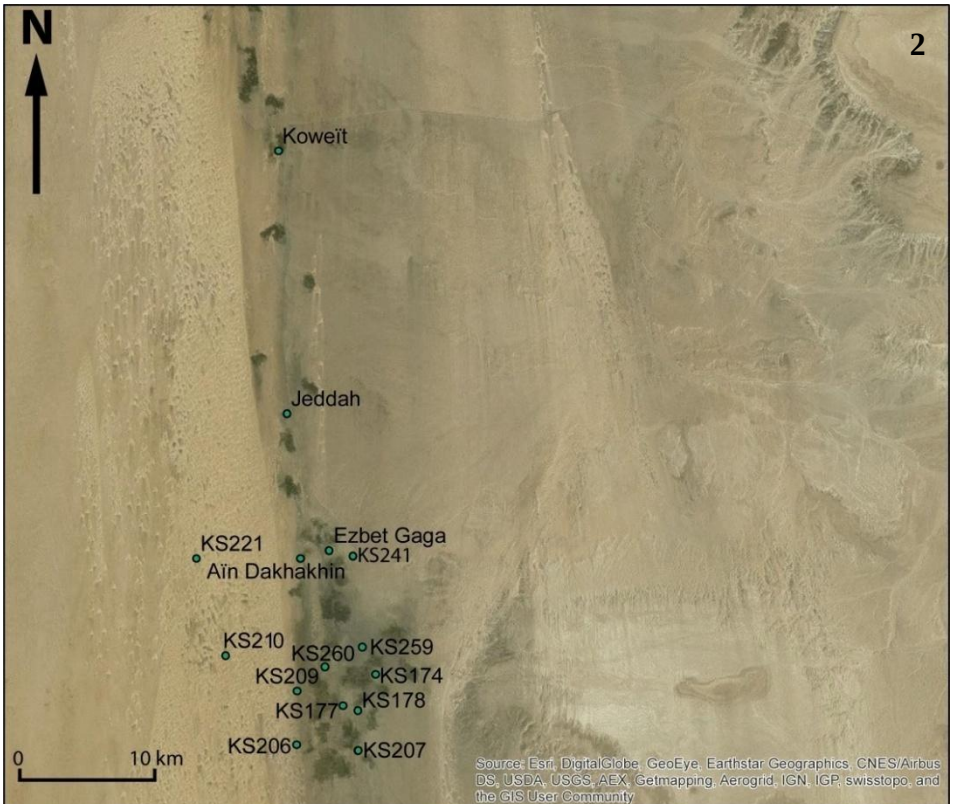


Figure 26 - Carte des sites étudiés en partie médiane de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 2 de la figure 24).

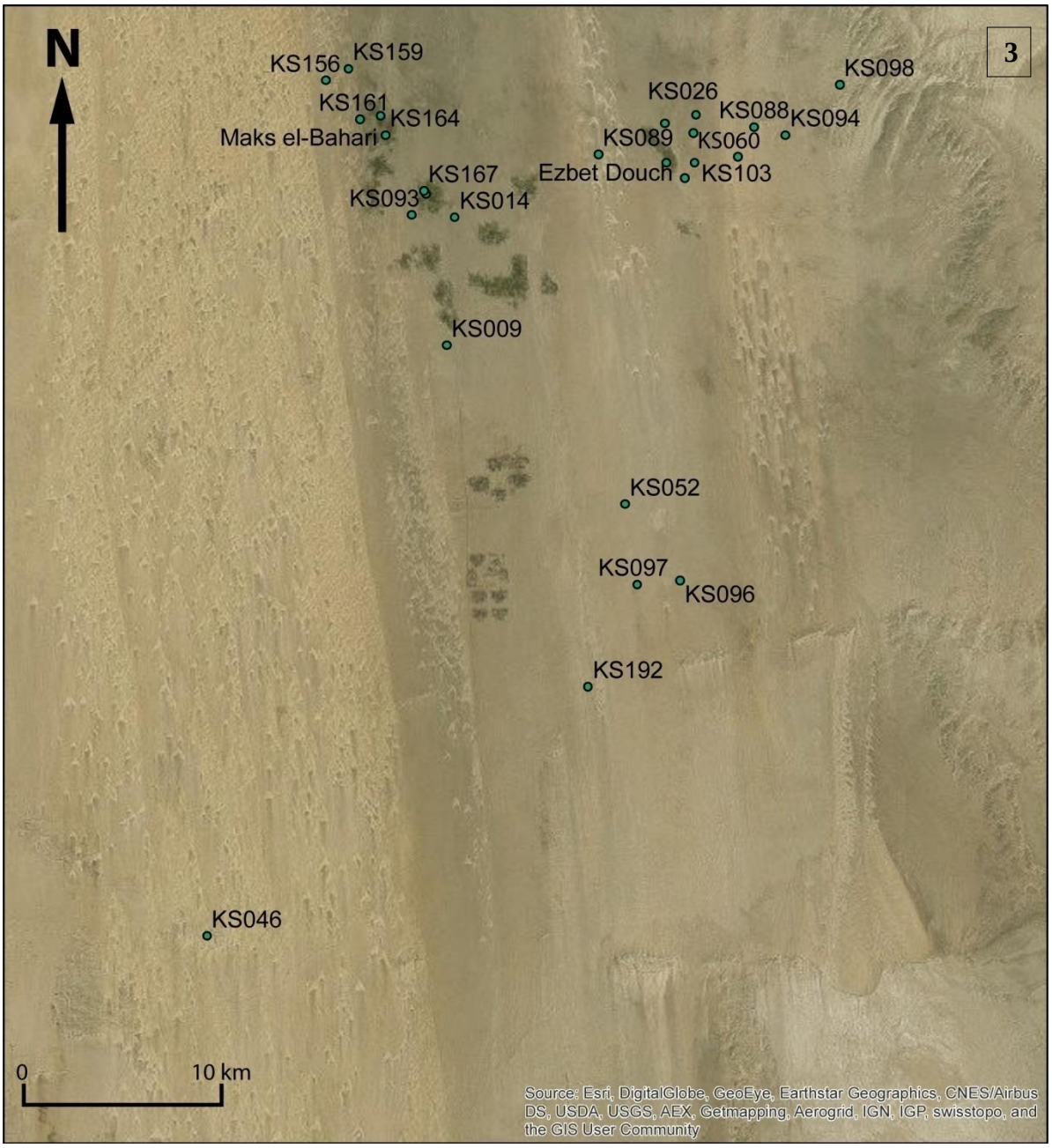


Figure 27 - Carte des sites étudiés dans le sud de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 3 de la figure 24).

IV.A. La butte témoin : KS046 - Gebel Bayyan el-Qibli

Située à l'extrême sud de la zone prospectée, cette butte témoin (tableau 4) de l'érosion du plateau s'élève à près de 80 m au-dessus de la plaine environnante (l'altitude maximale avoisine les 235 m). Constituée, de bas en haut, des formations géologiques Dakhla et Kurkur, elle correspond à un synclinal perché peu prononcé. Les pendages des couches ont facilité

l'érosion différentielle de la butte. Le site, au cœur de l'erg, porte les traces d'une corrasion éolienne intense (figure 28). Le site a été occupé durant la préhistoire, du Paléolithique au Prédynastique, en lien avec l'exploitation de silex contenus dans la formation Kurkur. Aucun vestige de source n'a été repéré sur le terrain ou sur les images satellitaires : les ressources en eau étaient probablement liées à des étendues d'eau temporaires (playas). L'aridification progressive de la région, en l'absence de source, pourrait expliquer l'absence de vestiges postérieurs à la période prédynastique. De plus, lors de la reprise de l'occupation de la région, à l'époque de la première domination perse, les sources de silex ne revêtaient plus la même importance. L'occupation et le contrôle du site ne présentaient plus guère d'intérêt.

Tableau 3 - Tableau récapitulatif du type de site sur butte témoin.

Butte témoin				
Toponyme	**Code IFAO**	**Période**	**Altitude (m)**	**Prospection**
Gebel Bayyan el-Qibli	KS046	Préhistoire	235	Oui

Les prospections, l'observation des images satellitaires et le recours à la bibliographie (Hermina 1990) ont permis de repérer, sans la visiter, une seconde butte de ce type, située à environ 18 km à l'est de la précédente.

Figure 28 - Corrasion éolienne sur les calcaires de la partie sommitale de la butte témoin KS046 - Gebel Bayyan el-Qibli. Prise de vue : novembre 2011.

IV.B. Les sites de plaine

Seize sites de plaine ont été étudiés depuis 2010 (tableau 5). Ils reposent tous sur la formation Quseir et sur des dépôts holocènes. Quatre sous-types des sites de plaine sont identifiables : les sites de playa, les sites sur puits, les sites sur puits et canaux exogènes et une nécropole.

Tableau 4 - Récapitulatif des sites de plaine. Certains sites, de par leur situation en plein désert, loin de toute source d'eau et de toute occupation humaine actuelle ou subactuelle, n'ont pas de toponyme.

Sites de plaine					
Type	**Toponyme**	**Code IFAO**	**Périodes**	**Altitude**	**Prospection**
Sites de playa		KS052	Préhistoire	77	Oui
		KS096	Préhistoire ; 6-7	82	Oui
		KS097	Préhistoire	85	Oui
		KS192	Préhistoire	88	Oui
	Aïn Gaga	KS241	Préhistoire	29	Oui
Sites sur puits	Aïn Mabrouka	KS009	1-4 ; 6	76	Non
	Aïn el-Waqfa	KS014	6-8	71	Non
	Aïn el-Aqil	KS071	Préhistoire ; 1 -4 ; 6	77	Oui
	Aïn el-Dushiyya	KS094	2-4 ; 6 ; 13	69	Oui
	Aïn el-Qa'qa'a	KS100	6 ; 13	70	Oui
	Aïn el-Quz	KS103	6 ; 13	68	Oui
	Aïn Tarfaya Bakir	KS206	7-8 ; 13	45	Non
Sites sur puits et canaux exogènes	Aïn Khalil	KS026	6-8 ; 13	63	Oui
	Aïn Birqis-est	KS259	7	33	Oui
Nécropole	Nécropole de Douch	KS022	2-4 ; 6-7	68	Oui

IV.B.1. Les sites de playa

Cinq sites appartiennent à ce sous-type dont quatre situés dans la partie la plus méridionale de la région (KS052, 096, 097 et 192), ce qui explique les altitudes relativement importantes (77 à 88 m), le fond de la dépression s'élevant progressivement vers le sud. Au contraire, le dernier site de ce type (KS241 - Aïn Gaga) se trouve bien plus au nord dans une dépression fermée emboîtée dans la grande dépression de Kharga, ce qui explique une altitude beaucoup plus faible (29 m). Tous ces sites partagent deux points communs : ils ont été occupés durant la préhistoire et des vestiges de playas y sont visibles (figure 10**,** p. 40, et figure 29). KS052 recèle des vestiges néolithiques, KS096 et 097 des vestiges paléolithiques, KS241 - Aïn Gaga des vestiges épipaléolithiques, et KS192 des vestiges du Paléolithique au Néolithique. Les

prospections de l'IFAO n'ont permis d'identifier des vestiges postérieurs à la Préhistoire que sur le site KS096, dont les seuls vestiges antiques peuvent correspondre à des traces de passage plus que d'occupation et d'exploitation des lieux. Ceci tend à confirmer que les étendues d'eau temporaires, à l'origine des dépôts de playas, constituaient la ressource principale en eau dans ce secteur. En leur absence, suite à l'aridification régionale, et en raison de la salinité des dépôts de playas, ces sites n'étaient pas les plus adaptés à l'agriculture pratiquée à partir de la première domination perse.

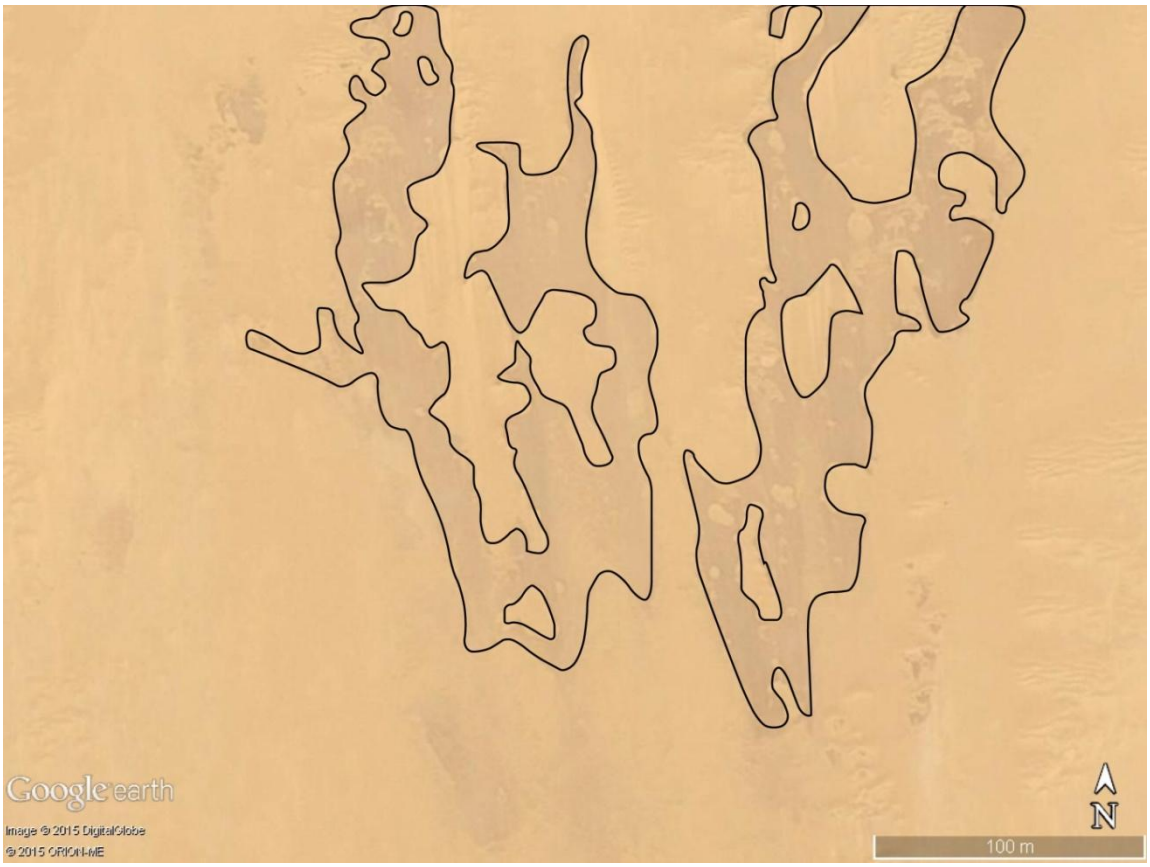


Figure 29 - Dépôts de playas érodés et partiellement recouverts de sable libre et de méga-rides éoliennes, au sud du site KS097. Les lignes correspondent aux limites des principaux dépôts de playas. Image satellitaire de mai 2010.

IV.B.2. Les sites sur puits

Sept sites correspondent à ce sous-type. Ils sont concentrés dans la partie sud de la dépression et leurs altitudes sont comprises entre 45 et 77 m. Hormis KS206 - Aïn Tarfaya Bakir, situé à proximité immédiate de Baris et KS009 - Aïn Mabrouka, situé plus au sud, les sites sur puits sont concentrés le long de l'axe d'un linéament tectonique est-nord-est/ouest-sud-ouest. Les remontées artésiennes, facilitées par la fracturation des roches sous-jacentes, ont entraîné la formation de nombreuses sources, souvent aménagées en puits. Les sources et les puits sont

reconnaissables aux accumulations de déblais et de sédiments déposés autour de leur tête (figure 9, p. 40) ou aux dépressions circulaires correspondant aux bassins de concentration d'eau des puits (figure 30). Autour de ces points d'eau, on observe des vestiges de parcellaires étendus, d'aqueducs, et parfois d'habitations. Un seul de ces sites (KS071 - Aïn el-Aqil) a livré des vestiges antérieurs à l'Antiquité (rares vestiges paléolithiques). Trois n'ont plus été occupés après la fin de l'Antiquité (KS009 - Aïn Mabrouka, KS014 - Aïn el-Waqfa et KS071 - Aïn el-Aqil). Les autres ont tous été réemployés au XIXe ou au XXe s. après un hiatus dans leur occupation de plus d'un millénaire. Beaucoup de ces sites contiennent les vestiges de nombreux puits successifs et/ou contemporains. Seul KS014 - Aïn el-Waqfa comporte un unique puits, mais il est probable que d'autres aient été recouverts par les cultures actuelles de l'oasis de Maks el-Qibli, qui grignotent le site à l'ouest et au nord.

Figure 30 - Parcellaires et puits sur le site KS094 - Aïn el-Dushiyya. Trois puits (localisés par les cercles) sont visibles : l'un d'eux est couvert de sédiment fin et de végétaux, à l'extrême nord-ouest, le second se situe au sud du premier et forme une dépression circulaire comblée de sables, et le troisième, situé plus à l'est et probablement curé au XIXe ou au XXe s., est entouré de déblais. Image satellitaire de mars 2004.

IV.B.3. Les sites sur puits et canaux exogènes

Deux sites appartiennent à ce sous-type, KS026 - Aïn Khalil (altitude : 63 m) et KS259 -Aïn Birqis-est (altitude : 33 m). Ces deux sites sont assez semblables à ceux du sous-type précédent mais les apports des sources et puits sont complétés ou suppléés par des canaux et

des aqueducs en provenance de puits situés hors des sites (1,7 km et 3,6 km au sud pour KS026 -Aïn Khalil, 750 m au sud et 2 km au sud-ouest pour KS259 - Aïn Birqis-est). Le plus long de ces canaux encore visible dans son intégralité irrigue KS259 - Aïn Birqis-est : on observe les vestiges de son cours sur plus de 2,6 km. Un dernier kilomètre a pu être repéré sur les images satellitaires, pour un total de 3,6 km environ, mais le caractère fragmentaire des vestiges complique l'identification et interdit toute certitude qu'il s'agisse bien du même canal. Le site KS026 - Aïn Khalil a été occupé du Ier au IIIe s. de notre ère puis réoccupé au XIXe et au XXe s. : la datation des canaux exogènes est donc incertaine, et une partie au moins du canal venu du sud a été construite ou reconstruite à l'époque moderne. KS259 - Aïn Birqis-est n'ayant été occupé qu'au Ve s., le doute n'est en revanche pas permis, les canaux repérés sur ce site ont bien été construits durant l'Antiquité. Les parcellaires du site KS026 - Aïn Khalil sont très bien conservés et particulièrement visibles sur les images satellitaires (figure 31) alors qu'ils sont difficiles à repérer sur le site KS259 -Aïn Birqis-est où les parcellaires ont été érodés en yardangs par la corrasion éolienne (figure 32).

Figure 31 - Parcellaires et principaux canaux (en traits pointillés) du site KS026 - Aïn Khalil. Le canal visible au sud-est tirait son eau d'un puits situé à plus de 3 km au sud, sur le site KS103. Image satellitaire d'octobre 2011. L'un des puits du site (signalé par un cercle) est également visible à l'extrême nord-est, entouré d'une couronne de déblais et d'un chenal d'écoulement vers le sud-sud-est. Image satellitaire de mars 2004.

Figure 32 - Partie sud-est du site KS259 - Aïn Birqis-est. Deux canaux (signalés par les pointillés) en provenance de KS260 sont bien visibles. Les parcellaires, au contraire, ont été tellement érodés qu'ils ne sont plus visibles. Fragmentaires, ils ont pu être détectés au sommet des yardangs lors des prospections. Image satellitaire de mars 2010.

IV.B.4. La nécropole de Douch

Située à 68 m d'altitude, au nord du grand site de KS060 - Tell-Douch, la nécropole de Douch (KS022) se situe à distance des vestiges d'habitations et de cultures, au sein d'un affleurement de grès recouvrant des marnes et des bancs de gypse. Aucun puits et aucune source n'ont été repérés à proximité immédiate. Ce site dévolu aux sépultures durant les IVe et IIIe s. avant notre ère, puis du Ier au IVe s. de notre ère, semble avoir été installé en marge des lieux occupés par les vivants. D'autres secteurs de la région disposent de nécropoles situées en marge des sites d'habitation.

IV.C. Les sites de l'erg, malgré le sable ?

Les archéologues de l'IFAO ont découvert, au fil des missions, un grand nombre de sites situés dans l'erg qui traverse la dépression du nord au sud. La plupart de ces sites recèlent à la

fois des vestiges préhistoriques et des vestiges d'époque romaine (du Ier au Ve s.). Seuls deux sites de ce type ont été étudiés sur le terrain (tableau 6

Tableau 5). Aucun des sites non prospectés au sol n'a été étudié, car la présence de sables vifs recouvrant partiellement les sites perturbe profondément la lecture et l'analyse des images satellitaires (figure 33). Une trentaine de parcellaires ont toutefois été identifiés grâce à ce type de document.

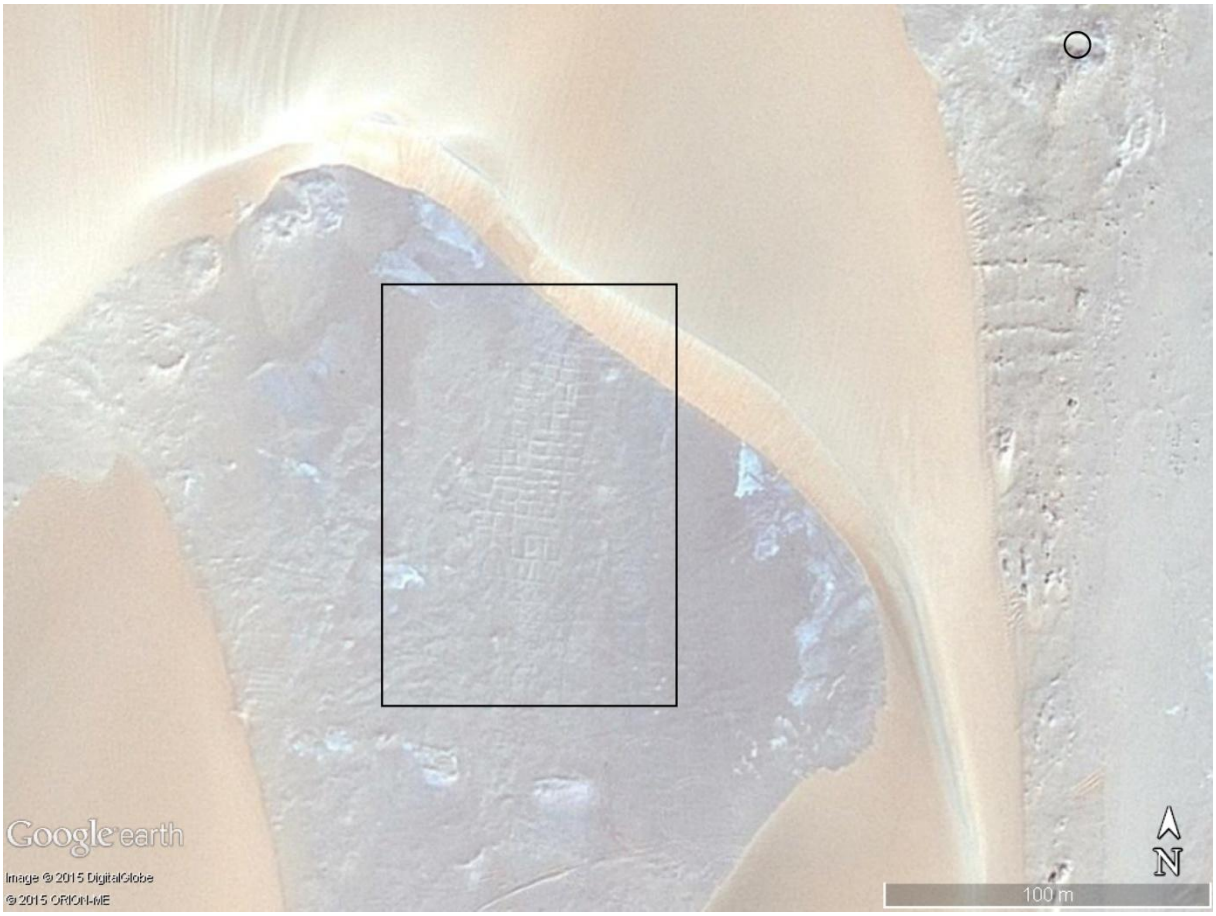


Figure 33 - Vestiges de parcellaire romain (dans le cadre) partiellement recouverts par une dune, au cœur de l'erg, sur le site KS221. Au nord-est, on observe la présence d'un puits (signalé par un cercle), marqué par une dépression très abrupte au sein d'une petite butte (bassin du puits et écoulement vers l'ouest). Image satellitaire de février 2010.

Les deux sites étudiés (KS210 et KS221) présentent à la fois des vestiges datés du Ier ou du IIe s. de notre ère, et des traces d'occupations préhistoriques. KS210 se situe dans un secteur de plaine (altitude 53 m) alors que KS221 occupe une colline gréseuse et son piémont. Les parcellaires, les vestiges de palmeraies et d'un important réseau d'irrigation (des qanâts ont même été repérés) visibles dans les fenêtres interdunaires témoignent d'activités agricoles bien développées (figures 33 et 34). La présence de bâtiments d'habitation sur place, l'importance des travaux d'irrigation et le nombre de sites présents dans l'erg, en différentes périodes de l'époque romaine, indiquent une occupation pérenne, au moins à l'échelle de l'erg,

ce qui est très surprenant. La quantité de sables vifs et le mouvement de certaines dunes constituent en effet une contrainte majeure pour l'installation de sites agricoles. L'erg était-il un milieu très différent à l'époque ? L'explication doit-elle être cherchée du côté d'une adaptation locale des pratiques agricoles, voire d'un aménagement volontariste du territoire ? L'occupation de ce secteur dépend-elle à la fois d'un changement environnemental et d'un aménagement du territoire ?

Tableau 5- Récapitulatif des sites de l'erg. De par leur situation en plein désert, loin de toute source d'eau et de toute occupation humaine actuelle ou subactuelle, ils n'ont pas de toponyme.

Sites de l'erg			
Code IFAO	**Périodes**	**Altitude (m)**	**Prospection**
KS210	Préhistoire ; 6	53	Oui
KS221	Préhistoire ; 6	80	Oui

Figure 34 - Parcellaire et canal d'irrigation d'époque romaine sur le site KS221, au cœur de l'erg. Le canal visible ici se prolonge de l'autre côté de la dune, d'où la photographie a été prise. Prise de vue : novembre 2010.

IV.D. Les collines de grès d'origine tectonique : des châteaux d'eau naturels

Six sites correspondent à ce type (tableau 7) : deux d'entre eux (KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams et KS514 - Aïn Harran) se trouvent dans l'extrême nord de la zone d'étude alors que les quatre autres (KS060 - Tell-Douch, KS088 - Aïn Ziyada, KS89 - Aïn Manawir et KS98 - Aïn Boreq) se situent en partie sud. L'étude des sites du nord a été très brève (moins d'une journée de terrain pour les deux sites) alors que les sites du sud font partie des sites les mieux étudiés durant nos travaux.

Tableau 6 - Récapitulatif des collines de grès d'origine tectonique. Pour les collines du nord, prospectées et étudiées depuis peu par les archéologues de la mission, les informations demeurent incomplètes : les phases ne sont donc pas précisées.

Collines de grès d'origine tectonique					
Type	**Toponyme**	**Code IFAO**	**Périodes**	**Altitude (m)**	**Prospection**
Collines du nord	Aïn Sour Matla' el-Shams	KS512	Préhistoire ; Antiquité (ind.)	60	Oui
	Aïn Harran	KS514	Préhistoire ; Antiquité (ind.)	57	Oui
Collines du sud	Tell-Douch	KS060	Préhistoire ; 1-2 ; 4 ; 6-8	101	Oui
	Aïn Ziyada	KS088	Préhistoire ; 2-7	93	Oui
	Aïn Manawir	KS089	Préhistoire ; 0 ; 1-2 ; 4 ; 6 ;	125	Oui
	Aïn Boreq	KS098	Préhistoire ; 1-4 ; 6	94	Oui

IV.D.1. Les collines d'origine tectonique du nord

KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams et KS514 - Aïn Harran sont deux collines taillées dans la formation de Taref, portée ici en situation dominante par la tectonique et le jeu des failles. Elles avoisinent les 60 m alors que la plaine environnante se situe à environ 40 m d'altitude. Au pied des collines, le substrat est constitué par la formation Maghrabi, elle aussi portée en altitude. Ces deux sites présentent à la fois des vestiges antiques et préhistoriques. A KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams, la céramique découverte indique une occupation de la seconde dynastie jusqu'à l'époque byzantine (Marchand 2013). A KS514, l'analyse de la céramique n'a pas encore été menée, mais le site semble particulièrement développé à l'époque romaine.

Les installations antiques sont organisées autour de sources recreusées en puits, sur et à proximité des collines depuis lesquelles des aqueducs rayonnent vers des parcellaires situés dans la plaine et sur les piémonts (Wuttmann et *al*. 2013). Le nombre important de sources, de puits, et les surfaces de parcellaires peuvent s'expliquer par l'hydrogéologie locale : la

formation de Taref constitue un aquifère qui n'est séparé de l'aquifère artésien de la formation de Sabaya que par l'aquiclude de la formation de Maghrabi. Dans un secteur très faillé, les communications entre les deux aquifères peuvent être maximales. La faible altitude des collines a probablement renforcé ce phénomène en permettant des remontées artésiennes pérennes à l'échelle de ces collines. Ce phénomène de recharge par la pression artésienne d'un aquifère perché se révèle particulièrement utile pour mettre en place et maintenir une irrigation par gravité.

IV.D.2. Les collines d'origine tectonique du sud

Situées le long du même linéament tectonique que cinq des sites de plaine sur puits (*cf. supra*, KS014 - Aïn el-Waqfa, KS071 - Aïn el-Aqil, KS094 - Aïn el-Dushiyya, KS100 - Aïn el-Qa'qa'a et KS103 - Aïn el-Quz), ces quatre collines s'alignent de l'est-nord-est vers l'ouest-sud-ouest. Nées du soulèvement de la formation de Taref, elles dominent le fond de la dépression, constitué aux dépens de la formation de Quseir (Bousquet 1996). La plus haute d'entre elles (KS089 - Aïn Manawir) culmine à 125 m, et la plus basse (KS088 - Aïn Ziyada) atteint 93 m alors que l'altitude de la plaine environnante oscille entre 60 et 78 m. KS060 - Tell-Douch, KS088 - Aïn Ziyada et KS089 - Aïn Manawir sont dissymétriques : leur versant nord est bien plus abrupt que le versant sud, et elles sont plus étendues sur l'axe est-ouest. En raison de la proximité du plateau et des glacis qui en constituent le front, KS098 - Aïn Boreq ne donne sur la dépression que vers l'ouest et le nord-ouest. Dans les autres directions, elle est en contact plus ou moins direct avec les glacis à l'est et au sud, avec un paléo-oued au nord. À l'extrémité occidentale de cette série de collines, KS089 - Aïn Manawir est actuellement traversé par un cordon de barkhanes, du nord vers le sud. Les environs immédiats des quatre collines sont constitués de dépôts de sédiment fin, principalement sur les versants nord. À Tell-Douch, un sondage de 7 m de profondeur effectué par B. Bousquet (1996) n'a pas permis d'atteindre le substrat. Un sédiment d'apparence semblable constitue également la plupart des yardangs (mesurant parfois plusieurs mètres de haut) repérés sur ces quatre sites. Ce dépôt est donc épais. Les yardangs sont très nombreux à KS060 - Tell-Douch et KS088 -Aïn Ziyada, mais beaucoup plus rares à KS089 - Aïn Manawir et KS098 - Aïn Boreq. B. Bousquet et M. Robin (1999) interprètent ces dépôts comme des limons éoliens et insistent sur leur fonction, centrale, de terres arables.

En raison de la fracturation et de la porosité des grès de Taref, ces collines constituent un aquifère perché, aujourd'hui complètement vide d'eau. Avant la baisse de la surface piézo-

métrique, l'artésianisme du système aquifère des grès de Nubie permettait la mise en charge de ce véritable « château d'eau » (Bousquet 1996). On observe de nombreux indices de la présence ancienne de ces nappes et de la végétation qu'elles ont entretenu : griffons de sources artésiennes, concrétions carbonatées et ferrugineuses, manchons de $CaCO_3$ (carbonates de calcium) originellement racinaires liés à la végétation, vitrification et rubéfaction dues à des feux de brousse, aménagements humains liés à l'exploitation des nappes. Les vestiges d'occupation humaine postérieure à l'aridification holocène, dont des puits et des qanâts antiques creusés dans les collines sont nombreux sur ces sites.

Figure 35 - Colline de Tell-Douch vue depuis l'ouest-nord-ouest. Au premier plan, le fond de la dépression est couvert de croûtes salées et de sable vif. Prise de vue : décembre 2011.

À KS060 - Tell-Douch (figure 35), les travaux de l'IFAO ont permis d'identifier des campements temporaires à proximité de sources artésiennes durant de la fin de la période prédynastique aux premiers siècles de l'Ancien Empire. Un foyer a ainsi pu être daté de cette dernière période, vers 4 800 BP (Wuttmann *et al.* 1998). De l'époque perse (Ve s. avant notre ère) à la fin de l'époque romaine (V^{e} s.de notre ère), cette colline et son pourtour ont été densément occupés et cultivés. De très nombreux vestiges de bâtiments, de qanâts et de parcellaires témoignent de l'existence d'une agglomération et d'une agriculture fondée sur l'exploitation des eaux du sous-sol (Bousquet 1996 ; Reddé 2004).

À KS088 - Aïn Ziyada (figure 36), se trouvent des concentrations lithiques antérieures à la période prédynastique autour de griffons de sources et des vestiges d'époques perse (Ve s. avant notre ère) à romaine (Ve s. de notre ère) sous forme de bâtiments, de parcellaires et de qanâts (Bousquet 1996).

À KS089 - Aïn Manawir (figure 37) sur l'extrémité est de la colline, un gisement épipaléolithique associé à une source artésienne a été étudié (Briois *et al.* 2008). La partie centrale de la colline fut occupée durant l'Antiquité, sur son front nord, par une agglomération dont subsistent les vestiges d'un temple d'époque perse et de maisons, de nombreux parcellaires et des ouvrages hydrauliques : de nombreux qanâts y ont fonctionné de l'époque perse à la fin de la période romaine (Wuttmann *et al.* 2000).

À KS098 - Aïn Boreq (figure 38), les missions successives de l'IFAO ont permis la découverte de vestiges préhistoriques (paléolithiques, épipaléolithiques et prédynastiques) et de nombreux aménagements datés de l'époque perse (Ve s. avant notre ère) à l'époque romaine (Ier et IIe s.de notre ère) : parcellaires, bâtiments, puits, qanâts et hydragogues[21].

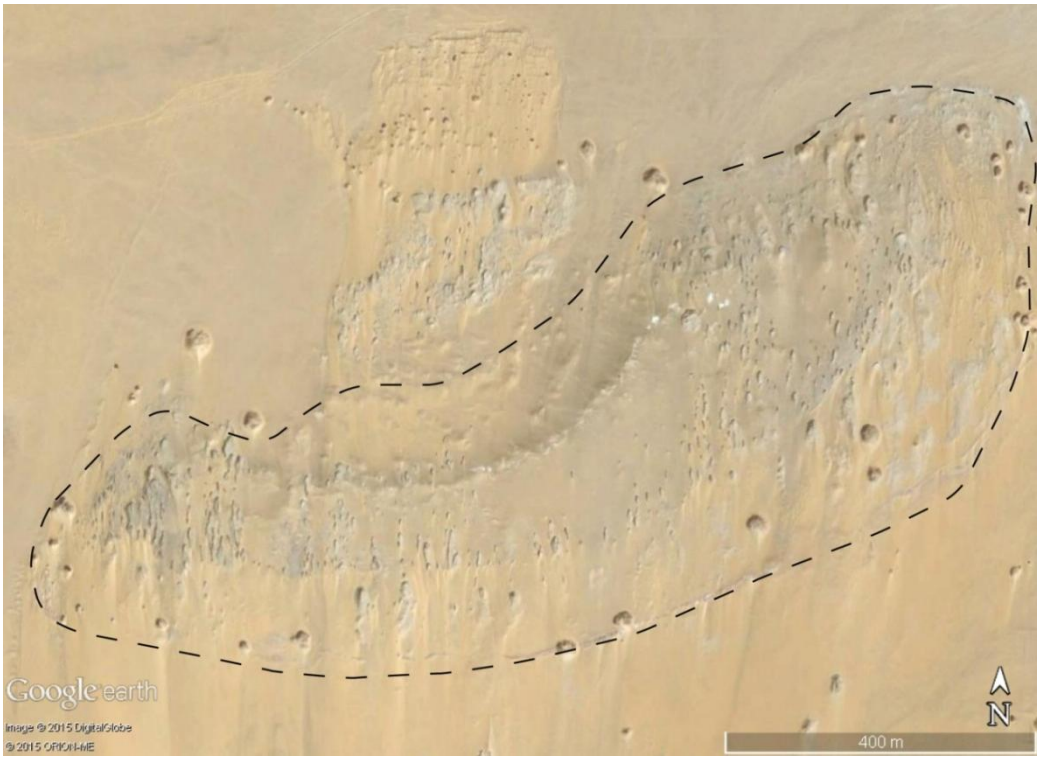


Figure 36 - Colline d'Aïn Ziyada (partie nord du site KS088, délimitée par les pointillés). De très nombreux yardangs et vestiges de tertres artésiens érodés par le vent y sont visibles. À l'extrême nord, on observe d'anciennes dune-afregs[22] abandonnés. Image satellitaire de mars 2004.

[21]. Les hydragogues, généralement constitués d'un emboîtement de tubes ou d'auges en céramique, servent à transporter l'eau jusqu'aux parcelles. Synonyme d'aqueduc pour les époques perse et ptolémaïque.

[22]. Les dune-afregs sont des édifices dunaires formés autour d'une haie de palmes ou d'une barrière mise en place dans le but de stopper le sable au vent des cultures et des villages (*cf.* chapitre X)

Ces quatre sites constituent donc un ensemble plutôt homogène, malgré des disparités locales, de collines-réservoirs. Les nappes perchées qui ont pu s'y former et se maintenir durant certaines périodes de l'Holocène ont constitué, comme à KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams et àKS514 - Aïn Harran, un atout essentiel pour la mise en place et le maintien de l'agriculture irriguée par gravité.

Figure 37 - Colline de KS089 - Aïn Manawir vue depuis le nord. A gauche, on repère le bout d'une des barkhanes appartenant au cordon qui traverse le site. Sont également visibles le tracé du qanât MQ4 (repérable à la série de murets en brique reconstruits par l'IFAO) et l'agglomération d'époque perse, au débouché de l'ouvrage. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 38- Extrémité est de la colline de KS098 - Aïn Boreq (délimitée par les pointillés). Le parcellaire ptolémaïque bien visible, et tributaire de qanâts perçant la colline, occupe le fond d'un paléo-oued. Son état de conservation indique donc que l'oued n'a plus connu de crues importantes depuis plus de deux millénaires.

IV.E. Les buttes de sédiment fin : une genèse récente ?

Dix sites appartiennent à ce type (tableau 8), auquel on aurait pu rajouter, si elles n'étaient pas occupées par des oasis actuelles, les buttes d'Aïn Dakhakhin et Ezbet Gaga (*cf. infra*)[23]. Ces formations superficielles reposant sur la formation de Quseir se situent toutes dans la zone de la « playa de Baris » et certaines d'entre elles ont été interprétées comme des dépôts de playas (Hermina 1990 ; Nofal 2002 ; Embabi 2004). La hauteur de ces buttes (de 2 à 26 m) et la présence de vestiges antiques ou médiévaux en place dans le sédiment contredisent cette interprétation, même si des dépôts de playas sont effectivement visibles à proximité de ces sites, sur le fond de la dépression et dans les parties superficielles du sous-sol. Ces buttes seraient donc juxtaposées ou superposées aux dépôts de playas, mais n'en seraient pas elles-mêmes. Ces buttes sont actuellement soumises à des phénomènes érosifs éoliens très actifs, entraînant la corrasion des dépôts et la formation de yardangs. Trois sous-types de ces sites ont été repérés : les buttes basses, les buttes disséquées et les buttes peu érodées.

Tableau 7 - Récapitulatif des « buttes de sédiment fin ». La hauteur indiquée correspond à la différence entre l'altitude du point culminant de la colline et celle de la plaine environnante. Les points d'interrogation indiquent que l'occupation durant la ou les phases concernées est incertaine.

Buttes de sédiment fin						
Type	**Toponyme**	**Code IFAO**	**Périodes**	**Altitude (m)**	**Hauteur (m)**	**Prospection**
Buttes basses	Aïn Foq	KS093	Préhistoire ; 6-7 ; 11 ; 12 ?	72	9	Non
	Aïn el-Qasir	KS164	8-9	58	2	Oui
	Aïn el-Fatima	KS167	9 ; 13	72	7	Non
	Shams el-Din	KS177	7-8	40	2	Non
Buttes disséquées	Aïn el-Haweisha	KS156	6 ; 12-13 ?	61	6	Non
	Aïn Zabiba	KS161	6-10 ; 13 ; 11-12 ?	65	10	Oui
	Aïn el-Mansouriya	KS209	7-9 ; 11-13	46	8	Oui
Buttes peu érodées	Aïn Bella	KS159	6-8 ; 12-13	63	13	Non
	Aïn Tafnis	KS174	10 ; 13	53	13	Non
	Aïn el-Mattrahiyya	KS178	7-8 ; 10 ; 12-13	54	15	Oui
	Aïn Fila	KS207	12-13	60	14	Non
	Aïn Birqis	KS260	7 ; 10 ; 13	59	26	Oui

[23]. Les activités agricoles actuelles perturbant l'étude géomorphologique des sites, nous avons préféré mentionner et étudier l'ensemble des oasis actuelles à part, bien qu'elles prennent place soit en plaine, soit sur des buttes des sédiments fins, et se rapprochent en cela des sites décrits en IV.B et en IV.E.

IV.E.1. Les buttes basses couvertes de sites antiques

Quatre sites appartiennent à ce sous-type : KS093 - Aïn Foq, KS164 - Aïn el-Qasir, KS167 - Aïn el-Fatima et KS177 - Shams el-Din. D'une hauteur comprise entre 2 et 9 m, ces buttes sont les plus basses étudiées. S'élevant peu au-dessus de la plaine, elles sont constituées des tertres d'un ou de deux puits et de dépôts de sédiment fin sur lesquels sont localisés des bâtiments et des parcellaires (sauf à KS167 - Aïn el-Fatima, mais les parcellaires y ont probablement été recouverts ou détruits par les installations postérieures et/ou les cultures actuelles). Hormis KS093 - Aïn Foq, les sites de ce sous-type sont caractérisés par une occupation relativement courte et plutôt ancienne : le site KS177 - Shams el-Din (figure 39) n'a livré des vestiges que pour les IVe et Ve s. de notre ère, KS164 - Aïn el-Qasir semble n'avoir été occupé que du Ve au VIe ou VIIe s. de notre ère, KS167 - Aïn el-Fatima aurait été occupé au VIe ou au VIIe s. et les céramiques des XIXe et XXe s. ne seraient qu'une pollution issue du village voisin de Maks el-Qibli. Au contraire, KS093 - Aïn Foq, la plus haute de ces trois buttes, aurait été occupée à l'époque romaine (du Ier au IIIe s. de notre ère), au Moyen-Âge (du XIIIe au XVe s.) et peut-être durant la période ottomane (du XVIe au début du XIXe s.). Ce site présente aussi des vestiges antérieurs à l'Antiquité, datés de la période prédynastique, et recouverts par les parcellaires romains. Dans les secteurs où la déflation a été particulièrement active, les vestiges romains et prédynastiques sont mélangés en surface.

Figure 39 - Butte de KS 177 - Shams el-Din (contours en pointillés). La portion la mieux conservée, au sud, correspond à l'un des anciens puits (signalé par un cercle). Image satellitaire de mars 2010.

IV.E.2. Les buttes disséquées, témoin de fortes dynamiques érosives

Ce sous-type regroupe 3 buttes tellement affectées par la corrasion éolienne qu'on en distingue difficilement les limites et qu'on en devine seulement l'existence à l'étendue et à la hauteur des yardangs et des restes de puits érodés. KS156 - Aïn el-Haweisha (figure 40), située en marge orientale de l'erg, est de loin la butte la plus érodée : elle ne se situe plus que 6 m au-dessus de la plaine environnante et seuls 3,7 ha sont encore couverts de yardangs, alors qu'elle pourrait avoir s'être étendue sur une surface de près de 25 ha (en supposant la continuité de la butte dans les secteurs de yardangs et en y ajoutant le secteur de yardangs et le puits récemment découvert par le déplacement de la dune située au nord). Le stock de sable vif et le nombre de jours de vent efficace par an, combinés à la faible extension des occupations postérieures à l'époque romaine, pourraient être à l'origine de cette ablation très prononcée. L'extension maximale du site daterait en effet des Ier et IIe s. de notre ère et les secteurs cultivés lors de périodes plus récentes sont très réduits.

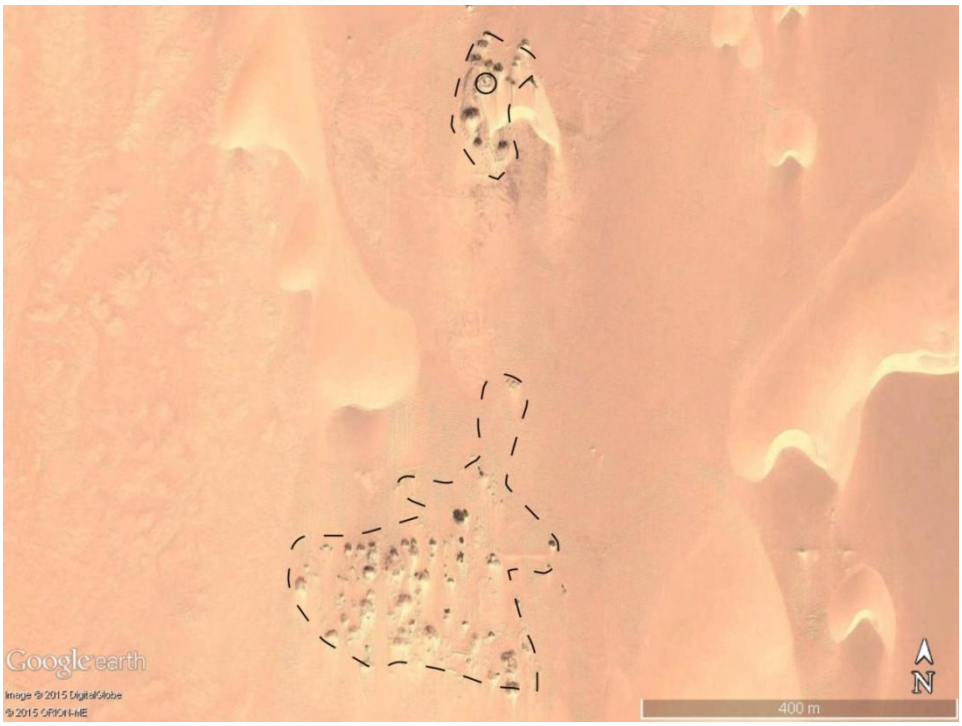


Figure 40 - Vestiges de la butte KS156 - Aïn el-Haweisha (contours en pointillés). La partie sud n'est plus visible que par quelques *rebdous*[24] et yardangs ; la partie nord, partiellement recouverte par une barkhane, est un peu mieux conservée et on y observe encore un puits (signalé par le cercle).

[24]. Tertre ou butte sableuse et limoneuse se constituant autour d'arbustes ou d'arbres. Leur surface est faible et dépend de la répartition des végétaux susceptibles de survivre à un dépôt sédimentaire rapide. Plus le *rebdou* devient haut, plus les végétaux croissent, permettant la formation progressive de buttes de plusieurs mètres de hauteur s'il s'agit d'arbres tels que les tamarix. Dans le sud de la dépression de Kharga, ils atteignent fréquemment 5 à 6 m de hauteur et peuvent dépasser les 8 mètres.

KS209 - Aïn el-Mansouriya (figures 41 et 42) présente, sur près de 19 ha, les vestiges d'une ancienne butte que la corrasion a transformée en yardangs. La hauteur maximale de la butte, à proximité du puits principal, est de 8 m, et les yardangs les plus bas, en partie nord, mesurent un peu moins de 3 m. Les vestiges archéologiques, le faciès des yardangs et la superposition de parcellaires d'époques différentes indiquent que cette butte s'est constituée, au moins pour les parties supérieures, depuis la fin de l'époque romaine : les vestiges les plus anciens, recouvert par endroits par plusieurs mètres de sédiment datent du Ve s. de notre ère. La couverture sédimentaire de ces vestiges, dont il ne reste aujourd'hui que des yardangs a été employée à des fins agricoles à l'époque médiévale (entre le XIIIe et le XVe s.) et jusqu'au XIXe s. : le sommet des yardangs présente donc des lambeaux de parcellaires et de palmeraies. L'érosion semble avoir été extrêmement rapide dans ce secteur : là encore, la proximité de l'erg et les dynamiques éoliennes régionales semblent en avoir été les principaux facteurs.

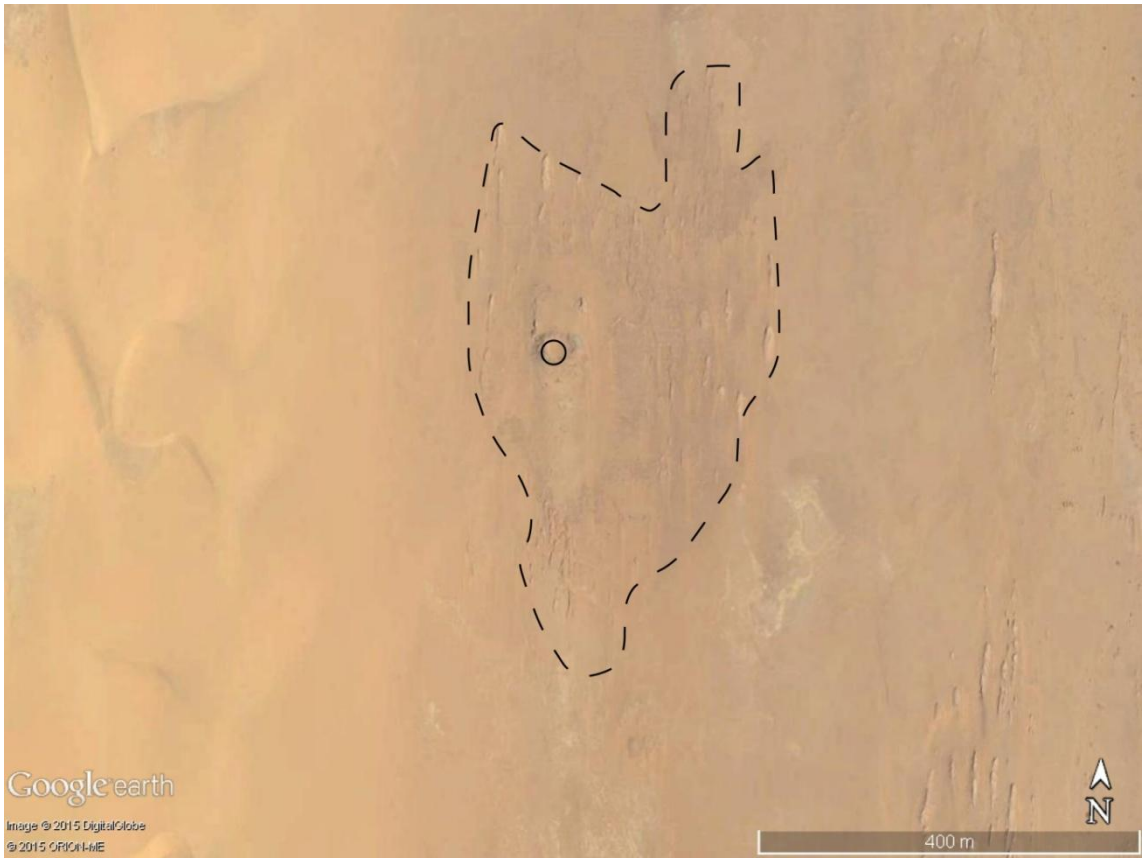


Figure 41 - Partie centrale des vestiges de la butte KS209 - Aïn el-Mansourya (contours en pointillés). La zone concernée par les yardangs se prolonge à la fois au nord et au sud. Le point culminant se situe sur la couronne de déblai du grand puits (signalé par un cercle), recreusé à plusieurs reprises depuis l'époque romaine. L'erg, visible à l'ouest, couvre une partie du site. Image satellitaire de mars 2010.

Figure 42 - Vue de la partie sud de KS209 depuis le puits principal de KS209- Aïn el-Mansourya. Les yardangs sombres visibles au pied de la pente recouvrent des installations romaines, et sont coiffés par un jardin d'époque médiévale. Prise de vue : décembre 2011.

KS161 - Aïn Zabiba (figure 43), dernier site rattaché à ce sous-type, présente, sous la forme d'un méga-yardang, les vestiges d'une butte de sédiment fin organisés autour d'un puits. Les vestiges de la butte recouvrent une surface de près de 40 ha. Ce site est partiellement réoccupé par les cultures actuelles et, si l'on étend la mesure à l'ensemble du secteur concerné par les méga-yardangs et les buttes-témoins associées, la surface de la butte pourrait avoir dépassé les 60 ha. La hauteur maximale des dépôts, dont la partie nord repose directement sur un parcellaire d'époque romaine est de 10 m, confirmant un dépôt récent et rapide, incompatible avec l'hypothèse des playas précédemment citée.

Les prospections de l'IFAO indiquent que ce site a été occupé durablement depuis l'Antiquité : les vestiges découverts s'étalent du Ier au XIe s. de notre ère et certains parcellaires ont été réemployés aux XIXe et XXe s. L'occupation du site entre le XVe et le XVIIIe s. est également possible : les analyses de S. Marchand[25] (communication personnelle) montrent que certaines céramiques pourraient être postérieures aux périodes médiévales.

[25]. Sylvie Marchand, ingénieure de recherche à l'IFAO, éditrice des Cahiers de la Céramique Égyptienne et des Bulletins de Liaison de la Céramique Égyptienne.

Figure 43 - Mega-yardang, vestiges de la butte d'Aïn Zabiba dominant la plaine environnante de 10m. Au premier plan, culture de maïs de l'oasis actuelle de Maks el-Bahari recolonisant un parcellaire d'époque romaine partiellement recouvert par la butte. Le méga-yardang, formé par la corrasion éolienne, a été largement retouché du fait de prélèvements de sédiment par les agriculteurs locaux. Prise de vue : novembre 2012.

IV.E.3. Les buttes peu érodées, récemment abandonnées

Le dernier sous-type regroupe cinq buttes particulièrement bien conservées malgré des marques de corrasion et d'ablation éoliennes. Ces buttes ont toutes pour point commun un abandon tardif, au cours du XXe s. KS174 - Aïn Tafnis, KS178 - Aïn el-Matrahiyya et KS260 - Aïn Birqis, les trois buttes les moins érodées, ont même été abandonnées après les années 1960 : les vestiges de cette occupation tardive sont particulièrement bien conservés et R.M. Anwar a intégré les puits de ces sites dans son analyse des eaux d'irrigation de la région de Baris (Anwar 1959).

Le sommet de la plus basse de ces buttes (KS159 - Aïn Bella) domine la plaine environnante de 13 m alors que la plus haute (KS260 - Aïn Birqis) mesure 26 m. Elles couvrent de grandes superficies, du même ordre de grandeur que celles reconstituées pour les buttes disséquées : plus de 12 ha pour KS178 - Aïn el-Matrahiyya, 31 ha pour KS207 - Aïn Fila, 48 ha pour KS174 - Aïn Tafnis, 57 ha pour KS159 - Aïn Bella, et plus de 85 ha pour KS260 - Aïn Birqis.

En l'état actuel des prospections de l'IFAO, KS174 - Aïn Tafnis n'a livré des vestiges d'occupations que pour le Moyen-Âge (entre le VIIIe et le XIe s.) et le XXe s..

KS 207 - Aïn Fila n'aurait été occupé, au plus tôt, qu'à partir du XVIe s., et jusqu'au XXe s. Au contraire, les autres sites ont été occupés plus durablement.

Figure 44 - Butte KS159 - Aïn Bella (contours en pointillés, puits signalé par un cercle), en bordure de l'erg. Éloignée des implantations humaines actuelles, cette butte ne doit son érosion qu'aux dynamiques éoliennes. Image satellitaire d'octobre 2011.

Figure 45 - Butte KS260 - Aïn Birqis (contours en pointillé et puits signalé par un cercle) soumise à la corrasion éolienne et à des prélèvements de sédiments et des aplanissements d'origine anthropique, au nord et au sud-ouest. Image satellitaire de mars 2010.

KS159 - Aïn Bella (figure 44) a été occupé durant les époques romaines (du Ier au Ve s.), ottomanes (du XVIe au XIXe s.), et au XXe s.

La butte du site KS260 - Aïn Birqis (figure 45) recouvre des vestiges d'époque romaine (IVe s.), et porte des traces d'occupation médiévale (du VIIIe au XIe s.) et du XXe s. Sur le terrain, les restes végétaux sont nombreux sur certaines des parcelles du sommet de la colline.

Enfin, la butte KS178 - Aïn el-Matrahiyya (figures 46 et 47) présente le temps d'occupation le plus long. Les vestiges les plus anciens (IVe et Ve s.) ont été découverts au pied de la colline et sont partiellement recouverts par des parcellaires médiévaux (du VIIIe au XIe s.) qui constituent une terrasse intermédiaire à l'est de la butte. Enfin, le reste de la butte a été occupé du XVIe s. aux années 1960 (des hiatus dans l'occupation sont néanmoins possibles).

La structure de ces buttes et le matériel archéologique en place indiquent un dépôt rapide et contemporain de certaines des époques d'occupation, disqualifiant définitivement l'hypothèse de dépôts de playas. R.M. Anwar (1959) les identifiait, ainsi que d'autres buttes de la région, comme d'épais dépôts éoliens, sans tenter d'expliquer plus avant leur formation. H.J.L. Beadnell (1909) considérait, quant à lui, qu'il s'agissait de buttes formées par des dépôts éoliens autour des puits et sur les champs. Cette hypothèse constitue un excellent point de départ pour étudier ces buttes.

Figure 46 - Butte KS178 - Aïn el-Mattrahiyya (vue depuis l'ouest). Le point culminant correspond au tas de déblais du puits. Prise de vue : décembre 2012.

Figure 47 - Butte KS178 - Aïn el-Mattrahiyya. L'état de conservation exceptionnel du site permet d'observer un parcellaire étagé et la présence d'anciennes terrasses de cultures, ainsi qu'un puits profond avec un écoulement vers le nord-est. Cependant, la butte est aujourd'hui menacée par des prélèvements de sédiments effectués à la pelle mécanique à ses extrémités nord et sud.

IV.F. Les oasis actuelles

Neuf oasis actuelles ont été retenues (tableau 9). Elles se caractérisent par une occupation agricole actuelle et ont été choisies pour différentes raisons. Tout d'abord, leur étude permet des raisonnements actualistes, en étudiant les dynamiques géomorphologiques spécifiques aux oasis de nos jours. De plus, elle permet d'identifier les nouvelles pratiques agricoles ayant un impact géomorphologique et environnemental suffisant pour perturber la compréhension des milieux anciens en transformant, en recouvrant ou en détruisant les archives sédimentaires (Koweït, Jeddah, Ginah, Ezbet Gaga et Aïn Dakhakhin). Enfin, plusieurs d'entre elles recèlent également des vestiges plus anciens (qui ne peuvent être prospectés et identifiés, étant actuellement cultivés) que les installations actuelles ont partiellement recouverts ou réemployés (Aïn Dakhakhin, Ezbet Gaga, Ginah, Maks el-Bahari, Maks el-Qibli, Baris). Deux des oasis actuelles étudiées sont des créations ex-nihilo dans le cadre du projet « Nouvelle Vallée » : Koweït (figure 48) et Jeddah. Les autres oasis sont plus anciennes et

existaient avant la mise en place de ce grand projet. Elles ont toutefois été largement redynamisées par les investissements liés à ce dernier.

Tableau 8 - Récapitulatif des « oasis actuelles ».

Oasis actuelles			
Toponyme	**Période**	**Altitude (m)**	**Prospection**
Baris	Actuelle	58	Non
Dakhakhin	Actuelle	59	Non
Ezbet Douch	Actuelle	71	Oui
Ezbet Gaga	Actuelle	50	Non
Ginah	Actuelle	75	Non
Koweit	Actuelle	38	Non
Jeddah	Actuelle	41	Non
Maks el-Bahari	Actuelle	63	Oui
Maks el-Qibli	Actuelle	74	Non

Ginah et Koweït se trouvent au nord de la zone d'étude, Jeddah dans la partie centrale, et les autres oasis étudiées se situent toutes dans la partie sud. Ginah se trouve sur la ligne de contact entre la formation Quseir et la formation de Maghrabi, bien plus ancienne (tableau 1) et portée en hauteur par des mouvements tectoniques. Ce contexte géologique différent pourrait expliquer partiellement l'importante décharge des puits de Ginah, pourtant situés à une altitude supérieure à de nombreux autres puits de la région et dont s'étonnait H.J.L. Beadnell (1909). Les autres oasis se situent toutes sur la formation Quseir, ou sur les dépôts quaternaires la recouvrant. Les oasis créées ex-nihilo reposent sur des forages profonds, équipés de pompes relevant l'eau sur les dernières dizaines de mètres. Elles se situent en plaine, et les cultures, souvent de rente, ne présentent pas de stratification verticale.

Les oasis plus anciennes, redynamisées par les grands projets, ont également été équipées de forages et de matériel de pompage, souvent à proximité voire à l'emplacement des anciens puits. Ces oasis sont généralement en contact direct avec des vestiges plus anciens, et elles réemploient certains d'entre eux (canaux ou parcellaires, principalement). Des portions de plusieurs d'entre elles se trouvent sur des éminences plus ou moins prononcées. Dans la plupart des cas, la nature de ces éminences n'est pas claire et il est impossible de déterminer, en l'état actuel des recherches, s'il s'agit de buttes de sédiments fins ou de collines d'origine tectonique, voire de dépôts de sédiments fins nappant des collines : elles ont été observées à Maks el-Bahari, Maks el-Qibli, Baris, et Ezbet Douch (figure 49).

Dans les oasis d'Aïn Dakhakhin et d'Ezbet Gaga (figure 50), la nature des dépôts, beaucoup plus hauts (19 m de haut à Gaga, 27 m à Dakhakhin), est rendue plus évidente par la présence

de coupes : il s'agit de buttes de sédiments fins déposés autour de tertres de sources artésiennes. D'après H.J.L. Beadnell (1909), ces dépôts seraient éoliens. L'auteur indique même à propos de Dakhakhin que le dépôt a été si rapide qu'il a entraîné une baisse très prononcée du débit des puits. Les agriculteurs, plutôt que d'abandonner le site, entreprirent de raboter le sommet de la colline qui mesurait alors 30 m sur 8 à 9 m (la ramenant à une hauteur comprise entre 21 et 22 m), vingt ou vingt-cinq ans avant son passage dans la région. Lors du passage de H.J.L. Beadnell, le point culminant de la colline avait déjà atteint 23 m de hauteur. Ce témoignage précieux a permis la construction des principales hypothèses de fonctionnement des buttes aujourd'hui abandonnées (chapitre VII).

Figure 48 - Oasis de Koweït, créée ex-nihilo dans le cadre du projet « *New-Valley* ». Image satellitaire de décembre 2011.

Figure 49- Ezbet Douch, oasis ancienne redynamisée par les investissements du projet « *New-Valley* ». Les parcelles situées au nord de la route sont des créations récentes qui s'étendent progressivement. À l'ouest, extrémité orientale de la colline de KS089 - Aïn Manawir traversée par des barkhanes. Image satellitaire d'octobre 2011.

Figure 50 - Oasis d'Aïn Dakhakhin, sur la butte ensablée à l'ouest, et d'Ezbet Gaga, situé sur la butte circulaire à l'est. Les observations de H.J.L. Beadnell (1909) et les coupes observées à proximité des sites (qui n'ont, malheureusement, pas pu être prospectés) indiquent que ces éminences sont essentiellement constituées de dépôts de sédiment fin. Les versants les plus abrupts sont cultivés en terrasses. La strate arborescente est particulièrement développée dans ces deux oasis qui semblent avoir été autrefois plus étendues. Des restes de parcellaires érodés sont visibles sur l'ensemble des deux buttes. La tendance actuelle est toutefois à la reconquête, dans ces deux oasis comme à Douch, Baris, et Maks el-Bahari, où les cultures actuelles s'étendent sur des parcellaires autrefois abandonnés. Image satellitaire de février 2010.

Conclusion : géomorphologie et activités humaines dans la dépression de Kharga, un jeu d'échelles complexe

La compréhension des sites présentés ci-dessus et des dynamiques géomorphologiques et géoarchéologiques régionales nécessite de prendre en compte des facteurs fonctionnant à des échelles spatiales et temporelles très différentes. L'eau du système aquifère des grès de Nubie est une ressource héritée, dont les principales zones de recharge se situaient des centaines de kilomètres au sud de la dépression de Kharga, alors que le sable des dunes qui la traversent provient, pour partie au moins, de la dépression de Qattara, plus de 400 km au nord : l'interaction entre les eaux d'une source artésienne et ce sable peut localement former des monticules élevés et étendus. L'eau utilisée par les hommes durant quelques décennies ou quelques siècles peut avoir circulé en sous-sol pendant plusieurs milliers d'années avant de mettre en charge les nappes exploitées. La constitution de la ressource se produit donc à une échelle de temps géologique alors que son utilisation prend place à une échelle décennale, séculaire ou pluriséculaire : de cette situation, naît le déséquilibre fondamental de la relation entre les hommes et leur milieu dans la dépression de Kharga.

Pour étudier les systèmes morphogénétiques et la relation hommes/environnement dans cette région, il est donc essentiel de prendre en compte plusieurs échelles spatiales et temporelles. Les analyses à échelles macro-régionale à locale permettent en effet de relier des formations locales aux différentes dynamiques à l'œuvre, aux sources d'eau et de sédiment. Mais, pour parvenir à décrypter les processus depuis l'Antiquité et la juxtaposition de formes très différentes en un même lieu, il est essentiel d'y ajouter une profondeur temporelle. Il faut donc prendre en compte différentes échelles temporelles, des temps géologiques, ayant permis la formation des ressources en eau et en sédiments aujourd'hui mobilisées, au temps beaucoup plus court des activités humaines, voire d'une saison ou d'un vent de sable.

Afin d'appréhender ces différentes échelles et l'ensemble des facteurs ayant eu un effet sur la géomorphologie et les activités humaines dans la dépression de Kharga, le recours à la pluridisciplinarité et à des méthodes variées et complémentaires est essentiel. L'étude

présentée ici n'est donc qu'une pierre, centrée sur la question des interactions entre les hommes, l'eau et le vent depuis 2 500 ans, apportée à l'édifice de la recherche sur les interactions entre sociétés et milieux dans le désert Libyque.

Deuxième partie
Analyse géomorphologique, géoarchéologique et géohistorique des relations hommes/vent durant l'Holocène

Introduction

À l'observation d'images satellitaires de la dépression de Kharga, la prégnance des phénomènes éoliens apparaît évidente : un erg la traverse du nord au sud, plusieurs cordons de barkhanes s'y développent et les yardangs y sont omniprésents. Les dynamiques éoliennes se manifestent donc à la fois par les processus de corrasion (abrasion des sédiments, des plantes et des constructions par les particules transportées par le vent) et de déflation (emport des sédiments en surface), par le transport des sédiments et par des phénomènes de dépôt. L'ensablement des champs, des voies carrossables, et l'état de dégradation de certains bâtiments témoignent de leur impact sur les activités humaines.

Le vent est l'une des constantes dans l'évolution environnementale de la dépression de Kharga depuis le début de l'Antiquité. Pour autant, ces effets n'ont pas été identiques en tout lieu ni en tout temps. La morphogenèse éolienne est conditionnée à la fois par des facteurs d'érosivité (paramètres aérologiques : vitesses des vents et turbulences) et d'érodibilité (paramètres de surface : couverture des surfaces topographiques, propriétés mécaniques, hydriques, minéra-

logiques et chimiques des sols) (Coudé-Gaussen 1995) : les capacités d'érosion et de transport du vent dépendent à la fois de ses caractéristiques propres, de la nature du matériel à transporter et à éroder et de la couverture végétale. À l'inverse des conditions d'érosivité, qui ont peu changé depuis la mise en place antérieure à l'Antiquité des conditions climatiques actuelles, les conditions d'érodibilité ont beaucoup varié dans le temps et l'espace.

Dans les zones arides, les formations superficielles sont très vulnérables aux phénomènes d'ablation. Les oasis combinent au contraire des sols régulièrement irrigués et un couvert végétal pérenne, subissent moins l'ablation et limitent le transport éolien. La tendance y est donc au dépôt de sédiment par piégeage, ou du moins à une ablation peu prononcée. De la juxtaposition des deux types d'espaces découle une grande proximité entre les zones sources de sédiment et les secteurs de dépôt. L'activité éolienne y est donc renforcée. À la variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle liée à des dynamiques naturelles ou anthropiques : les variations dans l'occupation des sols influent sur l'érodibilité des sols. Il semble donc que les sites de la dépression de Kharga ont connu depuis l'installation des oasis, durant la période perse, une succession de phases de dépôt et d'ablation asynchrones d'un site à l'autre. Il en résulte une grande difficulté à identifier des tendances claires à l'échelle de la région et un paysage palimpseste au sein duquel se côtoient des vestiges d'époques et de dynamiques différentes. Les travaux menés depuis 2010 visent à affiner la compréhension de ces variations et reposent sur l'application d'une approche géomorphologique, géoarchéologique et géohistorique à 45 sites d'étude.

Cinq axes de recherches complémentaires ont été mis en œuvre :

- Axe 1 - étude de l'impact morphogénétique des précipitations dans la région (chapitre V) ;
- Axe 2 - analyse sédimentologique des dépôts de sédiments fins de la région (chapitre VI) ;
- Axe 3 - description des différentes unités constituant les buttes de sédiment fin et de leur formation (chapitre VII) ;
- Axe 4 - quantification de l'érosion éolienne pour les périodes historiques (chapitre VIII) ;
- Axe 5 - réalisation d'un bilan, provisoire, sur les conditions de vie et les pratiques ayant un impact sur l'environnement des habitants de la dépression de Kharga durant l'Holocène (chapitre IX).

Ces axes de travail aboutissent à la construction d'une typologie des formations superficielles locales liées aux activités éoliennes et humaines (chapitre X) et au développement d'un modèle synthétique d'évolution environnementale et paysagère des oasis de la dépression de Kharga (chapitre XI).

Chapitre V.
Les pluies actuelles, des épisodes violents à l'impact morphogénétique limité dans le temps

La rareté des précipitations en milieu aride et leur caractère très localisé (Cooke *et al.* 1993) rendent difficile l'observation de leurs conséquences immédiates, qui sont conditionnées par l'état du sol (Joly 2007). Il faut avoir la chance de se trouver au bon endroit, au bon moment. La pluie qui a frappé le site KS060 - Tell-Douch dans la nuit du 6 au 7 novembre 2012, de 23 h à 5 h du matin (M. Wuttmann, communication personnelle) était donc une occasion rare d'observer l'impact morphogénétique direct d'une pluie dans le sud de la dépression. Les autorisations de fouille et de prospection ont tardé cette année-là, et nous n'avons pu nous rendre sur le terrain qu'à partir du 13 novembre avec plusieurs semaines de retard sur le programme prévu. En l'absence de pluviomètre, nous n'avons pu quantifier les précipitations. En revanche, la mission de terrain menée en novembre 2014 a permis d'effectuer un suivi de l'évolution du paysage, deux ans après la pluie. Le caractère exceptionnel de l'événement et l'opportunité d'en étudier rapidement les effets nous ont conduits à lui consacrer un chapitre.

L'étude a consisté en la prospection de KS060 - Tell-Douch et des environs immédiats, afin d'observer les changements sur les sites depuis la mission de novembre et décembre 2011, après vérification auprès des habitants de l'oasis de Douch qu'aucune autre pluie n'avait eu lieu entre-temps. Afin de délimiter la zone touchée par les précipitations, cette prospection a été complétée sur d'autres sites. L'impact morphogénétique de la pluie s'est manifesté par des effets de *splash* (déplacement de sédiments et destruction d'agrégats par la chute des gouttes d'eau), des traces de ruissellement, des secteurs de stagnation et d'évaporation de l'eau.

V.A Les marques d'un ruissellement intense : ravinement et désorganisation des formations éoliennes

À KS060 - Tell-Douch, les dépôts sableux, les méga-rides éoliennes et les bâtiments du camp de fouilles ont été marqués de plein fouet par l'effet de *splash* (figure 51). Ce type de phénomène n'a pas pu être repéré sur les dépôts de sédiments fins, plus indurés et moins perméables. Sur la colline, les pentes ont facilité les écoulements et renforcé les effets de l'érosion hydrique, qui s'est manifestée différemment en fonction de la lithologie et de l'induration des sols. Sur son replat sommital, marqué par des affleurements gréseux, les écoulements, visiblement réduits, n'ont pas laissé de traces, à l'exception d'une perturbation modérée des états de surface antérieurs et d'une concentration des sables dans le fond des micro-dépressions.

Figure 51 - Au nord de KS060 - Tell-Douch, nappes sableuses marquées par les effets de *splash* et micro-dépression ayant accueilli une mare temporaire durant l'épisode de précipitations. La bande claire située à l'interface entre les dépôts sableux et les dépôts argileux est due à la précipitation de sel. Les stries sur les versants sont probablement liées au ruissellement et à la microtopographie : leur orientation est indépendante des directions de vent (même si le vent peut les avoir ensuite retouchées). Prise de vue : novembre 2012.

Le long des versants, où le grès est recouvert d'épais dépôts de sédiments fins, l'érosion hydrique a été beaucoup plus importante : en fonction des pentes, des fentes de dessiccation (parfois longues de plusieurs mètres et profondes de plusieurs décimètres : figure 52) et de la microtopographie (figure 53), le ruissellement s'est manifesté de manière diffuse, en nappe et en filets (figure 54) ou concentrée, induisant des phénomènes de ravinements (figures 54 et 55). Les ravines ainsi formées atteignent des profondeurs maximales de 60 cm environ, et une largeur maximale de plus de 80 cm. Sur le versant sud, au substrat plus sableux (ou gréseux par endroits), les traces de ruissellement ne témoignent que d'un ruissellement diffus, voire de conditions d'aréisme.

Figure 52 - Fentes de dessiccation observées à KS060 - Tell-Douch en décembre 2011. La plus longue observée sur le terrain a pu être suivie sur près de 20 m, et leur profondeur se limitait à quelques décimètres, voire un peu plus d'un mètre pour les plus importantes. Ces fentes constituent des points d'infiltration rapide pour l'eau météorique et semblent, par endroit au moins, avoir guidé les écoulements et favorisé le ravinement. Prise de vue : novembre 2012.

Dans les secteurs moins pentus du pied de la colline, les écoulements se sont prolongés sur des distances variables en fonction du substrat, de la quantité d'eau concentrée, et de la topographie. Vers le nord, les fentes de dessiccation favorisent l'infiltration de l'eau et la crue

n'a pas atteint le fond de la dépression. Au contraire, à l'ouest, les eaux ont rejoint une cuvette fermée. La crue a donc été limitée par des phénomènes d'infiltration et par l'endoréisme des bassins versants. Liée à des précipitations locales, elle n'a eu d'effet morphogénétique qu'à proximité immédiate du site (figure 58).

Figure 53 - Concentration des écoulements dans des traces de roues sur substrat sableux, au nord-est du temple en pierres de Douch. En raison de la faiblesse des précipitations, de la taille réduite du bassin versant et de la désorganisation du réseau hydrographique par les phénomènes éoliens, la micro-topographie a joué un rôle majeur dans la concentration des écoulements. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 54 - Traces de ruissellement en filets et en nappe sur la partie ouest du versant nord de Tell-Douch. Au pied des yardangs, on observe la formation d'une ravine qui recoupe les secteurs d'écoulement diffus. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 55 - Grande ravine formée dans les dépôts de sédiment fin en limite nord de la colline de Tell-Douch. Sa profondeur maximale était de 60 cm et sa largeur maximale de 50 cm. Prise de vue : novembre 2012.

V.B. Stagnation et évaporation aux exutoires de petits bassins versants endoréiques

À l'aval des bassins versants, dans de micro-dépressions sur les replats de la colline, ou en bordure des grandes dépressions fermées entourant KS060 - Tell-Douch, le ruissellement en filets est majoritaire : de minces chenaux peu profonds relient entre elles des mares temporaires (déjà asséchées lors des prospections de terrain : figure 56).

Les dépôts liés à la formation de ces mares sont nombreux, mais l'extension de chacun d'entre eux est réduite : le plus étendu mesurait tout juste 20 m^2 et l'eau stagnante n'avait dû atteindre qu'une trentaine de centimètres de profondeur. Toutes ces mares se situaient à moins d'un kilomètre de la colline (figure 58). Dans les bassins, des pellicules argileuses ou limoneuses (certaines contenant quelques graviers) recouvrent les éléments plus grossiers. L'évaporation et l'assèchement ont entraîné la formation des polygones de dessiccation, la rétraction des pellicules argileuses et la précipitation de sel. Les efflorescences et les croûtes salines ainsi formées jouent un rôle important dans les processus d'érosion éolienne : l'haloclastie et la

défloculation des argiles facilitent la mobilisation du sédiment et l'approfondissement progressif des dépressions hydro-éoliennes (Cooke *et al.* 1993).

Figure 56 - Traces d'écoulements en filets et dépôts liés aux mares temporaires formées au sein de micro-dépressions, au bord de la grande dépression fermée située au nord de Tell-Douch. Les dépôts résultant des mares temporaires suivent une stratification due à la décantation et sont recouverts par une couche d'argile extrêmement fine qui s'est craquelée et rétractée en se desséchant. L'évaporation de l'eau a entraîné la précipitation de sel, repérable par des efflorescences blanches (dans la petite mare située au tout premier plan) et par des croûtes épaisses (visibles au second plan). Ces dernières, épaisses et bien développées, sont le résultat d'apports d'eau répétés au fond de la dépression. Elles sont probablement liées au drainage d'anciennes parcelles agricoles situées en amont. Les processus actuels ne permettent plus la formation de telles croûtes dans ce secteur. Prise de vue : novembre 2012.

Les précipitations ont eu un effet limité sur la végétation : les plantes xérophytes déjà présentes sur les versants de Tell-Douch les années précédentes ont reverdi, profitant des apports en eaux, mais peu de plantes éphémères sont apparues. Les précipitations n'ont donc pas entraîné de phénomène d'*acheb* durant le du mois suivant leur survenue. Ont-elles été insuffisantes ? La dernière pluie était-elle trop ancienne pour que les graines aient été en état de germer ? La salinité des dépôts était-elle trop importante ? En l'état actuel, il est difficile de trancher entre ces hypothèses, mais la germination de quelques éphémères dans un secteur où le sel est moins présent (figure 57) incite à privilégier la dernière.

Figure 57 - Germination et pousse de rares plantes éphémères sur le fond d'une mare temporaire (versant nord de KS060 - Tell-Douch). Les précipitations de sel n'ont pas été suffisantes pour former des efflorescences visibles, probablement parce que cette mare, située dans la partie médiane du bassin versant, a connu des phénomènes d'évaporation limitée, l'eau continuant ensuite son chemin vers l'aval. Prise de vue : novembre 2012.

V.C. Un impact morphogénétique limité dans l'espace et le temps

Autour de la colline, plus aucune trace de la pluie n'était visible au-delà de 900 m au nord et de 1 500 m au sud (figure 58). Pourtant, le site KS259 - Aïn Birqis-est, situé 20 km au nord-ouest, présentait des dépôts correspondant à des mares temporaires récentes. Ces dépôts peuvent correspondre à un autre épisode récent de précipitations, mais il est également probable que l'épisode de précipitations qui a touché KS060 - Tell-Douch ait également eu un effet sur d'autres sites. La zone concernée par les précipitations semble avoir été plus étendue vers l'est et vers l'ouest. À KS088 - Aïn Ziyada et KS089 - Aïn Manawir, collines respectivement situées à 2 900 m à l'est et 3 400 m à l'ouest, les seules traces visibles de la pluie correspondent à une désorganisation légère des voiles sableux et des pavages de déflation, en lien avec l'effet de *splash* et des écoulements très diffus, malgré un substrat et des pentes comparables, au moins dans certains secteurs, au contexte de KS060 - Tell-Douch (figure 58).

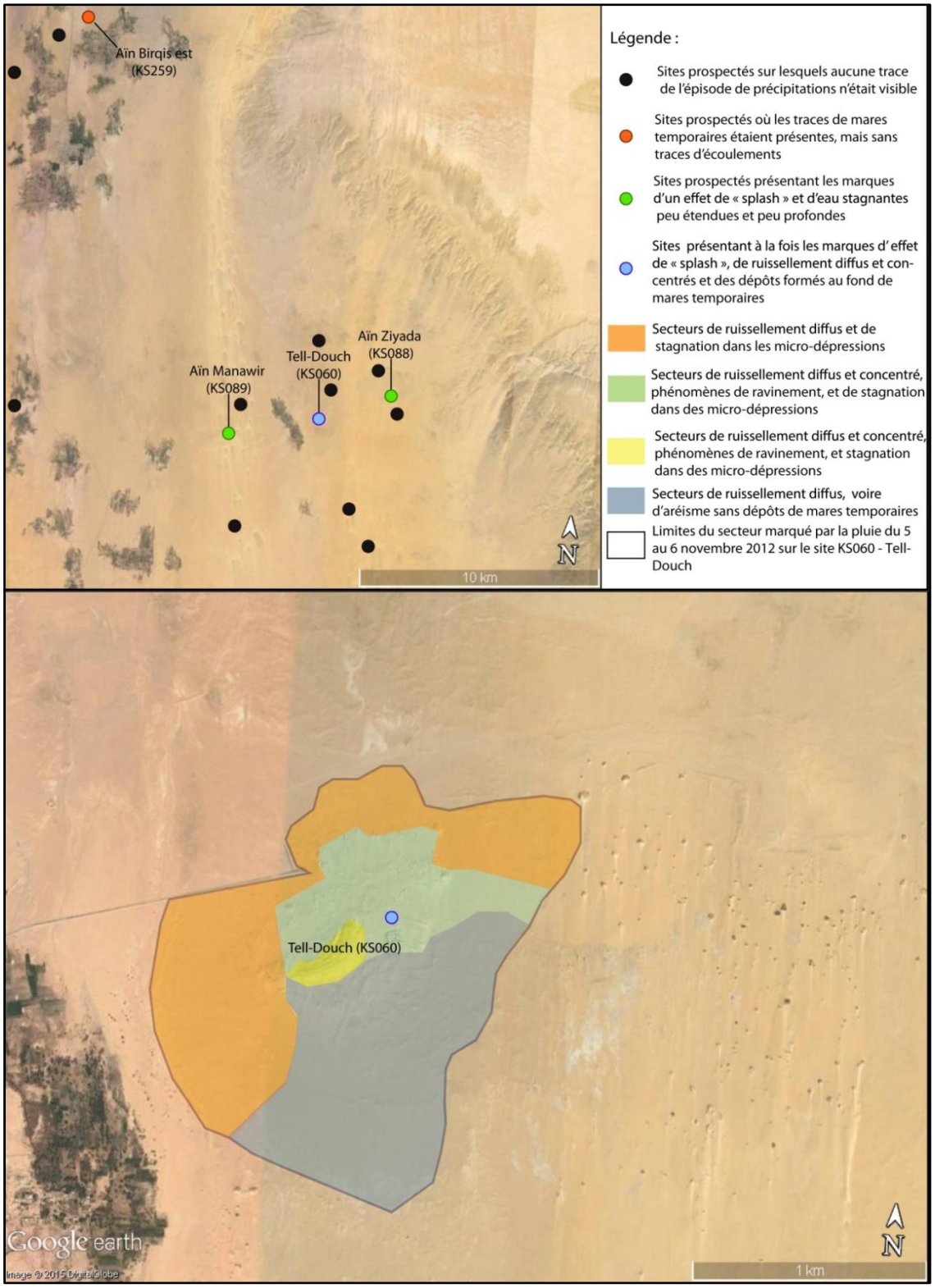


Figure 58 - Carte des sites présentant des traces de la pluie du 6 au 7 novembre 2012 et des effets morphogénétiques constatés. Les limites indiquées sont approximatives et correspondent aux observations effectuées lors des prospections.

Les petites formes d'accumulations éoliennes, nebkas et méga-rides éoliennes sont demeurées intactes, et aucun dépôt correspondant à une stagnation de l'eau n'a été observé. Les prospections n'ont permis d'identifier aucun autre site concerné par les précipitations de cet

épisode. La pluie a donc été très localisée, même si elle a touché plusieurs sites éloignés les uns des autres. Il n'est pas impossible que d'autres secteurs isolés non prospectés aient également été frappés par cet épisode. Un effet orographique sur les précipitations pourrait être envisagé, malgré la faible altitude des collines, car la plupart de leurs manifestations ont été observées sur des collines. Il est cependant plus probable que les pentes et la lithologie soient à l'origine de cette situation, en limitant l'infiltration et en favorisant la concentration des écoulements.

Les prospections de terrain de novembre 2014, très courtes, n'ont permis d'étudier l'évolution des formes d'érosion hydriques que sur le site de KS060 - Tell-Douch, mais elles ont tout de même permis d'observer la disparition de la plupart de ces formes (figures 59 et 60). L'ablation éolienne a emporté une partie du sel et des sédiments libérés par haloclastie et défloculation, a réduit la profondeur des ravines formées par le ruissellement et a complètement effacé les traces d'écoulement diffus. L'ensablement a complété ce travail, en achevant de combler les ravines. Enfin, les petites formes éoliennes, nebkas et méga-rides éoliennes, principalement, se sont reformées. L'impact morphogénétique de la pluie n'a donc pas été durable dans le temps, au contraire de l'action éolienne qui, si elle est moins brutale et plus progressive, apparaît bien plus efficace sur le long terme du fait de sa récurrence. Néanmoins, le ravinement observé aurait pu être désastreux pour les récoltes si les secteurs touchés avaient été des parcellaires cultivés. Le caractère soudain et abondant des précipitations en milieu hyperaride pourrait donc avoir constitué une véritable menace pour les habitants des oasis anciennes.

Cette étude, en démontrant l'impact relativement faible des précipitations, confirme l'importance des dynamiques éoliennes dans la morphogenèse de la dépression de Kharga. Comprendre les interactions hommes/environnement dans cette région implique donc d'approfondir les travaux sur l'ensemble des processus liés au vent.

Figure 59 - Ravinement dans un secteur avec dépôts de sédiments fins en pente forte, dans la partie nord de KS060 -Tell-Douch le 13 novembre 2012. Le personnage à droite donne l'échelle.

Figure 60 - Photographie du même lieu le 10 novembre 2014. On devine tout juste les ravines situées à gauche de la photographie, partiellement rabotées par la déflation et comblées par du sable. À droite, la ravine est mieux conservée, bien qu'entièrement comblée par les apports éoliens.

Chapitre VI. Yardangs et buttes de sédiments fins du bassin sud de la dépression de Kharga : analyse sédimentologique de dépôts inattendus dans un désert hyperaride

L'étude des dépôts de sédiments fins du bassin sud de la dépression de Kharga (région de Douch et de Baris) se justifie par leur fonction de terres arables des oasis antiques : la plupart des yardangs et des buttes de sédiments fins sont coiffés de vestiges anthropiques, de sols agricoles et de restes de canaux datés de l'Antiquité. Il était donc essentiel de les caractériser et d'identifier les processus à l'œuvre. L'existence même de ces formations pose question dans une région tendant plus vers les processus d'ablation et de transport, car l'hyperaridité y permet une activité éolienne très importante. L'épaisseur et l'homogénéité de certains de ces dépôts indiquent pourtant des conditions de sédimentation stables sur des durées importantes : à KS060 - Tell-Douch, par exemple, les yardangs limoneux situés haut sur le versant peuvent mesurer près de 3 mètres de hauteur et B. Bousquet (1996) a effectué un sondage de 7 mètres de profondeur au pied d'un de ces yardangs sans parvenir à atteindre la base de cette formation superficielle. Dans d'autres secteurs, au contraire, leur faciès indique des phases distinctes, parfois séparées de hiatus nets, comme à KS088 - Aïn Ziyada (figure 61). La position topographique de la plupart de ces dépôts, sur des points hauts, ainsi que leur faciès très homogène et présentant parfois des pentes de dépôt, nous ont mené à leur supposer une genèse éolienne (figure 62). Dix-sept coupes et quinze échantillons isolés ont été étudiés, prélevés et analysés en laboratoire (tableau 10) afin d'affiner la compréhension des processus à l'origine de leur formation. La plupart des échantillons a été prélevée sur des coupes affectant des yardangs ou des méga-yardangs. Quelques tranchées et sondages liés aux fouilles des archéologues ou à des trous de pillage ont également été exploités. Aucun

carottage n'a donc été nécessaire pour obtenir des archives sédimentaires concernant les périodes étudiées[26].

Une partie des coupes étudiées et des échantillons prélevés l'ont été au sein de formations qui n'étaient pas directement liées à la problématique de recherche, à titre de comparaison (tableau 11). Nous avons ainsi pu constituer un référentiel sédimentologique régional utile à toute entreprise de comparaison. Vingt-sept coupes supplémentaires ont été étudiées sur le terrain, mais n'ont pas pu être traitées en laboratoire pour le moment.

Figure 61 - Yardangs du site KS088 - Aïn Ziyada contenant une strate rubéfiée, vestige d'un incendie durant un hiatus dans la sédimentation. Prise de vue : novembre 2010.

Figure 62 - Vue de la colline de KS060 - Tell-Douch. L'ensemble du versant est constitué de sédiments fins plaqués sur les strates relevées des grès de la formation de Taref. Des yardangs formés par la corrasion éolienne se trouvent sur la colline, jusqu'à son sommet. Prise de vue : décembre 2011.

[26]. Pour étudier des périodes plus anciennes (Paléolithique ou Épipaléolithique par exemple) des carottages ou des sondages à la tarière peuvent au contraire être nécessaires sur certains sites.

Tableau 9 - Listes des coupes (lettres) et échantillons (nombres) par sites de prélèvement.

Site	Coupes et échantillons
KS052	127
KS060 - Tell-Douch	A, C, E, F, G, U, W, V, 125, 126
KS088 - Aïn Ziyada	N, O
KS089- Aïn Manawir	Q, 108, 109, 110
KS097	X, 123
KS098- Aïn Boreq	T
KS161 - Aïn Zabiba	ZA, ZB
KS192	114, 115, 116, 117
KS209 - Aïn al-Mansouriya	Y, 119, 124
KS241 - Aïn Gaga	118
Ezbet Douch	105

Tableau 10 - Liste des coupes (lettres) et échantillons (nombres) par type.

Type	Sous-type	Description	Coupes et échantillons
Référentiel sédimentologique : coupes dont les processus de formation étaient connus avant l'étude sédimentologique	Formes impliquant la présence d'eau	Playa ou semi playa	X, 118
		Canaux et puits	U, 105
	Formes éoliennes actuelles	Barkhane	110
		Méga-ride	116, 117
		Rebdou	127
	Formes éoliennes anciennes	Dune fixée durant l'Antiquité	108,109
		Sables rubéfiés	123
		Lœss recouvert par une playa de l'Holocène moyen	114, 115
		Dépôt de parcellaire	A, C, Y, 125, 126
Coupes dont les processus de formation étaient inconnus avant l'étude sédimentologique	Coupes analysées	Lœss saharien	E, G, N, V, W, 119, 124
		Lœss sableux	F, O, Q, T, ZB
		Coupes complexes	B, ZA

VI.A. Travaux antérieurs sur les yardangs et les dépôts de la dépression de Kharga

VI.A.1 Les yardangs et les dépôts de sédiment fin de la dépression de Kharga, un sujet de recherche ancien

Mentionnés dès le XIXe s. (Edmonstone 1824), les yardangs et dépôts de sédiment fin de la dépression de Kharga ont été étudiés dès la mise en place du *Geological Survey of Egypt* en 1897 (Beadnell 1909). De nombreux chercheurs se sont penchés sur leur formation, intrigués par la très grande extension et par la sédimentologie de certains dépôts de sédiments fins (sables fins, limons et argiles) au sein desquels se sont formés de nombreux yardangs. Ces modelés furent d'abord identifiés à des dépôts palustres ou lacustres par H.J.L. Beadnell (1909). Celui-ci est ensuite revenu sur son jugement initial et les a décrits comme des dépôts palustres mêlés à des apports éoliens importants (Beadnell 1911, 1933). Cette interprétation a été reprise et complétée par L.W. Collet (1926) qui ajouta à la description la mention de similitudes avec l'apparence des lœss périglaciaires. G. Caton-Thompson et E.W. Gardner (1932) s'opposèrent très fermement à l'hypothèse lacustre et distinguèrent trois types de buttes et yardangs de sédiment fin :

- les « *loess like deposits* » dénués de strates carbonatées ou salées et de coquilles, excluant ainsi une origine lacustre. L'hypothèse d'un dépôt éolien lié à une période d'aridification au Pléistocène fut proposée, mais elle est incompatible avec les conditions essentielles d'un dépôt éolien de sédiments fins sur de grandes surfaces (présence de végétation ou d'étendues humides) ;

- les dépôts de sources fossiles datés du Pléistocène par l'industrie lithique associée et formés par des éjectas de sources ainsi que par le piégeage de sédiments éoliens par la végétation présente ;

- les dépôts de puits artésiens antiques liés à l'extraction des eaux du sous-sol, à la pratique de l'irrigation et au dépôt de sédiment éolien sur la végétation entretenue par l'eau.

Depuis les derniers travaux de ces deux auteures (Gardner 1932, Caton-Thompson et Gardner 1952), novateurs par la collaboration étroite entre une archéologue et une géologue, de nombreuses études ont été menées par des géomorphologues, sans le concours d'archéologues, dans la région de Kharga. Les études pluridisciplinaires mêlant archéologie et

géologie, géographie ou géomorphologie ont au contraire été très peu nombreuses avant le milieu des années 1990. Cet élément a, semble-t-il, son importance, car les géomorphologues qui se sont penchés sur la question sans archéologue ont systématiquement conclu que l'ensemble des dépôts de sédiments fins présents dans la région correspondent à des dépôts de playas ou de semi-playas[27], marqués par des alternances de phases lacustres ou palustres et des phases d'apports strictement éoliens (Embabi 1972, 1999, 2004 ; Donner et Embabi 2000 ; Nofal 2002 ; Goudie 2007). Pourtant, la position topographique de certains des dépôts de sédiments fins prospectés et l'époque récente de formation que prouve le matériel archéologique en place, excluent la formation de playas. Les travaux de géomorphologues en collaboration avec des archéologues, comme le remarquable ouvrage de B. Bousquet (1996), mènent à des hypothèses plus nuancées : tout en confirmant la présence de playas dans certains secteurs, l'auteur observe que certains dépôts sont strictement éoliens et contemporains des oasis antiques, et que d'autres sont à relier aux activités humaines. L'auteur s'étant ensuite focalisé sur l'étude des systèmes d'irrigation et des conditions pratiques de l'agriculture, il n'a pas poussé plus loin son analyse des dépôts de sédiments fins. Notre étude a été initiée pour combler ces lacunes et mieux caractériser les différents types de dépôt et leur formation.

VI.A.2. *Loess like deposits* et lœss sahariens

L'apparence, en coupe, de certaines formations constituées d'un sédiment très fin et homogène nous a conduits, comme bien d'autres auparavant (Collet 1926 ; Caton-Thompson et Gardner 1932 ; Gardner 1932 ; Bousquet 1996), à observer des similitudes avec des lœss. Depuis l'idée initiale de V.A. Obruchev (1911) de *hot lœss* déposés en marge des milieux arides, passée à l'origine plutôt inaperçue avant d'être relayée en Europe par G. Merzbacher (1913), la recherche sur la question des lœss sahariens a bien progressé. Les dépôts de lœss, qu'ils soient périglaciaires ou péridésertiques, impliquent la combinaison de trois conditions nécessaires (Gibst et Holland 1960 ; Tsoar et Pye 1987) :

- une source de sédiments fins ;

[27]. Dépressions endoréiques dont les dépôts sédimentaires correspondent à une alternance entre phases palustres et périodes d'apports éoliens, plus grossiers. Les dépôts éoliens sont souvent plus développés que les dépôts palustres.

- un vent dominant le plus constant possible dans un contexte d'aridité ou de semi aridité pour le transport des particules ;

-un lieu de dépôt apte à piéger les particules fines et à entretenir une vitesse de dépôt suffisante pour limiter la pédogenèse.

Des lœss désertiques et péridésertiques ont été reconnus dans de nombreuses régions d'Afrique et d'Asie. Ils constituent, par exemple, des dépôts continus en Israël dans les marges du Néguev (Yaalon et Dan 1974 ; Crouvi *et al.* 2008) mais très localisés dans les Matmata en Tunisie (Coudé-Gaussen et Rognon 1986). La datation de ces dépôts oscille, selon les régions, entre le Pléistocène supérieur pour les lœss de Matmata, il y a 250 000 ans (Coudé-Gaussen et Rognon 1986 ; Coudé-Gaussen 1991 ; Dearing *et al.* 2001), et l'Holocène récent pour les lœss du nord-ouest de la Namibie, il y a 2 000 ans (Brunotte *et al.* 2009 ; Crouvi *et al.* 2010.). Des dépôts de lœss désertiques ont également été repérés au Yémen (Nettleton et Chadwick 1996 ; Coque-Delhuille et Gentelle 1998), en Arabie Saoudite et aux Émirats arabes unis (Goudie *et al.* 2000), à Bahrain et au Koweit (Tsoar et Pye 1987), en Libye (Rathjens 1928 ; Assalay *et al.* 1996 ; Giraudi 2005), en Algérie (Nouaouria *et al.* 2008), au Ghana (Breuning-Madsen et Awadzi 2004), au Nigeria (McTainsh 1987 ; Stokes et Horrocks 1998). Des lœss désertiques et péridésertiques ont été reconnus en Chine, où leurs épaisseurs et leurs temps de dépôt sont particulièrement importants (Billard 2000 ; Amit *et al.* 2013), au Tadjikistan et en Ouzbékistan (Goudie 2013), et en Australie (Dare-Edwards 1984). Ce type de dépôt a donc une très large distribution, particulièrement en Asie et en Afrique, et sur les marges sahariennes.

En Égypte même, des dépôts de lœss et de lœss remaniés ont récemment été étudiés, dans le Sinaï (Rögner *et al.* 2004) et à proximité du littoral dans le désert Libyque (Abdrabbo *et al.* 2000). Plus récemment des dépôts ont été étudiés à proximité du Caire, mettant à profit le creusement d'une station de métro dans la Ville du 6 octobre[28], à l'ouest du Caire (El Mosallamy *et al.* 2015). Ces lœss sont très sableux et présentent donc des médianes relativement élevées.

Ces dépôts ont des caractéristiques très variables (tableau 12), mais partagent des traits fréquemment observés : ils contiennent des sables grossiers, les sources de la fraction grossière des sédiments sont généralement proches, leur formation survient en marge des zones arides et ils constituent des archives sédimentaires de grande qualité pour la

[28]. Ville nouvelle créée à la fin des années 1970 pour désengorger Le Caire en pleine explosion démographique.

reconstitution des paléoenvironnements (Coudé-Gaussen 1991 ; Smalley *et al.* 1995 ; Assalay *et al.* 1998).

En Afrique du Nord, leurs médianes sont généralement comprises entre 30 et 125 µm (4-3 φ), avec un mode principal compris entre 60 et 100 µm (Assalay *et al.* 1998) qui correspond assez bien aux résultats obtenus par R.A. Bagnold (1941), indiquant que la granulométrie optimale pour un soulèvement et un transport éoliens est d'environ 80 µm. Parmi les dépôts Nord-Africains, il est possible de distinguer des apports de particules locales (sédiment le plus grossier, sables fins à grossiers), proximales (limons grossiers/*coarse silts)* et distales (sédiment le plus fin, argiles et limons fins/*fine silts and clays*) par l'analyse granulométrique des dépôts (Coudé-Gaussen 1991).

Tableau 11 - Récapitulatif de la granulométrie et des âges des principales formations de lœss sahariens étudiés dans le monde. Modifié d'après Crouvi *et al.* 2008 et augmenté (Algérie et Égypte) à partir des sources citées dans le texte.

Pays	Région	PAM (mm)	Age	Granulométrie
Israël	Negev	100-250	95 000-11 000 ans	Bimodal : 50-60 et 3-8µm
Émirats arabes unis	Ras al Khaima	150	NA	Médiane (carbonates détruits) : 28,68 à 73,69 µm. Médiane (carbonates préservés) : 59,19 à 103,59 µm
Nigéria	Kano	800-1200	37 000-10 000 ans	Trimodal : 75, 44 et moins de 2 µm. Moyenne : 55-95 µm
Namibie	Nord Ouest	50-300	60 000-2 000 ans	Médiane : 6-30 µm
Yemen	San-a-Dhamar-Taizz	300-450	moins de 15 000 ans	Médiane : 60-70 µm
Tunisie	Matmata	150-200	25 000-10 000 ans	Médiane : 58-67 µm.
Libye	Tripolitaine	100-300	60 000-13 000 ans	Bimodal : 63-9 µm Médiane : 8-60 µm
Algérie	Ghardaia	60-70	Supposé Holocène	Médiane : 25-30 µm
Egypte	Ville du 6 octobre	15-50	Pas de données	Médiane : 200-350 µm
Egypte	Sinaï central	65	27 000 à 12 000 ans	Silts, environ 63 µm.

Les dépôts de lœss sont généralement présents dans les marges semi-arides du Sahara où les précipitations et la présence de végétation entraînent la chute des sédiments en suspension, leur piégeage et leur sédimentation. Les principales zones-sources du sédiment semblent se situer dans des secteurs plus arides (Coudé-Gaussen et Rognon 1986 ; Coudé-Gaussen 1991 ; Assalay *et al.* 1996 ; Giraudi 2004 ; Crouvi 2010). Les émissions des poussières les plus

fines, susceptibles de connaître une suspension continue, et qui constituent les fractions les plus fines des lœss désertiques et péridésertiques (Coudé-Gaussen 1986, 1991, 1995 ; Chamley *et al.* 1987) ont été largement étudiées en zones arides et sont de mieux en mieux comprises (Yaalon et Ganor 1979 ; Marticorena *et al.* 1997 ; Callot *et al.* 2000 ; Crouvi *et al.* 2012). Au contraire, la formation des limons grossiers (entre 20 et 63 µm) est encore en débat dans la communauté scientifique (Smalley 1995 ; Assalay *et al.* 1998 ; Wright 2001 ; Smith *et al.* 2002 ; Crouvi *et al.* 2010 ; Amit *et al.* 2013). L'hypothèse d'une formation par érosion glaciaire (*glacial grinding*), logique en milieu périglaciaire, ne peut expliquer la formation des limons grossiers constitutifs des lœss désertiques (Coudé-Gaussen 1987). De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer la formation des limons grossiers : haloclastie, thermoclastie, cryoclastie, érosion chimique ou abrasion éolienne pendant le transport des sédiments (Smalley 1995 ; Assalay *et al.* 1998 ; Goudie *et al.* 2000 ; Wright 2001). Plus récemment, des travaux effectués en Afrique et en Asie ont permis de démontrer une corrélation entre ergs actifs et dépôts de lœss désertiques et péridésertiques, ainsi qu'une décroissance de la granulométrie des dépôts en fonction de l'éloignement aux ergs (Crouvi *et al.* 2010 ; Amit *et al.* 2013). Les auteurs de ces études interprètent leurs résultats comme la preuve d'une production massive de limons grossiers dans les ergs actifs. Cette hypothèse très convaincante ne fait pourtant pas, pour l'heure, consensus : les débats autour des posters et des communications orales s'y référant lors de la 8ème conférence internationale de l'*IAG*[29] à Paris, en 2013, ont ainsi été particulièrement développés, et parfois houleux.

VI.A.3. Les dépôts de source des dépressions de Dakhla et de Kharga

L'étude des dépôts de sources repérés dans la dépression de Kharga par G. Caton-Thompson et E.W. Gardner (1932) a également été approfondie depuis leur passage dans la région. Recensés, mais peu étudiés à Kharga (Embabi 2004), ces tertres sont désormais mieux connus dans les oasis de Bahariya et de Farafra, où certaines sources fonctionnent encore (Torab 2014), et surtout dans la dépression de Dakhla (Brookes 1993 ; Kleindienst *et al.* 1999 ; Adelsberger et Smith 2010). Dans ce secteur, des dépôts de sources datés du Pléistocène sont formés à la fois par des évaporites (croûtes et nodules ferrugineux ou

[29]. *International Association of Geomorphologists*

carbonatés), par des sédiments apportés par les sources elles-mêmes et par des apports éoliens : l'humidité, les suintements et les mares liés à la décharge d'une source entraînant le dépôt de limons éoliens, la végétation trouve un sol propice et se développe donc, entretenant le piégeage de plus de limons et de sables jusqu'au tarissement des sources et/ou à la mort de la végétation. L'ablation éolienne peut alors s'exercer sur les dépôts ainsi formés (Adelsberger et Smith 2010). Les conditions de dépôts des limons et le mélange entre sable et limons qui peut se produire une fois la végétation installée ne sont pas sans rappeler les processus de formation des dépôts de lœss désertiques et péridésertiques. L'étude du dernier type de dépôt identifié par G. Caton-Thompson et E.W. Gardner (1932), constitué de dépôts de puits artésiens d'époques historiques, a peu été approfondie avant les travaux récents de la mission de l'IFAO à Douch et de la mission archéologique d'El Deir dirigée par Gaëlle Tallet. Les résultats de l'une et de l'autre de ces missions à ce sujet n'ont pas encore été publiés.

VI.B. Des dépôts de lœss à Kharga ? Objectifs de l'analyse sédimentologique des dépôts de sédiments fins de la région de Douch et principales hypothèses de travail

L'étude sédimentologique des dépôts de sédiments fins de la dépression de Kharga, particulièrement nombreux et épais dans le bassin sud, a pour objectif d'expliquer leur origine et leur composition. Leur localisation, coïncidant souvent avec les terres arables antiques ou médiévales, justifie l'hypothèse d'un dépôt entretenu par la présence de végétation cultivée. Il pourrait s'agir d'un type de lœss désertique lié aux activités humaines, ce qui correspondrait assez bien à l'apparence des dépôts et aux contextes dans lesquels nous les avons observés. Le travail de sédimentologie effectué est donc construit autour de quatre objectifs principaux :

- vérifier si le transport éolien est exclusif, majoritaire ou minoritaire au sein des dépôts étudiés et s'ils peuvent correspondre à des lœss sahariens ;

- distinguer la part des apports locaux, proximaux et distaux et vérifier si la proximité de l'erg influence les paramètres granulométriques ;

- valider la corrélation entre épais dépôts de sédiments fins et zones d'occupation humaine ;

- participer à la construction de la typologie des formes éoliennes proposée au chapitre X.

Afin de répondre à ces questions, les prélèvements et les analyses ont concerné à la fois des échantillons dont le caractère non-éolien ou les processus de formation étaient bien connus, afin de constituer des éléments de comparaison et de référence, et des échantillons prélevés parmi les dépôts fins étudiés.

VI.C. Méthodologie de terrain et de laboratoire

L'étude des dépôts de sédiments fins de la dépression de Kharga repose à la fois sur des travaux de terrain, préparés en amont et complétés par un travail de photo-interprétation des images satellitaires, sur des analyses sédimentologiques et sur un travail de géoréférencement afin d'identifier d'éventuelles tendances (gradient granulométrique au vent/sous le vent, ou en fonction de la proximité à l'erg). Nous ne disposions de nuancier de Munsell ni sur le terrain, ni en laboratoire, les descriptions de couleur des sédiments ne seront donc pas accompagnées de leurs codes.

VI.C.1 Observations directes et sur images satellites, croisement avec les vestiges archéologiques sur le terrain

Après une première mission, du 8 au 19 novembre 2010, et la découverte de la géomorphologie régionale, l'étude a mis à profit les images satellitaires disponibles gratuitement grâce à *Google Earth Pro* et *Bing Maps* qui, croisées avec les rapports successifs de la mission à Douch et le catalogue de prospection, ont permis de repérer et d'observer le contexte géographique de la plupart des sites de prélèvement avant les missions de terrain. Le travail sur place a ensuite été mené lors de trois missions, du 28 novembre au 22 décembre 2011, du 13 novembre au 2 décembre 2012 et du 10 au 14 novembre 2014, et centré autour de prospections (pédestres et/ou motorisées) et de prélèvements au sein de coupes naturelles (yardangs) ou d'origine humaine (prélèvements de sédiment, construction de routes ou de canalisation, sondages archéologiques, trous de pillage). Quarante-trois coupes ont été levées et échantillonnées, et 15 échantillons isolés ont été prélevés sur différents sites. Seuls les échantillons isolés et ceux de 17 coupes (figures 63 à 69) ont pu être analysés en laboratoire, pour un total de 89 échantillons.

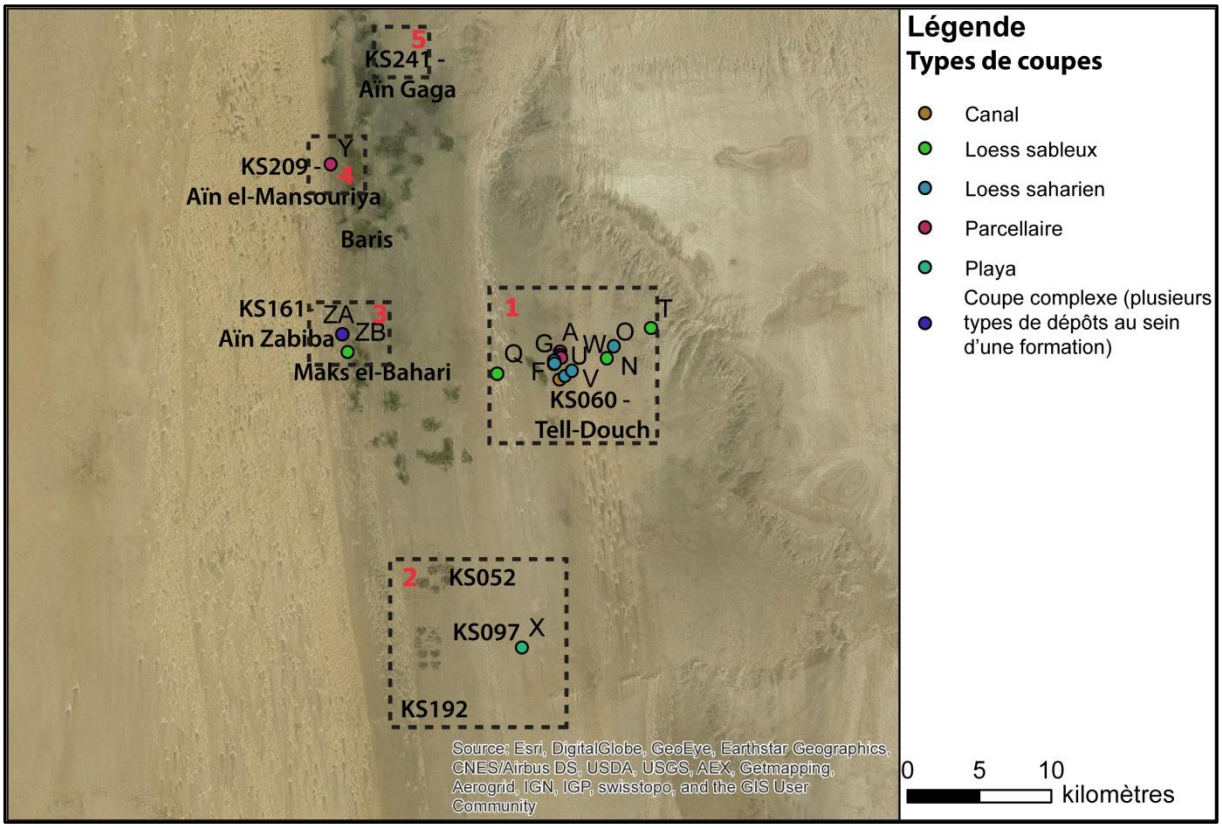


Figure 63 - Carte générale des emplacements des coupes traitées, toutes situées dans la moitié sud de la dépression de Kharga. Les cadres d'emprises numérotés renvoient aux cartes suivantes.

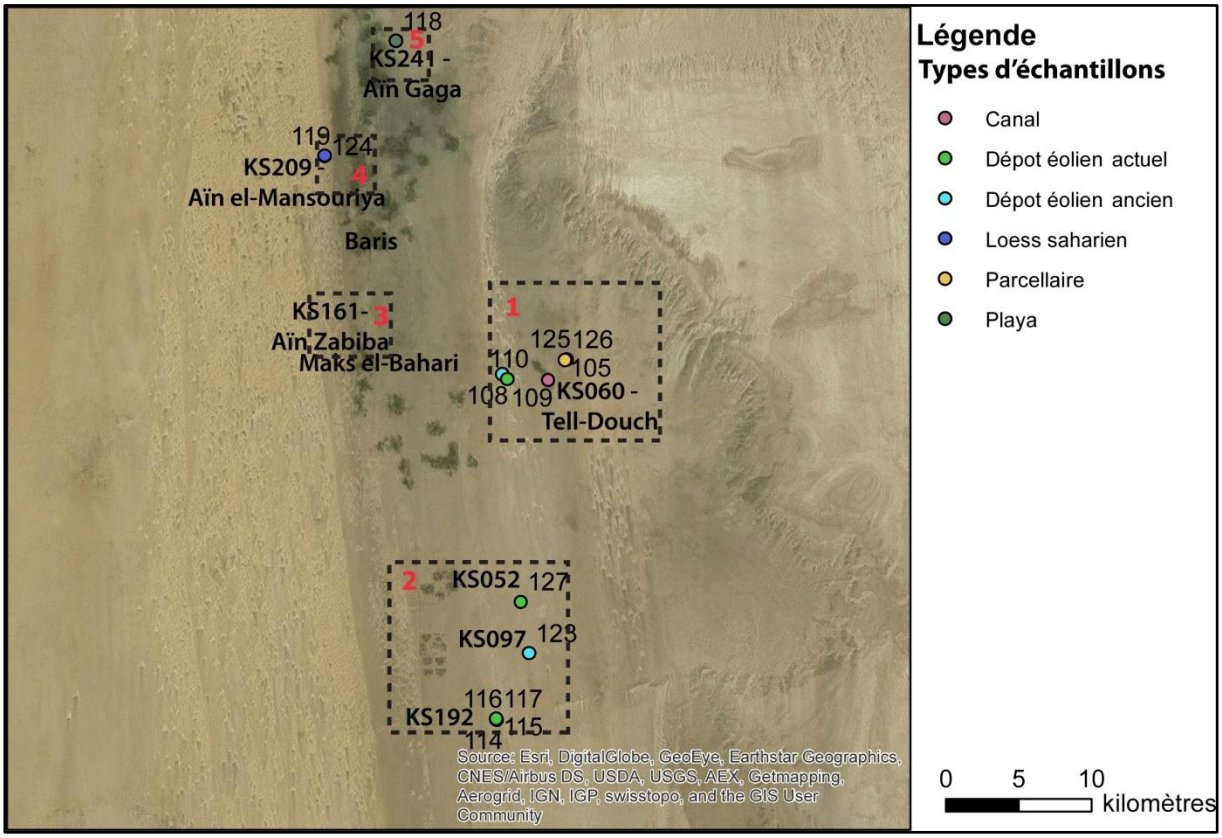


Figure 64 - Carte générale des emplacements de prélèvements des échantillons isolés, tous situés dans la moitié sud de la dépression de Kharga. Les cadres d'emprises numérotés renvoient aux cartes suivantes.

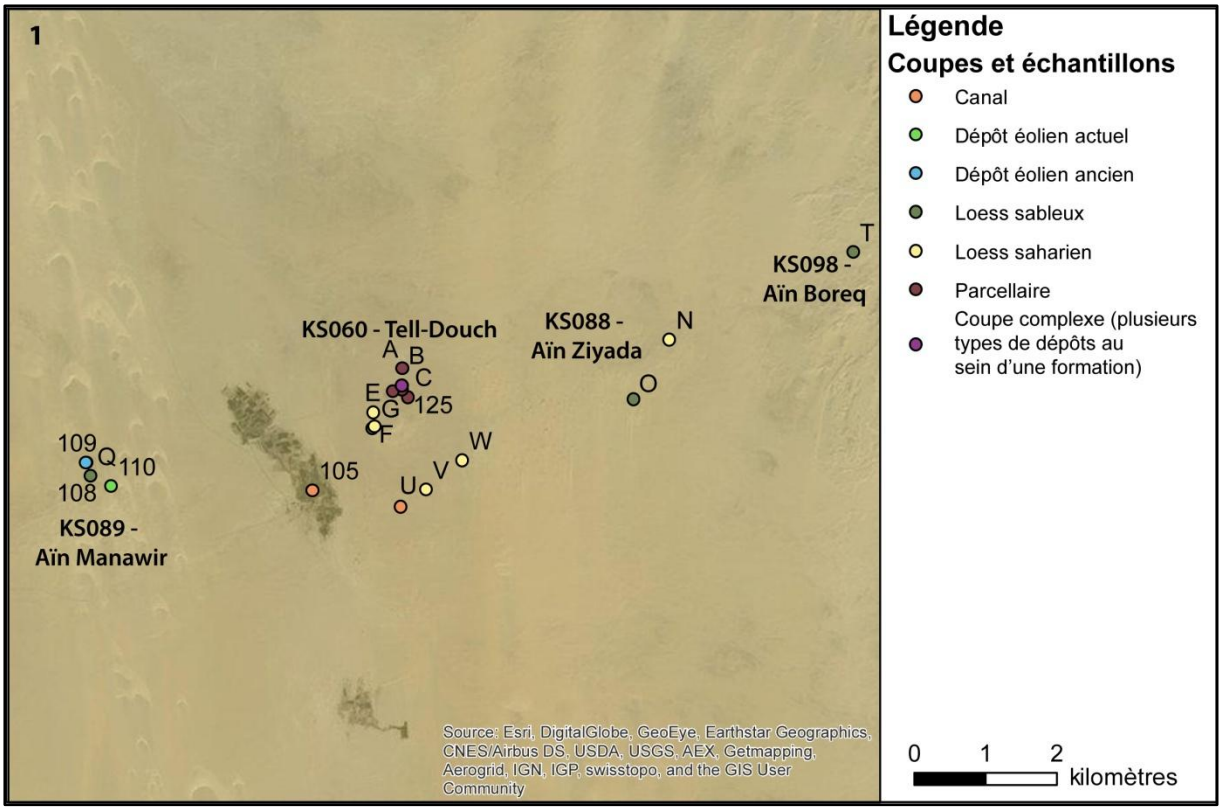


Figure 65 - Carte des emplacements des coupes et échantillons isolés du secteur de KS060 - Tell-Douch. Les prélèvements s'étendent de KS098 - Aïn Boreq, à l'est, à KS089 - Aïn Manawir, à l'ouest.

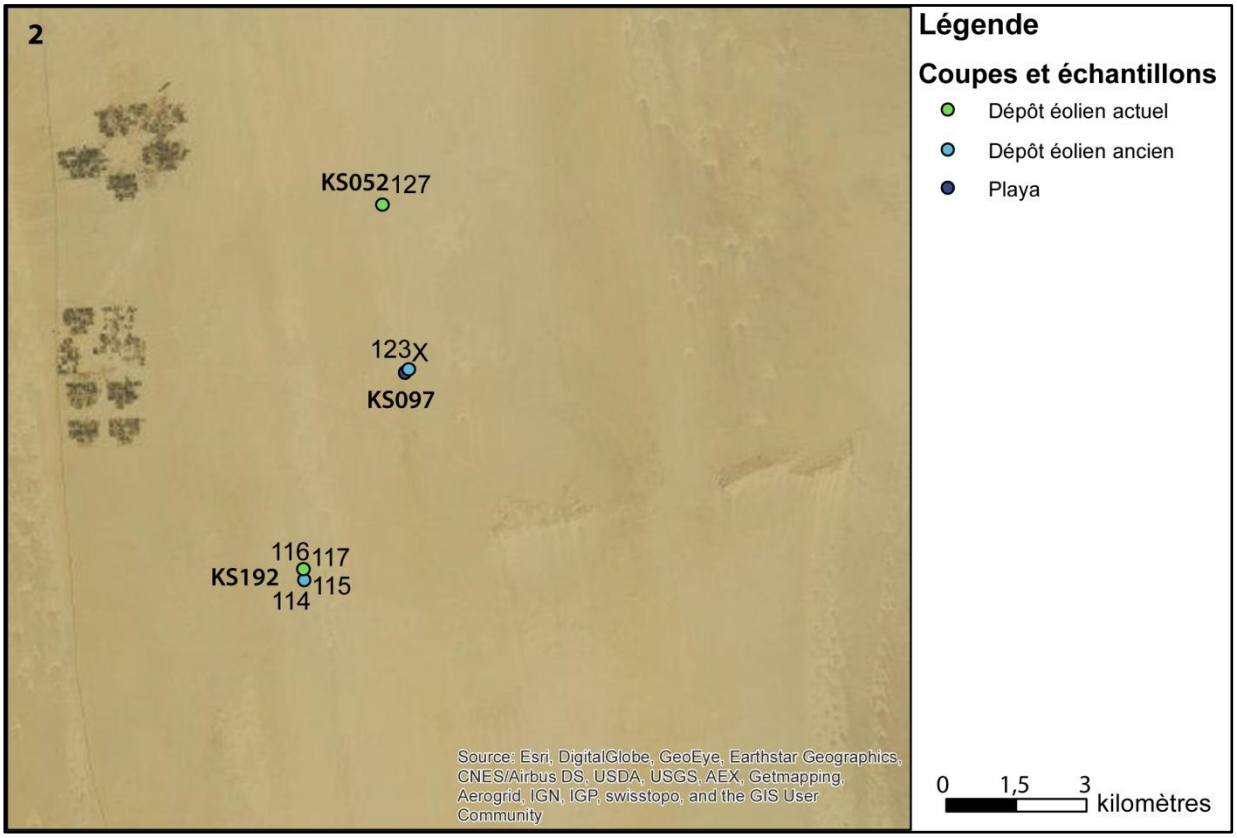


Figure 66 - Carte des emplacements des coupes et échantillons isolés du secteur prospecté le plus méridional, à proximité des sites KS052, KS097 et KS192.

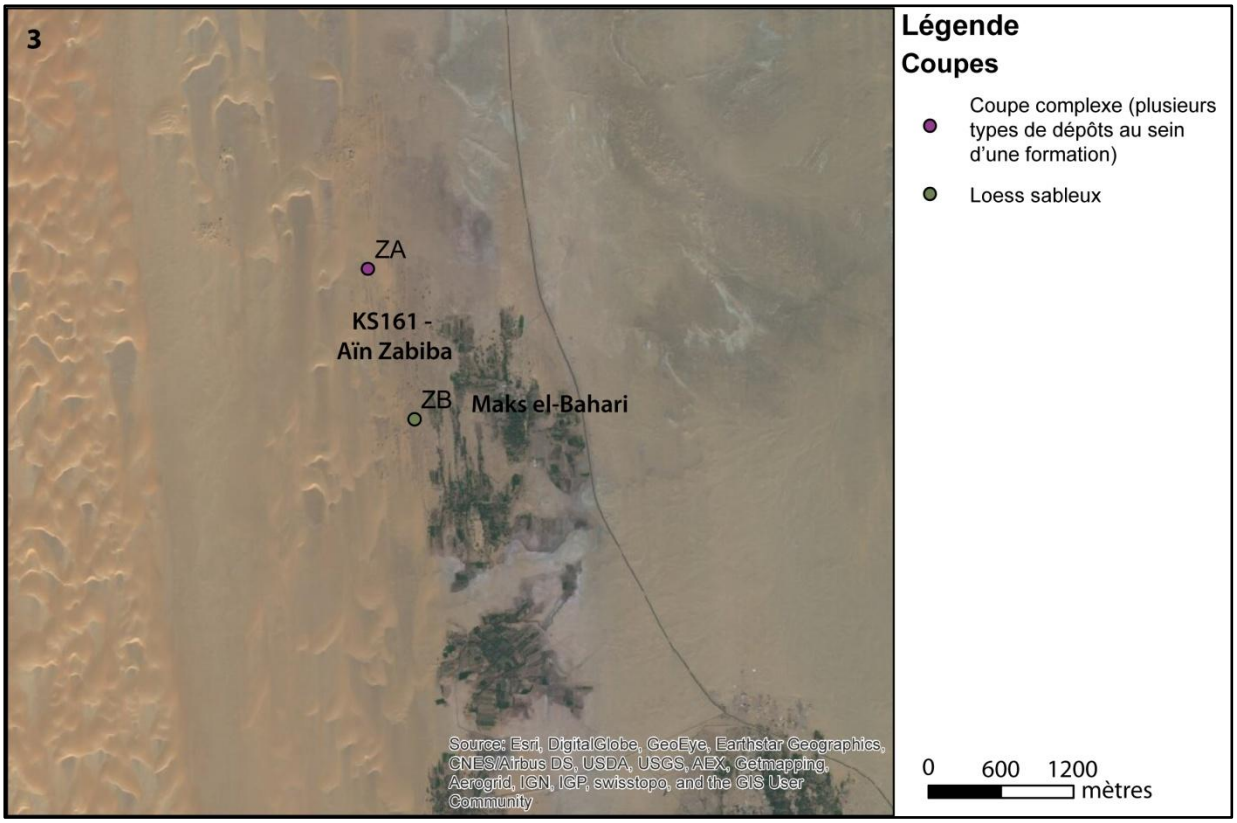


Figure 67 - Carte des emplacements des coupes du site KS161 - Aïn el-Zabiba.

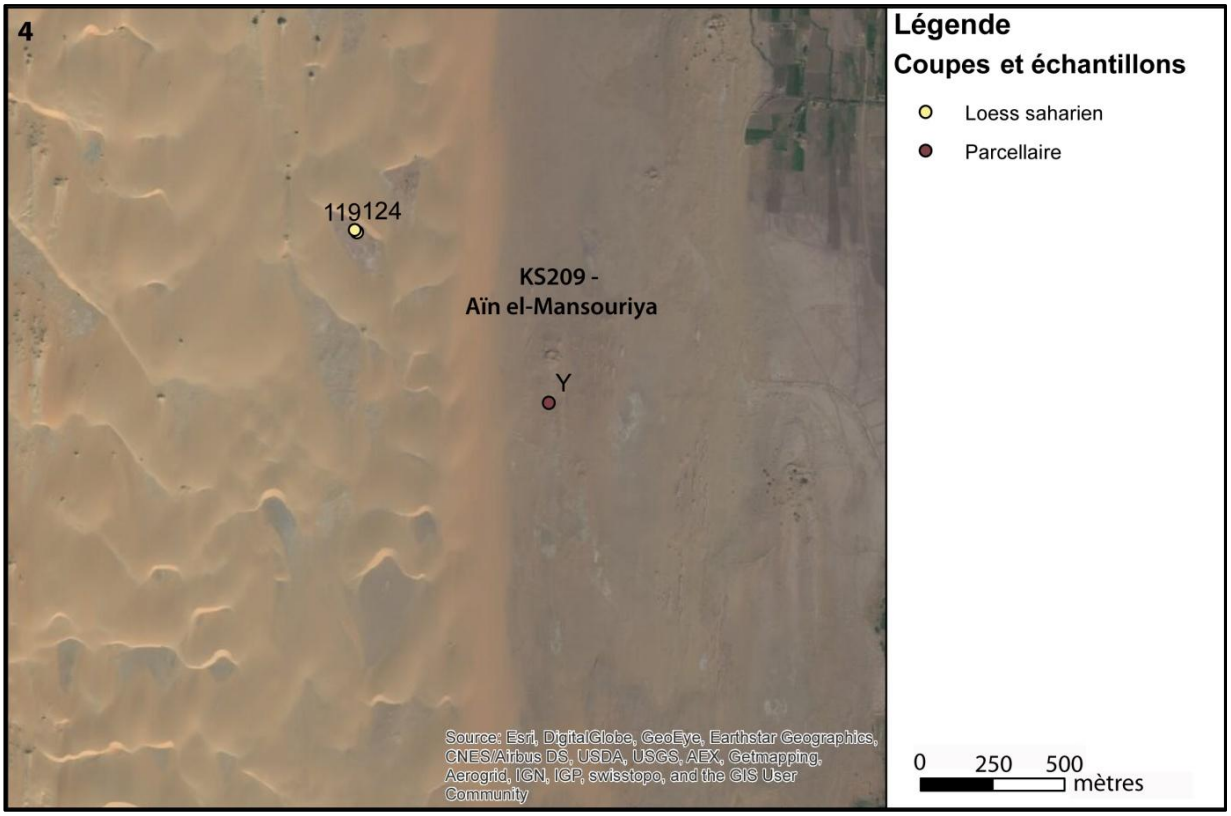


Figure 68 - Carte des emplacements des coupes et des échantillons isolés du site KS209 - Aïn el-Mansouriya.

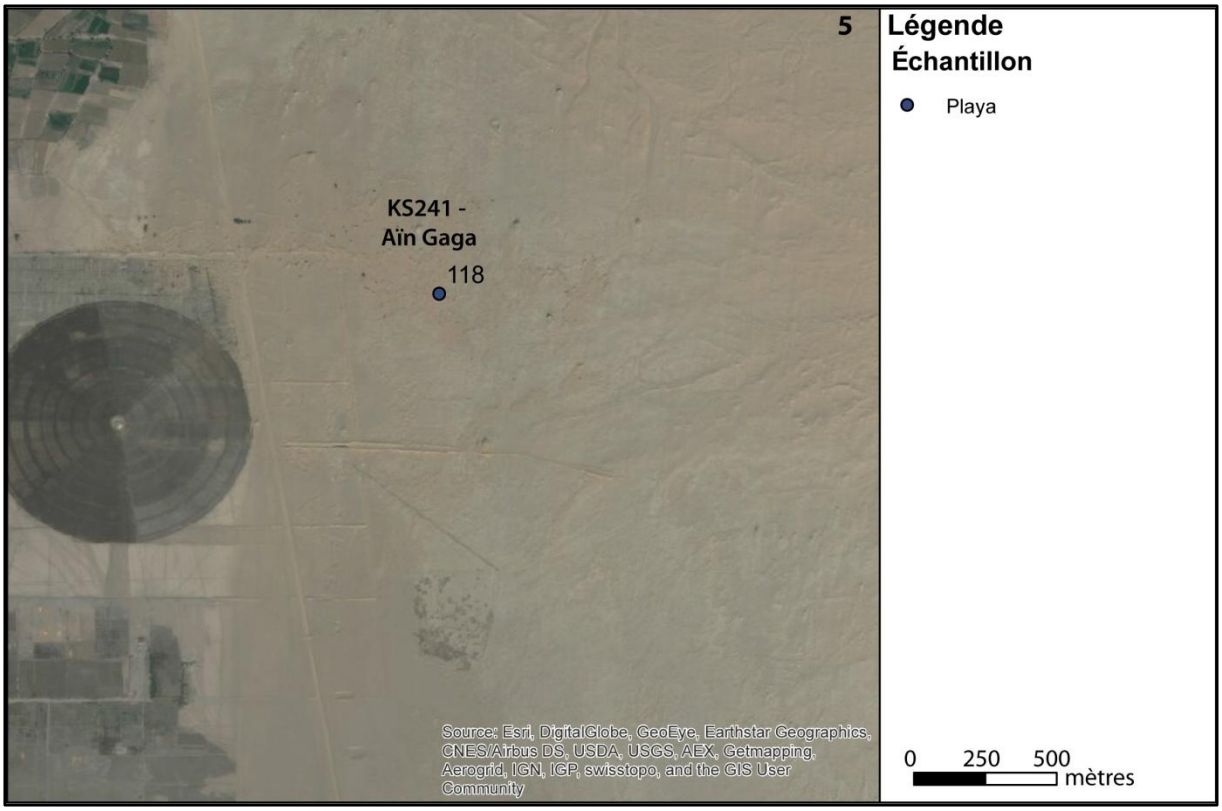


Figure 69 - Carte de l'emplacement de l'échantillon isolé 118 à KS241 - Aïn Gaga.

VI.C.2. Granulométrie, dosage de matière organique, analyses morphoscopiques et étude du contenu des sédiments : une combinaison d'analyses efficace et simple à mettre en œuvre

Le travail d'analyses sédimentologiques, qui devait initialement constituer le cœur de cette thèse, a finalement été relativement mis en retrait en raison de grandes difficultés pratiques. Tout d'abord, la législation égyptienne interdit la sortie du territoire des échantillons en provenance de sites archéologiques : il fallait donc concevoir les protocoles d'analyses avec les moyens disponibles sur place, et faire sans certains matériels pourtant essentiels dans l'étude des sédiments (outils de datation autre que ^{14}C conventionnel, granulomètre laser, etc.). Nous avons donc procédé à des analyses simples à mettre en œuvre et requérant peu de matériel : la granulométrie par tamisage humide, l'analyse morphoscopique des grains de quartz (accompagnée par une observation qualitative de la composition et du contenu des sédiments) et le dosage du carbone organique total par perte au feu. De surcroît, le contexte sociopolitique égyptien, complexe et mouvant entre 2011 et 2016, a entraîné une réduction drastique du nombre et de la durée des missions de laboratoire. Ceci explique le grand nombre

de coupes prélevées et levées, mais pas encore traitées. Des trois à quatre missions d'analyses prévues, seules deux ont pu être menées, du 11 mars au 1er avril 2011 et du 10 octobre au 12 novembre 2012.

La granulométrie par tamisage humide a été conduite d'après la méthode de Cailleux et Tricart (1959) et suivant le protocole ci-dessous :

Protocole de granulométrie par tamisage humide[30] :

1 Prélèvement et pesée d'environ 30 grammes d'échantillon brut sec.

2 Pesée à vide des béchers destinés à recueillir les différentes fractions granulométriques.

3 Tamisage humide (rendu nécessaire par la finesse des sédiments et leur caractère très cohésif) par une colonne de tamis des mailles suivantes : 2000 µm 1600 µm, 1000 µm, 600 µm, 500 µm, 400 µm, 315 µm, 200 µm, 160 µm, 100 µm, 63 µm et 50 µm.

4 Récupération de la fraction limono-argileuse contenue dans le récipient et évacuation de la majeure partie de l'eau par centrifugations successives et élimination du surnageant.

5 Séchage à l'étuve des différents refus de tamis dans les béchers préalablement pesés à vide

6 Pesée des différentes fractions une fois le sédiment sec. Soustraction du poids du bécher vide afin d'obtenir la masse représentée par chaque fraction et calcul des pourcentages.

Cette méthode simple à appliquer et peu exigeante en matériel s'est révélée suffisante pour obtenir des résultats exploitables. Il est cependant impossible de connaître la granulométrie des particules inférieures à 50 µm (maille du tamis disponible le plus fin) ; ceci induit une incertitude dans la détermination du premier quartile (inférieur à 50 µm pour l'ensemble des échantillons traités) et de la médiane (inférieure à 50 µm pour 6 échantillons). Il est également essentiel de prendre en compte, dans la comparaison de nos résultats avec ceux issus de la bibliographie, le fait que l'estimation des fractions est ici fondée sur leur poids, et non sur un compte ou une estimation du nombre de particules ou de leur volume relatif, comme lors de l'utilisation d'un granulomètre laser, à partir d'un traitement de signal. Pour un poids identique et à densité constante, le nombre de particules sera plus important dans les fractions fines que dans les fractions grossières. Ainsi, pour un même échantillon, les résultats obtenus au granulomètre laser indiqueront des fractions fines plus importantes que celles obtenues par tamisage humide (Laurent et Albrecht 1993 ; Michel et Courard 2006). Les médianes

[30]. Sauf pour les coupes A, G et F, analysées en 2011. 50 g d'échantillon brut sec ont été tamisés avec la colonne de tamis suivante : 2000 µm 1600 µm, 1000 µm, 600 µm, 500 µm, 400 µm, 300 µm, 200 µm, 106 µm, 50 µm. Les proportions de limons et de sables fins ont donc été estimées à partir des courbes cumulées.

granulométriques présentées ici sont donc surévaluées[31] par rapport à celles obtenues par granulométrie laser, nombreuses dans la bibliographie.

Malgré cela, cette méthode permet d'obtenir des résultats avec des moyens réduits. Pour la réalisation des logs de coupes, sept catégories ont été créées en fonction des pourcentages représentés par les catégories limons et argiles, sables fins et sables grossiers (tableau 13). En plus des paramètres granulométriques fréquemment utilisés tels que les quantiles D25, D50, D75 et D99 (caractérisation générale des échantillons et calculs d'indices) ou que les pourcentages des différentes classes granulométriques (limons et argiles : < 63 µm ; sables fins : 63≤x<200 µm ; sables grossiers : 200≤x<2000 µm) utiles à la comparaison des dépôts étudiés et de ceux décrits par d'autres auteurs, nous avons créé pour les formations éoliennes une discrétisation granulométrique adaptée au conditions locales de vent. Ainsi, afin de déterminer les pourcentages de particules distales/proximales/locales et les principaux modes de transports (suspension, saltation, reptation) nous avons déterminé cinq classes granulométriques avec les bornes suivantes, en fonction de critères adaptés à la région d'étude, car ils tiennent compte, non seulement des données issues de la bibliographie, mais également des résultats obtenus localement :

- suspension discontinue, x< 63 µm (Callot 2008) ;

- saltation très fréquente et possibilité de suspension discontinue lors de vents de sable, 63≤x<315 µm (maille la plus proche de 350 µm, granulométrie pour laquelle la saltation est fréquemment observée ; Callot 2008) ;

- saltation fréquente, 315≤x<600 µm (la borne supérieure correspond au mode[32] principal sur les barkhanes échantillonnées, indiquant un transport par saltation) ;

- saltation possible et/ou reptation, 600≤x<1000 µm (la borne supérieure correspond à la maille la plus proche du D99 de la barkhane échantillonnée - échantillon 110 - 950 µm, ce qui indique qu'un transport par saltation est possible pour des grains de cette taille, bien qu'un transport par roulage soit également envisageable et puisse concerner les grains les plus grossiers de cette fraction ;

- reptation ou apports non éoliens, 1000≤x<2600 µm (la borne supérieure correspond à la taille maximale de grain mesurée parmi les échantillons traités).

[31]. Les distorsions entre les résultats obtenus au granulomètre laser et les résultats obtenus par tamisage variant à la fois en fonction de la densité des particules constituant l'échantillon et de leur forme, il est malheureusement impossible d'estimer un taux de surévaluation ou de sous-évaluation. D'autant plus que celui-ci change d'un échantillon à l'autre. L'écart entre les résultats obtenus avec ces deux méthodes tendrait à se réduire si la forme des particules de l'échantillon approchait de celle d'une sphère parfaite, et si leur densité était homogène.

[32]. Au sens de mode statistique : valeur la plus représentée au sein d'une série statistique.

Tableau 12 - Récapitulatif des catégories créées pour la réalisation des logs en fonction des fractions granulométriques des échantillons.

Nom de la catégorie	Caractéristiques
Limons et sables fins	Limons comme fraction principale, sables fins comme fraction secondaire et sables grossiers inférieurs à 5 %
Limons majoritaires, sables grossiers minoritaires	Limons comme fraction principale, sables fins comme fraction secondaire et sables grossiers minoritaires, mais supérieurs à 5 %
Limons majoritaires, sables fins minoritaires	Limons comme fraction principale, sables grossiers comme fraction secondaire et sables fins minoritaires, mais supérieurs à 5 %
Sables fins et limons	Sables fins comme fraction principale, limons comme fraction secondaire et sables grossiers inférieur à 5 %
Sables fins majoritaires, sables grossiers minoritaires	Sables fins comme fraction principale, limons comme fraction secondaire et sables grossiers minoritaires, mais supérieurs à 5 %
Sables fins majoritaires, limons minoritaires	Sables fins comme fraction principale, sables grossiers comme fraction secondaire et limons minoritaires, mais supérieurs à 5 %
Sables grossiers majoritaires, limons minoritaires	Sables grossiers comme fraction principale, sables fins comme fraction secondaire et limons minoritaires, mais supérieurs à 5 %

Afin de compléter l'analyse granulométrique, les échantillons ont fait l'objet d'une observation à la loupe binoculaire permettant d'estimer leur composition qualitative, puis d'une analyse morphoscopique des grains de quartz menée selon la méthode de Cailleux et Tricart (1959). Seule la fraction supérieure à 300 µm a été étudiée, car les particules de taille inférieure sont peu marquées par leur transport. La fraction supérieure à 600 µm a également été écartée de l'analyse : le nombre de grains était trop réduit pour permettre une représentativité statistique. La fraction étudiée est donc comprise entre 300 et 600 µm. Elle convient bien à des analyses visant à distinguer un transport éolien d'un transport hydrique, car les effets de l'eau comme du vent y sont bien visibles. Les observations ont permis d'identifier que certains grains classés « non-usés » (NU) étaient, pour une part malheureusement impossible à quantifier, des grains fracturés par des chocs violents : un certain nombre de grains présentaient toutes les caractéristiques de grains NU sous un angle, et des caractères de grains « ronds-mats » (RM) éoliens sous d'autres angles.

Protocole d'analyses morphoscopiques des grains de quartz :
1 Rinçage des échantillons à l'eau distillée
2 Tamisage à 600 µm et 300µm
3 Préparation d'une petite portion d'échantillon pour identification et décompte des grains sur un fond noir. Compte de 25 grains suivi d'une interruption puis d'un second compte sur 25 grains. En cas de différence trop importante entre les deux comptes, on procède à un troisième décompte, voire à un quatrième si nécessaire.
4 Calcul des pourcentages représentés par les différents types de grains.

Ces analyses ont également été complétées par des dosages du carbone organique total par perte au feu. Cette opération permet d'en savoir plus sur l'environnement et sur la présence éventuelle de sources de matière organique au moment du dépôt des sédiments. En milieu aride, le taux de carbone organique moyen dans les sédiments est d'environ 1 %, contre 4 % en milieu semi-aride (Drègne, 1976).

Protocole de dosage de la matière organique totale par perte au feu :
1 Prélèvement et réduction en poudre dans un mortier d'environ 10 g d'échantillon sec.
2 Pesée au milligramme du récipient vide, puis du récipient rempli de sédiment.
3 Mise au four des échantillons pour 16 h à 375°C. Cette température évite la perte en eau structurale des argiles, qui provoquerait une surestimation du taux de carbone organique. En revanche, elle peut se révéler trop faible pour détruire complètement de gros agrégats de matière organique et implique donc un risque de sous-estimation des taux de carbone organique.
4 Pesée des échantillons et calcul afin d'obtenir la proportion de carbone organique.

L'étude qualitative de la composition des échantillons et du contenu des sédiments a été menée fraction par fraction, à la loupe binoculaire. Lorsque des coquilles ont été observées, leur identification a été confiée à H. Djerbi[33].

VI.D. Résultats et interprétation

VI.D.1. Référentiel sédimentologique

Cinq coupes et treize échantillons isolés ont été prélevés sur des formations dont la genèse était connue, soit par des travaux antérieurs de B. Bousquet (1996 ; coupe A, échantillons 125 et 126) ou de M.de Dapper[34] (communications orales ; coupe X, 114,115 et 118), soit par des travaux archéologiques de l'IFAO (coupes A, C et Y, échantillons 108 et 109), soit du fait que leur formation était toujours en cours (échantillons 110, 116, 117 et 127) ou que leur morphologie ne laissait aucun doute (échantillon 105 et 123, coupe U).

VI.D.1.a. Les dépôts de playas ou semi-playas

Les dépôts de playas et de semi-playas étant décrits comme omniprésents dans la région par différents auteurs (Embabi, 1972, 1999, 2004 ; Donner et Embabi, 2000 ; Nofal, 2002 ;

[33]. Hatem Djerbi est géoarchéologue et malacologue à EVEHA et chercheur associé à l'UMR5133 Archéorient.
[34]. Morgan de Dapper, professeur de géographie émérite à l'*Universiteit Gent* (Belgique) et trésorier de l'*International Association of Geomorphologist*, travaille à Douch avec la mission de l'IFAO depuis plusieurs années.

Goudie 2007), il était essentiel d'échantillonner certaines de ces formations pour les comparer aux dépôts de sédiments fins étudiés. La coupe X (figures 70 et 71, tableau 14) et l'échantillon 118 (figure 72, tableau 14) constituent ainsi une référence pour les formations liées à des playas ou à des semi playas.

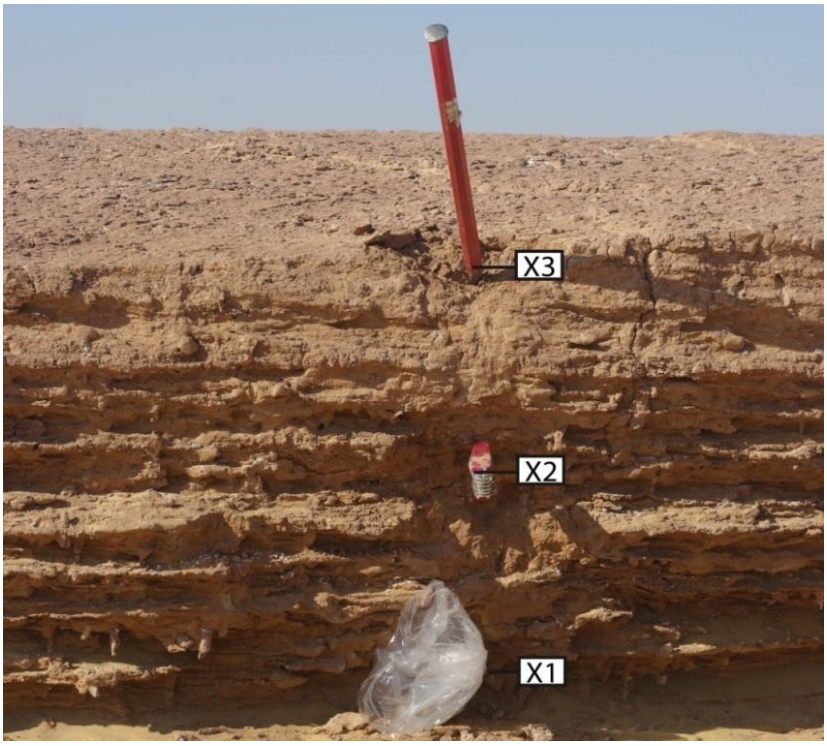


Figure 70 - Photographie de la coupe X sur le site KS097, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2011.

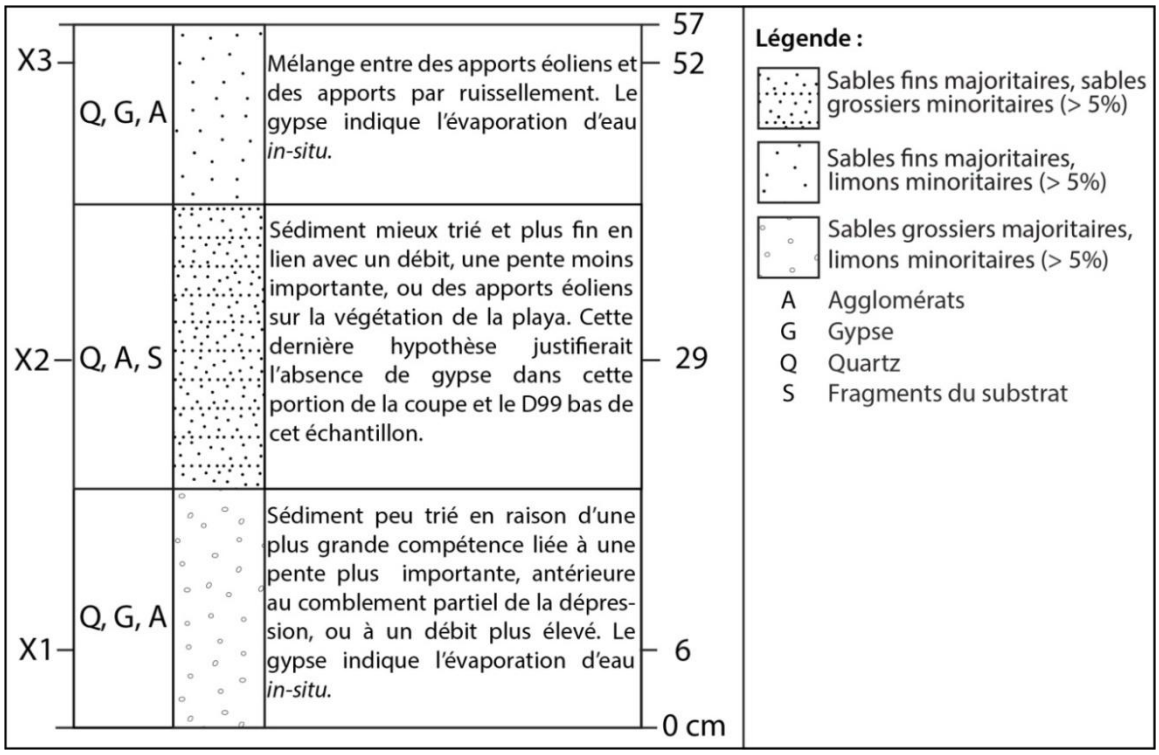


Figure 71 - Log synthétique de la coupe X.

La coupe X correspond à un dépôt paléo-lacustre (ou paléo-palustre) du site KS097. Elle mesure environ 57 cm de hauteur et s'inscrit dans un affleurement continu d'environ 1,4 ha pour une surface totale d'environ 10 ha au sein desquels des fragments érodés de la playa sont identifiables. Le sédiment est assez sombre, marron rouge, et présente un micro-litage horizontal coupé par quelques fentes de dessiccation verticales à subverticales. La partie sommitale, marquée par la polygonisation résultant de la dessiccation des sédiments, tire vers le violet. Les manchons de carbonate de calcium sont peu nombreux, mais l'induration générale du sédiment est importante. Les taux de matière organique compris entre 1,2 et 2,6 %, sont assez faibles en comparaison avec les autres dépôts étudiés dans la région. La morphoscopie des grains de quartz implique un transport éolien prépondérant, bien que le faciès de la coupe indique une mise en place finale des sédiments dans un contexte hydrique (micro-litage parfaitement horizontal, fentes de dessiccation, formation de gypse dans certaines strates).

L'observation géomorphologique et les analyses sédimentologiques montrent qu'il s'agit plutôt d'un dépôt paléo-palustre, à l'image des semi-playas décrites par N.S. Embabi (2004) que d'un dépôt paléo-lacustre. Sa faible épaisseur indique une durée de formation assez courte ou un apport sédimentaire réduit durant une période plus longue. La première hypothèse semble la plus probable. En l'état actuel des analyses, et sans moyen de datation des sédiments et des vestiges de sources artésiennes du secteur, il est impossible de préciser si cette playa est d'origine météorique ou peut-être liée au fonctionnement des anciennes remontées artésiennes.

L'échantillon 118 a été prélevé dans des dépôts finement lités situés sur le site préhistorique KS241 - Aïn Gaga. Les yardangs de ce secteur présentent, sur plusieurs hectares, la même séquence : leur base, constituée de limons gris et de sables fins mélangés, est couverte d'une couche de quelques décimètres d'épaisseur formée d'un micro-litage alternant sables fins gris sombres et sables fins jaune-beige, et leur partie sommitale est couverte d'un dépôt uniforme constitué de limons gris-beige. Dans certains secteurs plus à l'est, en se rapprochant du centre de la dépression, on observe la présence de lits argileux mis en évidence par l'érosion différentielle dans la partie médiane micro-litée. L'échantillon 118 est issu de cette couche médiane, interprétée en raison de son faciès comme une playa. La résolution de prélèvement contraint à obtenir une moyenne de la granulométrie des lits alternés, et non la granulométrie d'un seul lit. Le granoclassement est malgré cela très élevé, avec 84,2 % du poids de l'échantillon correspondant à des sables fins ; les limons, comme les sables grossiers, en sont

quasiment absents. Cette alternance traduit donc probablement un tri lié au ruissellement ou à des écoulements sporadiques en marge de la playa dans des secteurs où les pentes étaient encore suffisantes pour que l'écoulement induise un tri des sédiments. Plus à l'est, en se rapprochant du centre de la dépression, les sédiments semblent s'affiner, et on trouve plus fréquemment des lits argileux correspondant à une stagnation de l'eau ; cela confirmerait que l'échantillon a été prélevé au sein des marges de la playa, et non dans sa partie centrale, concentrant l'eau et l'ensemble de la charge sédimentaire.

Figure 72 - Photographie de la couche de prélèvement de l'échantillon 118 sur le site KS241 - Aïn Gaga. Prise de vue : décembre 2011

Tableau 13 - Sédimentologie des dépôts de playas et de semi-playas (coupe X et de l'échantillon 118).

Playas et semi-playas					
Identifiants	Coupe ou échantillon	118	Coupe X		
	Echantillon	118	X1	X2	X3
Granulométrie	D25 (µm)	110	90	60	65
	D50 (µm)	170	200	140	160
	D75 (µm)	195	500	195	240
	D99 (µm)	400	1200	510	700
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	8,0	17,6	25,9	23,7
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	84,2	32,2	52,4	46,2
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	7,8	50,2	21,8	30,1
Classement en fonction des modes de transport éoliens	x <63 µm (%)	8,0	17,6	25,9	23,7
	63≤ x ≤315 µm (%)	86,3	40,3	65,7	63,1
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	5,7	29,9	8,0	12,1
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,1	11,3	0,4	1,0
	x >1000 µm (%)	0,0	0,9	0,0	0,0
Carbone organique total	Carbone organique (%)	2,1	1,2	2,6	2,5
Morphoscopie	RM (%)	56	98	90	92
	EL (%)	28	0	0	0
	NU (%)	16	2	10	8

VI.D.1.b. Les canaux et les puits

En raison de l'anthropisation importante de la région depuis l'Antiquité, il était également essentiel d'étudier les faciès et les caractères sédimentologiques de certains aménagements anthropiques tels que les déblais de curage de puits et les canaux, afin d'éviter des erreurs d'interprétation des dépôts fins étudiés. La coupe U et l'échantillon 105 ont été prélevés dans cette logique.

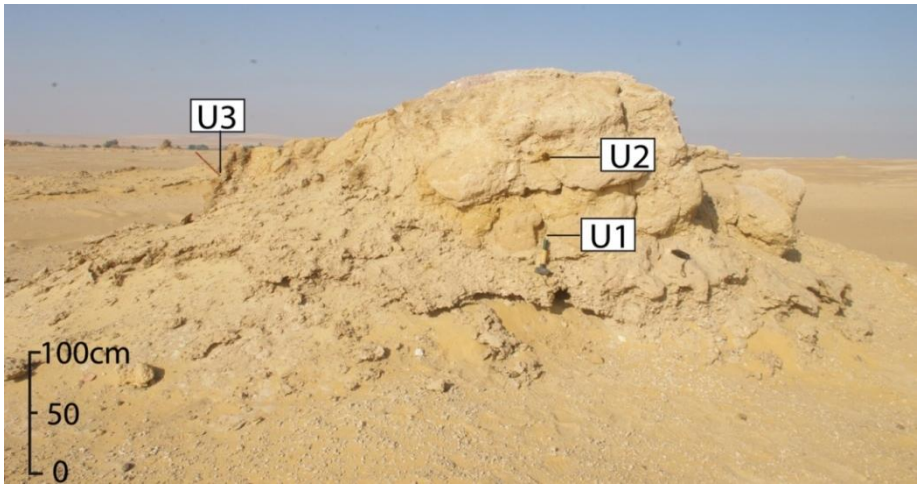


Figure 73 - Photographie de la coupe U au sud du site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. L'échantillon U3 n'apparaît pas dans les tableaux et logs car il s'agit d'un prélèvement de vestiges de stipe de palmiers (malheureusement insuffisant pour une datation radiocarbone). Prise de vue : décembre 2011.

Située à la limite entre les sites KS060 - Tell-Douch au nord et KS071 au sud et mesurant 2,33 m de hauteur, la coupe U (figures 73 et 74, tableau 15) présente des dépôts très hétérogènes, différant ainsi de la plupart des coupes observées sur le terrain. La formation est constituée de plusieurs unités dont l'épaisseur varie latéralement. L'unité constituant la base de la coupe mesure, sur la face est, environ 50 cm en partie nord, contre environ 1 m en partie sud. Elle est constituée d'un mélange de sédiments fins et de croûte salée. La couche suivante, qui mesure 1,40 m en partie nord et 45 cm en partie sud, est constituée d'une matrice de sédiments fins au sein de laquelle des agglomérats cohésifs de sédiments fins et des graviers sont présents. En partie nord, les 10 cm constituant le sommet sont composés d'argilites violettes. Enfin, à l'extrémité sud, on trouve des restes de palmiers. Deux échantillons de sédiments ont été prélevés, qui ont révélé une granulométrie plutôt homogène. La présence d'un puits abandonné à proximité immédiate et le faciès des sédiments indiquent sans aucun doute possible qu'il s'agit d'un tas de déblais érodé issu d'un curage.

Tableau 14 - Sédimentologie des dépôts de canaux et de puits (coupe U et échantillon 105).

Canaux et puits				
Identifiants	**Coupe ou échantillon**	**105**	**Coupe U**	
	Echantillon	**105**	**U1**	**U2**
Granulométrie	**D25 (µm)**	115	95	130
	D50 (µm)	185	190	240
	D75 (µm)	250	380	450
	D99 (µm)	480	1300	1700
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	13,2	16,4	13,4
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	51,0	35,9	33,1
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	35,8	47,1	52,8
Classement en fonction des modes de transport éoliens	**x <63 µm (%)**	13,2	16,4	13,4
	63≤ x ≤315 µm (%)	75,4	50,6	47,8
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	11,1	22,4	25,0
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,2	9,1	12,0
	x >1000 µm (%)	0,0	1,6	1,7
Carbone organique total	**Carbone organique (%)**	1,5	1,5	4,1
Morphoscopie	**RM (%)**	94	84	94
	EL (%)	2	2	2
	NU (%)	4	14	4

L'échantillon 105 (figure 76 et tableau 15) a été prélevé dans un dépôt de 20 cm de hauteur, à proximité d'un ancien puits, sur le tracé d'un canal indiqué sur la carte au 1:10000e du *Survey of Egypt* éditée en 1931. L'aspect extrêmement homogène de la coupe et la finesse du sédiment pourraient indiquer une origine éolienne. Seuls la morphologie du dépôt, son

contexte et la présence de nombreux oxydes et de ciments carbonatés dans les sédiments permettent de distinguer ce dépôt de la plupart des dépôts éoliens de sédiments fins de la région. Cela s'explique probablement par le mode de construction de la plupart des canaux de la région : dans presque tous les cas, il consiste à creuser une rigole dans le sol de la palmeraie (figures 75 et 77) dont le sédiment peut être éolien. Les carbonates déposés par l'eau protègent les anciens canaux de l'érosion en armant le sédiment, expliquant ainsi leur mise en évidence et la formation d'un microrelief inversé.

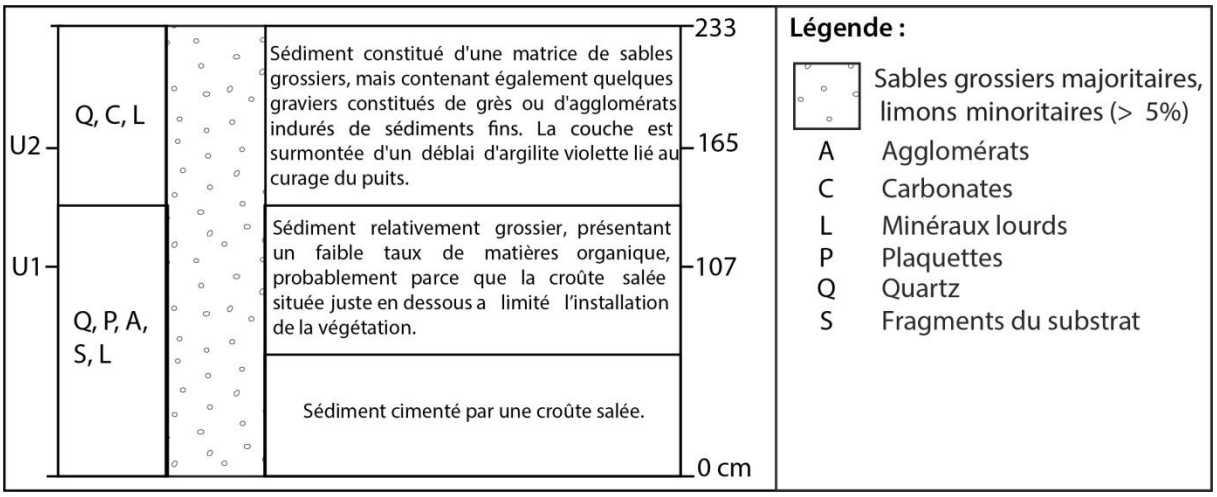


Figure 74 - Log synthétique de la coupe U.

Figure 75 - Vestiges de canal sur le site KS161 - Aïn Zabiba. Prise de vue : décembre 2011

Figure 76 - Photographie des vestiges de canal au sein desquels l'échantillon 105 a été prélevé, avec l'emplacement de l'échantillon. Prise de vue : novembre 2011

Figure 77 - Canal en fonctionnement dans l'oasis actuelle de Douch. Les canaux non maçonnés distribuent l'eau vers différents réseaux d'irrigation. Une simple levée de terre sépare le canal actuellement en eau du canal à sec à gauche. Son déplacement pour ouvrir le canal situé à gauche et boucher le canal de droite permet d'alimenter une autre partie du réseau d'irrigation. Prise de vue : novembre 2011

VI.D.1.c. Les dépôts éoliens indépendants des activités anthropiques

Les échantillons 110, 116 et 117 ont été prélevés au sein de formations éoliennes actives. Les échantillons 116 et 117 (figure 78, tableau 16) proviennent d'une méga-ride éolienne. Il était initialement prévu le prélèvement et l'analyse de nombreuses méga-rides de la région afin de mieux les caractériser et de comprendre certaines de leurs particularités (hauteur élevée et granulométrie particulièrement grossière). Cela n'a finalement pas été possible. Néanmoins, la destruction de certaines méga-rides lors de l'épisode de précipitations de 2012 et leur reformation en 2014 démontrent tout de même que le vent actuel est capable de déplacer par reptation des grains de plus de deux millimètres.

L'échantillon 110 (figure 79 et tableau 16), a été prélevé sur une barkhane active afin de déterminer la granulométrie des sables dunaires actuels. Particulièrement élevés pour une dune vive, la médiane et le D99 indiquent la grande compétence du transport éolien qui mobilise sous forme de barkhanes un sédiment plutôt grossier.

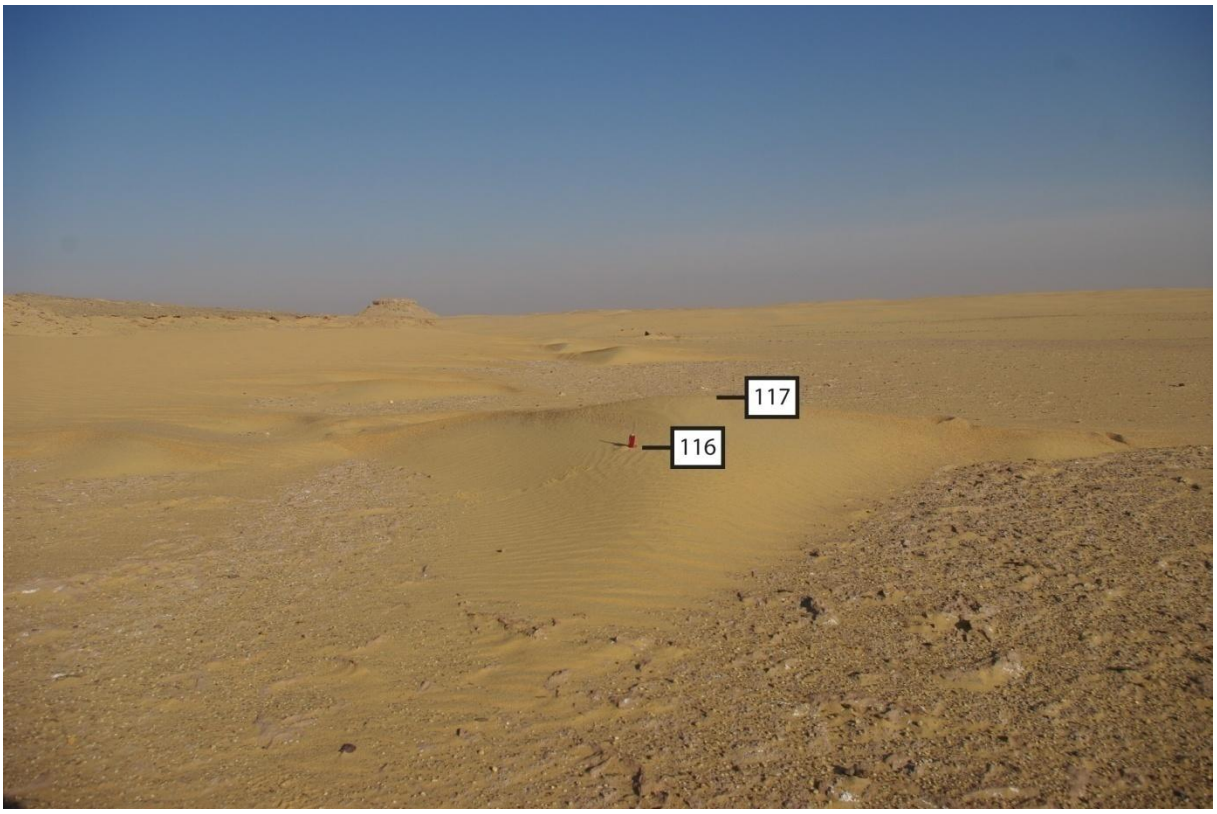


Figure 78 - Photographie de la méga-ride où ont été prélevés les échantillons 116 et 117, sur le site KS192, avec la localisation des prélèvements. Prise de vue : décembre 2011

Tableau 15 - Sédimentologie des dépôts éoliens d'origine naturelle (échantillons 108, 109, 110, 114, 115,116, 117, 123, 127).

Dépôts éoliens d'origine naturelle										
Identifiants	**Coupe ou échantillon**	**108**	**109**	**110**	**114**	**115**	**116**	**117**	**123**	**127**
	Échantillon	**108**	**109**	**110**	**114**	**115**	**116**	**117**	**123**	**127**
Granulométrie	**D25 (µm)**	88	140	280	2	5	170	1500	70	65
	D50 (µm)	170	190	410	25	80	300	1850	140	110
	D75 (µm)	195	275	540	175	190	605	1980	240	160
	D99 (µm)	800	800	950	400	500	1600	2600	600	600
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	11,6	9,1	4,6	58,5	43,2	5,5	0,1	21,3	22,7
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	72,0	52,1	13,3	29,8	44,5	29,3	0,4	61,1	69,1
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	16,4	38,8	82,2	9,3	8,5	65,2	99,7	14,2	3,0
Classement en fonction des modes de transport éoliens	**x <63 µm (%)**	11,6	9,1	4,6	58,5	43,2	5,5	0,1	21,3	22,7
	63≤ x ≤315 µm (%)	78,7	73,2	23,8	32,3	48,4	46,1	0,5	64,5	74,3
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	7,7	15,8	61,8	9,1	8,0	22,9	0,5	13,1	1,9
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	2,0	2,0	9,7	0,1	0,4	21,9	0,4	0,9	0,9
	x >1000 µm (%)	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	3,5	98,5	0,1	0,3
Carbone organique total	**Carbone organique (%)**	3,8	2,1	0,2	4,6	4,3	0,5	0,2	Non mesuré	3,9
Morphoscopie	**RM (%)**	94	98	100	84	90	90	88	80	92
	EL (%)	0	0	0	6	0	6	2	2	8
	NU (%)	6	2	0	10	10	4	10	18	0

Figure 79 - Sommet de la barkhane où a été prélevé l'échantillon 110, sur le site KS089 - Aïn Manawir. Le personnage assis donne l'échelle. Prise de vue : décembre 2011

L'échantillon 127 (figure 80, tableau 16) a été prélevé dans une formation en cours de destruction, un *rebdou* dont les tamarix secs ne suffisaient plus à maintenir le sédiment au sol, entraînant son démaigrissement progressif en raison de la corrasion éolienne. L'objectif de ce prélèvement était de caractériser les sédiments situés au cœur des *rebdous*. Il était essentiel de profiter de l'opportunité de prélèvement offerte par son état de dégradation, ce modelé répandu dans la région étant généralement recouvert de sable dunaire, plus grossier. La granulométrie du dépôt le rapproche de lœss grossiers, malgré une médiane un peu élevée, qui pourrait s'expliquer par le grand nombre de débris végétaux et d'agglomérats carbonatés observés au microscope dans les fractions les plus grossières. Sans surprise, le taux de matière organique est élevé.

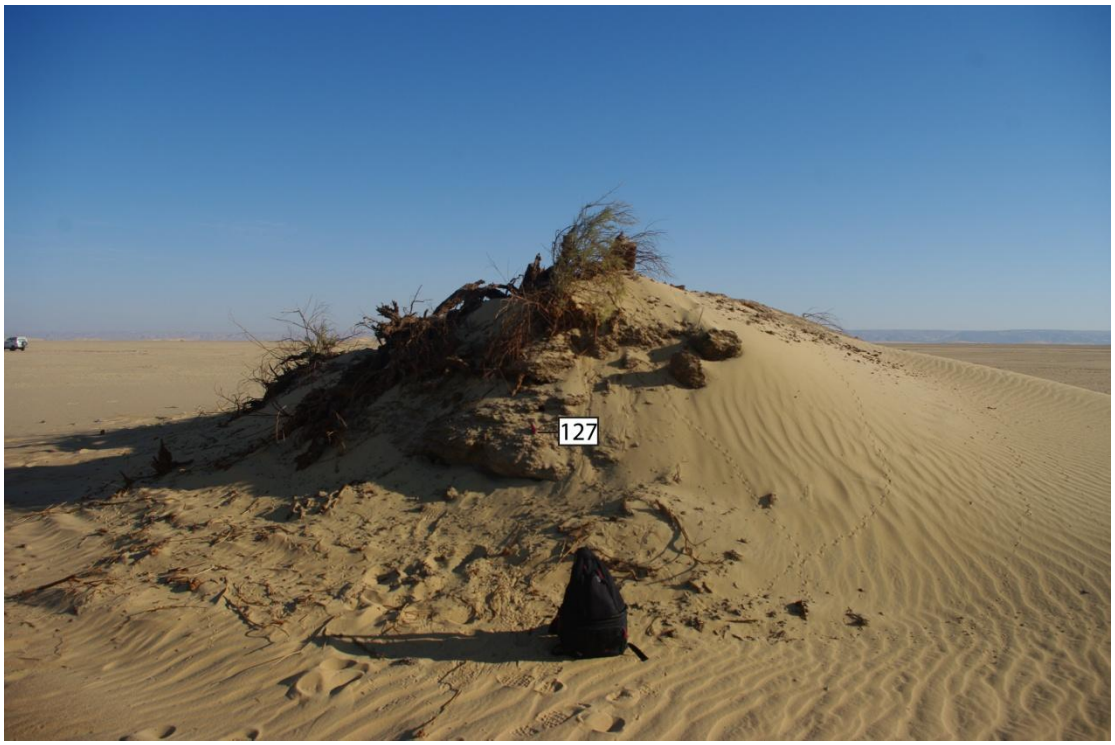


Figure 80 - Photographie du *rebdou* dans lequel a été prélevé l'échantillon 127, sur le site KS052, avec la localisation du prélèvement. Prise de vue : décembre 2011

L'existence d'un dépôt identifié par les archéologues comme une dune fixée et stabilisée par les hommes à l'époque romaine (Wuttmann *et al.* 1998) a permis le prélèvement des échantillons 108 et 109, afin de mieux identifier les dépôts dunaires antiques. La granulométrie diffère de celle de la barkhane analysée (échantillon 110), mais cela n'est pas anormal, le type de dunes initial étant inconnu. De plus, la vitesse du vent et/ou la charge sédimentaire étant modifiées par le couvert de surface, il est très probable que les sédiments les plus grossiers aient été retenus au vent. En effet, de nombreux champs existaient au nord

du dépôt à l'époque romaine, et la rugosité de surface renforcée localement pourrait avoir piégé la majeure partie des sables grossiers.

L'échantillon 123 (figure 81 et tableau 16) a été prélevé dans un secteur plan et complètement dénué de végétation, en profitant du travail de fouille, sur une surface réduite, de T. Dachy[35] et de M. Minotti[36]. Elles ont mis au jour, immédiatement sous le sable vif de couleur jaune, un dépôt très peu cohésif constitué de sables plus fins légèrement rubéfiés. Ce type de dépôt est présent sur la plupart des sites préhistoriques du sud de la région, immédiatement sous les sables vifs, et contient fréquemment du matériel lithique (T. Dachy et M. Minotti, communication personnelle). Au vu du matériel lithique qu'il contient, on peut conclure qu'il s'agit d'un dépôt ancien, probablement rubéfié par la concentration des oxydes de fer, qui peuvent se fixer et se maintenir sur les grains de quartz en l'absence des chocs réguliers liés au transport en saltation. Ce dépôt indique donc que, même en l'absence de végétation et malgré la vitesse des vents locaux, des dépôts de sables fins relativement anciens peuvent être retrouvés intacts à proximité de la surface actuelle constituée de sables vifs.

Figure 81 - Photographie de l'emplacement de prélèvement de l'échantillon 123 (sous la pellicule superficielle de sable, juste à côté du sac à échantillons) sur le site KS097. Prise de vue : décembre 2011.

Les échantillons 114 et 115 (figure 82 et tableau 16) ont été prélevés, à titre de comparaison avec les dépôts des yardangs formés aux dépens de dépôts plus récents, au sein d'un dépôt identifié auparavant par M. de Dapper comme un dépôt de lœss antérieur à l'Holocène moyen.

[35]. Tiphaine Dachy, post-doctorante au sein de l'UMR5608 - TRACES, a effectué sa thèse sur la préhistoire de la dépression de Kharga (Dachy 2015)

[36]. Mathilde Minotti, docteure associée à l'UMR5608 - TRACES a participé à la mission de l'IFAO à Douch de 2009 à 2011.

La sédimentologie de ces dépôts correspond parfaitement aux caractères des lœss sahariens. En raison du caractère lacunaire des données sur l'environnement tant local que régional pour la période concernée, il est impossible d'en dire plus.

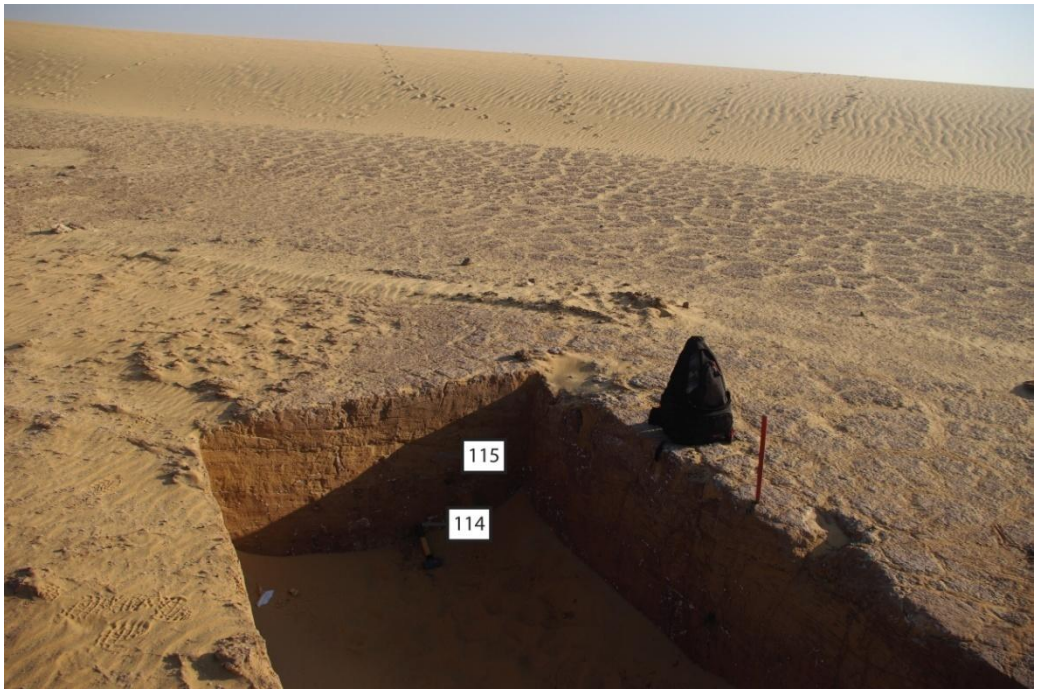


Figure 82 - Photographie du sondage dans lequel ont été prélevés les échantillons 114 et 115, avec la localisation des prélèvement, sur le site KS192. Seule la couche superficielle correspond à une ancienne playa reconnaissable aux polygones de dessiccation. Prise de vue : décembre 2011.

VI.D.1.d. les dépôts de parcellaires

Ces dépôts (coupe A, C et Y, échantillons 125 et 126), bien qu'ayant une origine éolienne marquée, ont été traités à part, en raison de leur formation dans un contexte d'activités anthropiques, et non dans un cadre strictement éolien. Le dépôt au sein duquel la coupe A a été prélevée (figures 83 et 87, tableau 17), a été identifié par B. Bousquet (1996) et par les archéologues de l'IFAO (M. Wuttmann, communication personnelle) comme un parcellaire de jardins (cultures maraîchères et/ou céréalières) daté de l'époque romaine. Situé en marge d'une dépression fermée, le dépôt est peu épais (62 cm). Ce sédiment gris à gris-violet contient du sel et du gypse formés *in situ* ou apportés depuis la dépression située directement au vent. Les 35 cm inférieurs présentent un litage fin ayant permis une érosion différentielle. La partie supérieure, au contraire, ne présente pas de litage net. Le bas de la coupe semble correspondre à un remaniement par le ruissellement (ou par inondation des parcelles agricoles) de dépôt éolien. La finesse du sédiment, que sa granulométrie rapproche des lœss sahariens (en particulier pour l'échantillon A2), implique la présence d'éléments de rugosité aérodynamique

à même de piéger les sédiments et de les maintenir au sol. Les taux de matière organique sont relativement bas (1,71 à 2,83 %).

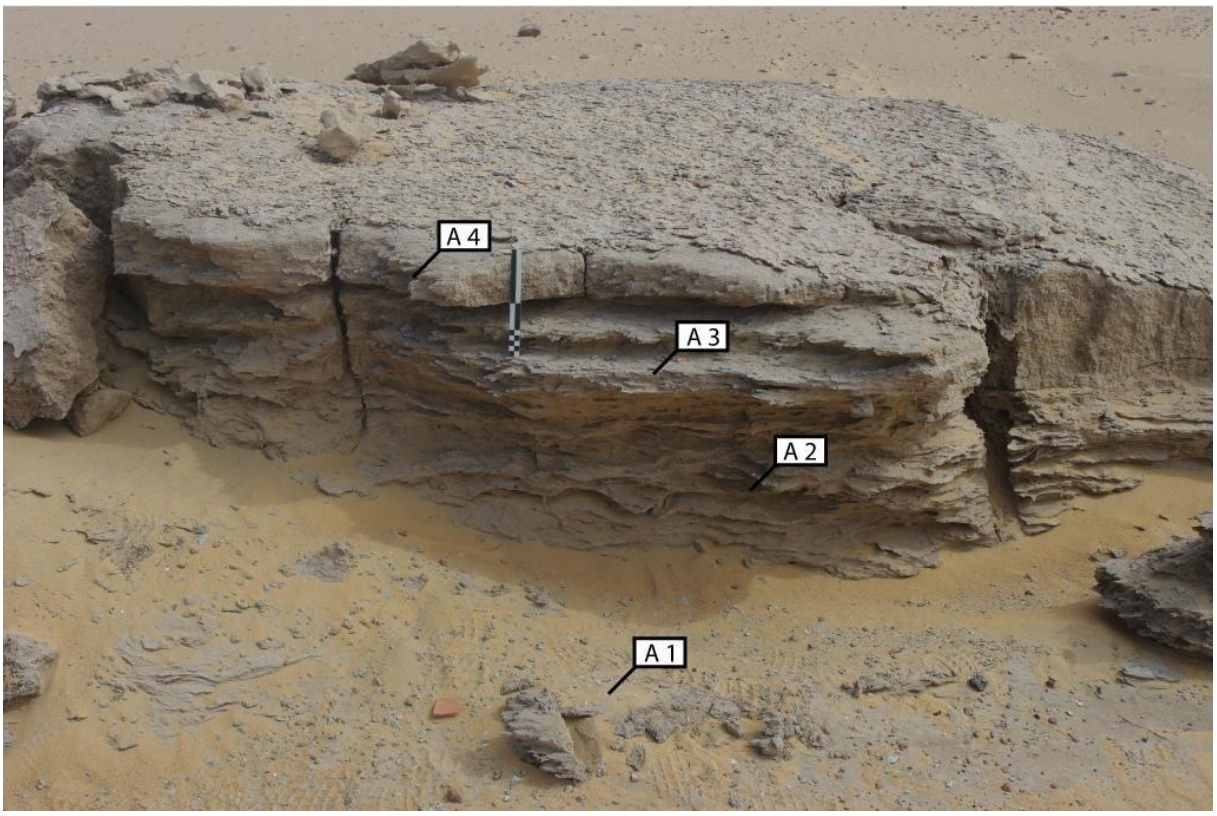


Figure 83 - Photographie de la coupe A sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010

Les échantillons 125 et 126 (figure 84 et tableau 17) ont été prélevés en surface, dans un secteur où le parcellaire de jardins (cultures maraîchères et/ou céréalières) d'époque ptolémaïque (fin du IVe s. avant notre ère) est particulièrement bien préservé. L'échantillon 125 est très semblable aux échantillons prélevés sur la coupe A. L'échantillon 126, au contraire, présente une granulométrie plus grossière et contient des morceaux de calcaire et de grès dépassant 2 mm, d'origine probablement locale. Le prélèvement de cet échantillon ayant été effectué à proximité immédiate d'un canal, il est possible que les éléments grossiers aient été apportés par l'irrigation depuis les qanats en amont.

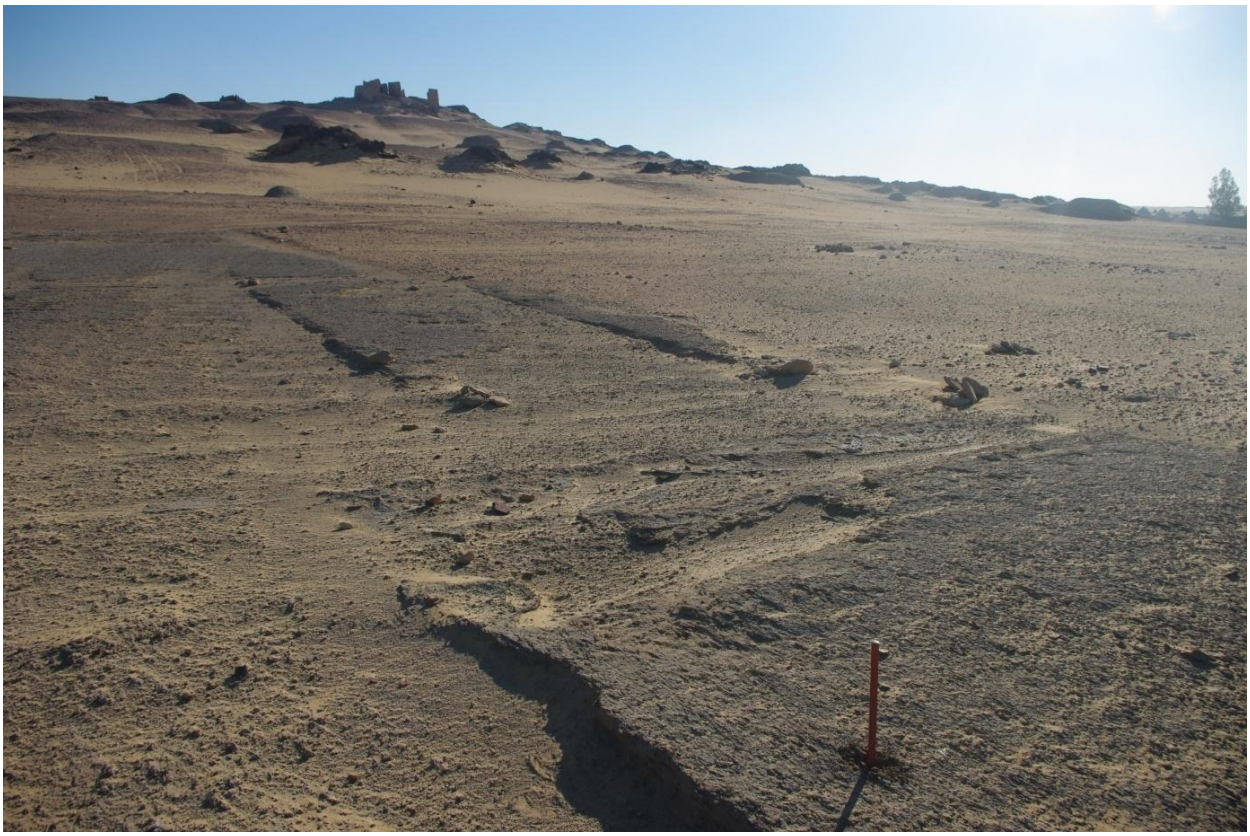


Figure 84 - Photographie du parcellaire où les échantillons 125 et 126 ont été prélevés, sur le site KS060 - Tell-Douch. Prise de vue : novembre 2011.

Les coupes C et Y ont également été sélectionnées dans le cadre de l'étude des parcellaires au sein de yardangs contenant des vestiges de palmiers. La coupe C (figures 85 et 87, tableau 17) a été prélevée dans un dépôt coiffé d'un palmier cultivé à l'époque ottomane (Bousquet 1996) dont une partie du stipe et la majeure partie du système racinaire étaient préservées. Le sédiment est fin, bien qu'un peu plus grossier que sur les parcellaires précédents. Le tri, excellent, et la morphoscopie des grains de quartz indiquent une origine éolienne des sédiments. Le taux de carbone organique, malgré la présence des restes de palmier, est bas. La matière organique ne semble pas encore avoir migré au sein des sédiments. La coupe Y (figures 86 et 87, tableau 17), dans laquelle on retrouve des restes de palmiers beaucoup plus dégradés (datés de la période médiévale, XIII-XV^{e}s. de notre ère - M. Wuttmann, communication personnelle) présente des caractères similaires, hormis le taux de carbone organique, nettement plus élevé. Ce dépôt recouvre un parcellaire cultivé antérieur (IV^{e}s. de notre ère). Les pentes et le faciès du dépôt indiquent une origine éolienne et des processus dunaires, tout à fait logiques dans le contexte local (proximité immédiate de l'erg). Les jardins d'époque romaine ont été ensablés par une dune qui a ensuite été fixée et a servi de terre arable pour une palmeraie.

Ces coupes et ces échantillons permettent donc de repérer des caractères généraux des parcellaires de jardins (cultures maraîchères et/ou céréalières) et des parcellaires de palmeraie. Il apparaît que le sédiment autour des palmiers est généralement mieux trié et plus grossier que celui des parcelles en cultures rases. L'absence de palmes à proximité du sol pourrait expliquer ce phénomène : le vent serait insuffisamment ralenti et perturbé pour permettre le dépôt des sédiments les plus fins là où la céréaliculture, par exemple, permettrait de piéger l'ensemble des sédiments transportés par le vent à proximité du sol. La combinaison de palmeraies et de parcelles de jardin favoriserait ainsi le piégeage d'un sédiment très fin : les palmes ralentiraient le vent en hauteur, permettant aux limons déplacés en suspension de se rapprocher du sol, et les cultures basses piégeraient ensuite ce sédiment au sol. La genèse de ces dépôts s'apparenterait donc à la formation de lœss sahariens ou de lœss enrichis d'apports de sables plus grossiers d'origine locale.

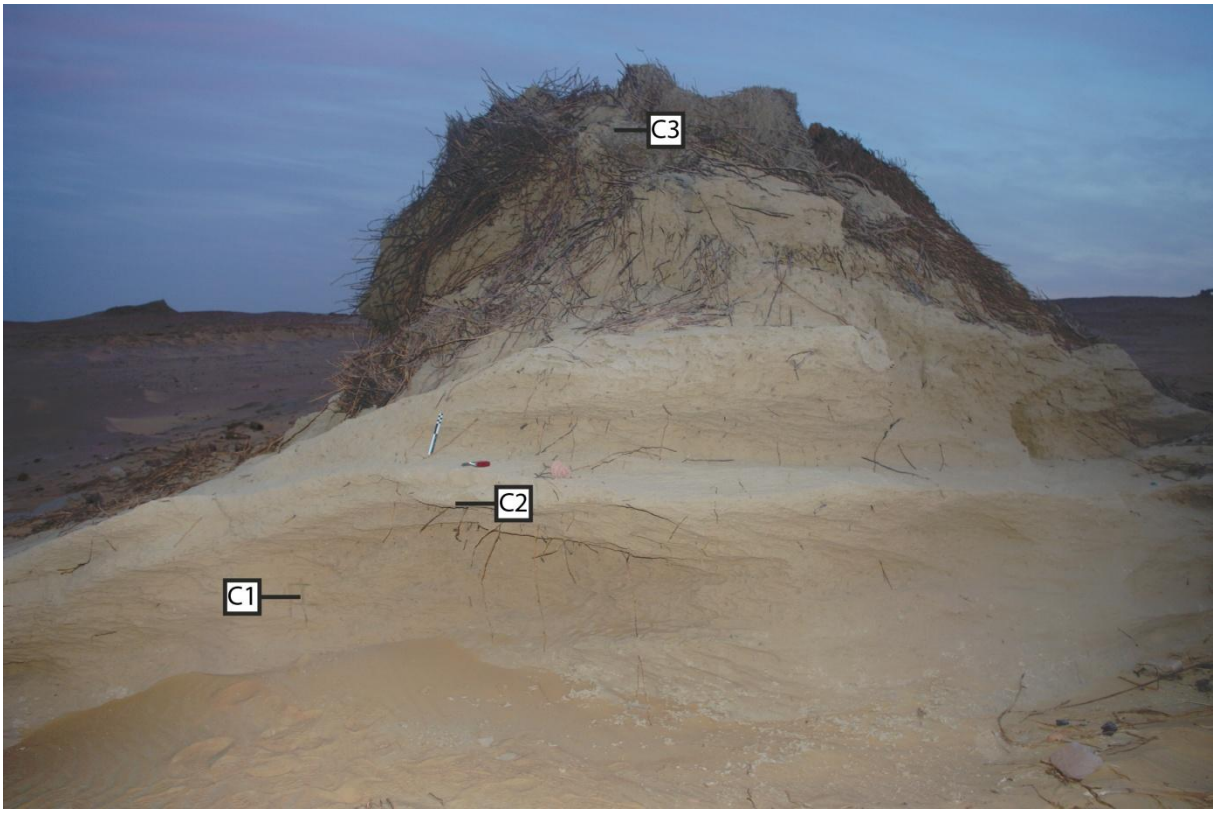


Figure 85 - Photographie de la coupe C sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

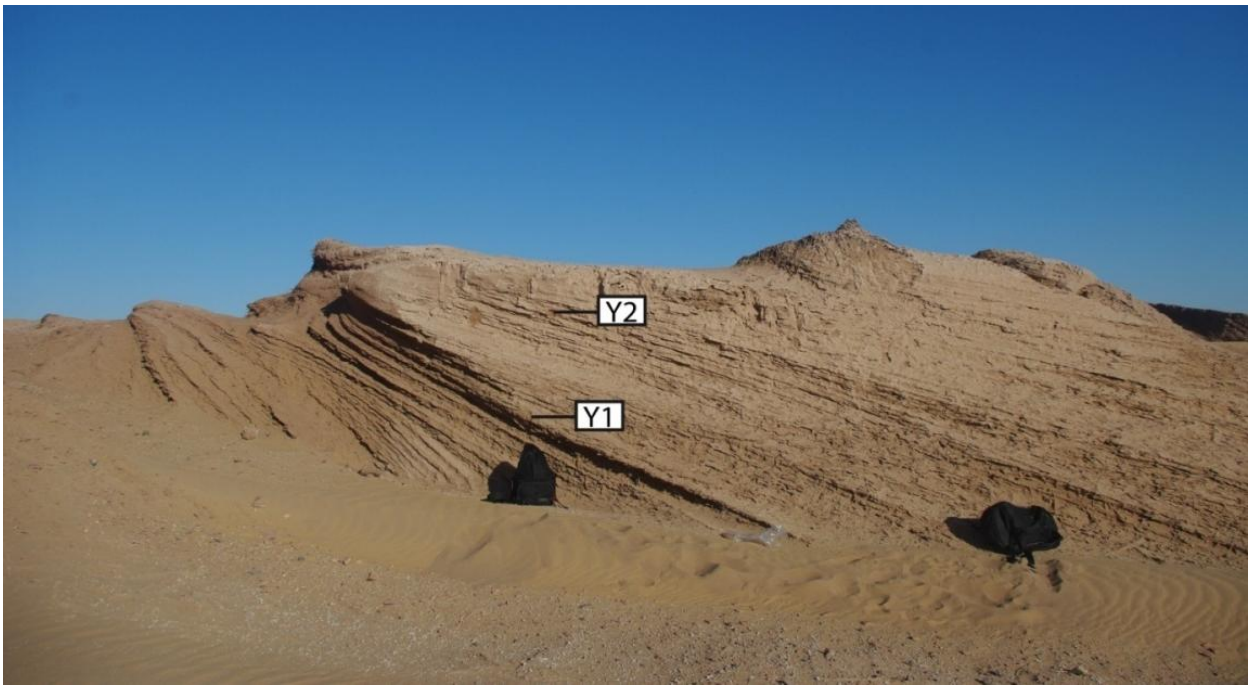


Figure 86 - Photographie de la coupe Y sur le site KS209 - Aïn el-Mansouriya, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2011.

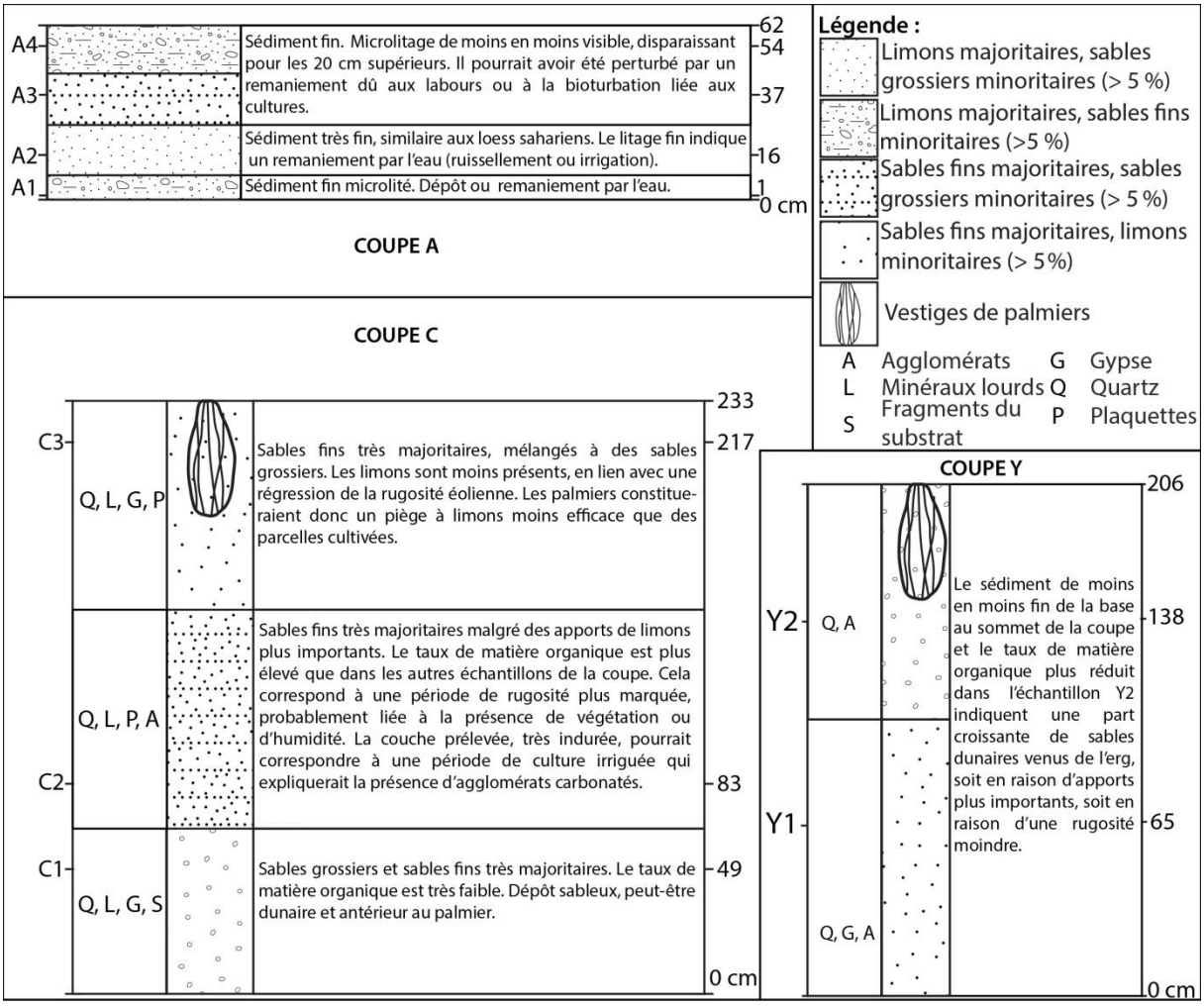


Figure 87 - Logs synthétiques des coupes A, C et Y.

Cet ensemble de coupes et d'échantillons constitue donc un référentiel sédimentologique et morphologique essentiel à la compréhension et à l'interprétation des coupes échantillonnées au sein des très nombreux yardangs dans la région. L'étude sédimentologique des échantillons des coupes en question a permis de constituer deux groupes principaux, l'un regroupant les lœss sahariens, l'autre les dépôts légèrement plus grossiers, constitués d'apports lœssiques et d'apports de sables. Enfin, deux coupes plus hétérogènes seront présentées à part, en raison de leur complexité.

Tableau 16 - Sédimentologie des dépôts de parcellaires (coupes A, C et Y, échantillons 125 et 126).

Dépôts de parcellaire												
Identifiants	**Coupe ou échantillon**	**125**	**126**	**A**				**C**			**Y**	
	Echantillon	**125**	**126**	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**C1**	**C2**	**C3**	**Y1**	**Y2**
Granulométrie	**D25 (µm)**	20	90	10	2	18	7	145	70	120	70	100
	D50 (µm)	130	195	130	49	135	135	200	130	180	160	200
	D75 (µm)	190	285	230	150	230	240	295	185	215	250	330
	D99 (µm)	500	2600	530	420	490	580	470	330	390	600	550
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	34,6	19,8	36,5	54,5	34,0	38,7	9,6	21,5	11,0	23,1	16,8
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	45,7	33,4	31,4	33,5	34,8	27,7	40,7	66,2	61,5	44,2	34,2
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	19,7	44,9	32,1	12,0	31,2	33,6	49,8	12,3	27,4	32,7	48,9
Classement en fonction des modes de transport éoliens	**x <63 µm (%)**	34,6	19,8	36,5	54,5	34,0	38,7	9,6	21,5	11,0	23,1	16,8
	63≤ x ≤315 µm (%)	56,1	64,8	52,5	36,5	54,0	48,3	71,6	77,4	85,1	63,9	54,1
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	8,9	12,9	10,5	8,7	11,7	12,0	18,8	1,1	3,8	12,0	28,5
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,6
	x >1000 µm (%)	0,1	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	**Carbone organique (%)**	3,9	3,1	1,7	2,8	2,2	1,7	0,7	1,5	1,2	2,9	2,2
Morphoscopie	**RM (%)**	98	98	94	94	86	80	98	94	86	82	96
	EL (%)	2	0	4	6	10	2	0	4	12	0	2
	NU (%)	0	2	2	0	4	18	2	2	2	18	2

VI.D.2. Analyse sédimentologique des dépôts fins de la région de Douch

Cinq coupes et deux des échantillons isolés étudiés correspondent à des lœss sahariens, par leur sédimentologie, leur faciès et leur contexte de dépôt.

VI.D.2.a. Les lœss sahariens

Échantillons 119 et 124

Ils ont été prélevés au sein de deux yardangs (figures 88 et 89) dans le fond d'une dépression interdunaire dans la partie est de l'erg. Ces dépôts de sédiment très fin et homogène situés immédiatement au nord de vestiges de canaux et de parcellaires très érodés d'époque romaine (Ve s. de notre ère), tranchaient avec le contexte dunaire. La finesse des sédiments et la quasi absence de sables grossiers (tableau 18) indiquent un changement important non seulement dans les conditions de rugosité aérodynamique locale (suffisante pour piéger des limons et des argiles en grande quantité) mais également dans la granulométrie des apports éoliens (expliquant ainsi la faible quantité de sables grossiers).

Figure 88 - Photographie du dépôt au sein duquel a été prélevé l'échantillon 119. Prise de vue : décembre 2011.

Ce constat est incompatible avec le contexte actuel : l'erg actif induit la présence de grandes quantités de sables, y compris grossiers. Ces éléments s'ajoutent aux interrogations évoquées lors de la présentation des sites archéologiques de l'erg et confirment que le milieu a changé dans ce secteur. La proximité des parcellaires romains situés immédiatement au sud permet également de supposer que ces dépôts ont été utilisés par des cultures à l'époque romaine ou que les activités agricoles ont contribué à leur formation. L'absence de moyen de datation interdit pour l'heure toute conclusion à ce sujet. Enfin, d'après la typologie des grains éoliens indiquée précédemment, près de 99 % des grains de ces deux échantillons pourraient avoir été transportés en suspension lors de vents violents. Ces deux dépôts correspondraient donc à des lœss sahariens, dont l'épaisseur et l'étendue sont pour l'heure inconnues.

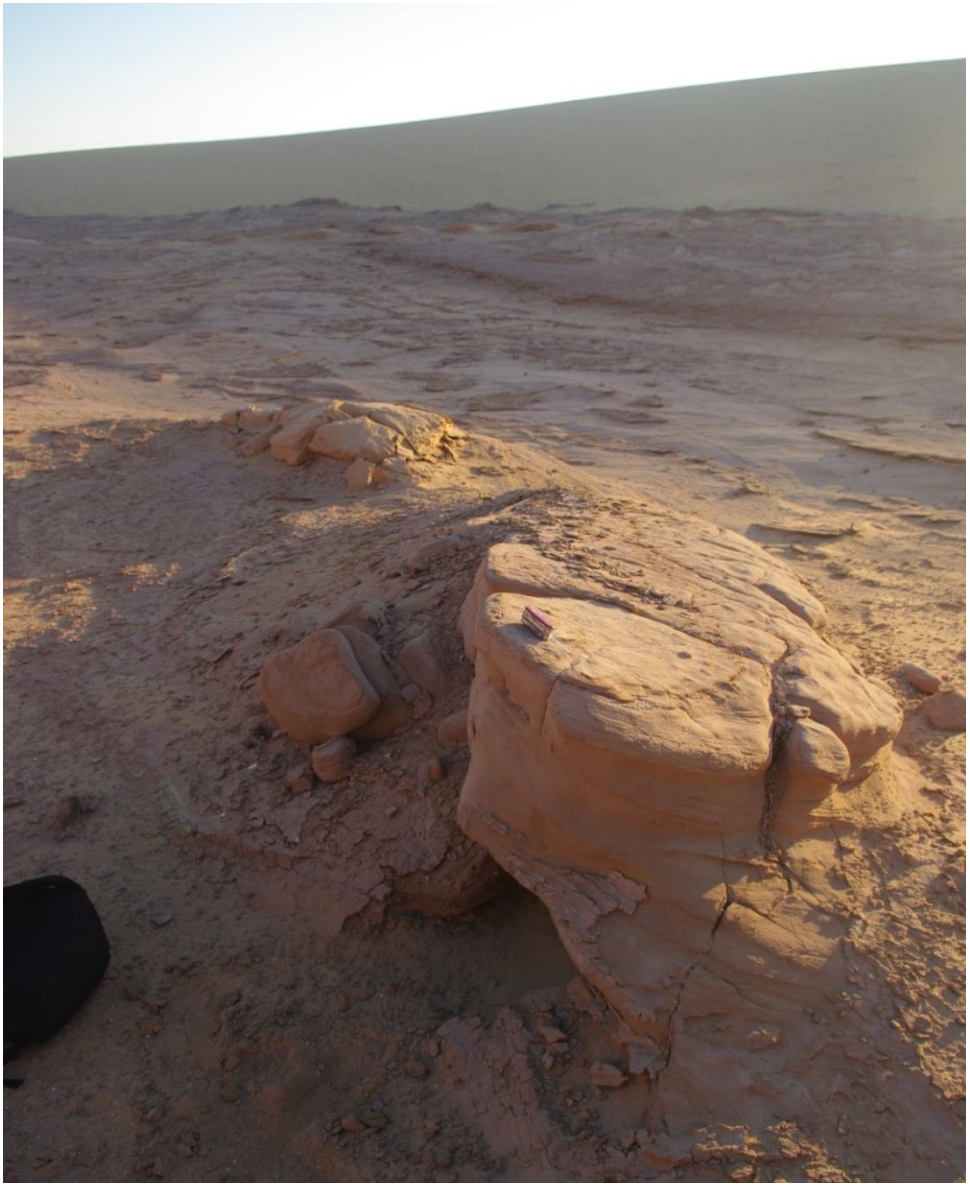


Figure 89 - Photographie du yardang au sein duquel a été prélevé l'échantillon 124 sur le site KS209 - Aïn el-Mansouriya. Prise de vue : décembre 2011.

Tableau 17 - Sédimentologie des dépôts de lœss sahariens (coupes E, G et N, échantillons 119 et 124).

Lœss sahariens 1													
Identifiants	Coupe ou échantillon	119	124	E				G			N		
	Echantillon	119	124	E1	E2	E3	E4	G1	G2	G3	N1	N2	N3
Granulométrie	D25 (µm)	2	3	4	10	3	8	3	2	4	3	4	2
	D50 (µm)	24	65	80	105	58	80	52	45	65	70	75	55
	D75 (µm)	130	140	190	190	140	150	105	130	150	210	150	140
	D99 (µm)	400	195	800	850	600	500	380	650	350	700	520	550
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	60,2	48,9	44,3	38,2	52,8	39,5	55,0	56,0	49,0	47,7	44,3	51,5
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	36,3	50,5	33,7	40,8	35,8	48,7	35,2	39,2	45,2	25,4	43,2	34,4
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	3,5	0,6	21,5	20,8	11,4	11,8	9,8	4,8	5,8	27,0	12,5	14,1
Classement en fonction des modes de transport éoliens	x <63 µm (%)	60,2	48,9	44,3	38,2	52,8	39,5	55,0	56,0	49,0	47,7	44,3	51,5
	63≤ x ≤315 µm (%)	38,4	51,0	45,3	53,8	42,2	56,9	41,0	42,0	49,0	37,1	49,3	41,2
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	1,3	0,1	9,0	6,2	4,0	3,0	4,0	2,0	2,0	13,6	6,1	6,8
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,1	0,0	0,8	1,3	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	1,7	0,3	0,5
	x >1000 µm (%)	0,0	0,0	0,6	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	Carbone organique (%)	5,4	4,5	5,3	6,1	4,3	4,1	3,6	2,9	4,0	6,1	6,3	5,8
Morphoscopie	RM (%)	98	96	88	92	80	80	80	80	76	92	94	94
	EL (%)	0	4	2	2	6	10	2	6	6	2	6	2
	NU (%)	2	0	10	6	14	10	18	14	18	6	0	4

Coupe E

Le faciès, le contexte local et l'organisation circulaire des dépôts au sein desquels se développe cette coupe (figures 90 à 92 et 96, tableau 18), située au pied de Tell-Douch, indiquent une formation autour d'une source ou d'un puits artésien. L'absence de tas de déblais

à proximité incite à privilégier l'hypothèse d'une source. La partie inférieure présente, contrairement à la partie supérieure, une stratification oblique, et semble s'être formée sur un tertre artésien, ou avoir été légèrement soulevée par la remontée artésienne. La présence de fragments de grès et de coquillages (*Melanoides tuberculata*[37], figure 93, et *Bulinus globosus*[38], figure 94) au sein des échantillons E1 et E2, ainsi que le D99 élevé doivent être reliés au fonctionnement de la source, permettant la vie de mollusques aquatiques.

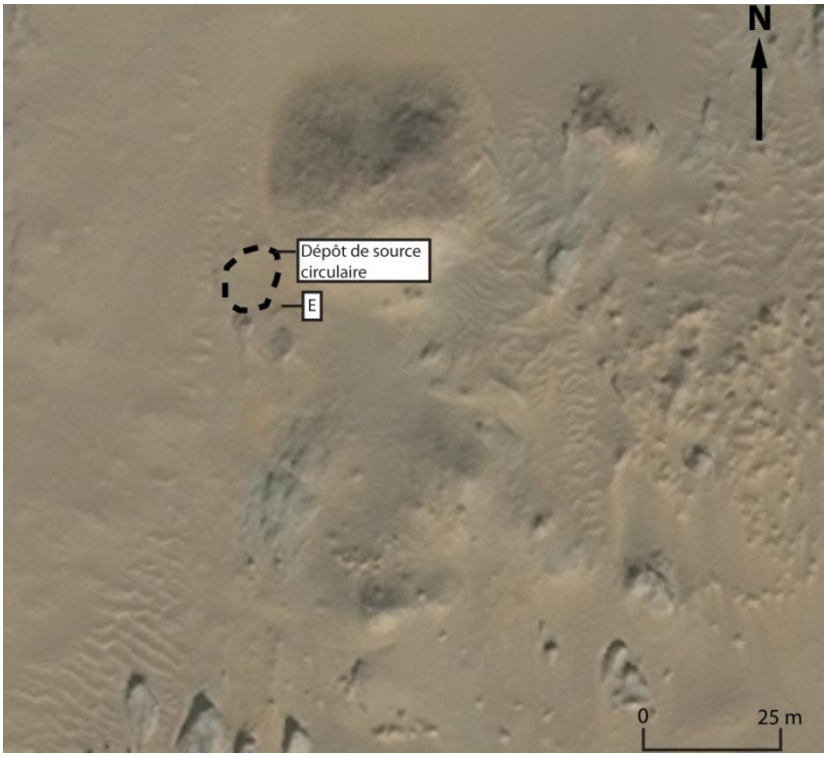


Figure 90 - Contexte local de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch. Source : *Google Earth pro*. Image satellitaire de mars 2004.

Les échantillons E3 et E4, au contraire, seraient liés à des dépôts strictement éoliens piégés par la végétation lors d'une période de moindre activité de la source (mais durant laquelle l'humidité serait suffisamment pérenne pour entretenir durablement la végétation). La granulométrie plus grossière de l'échantillon E4 par rapport à l'échantillon E3 pourrait s'expliquer par une baisse progressive de la rugosité au fur et à mesure du tarissement de la source ou du puits et de la disparition des végétaux. Les taux de carbone organique, parmi les plus élevés de la région, soulignent une spécificité locale ayant permis la formation et/ou la conservation de matière organique peut-être en lien avec des ressources en eau proches de la

[37]. L'espèce *Melanoides tuberculata* vit dans des étendues d'eau permanentes, stagnantes ou vives, douces à saumâtres et supportant des températures élevées et des taux d'oxygène réduits. Elle se développe particulièrement bien dans des milieux très anthropisés (Hatem Djerbi, communication personnelle).

[38]. L'espèce *Bulinus globosus* ne supporte que des eaux douces et stagnantes. En revanche, elle peut survivre à l'assèchement de son habitat en s'enfonçant dans la boue humide, ralentissant son métabolisme en attendant la remise en eau. Cette espèce est également l'un des principaux vecteurs du parasite responsable de la bilharziose (Hatem Djerbi, communication personnelle ; Nouboué-Teukeng 2011).

surface jusqu'à des périodes récentes (ce que semble confirmer la présence d'une butte végétalisée de grande taille à proximité immédiate). Cette coupe n'a malheureusement pas pu être datée. Les échantillons contiennent moins de 10 % (moins de 5 % pour E3 et E4) de grains nécessitant un transport en saltation ou reptation : ils correspondraient donc à des lœss sahariens mélangés à des apports liés à la source.

Figure 91 - Photographie de la partie est de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

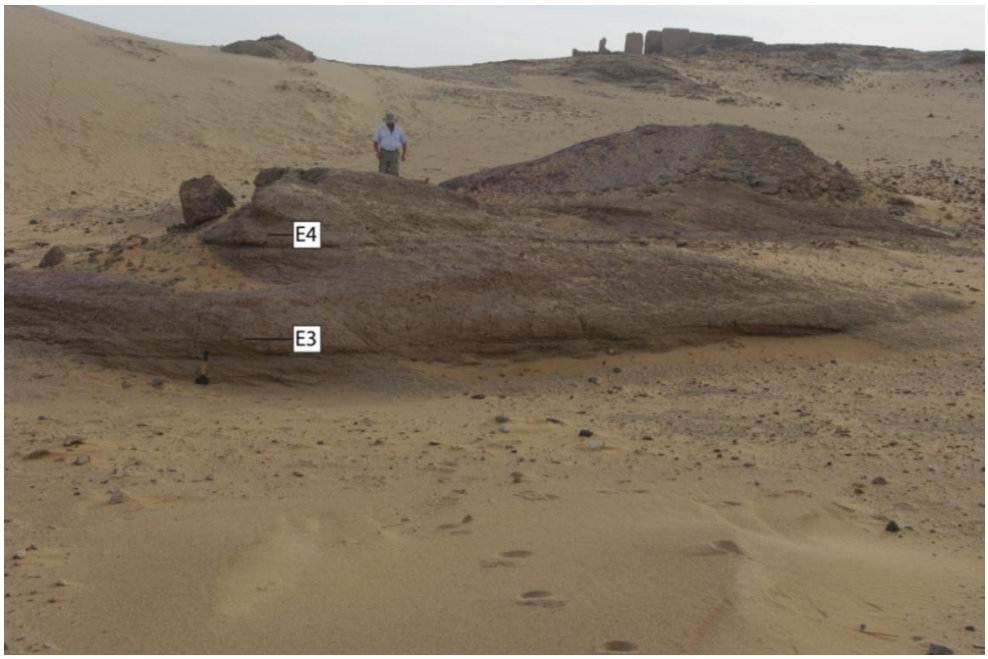


Figure 92 - Photographie de la partie sud de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

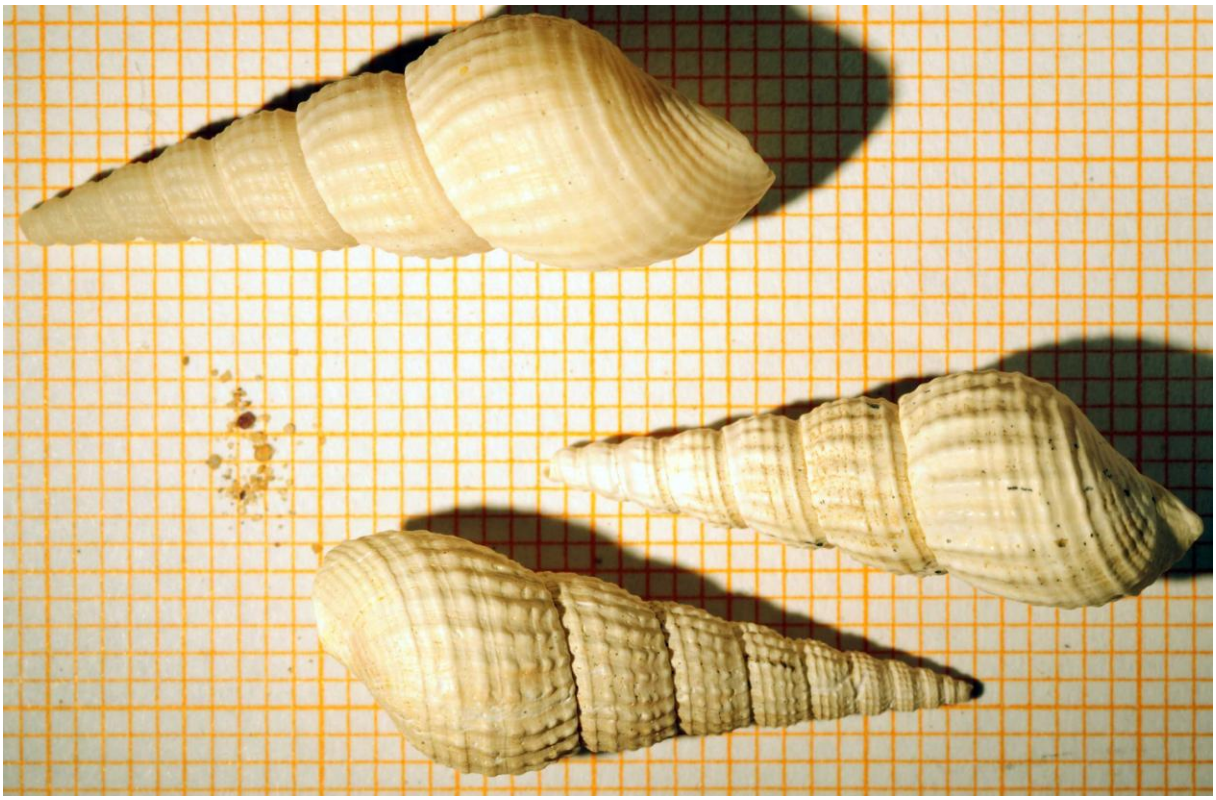


Figure 93 - *Melanoides tuberculata* prélevés au sein de la coupe E.

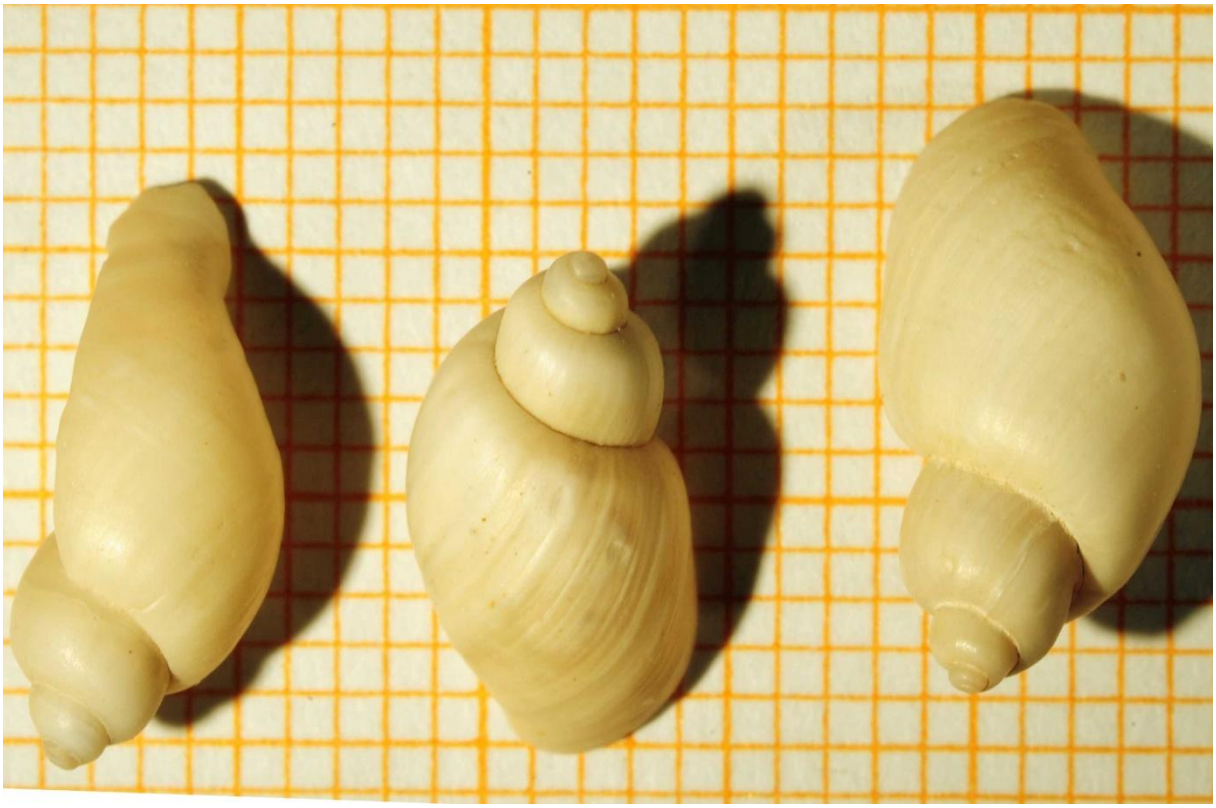


Figure 94 -*Bulinus globosus* prélevés au sein de la coupe E.

Coupe G

Ce dépôt (figures 95 et 96, tableau 18) se situe sur le versant s'abaissant vers le nord de KS060 - Tell-Douch, mais présente une stratification oblique orientée vers le sud-ouest et discordante avec la pente de la colline (vers le nord). Le sédiment est homogène, à l'exception d'une couche cendreuse liée à un foyer en place daté de l'Ancien Empire, en lien avec des campements temporaires (4 800 BP environ ; Bousquet 1996 ; Wuttmann *et al.* 1998). La sédimentologie du dépôt confirme son homogénéité et indique un transport éolien. Les dosages de matière organique (2,85 à 4,03 %), supérieurs aux pourcentages habituels en milieu hyperaride, indiquent un dépôt dans un environnement plus propice à la végétation que le contexte actuel. Le taux plus faible pour l'échantillon G2 pourrait être lié à la combustion produite lors de l'activité du foyer. Le croisement de ces données avec l'observation des dépôts sur le terrain permet de l'interpréter : la stratification oblique opposée à la pente du versant actuel indique que la paléotopographie était différente et explique la position du foyer. Le dépôt s'est formé derrière une butte (*rebdou* par exemple) ou un tertre artésien aujourd'hui disparu dont la pente était, sur une de ses faces, inverse à celle du versant. Les sédiments, très fins et très bien triés, correspondent à des lœss sahariens. Les activités humaines nomades liées au foyer ne semblent pas avoir modifié les conditions de dépôt de manière significative.

Figure 95 -Photographie de la coupe G, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Le foyer est signalé par la ligne rouge. Prise de vue : novembre 2010.

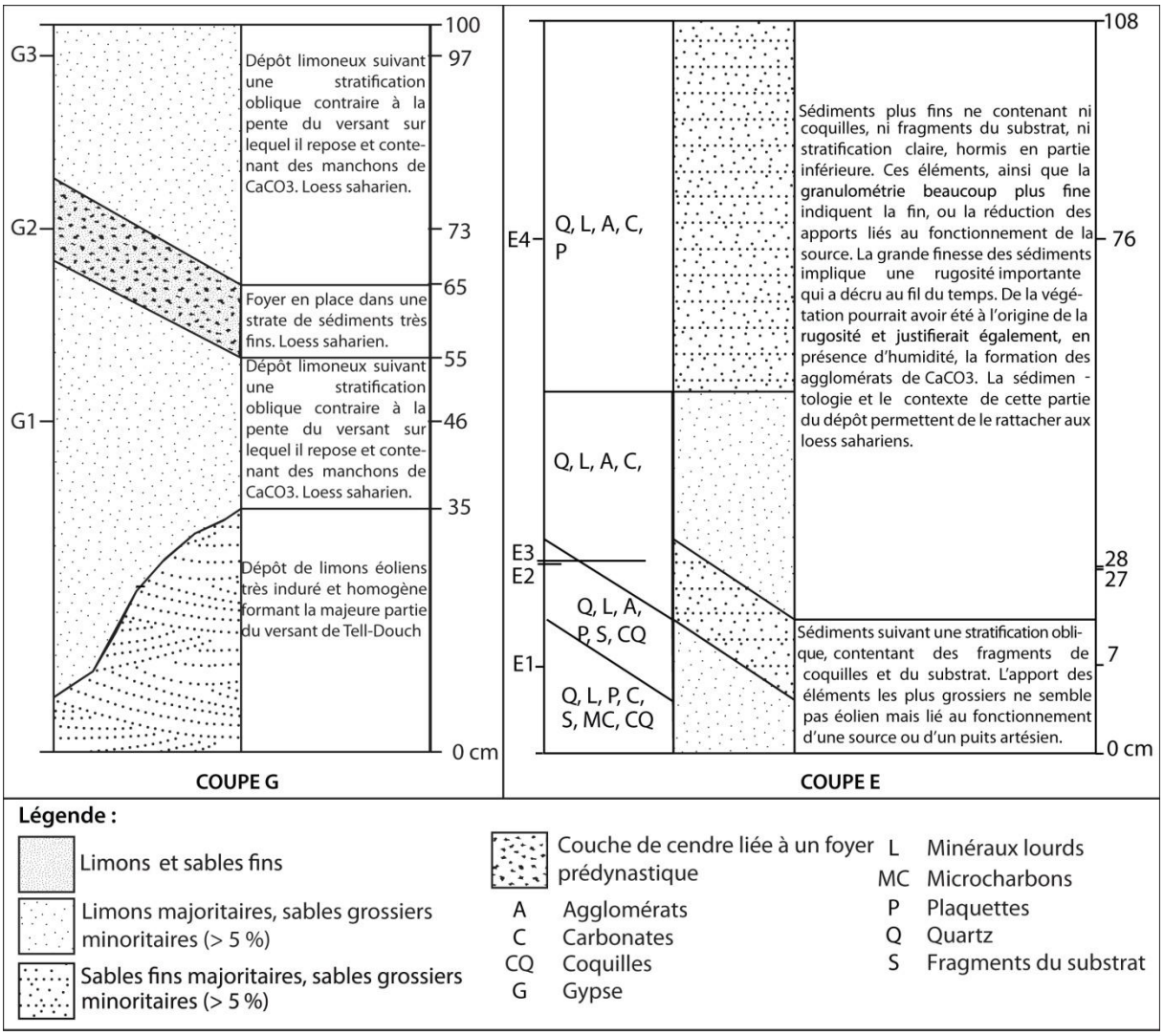


Figure 96 - Logs synthétiques des coupes G et E.

Coupe N

Cette coupe (figures 97 et 98, tableau 18) située sur la colline de KS088 - Aïn Ziyada mesure environ 360 cm de hauteur. La majeure partie du dépôt est très homogène, constituée d'un sédiment beige comportant de nombreux manchons de $CaCO_3$ originellement racinaires. Au contraire, la partie sommitale du dépôt (les 30 derniers centimètres) est très différente : d'une couleur gris violacé, elle correspond à un déblai anthropique lié au forage d'un regard de qanât au travers du yardang et jusque dans les argilites sous-jacentes.

Les analyses sédimentologiques confirment une très grande homogénéité du dépôt : composition qualitative, morphoscopie, taux de carbone organique élevés (parmi les plus forts relevés dans la région) et granulométrie sont semblables. Une différence notable existe toutefois entre l'échantillon N1, qui contient plus de sables grossiers, et les deux autres, pour lesquels cette classe granulométrique représente moins de 15 % du poids des sédiments. Les

limons et argiles sont majoritaires pour l'ensemble des échantillons. L'échantillon N3 a au contraire une granulométrie encore plus fine indiquant une augmentation de la rugosité locale ou une modification de la charge sédimentaire.

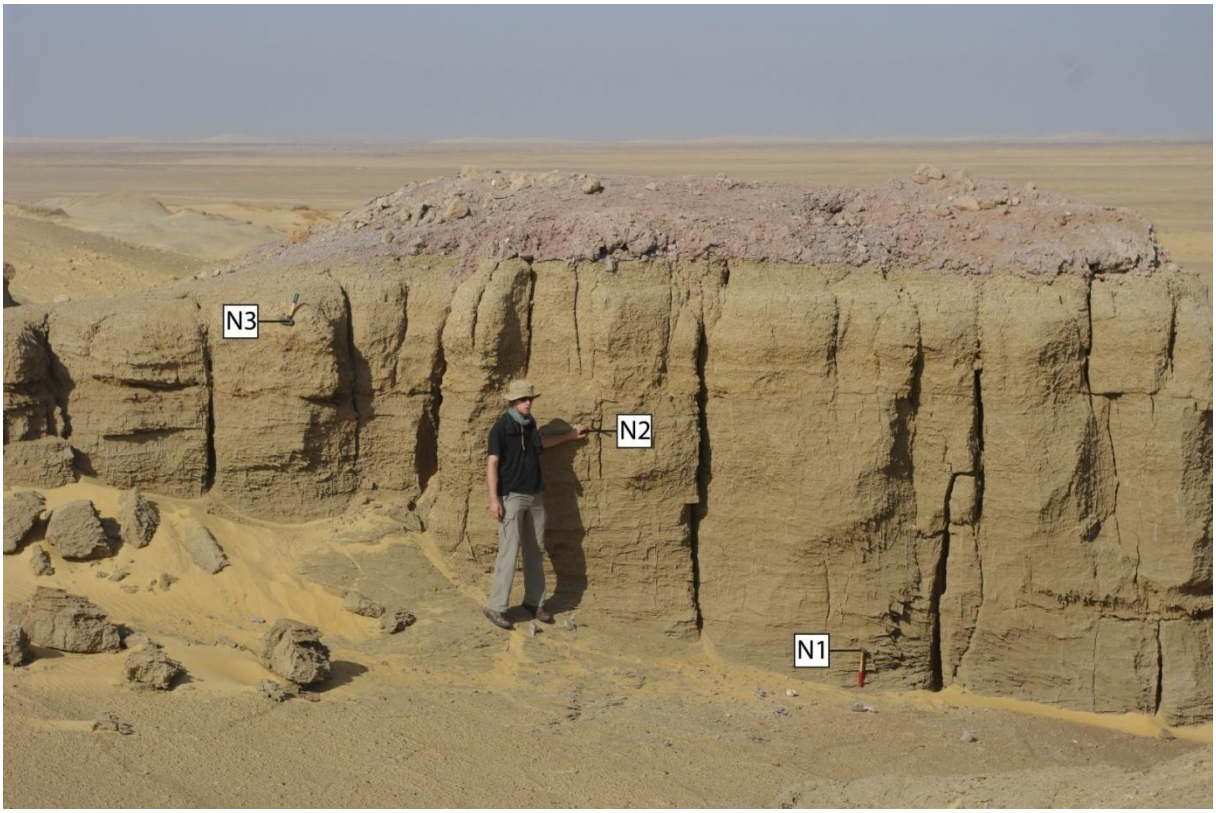


Figure 97 - Photographie de la coupe N, sur le site KS088 - Aïn Ziyada, avec emplacement des échantillons.). Photographie : Yann Callot, novembre 2010.

La sédimentologie de cette formation témoigne d'un dépôt de lœss sahariens : la majeure partie des grains correspond en effet à un transport en suspension continue et discontinue lors de vents violents ou de saltation lors de vents moins forts. Les déblais sommitaux indiquent un dépôt antérieur ou contemporain du creusement des qanâts. Le grand nombre de yardangs semblables (et présentant également des traces d'activités humaines à leur sommet) observé dans la zone indique que ce dépôt de lœss était autrefois étendu (au moins 64 ha). La grande finesse de l'échantillon N3, situé juste en dessous de la couche de déblais, pourrait être reliée aux activités humaines : les modifications locales de la rugosité aérodynamique seraient ainsi dues à la présence de cultures ou d'humidité liée à l'irrigation, et les cultures présentes au nord(des parcellaires antiques sont visibles directement au vent de ce site) pourraient avoir piégé les sédiments plus grossiers, modifiant ainsi la charge sédimentaire.

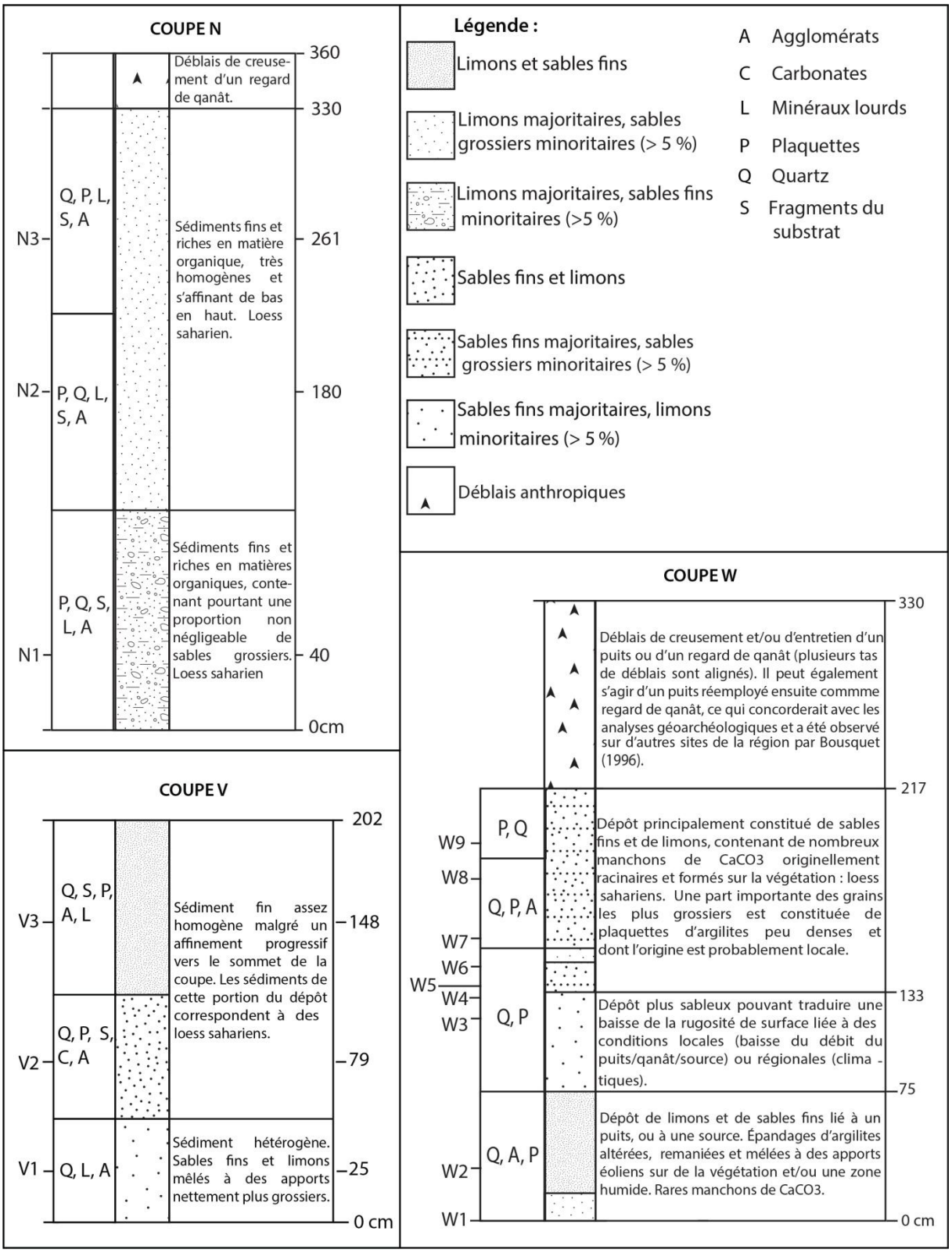


Figure 98 - Logs synthétiques des coupes N, V et W.

Coupe V

Ce yardang isolé (figure 98 et 99, tableau 19) mesurant 150 cm de haut se situe au sud-sud-est de KS060 - Tell-Douch, sous le vent de la colline. Le sédiment de couleur beige paraît assez

homogène, bien que certaines strates de dépôt soient légèrement plus indurées. Les analyses montrent que la base de la coupe est plus grossière et moins bien triée, alors que le reste est beaucoup plus fin et bien mieux trié. L'échantillon V1 ne ressemble à aucun des autres échantillons traités : sa médiane le rapproche des sédiments de palmeraie (coupes Y et C) ou de la dune stabilisée à l'époque romaine (échantillons 108 et 109), mais le D99, beaucoup plus grossier, tend vers les valeurs observées pour les dépôts de playas (échantillon X1), les dépôts de puits (coupe U), les mégarides et pour l'un des parcellaires irrigués d'époque ptolémaïque (échantillon 126). Il pourrait donc correspondre à un dépôt sableux éolien remanié et enrichi en sédiment grossier par un écoulement naturel ou lié à l'irrigation. Les échantillons V2 et V3 peuvent correspondre à un dépôt de lœss sahariens : leur finesse et leur tri sont parfaitement compatibles avec un transport éolien et un dépôt sur la végétation. La morphoscopie confirme également un transport éolien, les grains notés NU étant en réalité des grains ronds-mats fracturés par des impacts violents sur plusieurs de leurs faces. Les taux de matière organique sont élevés pour un milieu hyperaride, variant entre 3 et 3,3 %, et confirment la présence ancienne de végétation. Aucun élément n'a permis de dater cette formation.

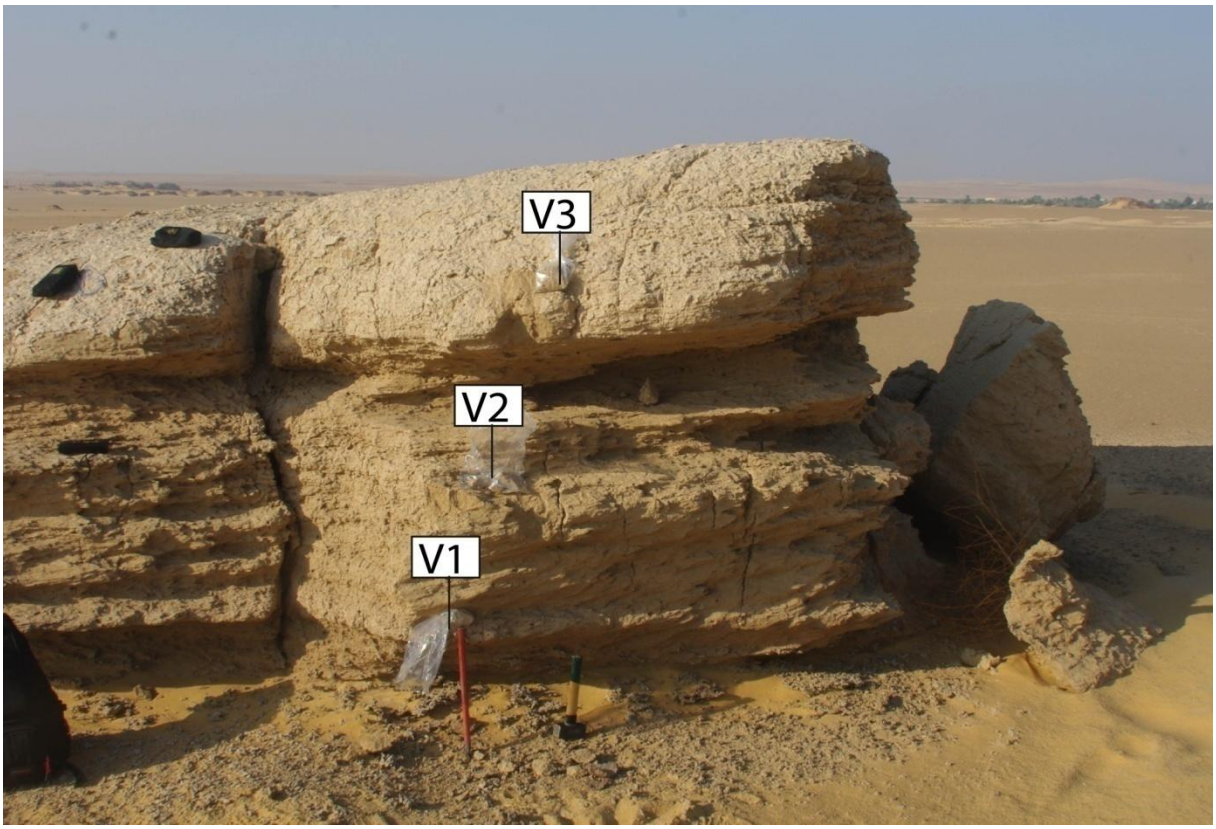


Figure 99 - Photographie de la coupe V, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2012.

Tableau 18 - Sédimentologie des dépôts de lœss sahariens (coupes V et W).

Lœss sahariens 2													
Identifiants	Coupe ou échantillon	V			W								
	Echantillon	V1	V2	V3	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9
Granulométrie	D25 (µm)	70	25	6	2	3	70	50	5	57	50	15	18
	D50 (µm)	160	90	65	40	45	140	100	60	130	95	75	80
	D75 (µm)	370	180	110	130	110	240	160	100	190	165	140	140
	D99 (µm)	1600	400	305	350	350	900	400	280	380	390	300	300
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	21,7	36,6	48,2	53,5	60,3	20,8	32,7	49,4	26,5	31,5	41,3	37,2
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	46,1	58,6	48,2	39,3	35,3	50,5	55,6	47,4	55,7	56,4	51,3	56,6
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	32,2	4,8	3,6	7,2	4,3	28,7	11,7	3,2	17,7	12,1	7,4	6,2
Classement en fonction des modes de transport éoliens	x <63 µm (%)	21,7	36,6	48,2	53,5	60,3	20,8	32,7	49,4	26,5	31,5	41,3	37,2
	63≤ x ≤315 µm (%)	51,2	61,9	51,0	45,1	38,1	62,2	64,0	50,2	71,5	65,9	57,6	62,1
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	10,7	1,1	0,6	1,2	1,5	14,3	3,1	0,3	2,0	2,6	1,1	0,7
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	11,9	0,4	0,1	0,2	0,2	2,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	x >1000 µm (%)	4,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	Carbone organique (%)	3,0	3,3	3,3	4,9	4,7	2,9	2,9	3,4	3,0	2,8	4,3	3,1
Morphoscopie	RM (%)	78	50	62	26	76	80	82	80	72	90	74	90
	EL (%)	0	0	2	10	8	8	0	6	14	2	10	2
	NU (%)	22	50	36	64	16	12	18	14	14	8	16	8

Coupe W

Située dans la partie sud-est du site de Tell-Douch (KS060), dans un secteur où les marques d'artésianisme ancien sont particulièrement visibles (vestiges de tertres artésiens, épandages lités d'argilites remaniées, etc.), la coupe W (figures 98 et 100, tableau 19) s'est formée au sein d'un yardang présentant la même séquence de dépôt que tout un groupe de buttes du secteur. En place sur des argilites remaniées par l'écoulement d'eau depuis un puits ou d'une

source, ce dépôt mesure environ 330 cm. La partie supérieure, de 120 cm d'épaisseur, est constituée de déblais anthropiques résultant du creusement d'un regard de qanât. La partie inférieure, mesurant 217 cm, présente une succession de couches de sédiments fins d'épaisseur variable dont la couleur varie du beige au brun. Les 75 premiers centimètres sont constitués d'un dépôt homogène de sables fins et de limons comprenant une grande quantité d'argilites et de rares manchons de $CaCO_3$ originellement racinaires. Les 62 cm situés au-dessus sont des sables moins fins et contenant de très nombreux manchons de $CaCO_3$. Les 80 cm du sommet de ce premier ensemble présentent une apparence plus homogène, bien que l'échantillon W6 contienne un sédiment légèrement plus grossier.

Seuls les échantillons W3 et W6 présentent des granulométries supérieures à celles observées pour les lœss sahariens ; cependant, une grande partie des fractions les plus grossières de ces échantillons est formée de plaquettes d'argilites probablement issues d'apports locaux. Seul l'échantillon W3 présente une médiane supérieure à celles habituellement observées pour des lœss sahariens et un D99 supérieur à 400 µm ; et la plupart des grains constituant ce dépôt peuvent être transportés en suspension, au moins lors d'épisodes de vents forts. Les taux de matière organique sont généralement élevés.

Les buttes présentant, dans ce secteur, une séquence générale de dépôt identique permettent d'estimer la surface recouverte par les lœss sahariens avant la formation des yardangs à environ 18 ha. Le dépôt est antérieur ou contemporain du creusement du qanât, et remonte donc à l'Antiquité ou à une période plus ancienne. En l'état actuel de nos analyses, une datation plus précise est impossible.

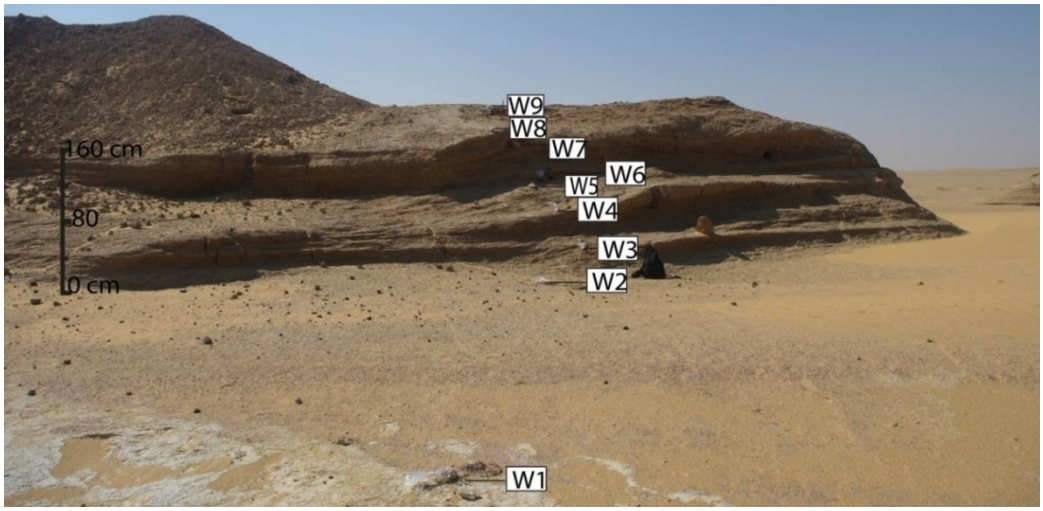


Figure 100 - Photographie de la coupe W, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2012.

Les lœss sahariens sont donc bien représentés dans la région, en particulier à proximité d'anciennes sources ou de puits abandonnés, et sur les points hauts (Aïn Ziyada, Tell-Douch, sud-est de Tell-Douch). Dans certains secteurs, ils ont recouvert de grandes surfaces, dépassant la dizaine d'hectares, avant la formation des yardangs au sein du dépôt. Pour certains de ces dépôts, une formation durant l'Holocène est attestée.

II.D.2.b. Les lœss sableux

Cinq coupes ont une sédimentologie les rapprochant des lœss sahariens, avec des apports légèrement plus grossiers. Deux coupes (O et ZB) sont exclusivement constituées de sédiment plus grossier mais indiquent des processus similaires. Trois (T, Q et F) se composent à la fois d'échantillons similaires aux lœss sahariens et d'échantillons plus grossiers.

Coupe O

Située sous le vent de la colline de KS088 - Aïn Ziyada, ce yardang (figures 101 et 104, tableau 20) mesure 471 cm de hauteur. Au pied de la coupe, un sédiment gris bleu contient des inflorescences gypseuses : il est ainsi semblable aux nombreux dépôts de sources artésiennes repérés dans le secteur. Les sédiments passent progressivement du gris bleu au beige, jusqu'à environ 200 cm. Toute cette portion présente des traces d'érosion différentielle mettant en évidence des différences d'induration. Le sommet de la coupe, plus homogène, est constitué d'un sédiment beige plus fin, au faciès éolien. Les manchons de $CaCO_3$ racinaires sont rares sur l'ensemble de la coupe.

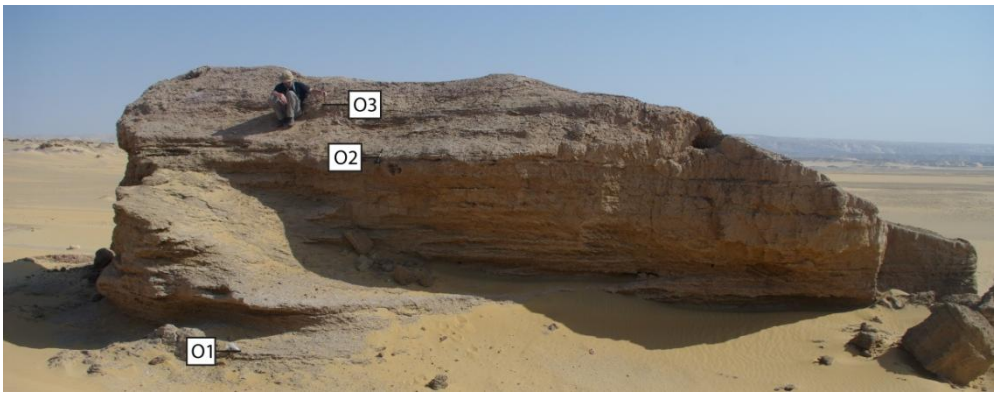


Figure 101 - Photographie de la coupe O, sur le site KS088 - Aïn Ziyada, avec emplacement des échantillons. Photographie : Yann Callot, novembre 2010.

De bas en haut, le sédiment est de plus en plus fin, dominé par les sables fins et les limons. Le D99 suit une tendance inverse (mais le pourcentage de sables grossiers est pourtant de plus en plus bas), indiquant un tri moins bon dans le sommet de la coupe et une distribution dispersée.

Les taux de matière organique sont élevés pour un milieu aussi aride, mais faibles par rapport à ceux mesurés sur ce type de sédiments dans la région.

Le bas pourrait correspondre aux apports d'une ancienne source. Un dépôt éolien (lœss sableux) permis par l'installation de végétaux aurait formé la partie supérieure. Les différences d'induration de la coupe seraient liées au fonctionnement de la source.

Tableau 19 - Sédimentologie des dépôts de lœss sableux (coupe O, Q, T et ZB.)

Lœss sableux 1											
Identifiants	**Coupe ou échantillon**	**O**			**Q**		**T**		**ZB**		
	Echantillon	**O1**	**O2**	**O3**	**Q1**	**Q2**	**T1**	**T2**	**ZB1**	**ZB2**	**ZB3**
Granulométrie	**D25 (µm)**	80	20	20	30	15	2	25	15	65	100
	D50 (µm)	150	130	110	125	90	55	125	130	200	210
	D75 (µm)	205	195	170	175	140	100	190	190	290	350
	D99 (µm)	400	450	600	380	360	380	1650	395	500	950
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	22,2	32,5	34,4	29,7	33,7	54,7	30,5	32,9	24,2	19,5
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	51,0	45,6	52,4	57,1	61,3	41,8	49,9	44,2	24,9	28,3
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	26,8	21,9	13,2	13,1	5,1	3,5	19,6	22,9	50,8	52,2
	63≤ x ≤315 µm (%)	73,6	62,3	61,1	67,4	65,2	43,6	60,8	63,7	57,8	48,6
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	4,2	5,1	3,5	2,8	1,2	1,7	4,1	3,3	17,7	25,4
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,0	0,2	0,7	0,0	0,0	0,1	1,5	0,1	0,2	6,5
	x >1000 µm (%)	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	**Carbone organique (%)**	1,4	2,4	3,2	3,2	3,9	3,7	2,5	2,3	1,7	2,0
Morphoscopie	**RM (%)**	74	78	74	90	82	90	78	86	88	100
	EL (%)	22	18	22	2	2	6	20	2	6	0
	NU (%)	4	4	4	8	16	4	2	12	6	0

Coupe ZB

Située à proximité du puits de KS161 - Aïn Zabiba, la formation entaillée par cette coupe (figures 102 et 104, tableau 20) repose sur un parcellaire daté de l'époque romaine (IIIe - Ve s.) et est coiffée par d'anciennes parcelles agricoles datées des périodes mamelouk à ottomane (XIIIe- XIXe s. de notre ère). Elle est constituée de 470 cm d'un sédiment beige sombre d'apparence homogène au faciès éolien. Elle contient de nombreux manchons de $CaCO_3$ originellement racinaire dont la densité augmente du bas vers le haut.

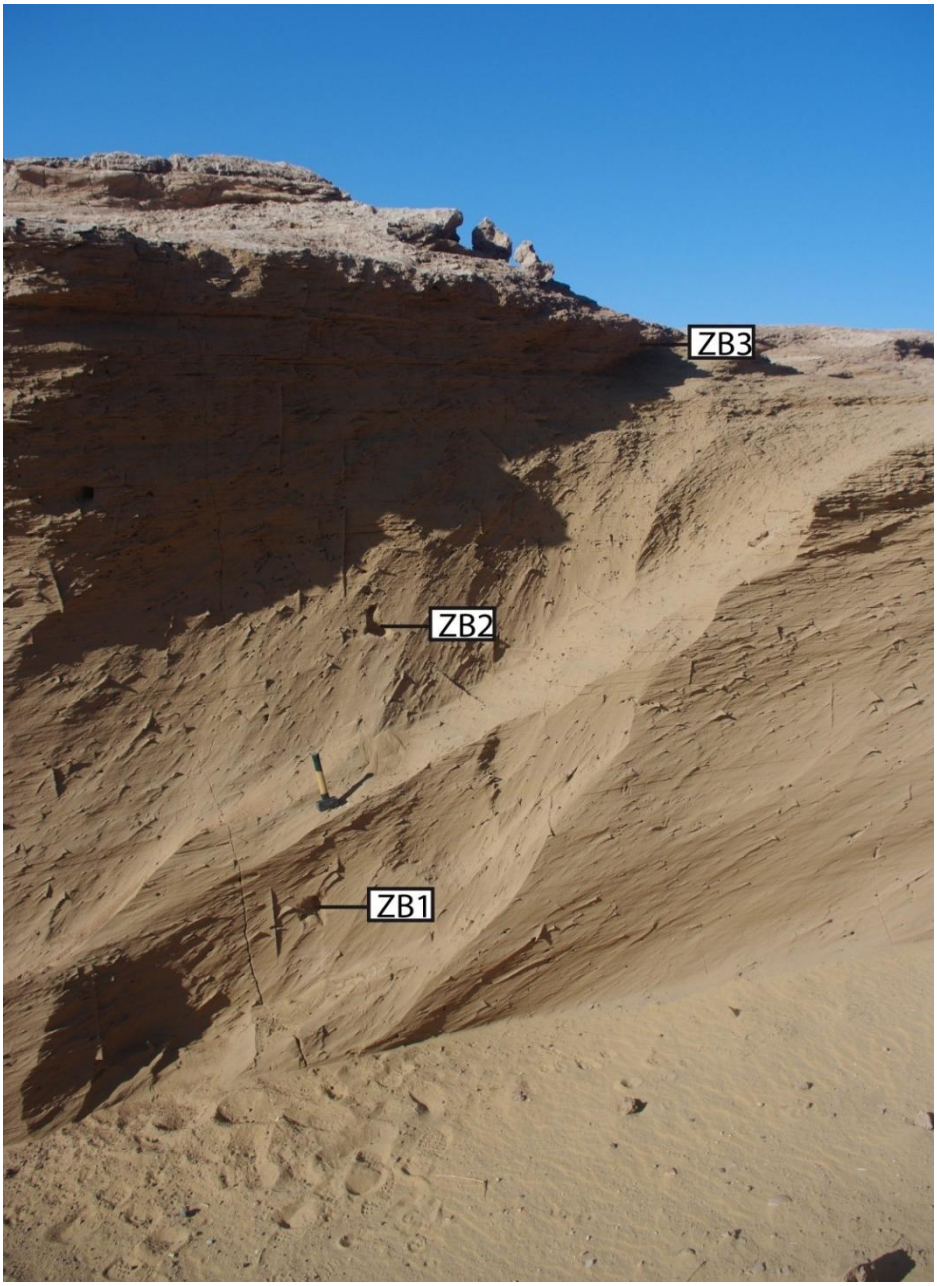


Figure 102 - Photographie de la coupe ZB, sur le site KS161 - Aïn Zabiba, avec emplacement des échantillons. Date: décembre 2011.

Malgré l'apparente homogénéité du dépôt, l'absence de rupture stratigraphique nette et des taux de carbone organique proches, les trois échantillons se distinguent fortement : de bas en haut, la fraction des sables grossiers devient de plus en plus importante, et les médianes comme les D99 augmentent nettement. L'échantillon ZB1 ressemble en tous points aux dépôts de lœss sableux observés dans d'autres secteurs de la région. Au contraire, les échantillons ZB2 et ZB3 présentent un sédiment encore plus grossier. Néanmoins, leur granulométrie demeure parfaitement compatible avec un transport et un dépôt éoliens. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer leur dépôt :

- changement des sources de sédiment, en raison de l'influence de l'erg qui traverse actuellement la partie ouest du site et du dépôt, et qui a laissé des traces de son passage sur les parcellaires romains (figure 103) ;

- changement des conditions locales de rugosité éolienne. La sédimentologie des échantillons ZB2 et ZB3 les rapproche effectivement des coupes C et Y, correspondant à des dépôts éoliens en contexte de palmeraie ;

- changement des conditions de rugosité au vent, avec une végétation plus clairsemée et une humidité réduite.

Figure 103 - Traces de passage de barkhanes (lignes signalées par les pointillés) sur un parcellaire d'époque romaine, site KS161 - Aïn Zabiba. Prise de vue : décembre 2011.

Les sédiments se seraient donc déposés sur la végétation liée aux champs d'époque romaine ou postérieure (ou sur la végétation naturelle en cas de période d'abandon des cultures), expliquant l'épaisseur du dépôt. Les yardangs et les buttes similaires du secteur permettent

d'estimer la surface initiale occupée par cette formation à plus de 40 ha. Par endroits, sa morphologie et son étendue ont été modifiées par les activités humaines (prélèvement de sédiments, arasement de yardangs pour la mise en culture).

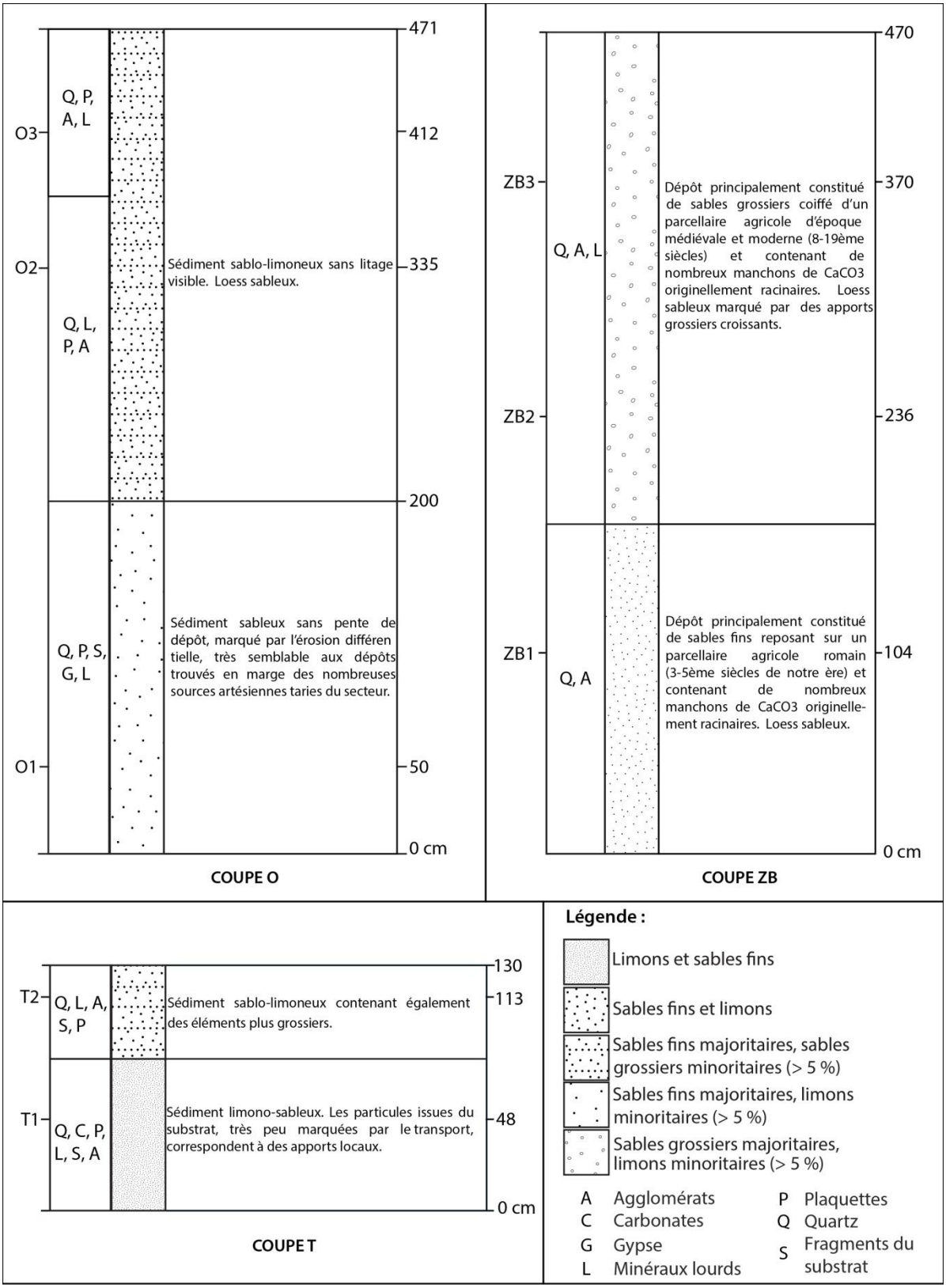


Figure 104 - Logs synthétiques des coupes O, T et ZB.

Coupe T

Seul témoin subsistant des dépôts probablement plus étendus de la colline de KS098 - Aïn Boreq, ce yardang de 130 cm de hauteur est constitué d'un sédiment beige clair très cohésif marqué de taches grises (figure 104 et 105, tableau 20). Le sédiment est très fin dans le bas de la coupe et plus grossier vers le sommet. Deux échantillons ont été prélevés. La situation du dépôt indique que la déflation a été particulièrement efficace dans le secteur.

L'échantillon T1 ne comporte que 3,5 % de sables grossiers et la majeure partie du sédiment peut avoir été transportée en suspension par les courants éoliens. Le taux de matière organique est plutôt élevé (3,7 %) pour un milieu hyperaride. Le sédiment pourrait donc correspondre à un dépôt par piégeage lié à la végétation, et donc à des lœss sahariens.

L'échantillon T2 comprend des éléments beaucoup plus grossiers. Le taux de matière organique est nettement inférieur à celui mesuré pour l'échantillon T1 (2,5 %) mais demeure élevé pour un dépôt de milieu aride. Le D99 très élevé est compliqué à comprendre, mais pourrait correspondre à un transport éolien par reptation (il correspond à celui de la partie la moins grossière de la méga-ride étudiée - échantillon 116). Le sommet du dépôt correspond donc à une raréfaction de la végétation et à un abaissement de la rugosité aérodynamique *in situ* (expliquant les moindres proportions de fines) et dans les secteurs situés plus au nord (permettant le transport de sédiments plus grossiers).

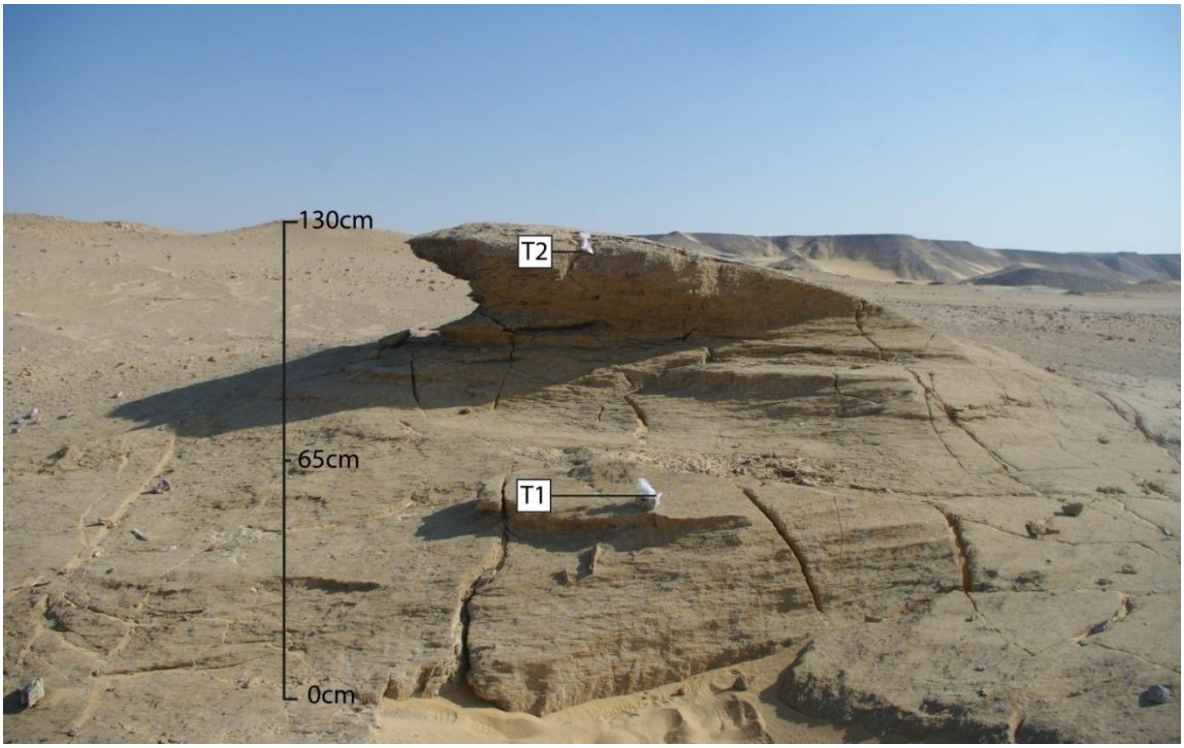


Figure 105 - Photographie de la coupe T, sur le site KS098 - Aïn Boreq, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

Coupe Q

Située sur le versant nord de la colline de KS089 - Aïn Manawir, la formation entaillée par cette coupe (figure 106 et 107, tableau 20) correspond au seul yardang de cette colline, conservé malgré l'absence de couverture anthropique. Deux autres yardangs, protégés par une couche de déblai sommitale ont été repérés ; leur faciès était similaire. Ce yardang de 160 cm de hauteur composé de sédiment beige et d'apparence homogène contenait des manchons de $CaCO_3$, originellement racinaires, sur toute sa hauteur.

Les sables fins sont très majoritaires et le tri est excellent. La position de ce dépôt, en hauteur sur le versant, et son faciès indiquent un transport éolien. Les manchons de $CaCO_3$ et les taux de matière organique élevés indiquent la présence de végétation. L'échantillon Q2 constitué d'un sédiment très fin correspond à la granulométrie des lœss sahariens. Moins fin, l'échantillon Q1 pourrait correspondre à des apports lœssiques mélangés à des sables plus grossiers. La présence de dunes actuellement (échantillon 110) et durant l'Antiquité (échantillons 108 et 109) indique que le secteur est propice à leur formation, ce qui pourrait expliquer l'existence de cette fraction plus grossière.

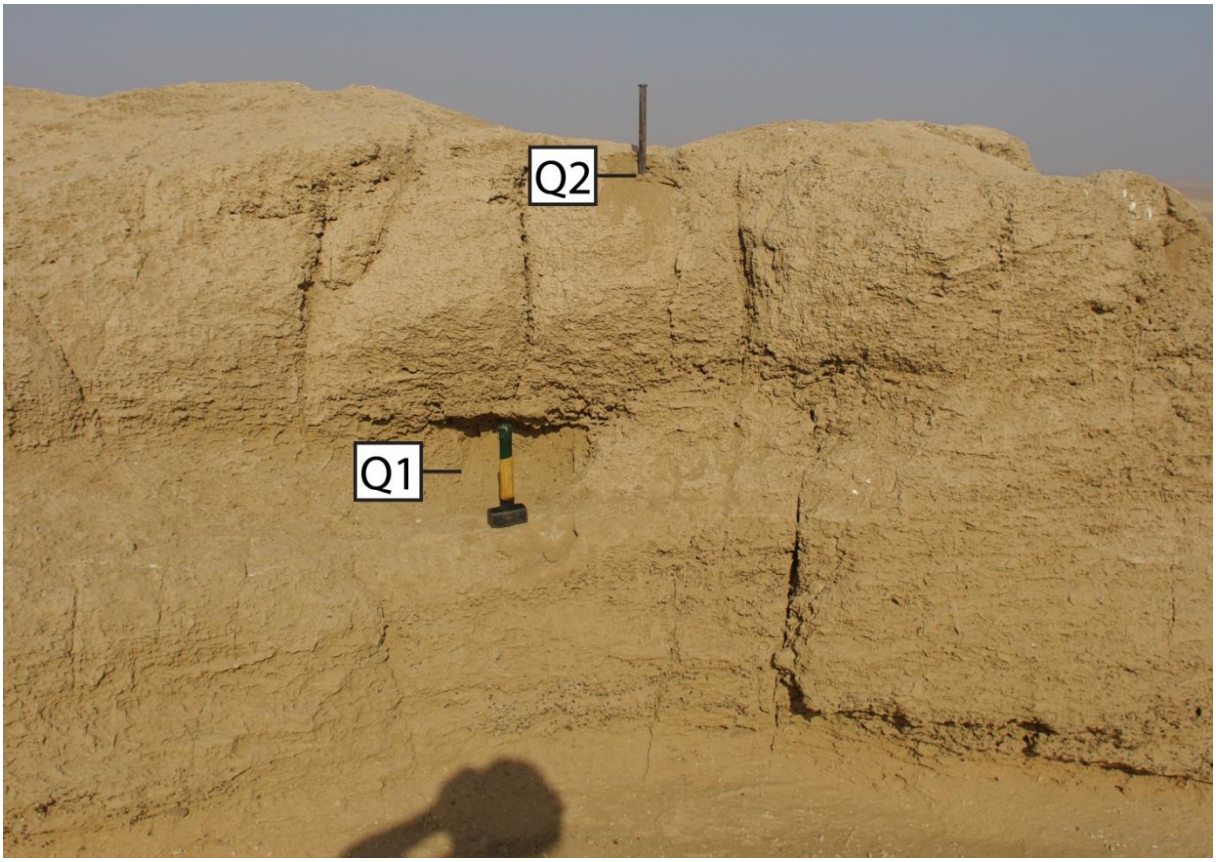


Figure 106 - Photographie de la coupe Q, sur le site KS089 - Aïn Manawir, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

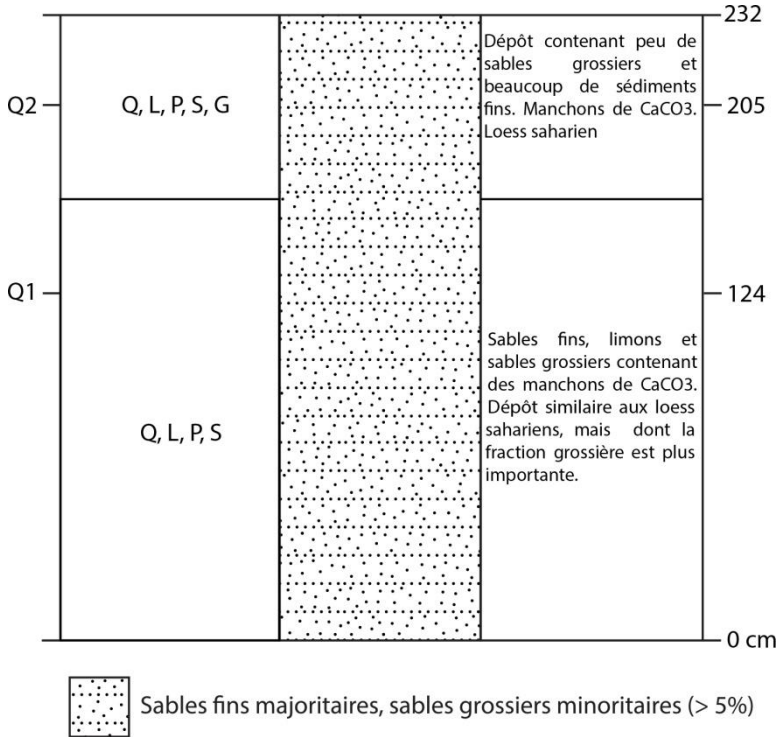


Figure 107 - Log synthétique de la coupe Q.

Coupe F

Située à proximité du sommet de la colline de KS060 - Tell-Douch, cette coupe (figures 108 à 110, tableau 21) se scinde en deux parties qui n'ont pas pu être raccordée clairement, faute de strates visibles. La topographie et le faciès révélés par les coupes indiquent un dépôt éolien. La partie ouest, en aval, mesure 340 cm de hauteur et la partie est, en amont, mesure 170 cm.

D'apparence homogène, la formation est constituée d'un sédiment fin beige contenant des manchons de $CaCO_3$ originellement racinaire. Les taux de matières organiques sont élevés. Le tri est excellent et le D99 bas, même pour les échantillons contenant beaucoup de sables grossiers : seule la fraction la plus fine des sables grossiers est représentée. Les échantillons FA4, FB1, FB2 et FB4 très fins, présentent des taux de carbone organique élevés (entre 2,58 et 3,46 %). Apportés par le vent et piégés par la végétation à l'origine des manchons de $CaCO_3$ et du carbone organique, ces sédiments correspondent à des lœss sahariens. Les autres échantillons, un peu plus grossiers, pourraient s'être déposés selon le même processus mais en incluant aussi des sables dunaires ou des sables vifs de granulométrie supérieure : 90 à 99 % du sédiment de chacun des échantillons peut avoir été apporté en suspension ou saltation. Hormis les échantillons FB3 et FB6, ils contiennent plus de 2,5 % de carbone organique. Cette coupe correspondrait donc à un dépôt de lœss sableux. La compétence du vent et la rareté des zones de rugosité aérodynamique pourraient expliquer ce caractère particulièrement grossier. De même que les dépôts actuels présentent des granulométries plutôt grossières,

certains des lœss de la région pourraient également être plus grossiers que dans les autres régions du Sahara.

Tableau 20 - Sédimentologie des dépôts de lœss sableux (coupe F).

Lœss sableux 2														
Identifiants	Coupe ou échantillon	F												
	Echantillon	F1	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA6	FB1	FB2	FB3	FB4	FB5	FB6
Granulométrie	D25 (µm)	16	8	12	35	7	55	18	2	3	58	8	19	25
	D50 (µm)	130	115	130	135	72	150	120	52	50	150	90	120	120
	D75 (µm)	190	185	200	185	150	215	180	150	150	250	170	170	170
	D99 (µm)	650	650	390	380	350	390	350	450	490	570	550	450	390
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	36,0	38,5	35,0	31,0	45,0	27,5	34,3	55,0	51,5	27,0	41,0	36,0	34,5
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	42,9	43,4	40,8	54,5	47,0	42,0	54,9	31,3	35,7	36,1	41,2	52,2	52,7
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	21,1	18,1	24,2	14,5	8,0	30,5	10,8	13,7	12,8	36,9	17,8	11,8	12,8
Classement en fonction des modes de transport éoliens	x <63 µm (%)	36,0	38,5	35,0	31,0	45,0	27,5	34,3	55,0	51,5	27,0	41,0	36,0	34,5
	63≤ x ≤315 µm (%)	54,0	54,5	57,0	67,0	53,3	63,5	64,7	41,0	42,5	60,0	53,0	62,1	62,5
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	8,8	4,3	7,8	1,9	1,3	9,0	1,0	3,8	5,6	12,5	5,7	1,5	2,9
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	1,2	2,7	0,2	0,1	0,4	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,3	0,4	0,1
	x >1000 µm (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	Carbone organique (%)	3,4	4,4	4,8	2,9	3,3	2,4	3,1	3,1	3,5	1,8	2,6	2,5	1,9
Morphoscopie	RM (%)	94	88	74	84	86	88	84	89	83	78	76	76	86
	EL (%)	2	6	18	14	8	6	14	4	4	12	14	12	10
	NU (%)	4	6	8	2	6	6	2	7	13	10	10	12	4

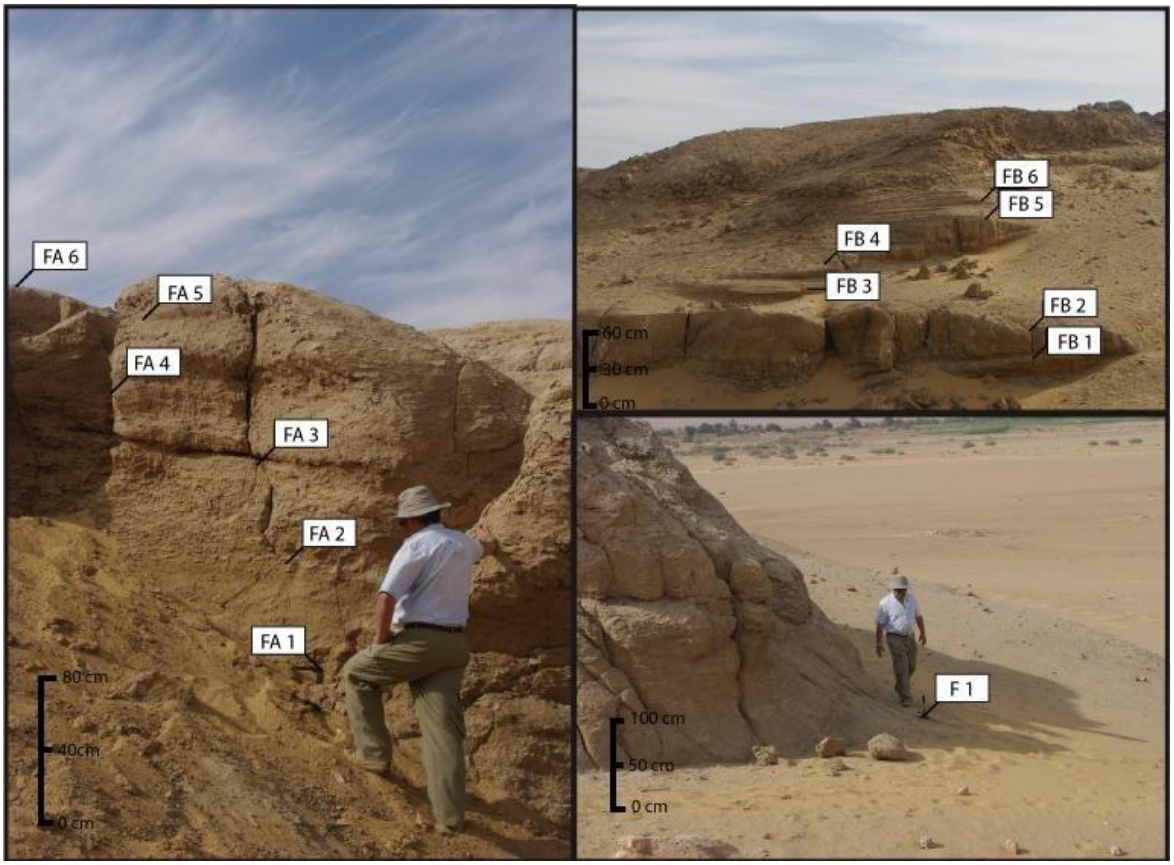


Figure 108 - Photographies des différents secteurs de la coupe F, sur le site KS60 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010.

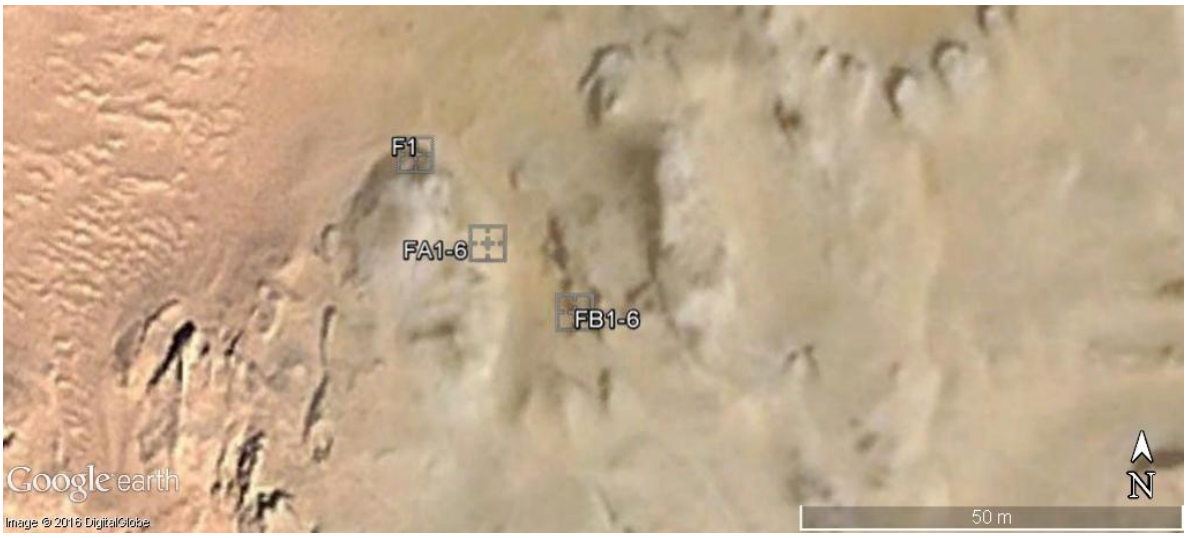


Figure 109 - Contexte local de la coupe F, sur le site KS060 - Tell-Douch. Image satellitaire de mars 2004.

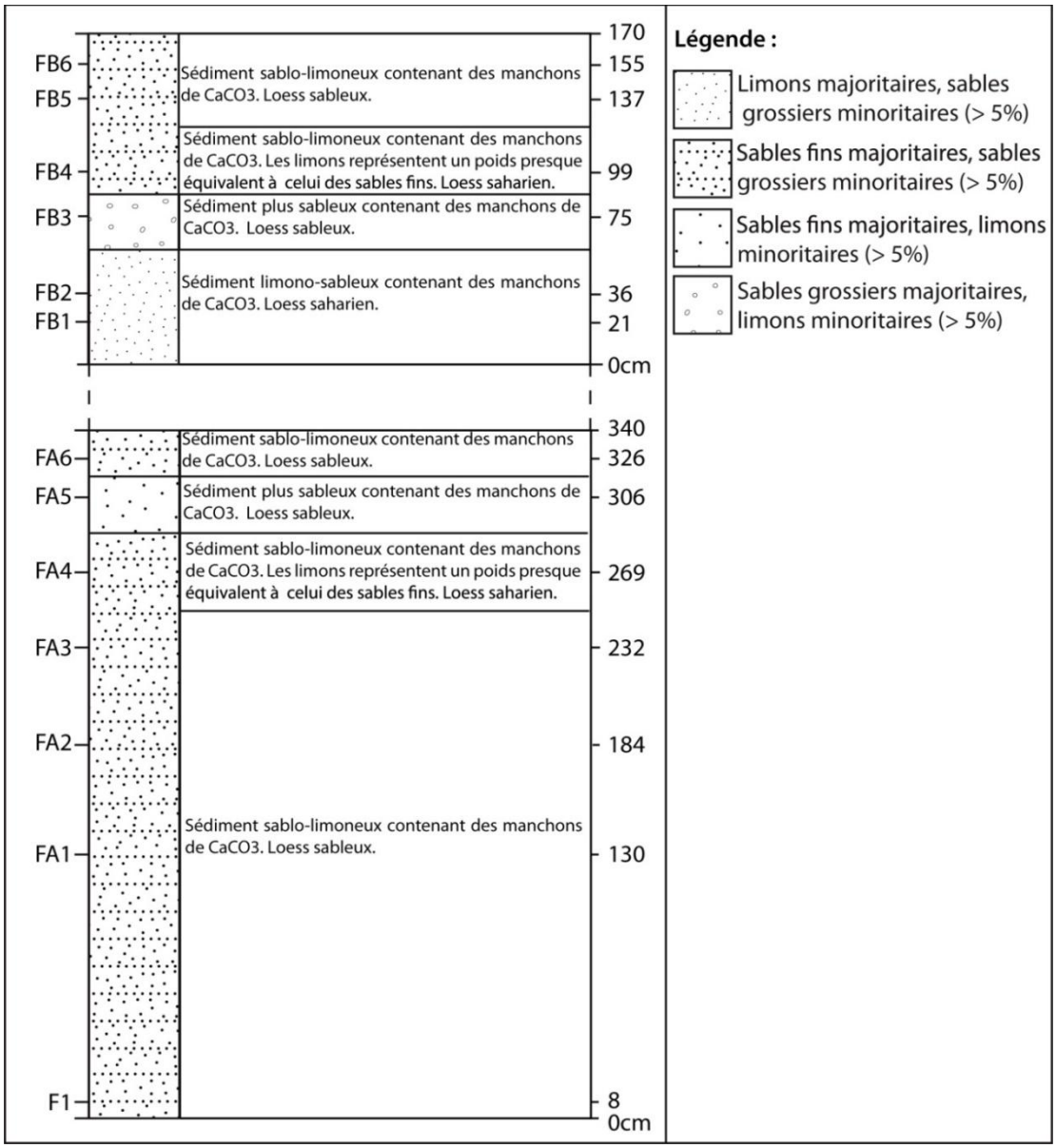


Figure 110 - Logs synthétique de la coupe F.

Les dépôts de lœss sableux sont donc fréquents dans la région. Ils pourraient avoir concerné de grandes surfaces et de grands volumes avant la mise en place des dynamiques d'ablation éolienne et de prélèvements anthropiques.

II.D.2.c. Les coupes complexes

Deux coupes présentent des caractères hétérogènes et une stratigraphie plus complexe. Il était donc impossible de les classer parmi un type unique, car elles témoignent de conditions de dépôts variables au fil du temps.

Coupe ZA

Située à 1,3 km au nord de KS161 - Aïn Zabiba directement sous le vent d'une barkhane qui avance du nord vers le sud, la formation entaillée par cette coupe (figures 111 à 113, tableau 22) correspond à un dépôt de 190 cm de haut ayant fossilisé une ancienne agglomération romaine (IIIème siècle de notre ère). Le sédiment généralement beige clair (avec une couche rubéfiée au niveau de l'échantillon ZA2) suit des pentes de dépôt discordantes parfois soulignées par le développement de croûtes salées obliques. La couche située au pied de la coupe présente une pente de dépôt oblique sur environ 45 cm d'épaisseur et un faciès dunaire. Les sables sont partiellement grésifiés. Au-dessus, sur 15 cm environ, le sédiment ne présente aucune pente de dépôt, mais une légère rubéfaction faisant penser à une période de stabilité et de pédogenèse. Cette couche est séparée de la suivante par une croûte salée (figure 112). Au-dessus, sur environ 40 cm, le sédiment suit des pentes moins régulières, discordantes par rapport à celles observées pour la strate basale et qui varient latéralement. Le faciès semble également dunaire dans l'ensemble, malgré des indurations et de très fines croûtes salées accompagnées de formations de gypse le long des pentes de dépôt. Au-dessus, une couche de 60 cm suit une pente de dépôt réduite et contient des croûtes salées très fines et du gypse. Enfin, les 30 cm constituant le sommet de la coupe ne présentent pas de pente de dépôt.

L'échantillon ZA1 montre des caractères sédimentologiques très proches des échantillons les plus grossiers des coupes Y et C et sa médiane se situe dans la norme des sables vifs. Il s'agit probablement d'une barkhane ou d'une flèche sableuse dont la partie basale aurait été fixée par de la végétation ou par des suintements artésiens en fond de dépression. Les similitudes avec les coupes Y et C conduisent à privilégier l'hypothèse d'un dépôt lié à de la végétation.

L'échantillon ZA2 est constitué d'un sédiment beaucoup plus fin et moins trié. Le taux de carbone organique est le plus élevé de la coupe. Ces éléments, ainsi que la rubéfaction de la couche et la croûte salée sommitale indiquent à la fois des conditions de rugosité aérodynamiques et une humidité plus importantes. Il pourrait s'agir d'un sol anthropique, en lien avec l'agglomération située à proximité. La présence d'eau pourrait être liée à des pratiques d'irrigation. Cette partie du dépôt correspondrait donc à un parcellaire antique, ce qui expliquerait également certains caractères sédimentologiques communs avec les échantillons de la coupe A et avec l'échantillon 125.

Tableau 21 - Récapitulatif de la sédimentologie des coupes complexes (coupe ZA).

Coupes complexes 1							
Identifiants	Coupe ou échantillon	ZA					
	Echantillon	ZA1	ZA2	ZA3	ZA4	ZA5	ZA6
Granulométrie	D25 (µm)	70	10	17	60	150	120
	D50 (µm)	200	125	135	170	310	230
	D75 (µm)	340	275	195	255	500	400
	D99 (µm)	500	700	450	530	980	950
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	24,0	38,2	33,1	24,9	14,0	15,9
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	25,6	29,1	49,3	35,7	21,3	29,5
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	50,4	32,6	17,6	39,4	64,7	54,7
Classement en fonction des modes de transport éoliens	x <63 µm (%)	24,0	38,2	33,1	24,9	14,0	15,9
	63≤ x ≤315 µm (%)	45,3	40,8	63,4	63,4	35,4	45,8
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	30,5	20,0	3,4	11,4	41,7	33,7
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	0,2	0,8	0,1	0,3	8,9	4,6
	x >1000 µm (%)	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Carbone organique total	Carbone organique (%)	1,5	3,9	2,4	1,5	1,9	2,0
Morphoscopie	RM (%)	94	98	82	82	92	100
	EL (%)	0	0	4	6	6	0
	NU (%)	6	2	14	12	2	0

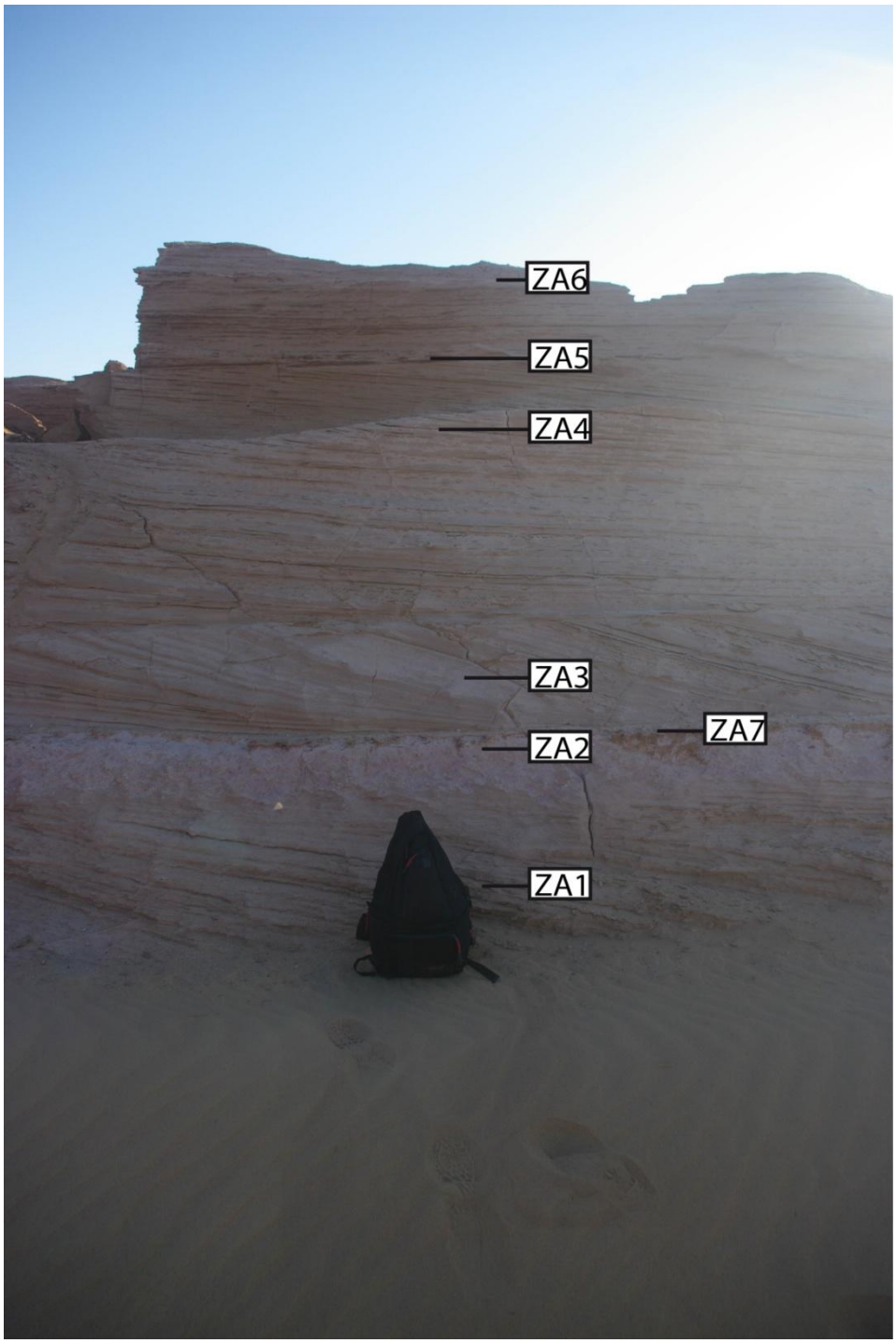


Figure 111 - Photographie de la coupe ZA, sur le site KS161 - Aïn Zabiba, avec emplacement des échantillons. Date: décembre 2011.

L'échantillon ZA3, dominé par les sables fins et plus riche en carbone organique que le reste de la coupe (hormis l'échantillon ZA2) correspond par sa sédimentologie aux échantillons de lœss sableux observés dans la région. Les pentes de dépôts sont, à ce titre, assez surprenantes. Il pourrait s'agir de sédiments accumulés par de petites formations sableuses (nebkas), ce qui expliquerait la grande variabilité latérale des pentes, et des limons et argiles piégés par la végétation ou l'humidité.

L'échantillon ZA4 est semblable à l'échantillon ZA1 (médiane, D99, proportions représentées par les différentes fractions). Il pourrait donc également correspondre au sédiment d'une dune (barkhane ou flèche sableuse) piégé par la végétation ou l'humidité. Cette dernière est confirmée lors du dépôt, au moins par intermittence, par la présence de croûtes salées suivant les pentes de dépôt.

Les échantillons ZA5 et ZA6, constitués de sables dunaires, sont les plus grossiers de la coupe. La médiane et le D25 indiquent que la rugosité aérodynamique locale n'était plus suffisante pour piéger des quantités importantes de limons et d'argiles, en raison d'une réduction de la végétation ou de l'humidité. L'absence de gypse ou de croûtes salées confirme la baisse d'humidité. Ces échantillons correspondent à des dépôts liés au passage de dunes en bordure orientale de l'erg dans un contexte de végétation et d'humidité réduites.

On peut donc construire l'hypothèse d'une séquence de dépôts complexe mettant en jeu à la fois des dynamiques éoliennes et anthropiques. Tout d'abord, dans un contexte où la végétation et l'eau étaient plus présentes, probablement en lien avec des remontées artésiennes (des vestiges de sources et de puits ont été observés à proximité), du sable dunaire a été piégé. Ce premier dépôt a ensuite été colonisé et exploité par les hommes qui y ont installé des bâtiments et des champs. Après cette phase d'occupation, de petites formations sableuses se sont mises en place sur les champs, puis des dunes se sont formées, dont une partie a été fixée sur place, peut-être en raison de la présence de végétation résiduelle. On serait donc passé d'un système dunaire éolien à un système anthropisé, avant de revenir au premier système.

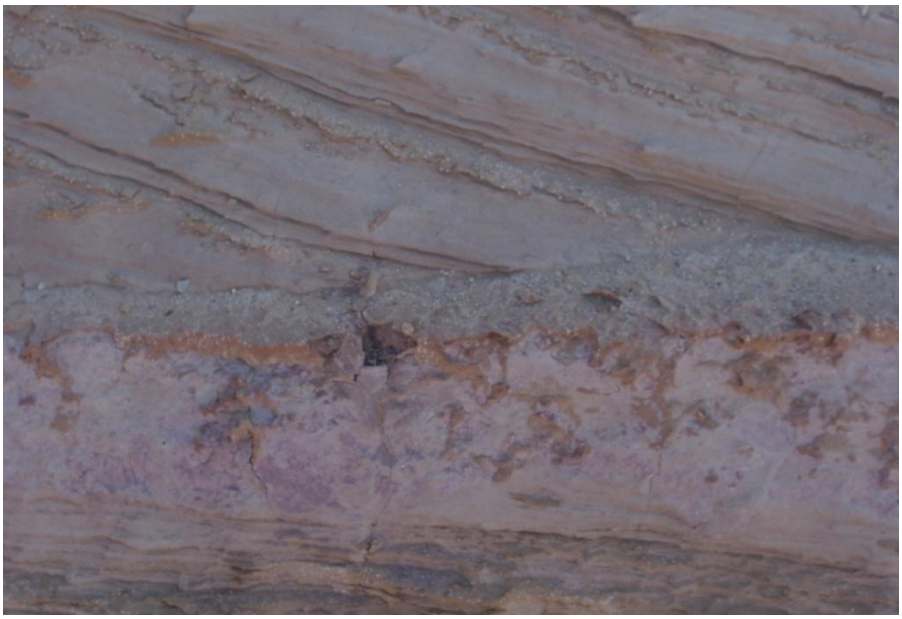


Figure 112 - Détail de la coupe ZA : niveau rubéfié recouvert par une croûte salée plane et épaisse à l'interface entre deux strates, et série de croûtes plus fines suivant les pentes de dépôt (détail ZA2 - 3 et ZA7). Prise de vue : décembre 2011.

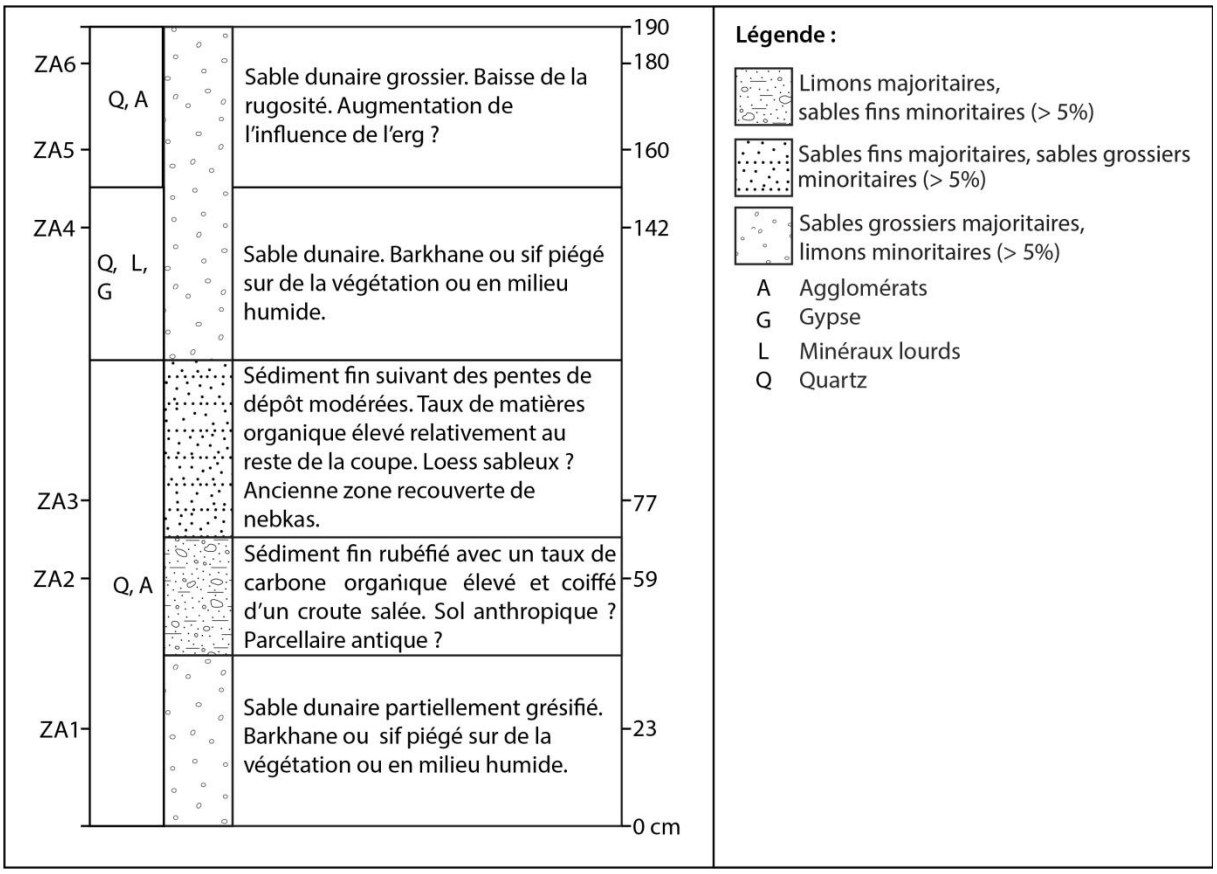


Figure 113 - Log synthétique de la coupe ZA.

Coupe B

Située sur le versant nord de KS060 - Tell-Douch, du côté au vent de la colline, cette coupe (figures 114 à 117 et tableau 23), ouverte dans une accumulation de 360 cm de sédiment beige, a été prélevée au sein d'une série de buttes éoliennes coiffées de parcellaires d'époque ptolémaïque (échantillons 125 et 126). Les 200 cm situés au pied de la coupe contiennent de nombreux manchons de $CaCO_3$ originellement racinaires et des lits fins sablo-limoneux horizontaux mis en évidence par la corrasion éolienne dans un processus d'érosion différentielle. Aucun tesson n'y a été observé. Les 40 cm situés juste au-dessus suivent une alternance de niveaux plus ou moins indurés, composés d'un sédiment en apparence plus fin et contenant des manchons de $CaCO_3$. Le tesson situé le plus bas de la coupe se situe au cœur de ce niveau. Enfin, la partie sommitale (120 cm environ) a un aspect beaucoup plus homogène.

Figure 114 - Contexte de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch. Image satellitaire de mars 2004.

L'échantillon B1, prélevé au pied de la coupe, est majoritairement constitué de sables fins. Le taux de matière organique se situe au-dessus des moyennes généralement constatées en milieu aride. Les plaquettes d'argilite observées au microscope sont très peu émoussées. Ceci indique que le transport de ces plaquettes n'a pas eu un impact important sur leur forme et qu'il a donc été très court. Les échantillons B2 à B4, prélevés dans les niveaux à lits fins mis en évidence par la corrasion éolienne, sont majoritairement constitués de sables fins et grossiers. Leurs médianes sont parmi les plus hautes de la coupe et les taux de carbone organique sont légèrement supérieurs aux moyennes fréquemment observées en milieu aride. L'échantillon B5 est semblable aux échantillons B2 à B4 mais son sédiment est plus grossier.

Les échantillons B1 à B5 témoignent d'une période durant laquelle les apports éoliens étaient remaniés par un ruissellement de faible énergie (suintements artésiens ou ruissellement léger) ; cela explique à la fois leur sédimentologie éolienne et le litage observé sur le terrain. La présence dans certains échantillons de plaquettes d'argilite très peu émoussées indique un transport court depuis une source artésienne.

L'échantillon B6, prélevé dans une couche très indurée ne comportant pas de lits visibles, est majoritairement constitué de sables fins. La proportion des limons et argiles augmente et les carbonates sont nombreux. Les premiers tessons observés sur la coupe B l'ont été dans cette strate. Ce dépôt serait donc contemporain d'activités humaines remontant au Ve s. avant notre ère au maximum, d'après la céramique en place. Dans un contexte agricole, il existe

cependant un risque de remaniement : les tessons pourraient avoir été enfouis, ou remontés à proximité de la surface par les labours et l'irrigation. Le jalon posé par les tessons semble toutefois assez fiable : leur disposition et les groupes qu'ils forment indiquent un remaniement limité.

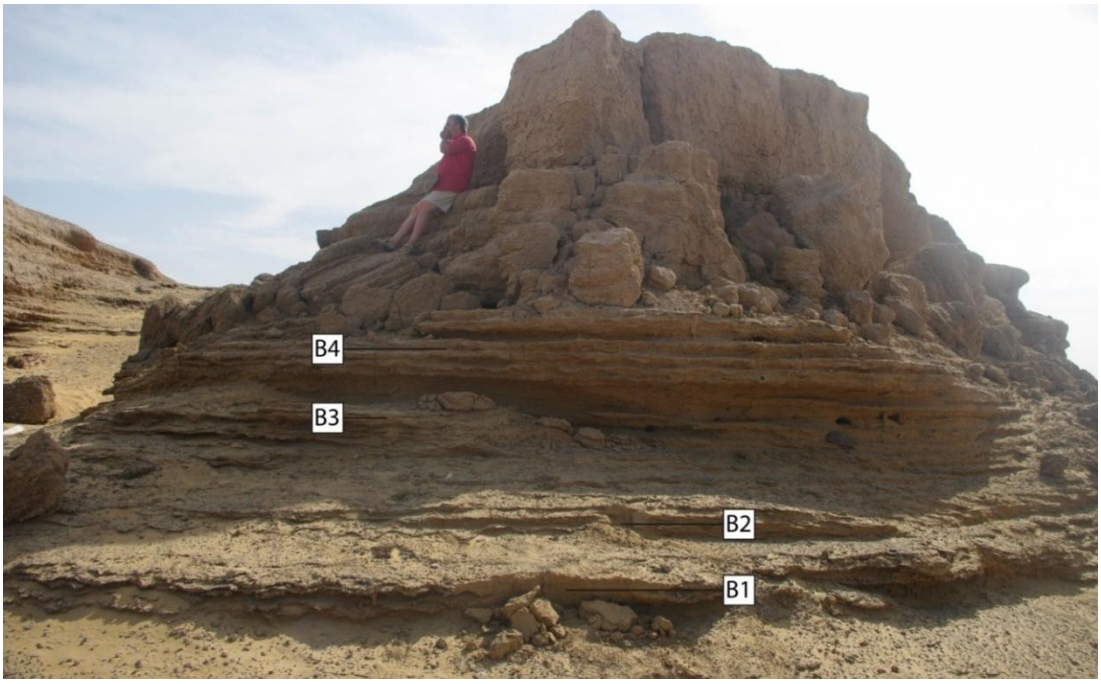


Figure 115 - Photographie de la partie nord de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons B1 à B4. Prise de vue : novembre 2010.

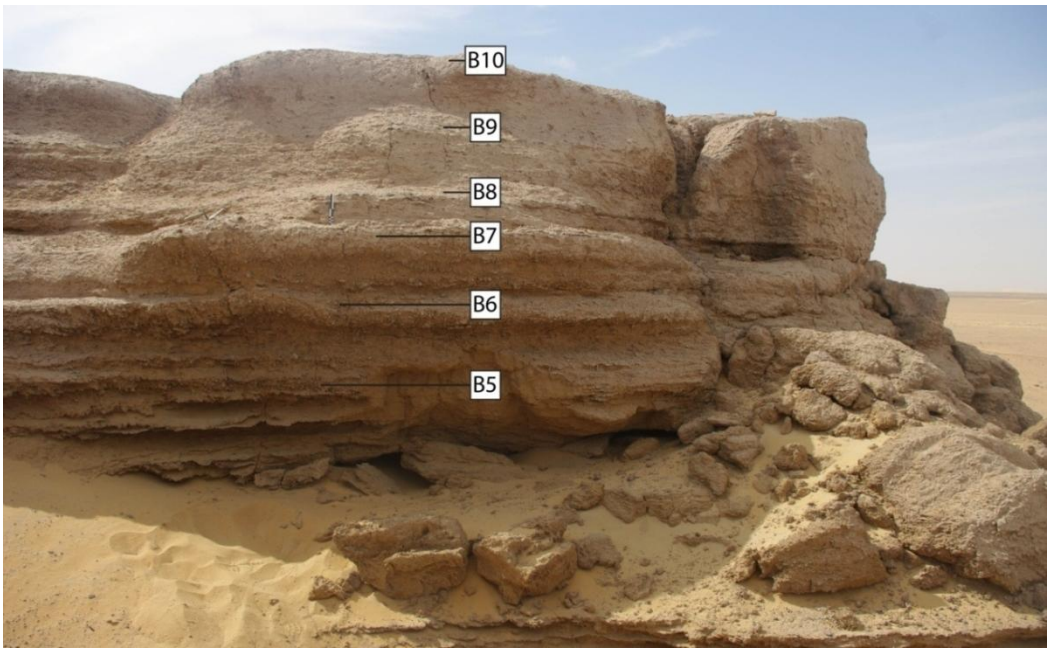


Figure 116 - Photographie de la partie sud de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. B5 à B10. Prise de vue : novembre 2010.

Les ciments carbonatés consolidant les agglomérats indiquent la présence et l'évaporation d'eau dans le secteur ou le transport des agglomérats par saltation. Quoi qu'il en soit, cela témoigne d'une période où les apports en eau carbonatée ont été plus importants, soit *in situ*, soit dans la dépression située au vent par rapport à la coupe. Les apports d'eaux artésiennes ont donc dû être plus importants ou réguliers. Ces éléments et les traces d'activités humaines indiquent que cette couche pourrait correspondre au développement des systèmes d'irrigation dans ce secteur.

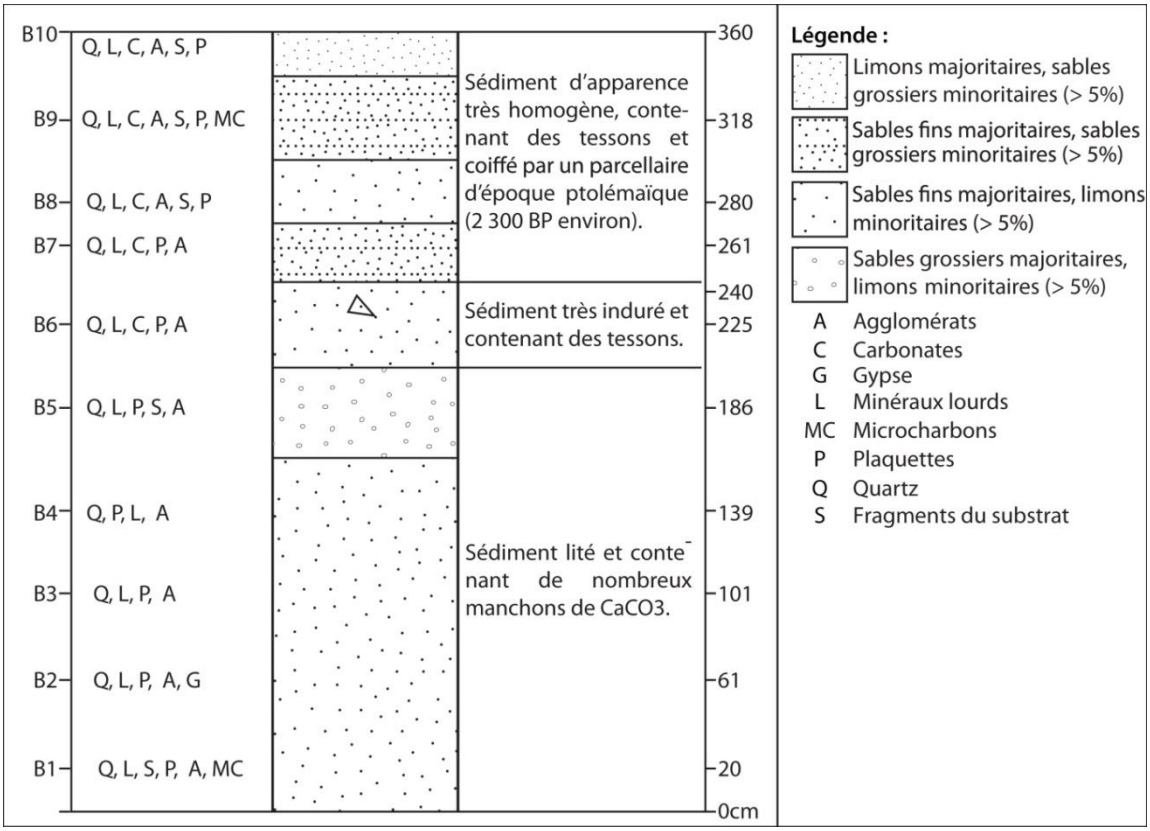


Figure 117 - Log synthétique de la coupe B.

Les échantillons B7 à B10 sont composés d'un sédiment encore plus fin. Les sables fins restent majoritaires, mais ils comportent une part importante de limons et d'argiles. Il pourrait s'agir de lœss sableux. Leur sédimentologie traduit un piégeage par la végétation de sédiment transporté par le vent. Des tessons de poterie, des agglomérats, des grains grossiers et des fragments de grès du substrat (probablement apportés par l'eau d'irrigation venue des *qanâts* creusés dans la roche en amont) suggèrent que cette végétation pourrait avoir été entretenue par l'agriculture antique. Les parcellaires ptolémaïques conservés au sommet de cette butte confirment cette interprétation. Le taux de sédimentation est haut.

On peut donc proposer la séquence de dépôts suivante :

- dépôt de sédiment fin piégé par la végétation et l'humidité, puis remanié par un ruissellement de faible énergie probablement lié à l'artésianisme ;

- régularisation des apports en eau et augmentation de la rugosité aérodynamique contemporaine d'activités humaines ;

- dépôt de sédiments éoliens sur la végétation entretenue dans les champs et apports de roches du substrat liées aux pratiques d'irrigation.

Tableau 22 - Sédimentologie des coupes complexes (coupe B).

Coupes complexes 2											
Identifiants	**Coupe ou échantillon**	**B**									
	Echantillon	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**
Granulométrie	**D25 (µm)**	100	130	85	125	130	70	45	65	18	10
	D50 (µm)	165	190	170	180	200	175	120	160	140	135
	D75 (µm)	225	290	340	290	340	200	190	310	205	230
	D99 (µm)	600	600	430	500	700	485	480	580	480	550
	Limons et argiles- x <63 µm (%)	11,1	8,5	14,6	9,0	14,4	22,3	29,7	24,1	32,5	35,4
	Sables fins - 63,1≤ x ≤200 µm (%)	61,5	49,1	43,8	53,9	38,1	52,7	48,1	38,0	41,8	33,1
	Sables grossiers - 200,1≤ x ≤2000 µm (%)	27,4	42,4	41,6	37,1	47,5	25,0	22,2	37,8	25,7	31,4
Classement en fonction des modes de transport éoliens	**x <63 µm (%)**	11,1	8,5	14,6	9,0	14,4	22,3	29,7	24,1	32,5	35,4
	63≤ x ≤315 µm (%)	76,9	71,9	48,3	69,7	51,0	70,9	63,8	49,4	59,0	53,4
	315,1≤ x ≤600 µm (%)	11,0	18,7	37,0	21,0	33,1	6,5	6,2	25,7	8,3	10,3
	600,1≤ x ≤1000 µm (%)	1,0	0,8	0,1	0,3	1,5	0,3	0,3	0,6	0,2	0,6
	x >1000 µm (%)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,3
Carbone organique total	**Carbone organique (%)**	3,6	1,2	1,9	2,1	1,1	2,1	2,2	1,9	2,9	3,0
Morphoscopie	**RM (%)**	92	96	94	84	90	90	88	84	90	94
	EL (%)	6	2	6	16	4	4	6	6	4	0
	NU (%)	2	2	0	0	6	6	6	10	6	6

VI.D.3. Synthèse et spatialisation : des lœss nombreux et parfois liés aux activités agricoles, mais sans gradient

L'étude des dépôts de sédiments fins de la région de Douch indique une origine éolienne pour des surfaces non-négligeables, d'autant plus que les coupes étudiées en laboratoire sont peu nombreuses par rapport à celles présentant des faciès similaires sur le terrain. À titre d'exemple, le site d'époque romaine de KS259 - Aïn Birqis-est présente sur plus de 100 ha des yardangs formés au sein d'un dépôt éolien de sédiments fins épais de plusieurs mètres. À l'ouest, la butte de KS260 - Aïn Birqis, cultivée au moins lors des XIXe et XXe s. de notre ère, et dont les sédiments reposent sur des vestiges, là aussi d'époque romaine, occupe plus de 80 ha pour une épaisseur maximale de dépôt de 26 m. Le faciès est éolien sur la majeure partie de la stratigraphie visible.

Parmi ces formations, il a été possible d'identifier des dépôts correspondant strictement à des lœss sahariens (médiane comprise entre 25 et 110 µm), et d'autres plus sableux (médianes comprises entre 111 et 210 µm). Il est essentiel de rappeler que, comme indiqué en méthodologie, la granulométrie par tamisage conduit, par rapport à la granulométrie laser, à une surestimation des proportions de particules grossières. Les médianes sont donc plus grossières avec cette méthode. Certains des dépôts qualifiés de lœss sableux, particulièrement ceux présentant des médianes comprises entre 111 et 150 µm, auraient peut-être été rattachés à la catégorie des lœss sahariens avec une mesure au granulomètre laser. De même, la limite supérieure des lœss sahariens a été choisie en fonction des valeurs observées dans les publications présentant et localisant précisément les dépôts étudiés, mais Assalay *et al.* (1998) indiquaient une limite maximale à 130 µm pour l'Afrique du Nord. En reprenant à notre compte cette limite, il faudrait ajouter à la liste des dépôts de lœss sahariens étudiés les coupes A, F, O, Q et T.

Par ailleurs, pour les coupes A, B, C, Y, ZA, ZB et l'échantillon 125, on constate que les éléments de rugosité aérodynamique peuvent avoir pour origine des activités anthropiques. Le processus à l'origine du dépôt de l'ensemble de ces lœss explique pourquoi l'ensemble des taux de matière organique mesurés est particulièrement élevé en comparaison avec le contexte d'aridité climatique : la végétation nécessaire pour piéger les sédiments et les ressources en eau souterraines atténuent localement les conditions de sécheresse.

Enfin, le géoréférencement des résultats de l'étude sédimentologique ne permet d'observer ni gradient nord-sud (lié au vannage éolien dans le sens du vent) ni gradient ouest-est (lié à

l'éloignement de l'erg). Les dépôts les plus fins sont au contraire parmi les plus au nord et les plus à l'ouest prélevés. Ceci s'explique par des contextes de dépôts ponctuels, ou peu étendus, dans le temps comme dans l'espace : les périodes de dépôts et les conditions de rugosité aérodynamique associées ne sont pas identiques dans l'ensemble de la région à un instant donné. Elles varient au contraire localement en fonction de l'apparition de sources ou de suintements artésiens à même d'entretenir la végétation, ou des aménagements humains. En dehors de certains dépôts situés en bordure même de l'erg (ZA et ZB), le facteur principal de la granulométrie des dépôts n'est donc pas la charge sédimentaire éolienne, mais la rugosité aérodynamique à même de l'immobiliser : sa variabilité explique l'évolution des dépôts. Selon la végétation et l'humidité présentes, des sédiments plus ou moins fins peuvent être piégés, ou remobilisés. En cas de mort de la végétation et d'assèchement, les dynamiques de corrasion et d'ablation reprennent de plus belle et les rares dépôts bien datés indiquent des taux de sédimentation et d'ablation assez élevés sur lesquels nous reviendrons (VIII). Les yardangs étudiés constituent donc des archives sédimentaires relativement incomplètes car n'enregistrant que les périodes favorables à la végétation. Par exemple le site KS098 - Aïn Boreq ne présentera plus aucun vestige du dépôt qui s'y était constitué lorsque l'érosion de la coupe T sera complète.

A ce titre, l'étude de certains sites archéologiques caractérisés par une occupation de longue durée et une exploitation des puits prolongée jusqu'à une période récente est essentielle : ils sont susceptibles d'avoir préservé des indicateurs paléoenvironnementaux sur des périodes plus longues, et leur érosion n'est pas encore trop avancée.

Chapitre VII. Géomorphologie et stratigraphie des buttes de plaines associées à des puits historiques

Dans le sud de la dépression de Kharga, plusieurs buttes de sédiments fins à la fois élevées et étendues (figure 118 et tableau 24) ont été prospectées lors des missions de terrain. Elles sont systématiquement associées à des sites archéologiques sur puits[39], et parfois encore cultivées de nos jours (Ezbet Dakhakhin et Ezbet Gaga). N.S. Embabi (2004) les inclut dans ses productions cartographiques aux secteurs de playas et de semi-playas. Il est vrai que l'apparence des sédiments rappelle sur certains sites l'alternance de dépôts liés à des étendues d'eau temporaires et de dépôts éoliens. Néanmoins, l'épaisseur des dépôts et les vestiges archéologiques qui y sont présents indiquent sans aucun doute possible une formation holocène, particulièrement tardive : les dépôts de KS093 - Aïn-el-Foq, de KS156 - Aïn-el-Haweisha, de KS159 - Aïn Bella, de KS161 - Aïn Zabiba, de KS178 - Aïn-el-Matrahiyya, de KS209 - Aïn-el-Mansourya, de KS260 - Aïn Birqis reposent sur d'autres dépôts datés de l'époque romaine. Leur période de formation est donc comprise entre Ier s. de notre ère et nos jours, ce qui étonne en raison de la grande épaisseur de certaines de ces buttes (jusqu'à 26 m à Aïn Birqis). Le dépôt semble toutefois avoir été très rapide, suffisant pour ensevelir des palmiers durant leur période de vie, ou avant leur dégradation complète (figure 119). L'étude de ces buttes ayant débuté en 2012 et la mission de terrain et de laboratoire de 2013 ayant été annulée, il a malheureusement été impossible d'en produire une analyse sédimentologique. Des coupes ont toutefois été prélevées et pourront être analysées ultérieurement au laboratoire de l'IFAO au Caire. Au vu de l'importance de ces buttes et de leur intérêt majeur pour la compréhension des processus éoliens et pour la géoarchéologie, nous proposons tout de même une description de leur géomorphologie, de leur stratigraphie générale et de leur contexte de formation.

[39]. Leur surface est généralement recouverte de vestiges de parcellaires, et on trouve également des vestiges en stratigraphie au sein de ces buttes et dans la plaine environnante.

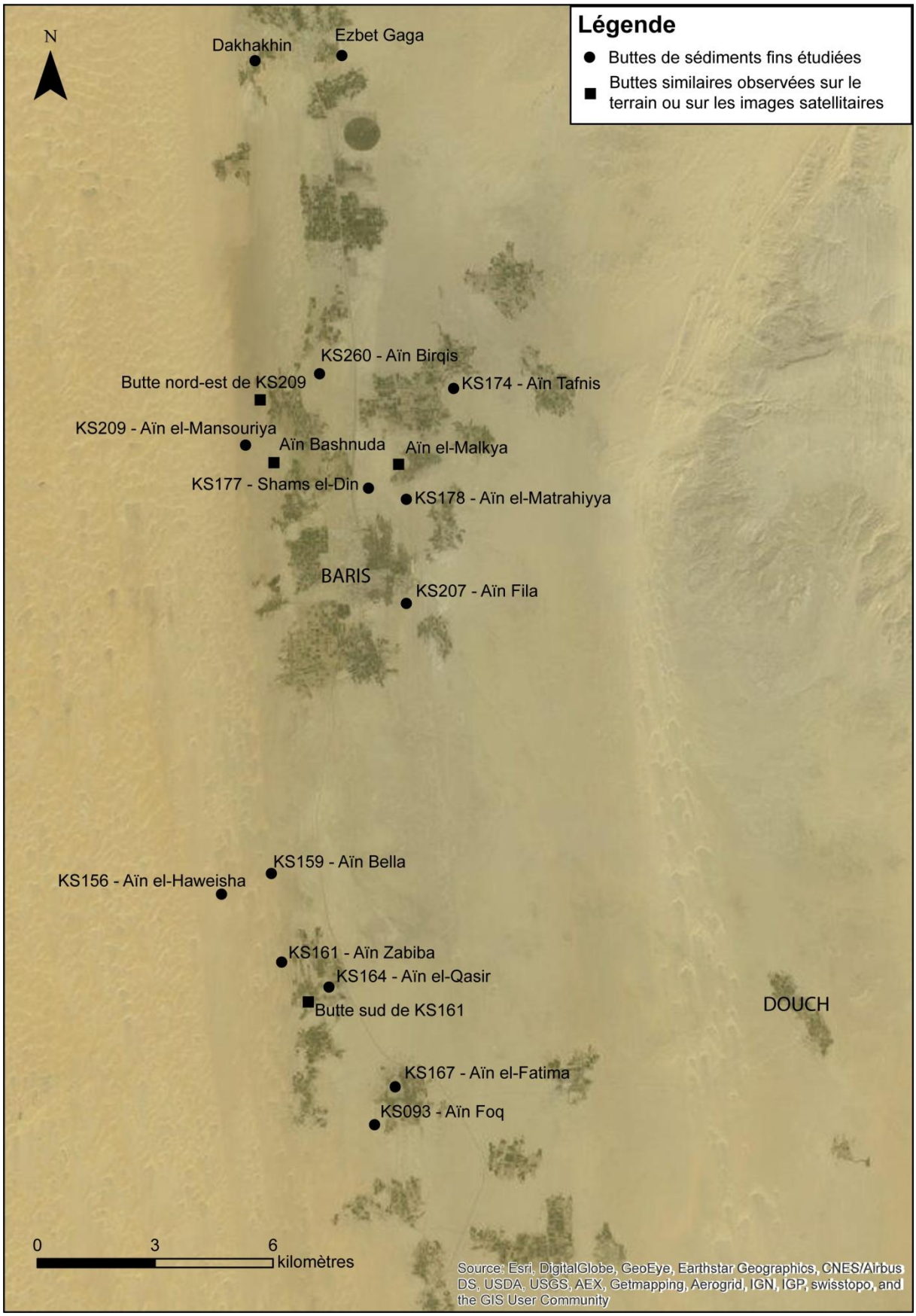


Figure 118 - Cartes des buttes de sédiments fins étudiées et de quatre buttes repérées sur les images satellitaires ou sur le terrain, dont l'étude n'a pas encore été menée.

Tableau 23 - Buttes de sédiments fins étudiées et périodes d'occupations connues.

Buttes de sédiment fin couvertes de vestiges archéologiques ou d'installations actuelles				
Type	**Toponyme**	**Code IFAO**	**Périodes**	**Epaisseur (m)**
Buttes basses	Aïn Foq	KS093	Préhistoire ; 6-7 ; 11 ; 12 ?	9
	Aïn el-Qasir	KS164	8-9	2
	Aïn el-Fatima	KS167	9 ; 13	7
	Shams el-Din	KS177	7-8	2
Buttes disséquées	Aïn el-Haweisha	KS156	6 ; 12-13 ?	6
	Aïn Zabiba	KS161	6-10 ; 13 ; 11-12 ?	10
	Aïn el-Mansourya	KS209	7-9 ; 11-13	8
Buttes peu érodées	Aïn Bella	KS159	6-8 ; 12-13	13
	Aïn Tafnis	KS174	10 ; 13	13
	Aïn el-Mattrahiyya	KS178	7-8 ; 10 ; 12-13	15
	Aïn Fila	KS207	12-13	14
	Aïn Birqis	KS260	7 ; 10 ; 13	26
Oasis actuelles, très peu érodées	Ezbet Gaga	Sans	Actuelle	20
	Dakhakhin	Sans	Actuelle	29

Figure 119 - Vestiges de palmiers dans un yardang sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. L'empreinte des anciens stipes indiquent que les sédiments ont enseveli le palmier durant sa période de vie, ou peu de temps après sa mort, avant que les stipes ne se dégradent. Prise de vue : novembre 2014.

VII.A. Des buttes d'apparence composite : une morphogenèse découlant de processus distincts ?

De manière générale, ces buttes sont constituées de plusieurs ensembles. Le premier, correspondant à un ancien puits, est une butte circulaire dont le centre est occupé par une dépression (la cuve du puits), tantôt fermée, tantôt ouverte sur un côté, formant une gorge de quelques mètres de profondeur creusée par les agriculteurs. Fréquemment coiffé de déblais anthropiques liés à des curages et au creusement de la gorge, cet ensemble se constitue d'un sédiment sablo-limoneux à limoneux et d'argilites remaniées (figure 120 et 121). Les manchons de $CaCO_3$ originellement racinaires sont nombreux, particulièrement visibles sur les faces internes des cuves de puits.

Figure 120 - Vue depuis le sud du tertre artésien et des tas de déblais du puits principal de KS209 - Aïn el-Mansouriya. Les vestiges au premier plan ont été recouverts par les dépôts constituant la butte associée au puits. Prise de vue : novembre 2012.

Le second ensemble borde généralement le premier de tous côtés : il s'agit de versants occupés par d'anciens parcellaires étagés et parfois délimités par des brise-vents de palme (figure 123). Sa stratigraphie alterne entre d'épaisses couches (décimétriques à pluri-métriques) de sédiment éolien sablo-limoneux à limoneux peu indurées et des strates plus fines (centimétriques à décimétriques) constituées d'un sédiment éolien remanié et présentant

parfois des caractères de sols agricoles (figure 122 et 124). Les parcellaires agricoles étagés sont encore bien visibles sur la plupart des buttes. Le matériel archéologique découvert par les archéologues de la mission montre une occupation plus récente du sommet des buttes que des niveaux plus bas, qui recouvrent eux-mêmes la plaine environnante occupée encore plus anciennement. Ces dépôts sont donc contemporains d'activités agricoles, et pourraient y être liés.

Figure 121 - Stratification à l'intérieur de la cuve du puits principal du site KS161 - Aïn Zabiba. Des argilites apportées depuis le sous-sol et mises en place par les écoulements du puits, sont surmontées par une couche contenant de nombreux manchons racinaires. Au sommet, les blocs de sédiments sont liés aux déblais de la cuve. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 122 - Parcellaires agricoles abandonnés dans les années 1960 sur le site KS260 - Aïn Birqis. Image satellitaire de mars 2010.

Figure 123 - Vestiges de brise-vents et de parcellaire datés des années 1960 sur le site KS260 - Aïn Birqis. Prise de vue : novembre 2014.

Figure 124 - Détail de la stratigraphie d'un dépôt de sédiment éolien remanié et supportant une parcelle agricole sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Prise de vue : novembre 2014.

Figure 125 - Parcellaire agricole étagé le long d'une flèche sableuse sous le vent de KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Le site a été abandonné dans les années 1960. Prise de vue : novembre 2014.

Enfin, le troisième ensemble ne se trouve que sous le vent de l'un ou l'autre des deux ensembles décrits ci-dessus. En l'absence de prélèvements anthropiques de matériel donnant lieu à la formation d'un front de taille, la pente est généralement régulière du sommet vers le bas, où la formation se raccorde au niveau de la plaine environnante (figure 125). Le sédiment est généralement beaucoup plus sableux que dans les deux autres ensembles. La majeure partie de la séquence stratigraphique semble correspondre à un dépôt éolien non remanié mais le sommet de cet ensemble est parfois recouvert d'une couche de sédiment plus fin et induré, anciennement exploitée par des champs dont les limites de parcelles sont encore visibles

VII.B. Un lien avec l'artésianisme ?

La présence de sources et de puits au sein des buttes nous a tout d'abord conduit à envisager la possibilité que ces formations soient liées à l'artésianisme. Il était donc essentiel d'approfondir le travail bibliographique à propos des *spring mounds* ou tertres artésiens et de leur manifestations dans différentes régions du monde. Des tertres artésiens ont été identifiés dans d'autres régions d'Égypte, dans les dépressions de Dakhla (Adelsberger et Smith 2010) et de Farafra (Torab 2014), ainsi que dans l'oasis de Siwa (Côte 2012), mais aussi dans d'autres pays : en Tunisie dans les oasis du Nefzaoua (Côte 2012), en Syrie dans la région de Aïn al-

Zarqa (Besançon *et al.* 2000), dans la région de Tularosa au Nouveau Mexique (Meinzer et Hare 1915 - figure 126) en périphérie du *Great Artesian Basin* australien (Ponder 1986, 2004 ; Mudd 2000 - figure 127). Cette liste est non exhaustive.

Les tertres des dépressions de Dakhla et de Farafra, ainsi que leur processus de formation ayant déjà été décrits plus haut, nous ne répéterons donc pas cette description ici.

Au Nouveau Mexique, Meinzer et Hare (1915) décrivent les tertres comme des dômes symétriques et assez réguliers, dont le centre est occupé par une dépression contenant parfois un plan d'eau. De dimensions variables (tableau 25) ils sont composés de limons et d'argiles, de couches de gypse, de débris végétaux, et parfois de tourbes en formation. Le processus de formation s'explique par le piégeage de sédiment éolien sur la végétation et par une stabilisation des dépôts grâce à l'humidité liée aux sources. L'exhaussement progressif des tertres se poursuit tant que la poussée artésienne est suffisante pour que l'eau affleure. Les auteurs indiquent également qu'en cas de tarissement, l'eau peut parfois affleurer à une faible distance du tertre et initier la formation d'une seconde source, qui suivra le même processus morphogénétique. Il peut donc se former des alignements de tertres.

Figure 126 - Tertres artésiens à proximité de Carrizozo, dans la région de Tularosa au Nouveau-Mexique (États Unis d'Amérique). Image satellitaire d'octobre 2013.

Figure 127 - Tertre artésien dont la dépression centrale est occupée par une mare, dans le *Great Artesian Basin,* en Australie. Image satellitaire de septembre 2013.

Tableau 24 - Dimensions généralement observées pour les tertres de la région de Tularosa, au Nouveau-Mexique (États Unis d'Amérique) d'après Meinzer et Hare (1915).

Dimension mesurée	Valeur en pieds	Valeur en mètres
Diamètre maximal du tertre	600	**183**
Hauteur minimale du tertre	15	**4,6**
hauteur maximale du tertre	20	**6,1**
diamètre minimal du cratère	50	**15,2**
diamètre maximal du cratère	125	**38,1**

Dans le Great Artesian Basin, les sources actives et taries cohabitent également, et sont liées à des systèmes de failles ; les tertres ne se forment que si le débit des sources est supérieur aux taux d'évaporation. Ils sont composés à la fois d'apports liés à l'eau (sables et limons en suspension et $CaCO_3$ en solution), de sables éoliens et de débris végétaux. L'exhaussement progressif des tertres s'accompagne d'une baisse des débits, et parfois d'un colmatage des griffons de sources qui mène à terme à leur tarissement (Ponder 1986). Plus de 600 tertres ont été recensés dans le Great Artesian Basin, mais les forages puisant directement dans l'aquifère artésien ont entraîné une baisse des débits, le tarissement de certaines sources et la dégradation d'une partie des tertres (Mudd 2000).

La formation des tertres de Siwa en Égypte, ou du Nefzaoua en Tunisie n'a pas encore été précisément étudiée[40], mais leur apparence générale et leur morphologie (figures 128 et 129) laissent supposer des processus similaires, à ceci près que leur hauteur peut être supérieure et que leurs marges sont généralement cultivées sous formes d'oasis frangeantes ou rayonnantes. A Siwa, certains tertres sont même recouverts de végétation jusqu'à leur sommet.

Figure 128 - Tertres artésiens dans l'oasis de Blidet, dans la région du Nefzaoua (Tunisie). Comme dans la dépression de Kharga, les puits et les sources à l'origine de leur formation sont désormais taris. Image satellitaire de février 2016.

Le premier ensemble décrit ci-dessus à propos des buttes de sédiments fins de la dépression de Kharga pourrait donc correspondre à des tertres liés à l'existence et à l'entretien de puits et de sources artésiennes. Leur grande hauteur pourrait être liée à un temps de fonctionnement particulièrement long et/ou à un transport sédimentaire éolien très développé dans la région. Cependant, les deux autres ensembles décrits, qui constituent la majeure partie des buttes, ne peuvent être directement liés à ce type de processus. La forme globalement circulaire n'est pas respectée à l'échelle de la butte, et leur extension spatiale est beaucoup plus importante. De plus, aucun dépôt de tuf n'a été observé. Il apparaît donc essentiel d'identifier les processus qui se superposent ou coïncident avec la formation des tertres dans la morphogenèse des buttes.

[40]. Afef Raddadi (doctorante à l'UMR5133 - Archéorient) prépare actuellement une thèse portant sur les tertres artésiens du Nefzaoua, dans les environs de Kébili, sous la direction de Y. Callot et de D. Ourchefani. Son travail porte à la fois sur les dynamiques naturelles associées à ces formations, sur leur valeur patrimoniale et sur les menaces qui pèsent sur leur préservation.

Figure 129 - Tertres artésiens dans l'oasis de Siwa. Chacune des îles et presqu'îles visibles sur le lac correspond à un tertre. Image satellitaire de janvier 2016.

Les travaux de C.V.Jr. Haynes (1985) dans la région de Kharga et de I.A. Brookes (1990) dans la région de Dakhla présentent à ce titre une hypothèse intéressante, qui concorde avec la sédimentologie des dépôts constitutifs des buttes de sédiments fins étudiées. Caton-Thompson et Gardner (1932) ont découvert à Gala Hill des dépôts d'époque historique (céramique datée entre 300 avant et 600 ap. J.-C.) de plusieurs mètres de hauteur, qu'elles interprétaient comme des dépôts de débordement des puits, formés dans des zones de stagnation d'eau et complétés par des apports éoliens sur de la végétation. C.V.Jr. Haynes (1985) s'est rendu sur le même site au début des années 1980. A partir de la céramique en place, de l'observation et de la mesure des dépôts, il a déduit que dix mètres d'épaisseur de sédiments éoliens et de sols agricoles se sont formés avant 1 400 avant notre ère, et que huit autres mètres se sont déposés avant 600 avant notre ère. Il émet quant à lui l'hypothèse d'un dépôt de sédiments éoliens sur des champs cultivés.

I.A. Brookes (1990) a également observé des yardangs de plusieurs mètres de hauteur, qu'il nomme « dépôts d'irrigation » et interprète, par comparaison avec certains systèmes agricoles qui étaient encore en usage à l'époque, comme des dépôts de sédiments éoliens volontairement piégés sur des champs par les agriculteurs. Le sédiment aurait été capté non seulement par la végétation des champs, mais également par des brise-vent mis en place à cet effet et permettant de construire progressivement des sols agricoles fertiles. Le processus identifié par Brookes tient en trois étapes de formations :

- établissement des brise-vents, linéaires et perpendiculaires à l'axe du vent, ou bien sous forme de quadrillage préfigurant le futur parcellaire ;

- aplanissement des sédiments piégés et formation de billons en limite de parcelles pour faciliter l'irrigation ;

- irrigation et plantation de fourrage, généralement de la luzerne. Cette étape permet de casser certains agrégats, de fixer de l'azote dans les sols et de favoriser l'activité bactérienne à même de réduire le taux de gypse.

Une fois la parcelle fonctionnelle, d'autres végétaux sont cultivés (céréales et légumes par exemple), et le processus de dépôt se prolonge, élevant peu à peu le niveau des terres arables. Cet exhaussement progressif introduit un avantage décisif en milieu hyperaride : en permettant un meilleur drainage et en évitant à la fois la salinisation et l'appauvrissement des sols, il permet une agriculture pérenne et productive, tant que l'eau peut être amenée au niveau des champs. Lorsque ce n'est plus le cas, des parcelles sont de nouveau mises en place sur les basses terres selon le même processus, introduisant une migration à long terme, mais sur de courtes distances, des parcelles. Les parcelles abandonnées, sans entretien, sont ensuite détruites par la corrasion éolienne, puis connaissent une déflation rapide, ou sont recouvertes par d'épais dépôts sableux. Dans certains cas, elles peuvent être réaménagées puis réemployées plus tard.

Les travaux de ces auteurs apportent donc un éclairage essentiel, mais les dépôts qu'ils ont décrits ne présentent pas une extension et une épaisseur comparables à celles des buttes étudiées. Il est donc essentiel de déterminer si les buttes du sud de la dépression de Kharga peuvent correspondre à la conjonction de tertres artésiens et de « dépôts d'irrigation » tels que définis par Brookes (1990). Les variations de l'épaisseur, de l'extension et de l'érosion des dépôts pourraient être liées tant à la période d'occupation qu'à la durée des activités humaines, voire au type de mise en valeur des sols. Une période d'occupation plus ancienne induirait des dépôts plus disséqués en raison d'un temps d'érosion plus long. On constate à ce sujet que les buttes les plus basses étudiées présentent souvent de nombreux vestiges d'époques antique et médiévale, mais rarement des vestiges postérieurs (tableau 24). Deux des trois buttes de plus de vingt mètres d'épaisseur sont encore occupées aujourd'hui. Une période d'occupation plus longue en un même site (sans déplacement progressif des parcelles) permettrait une plus grande épaisseur de dépôt. Enfin, des périodes de jachère et/ou la plantation systématique de palmiers, ou de végétation arbustive sur les parcelles ou à proximité modifieraient également les conditions de dépôt.

VII.C. Une mise en valeur agricole ancienne et durable dont témoignent les écrits des voyageurs et des scientifiques de passage

Le grand nombre de buttes (quatorze ont été étudiées sur le terrain ou à partir d'images satellites, de nombreuses autres ont pu être repérées) et leur visibilité nous ont incité à en chercher des mentions antérieures non seulement dans la bibliographie en géomorphologie et géologie, mais également dans des récits de voyages ou des travaux scientifiques plus anciens. Ces recherches ont tiré profit du remarquable travail de numérisation et de mise à disposition d'ouvrages mené par la Bibliothèque Nationale de France sur la plateforme Gallica (http://gallica.bnf.fr/). L'objectif de ces lectures était non seulement de recenser des mentions des buttes à différentes époques afin d'identifier une éventuelle continuité d'occupation, mais également de profiter des descriptions des auteurs, tant concernant les buttes en elles-mêmes que les pratiques agricoles associées. Des apports concernant les conditions de vie des oasiens ont également été identifiés, mais ils seront exposés dans le chapitre IX.

Afin de procéder à cette analyse, nous avons utilisé trois grands types de sources :

- des relations de voyages (Caillaud 1821, dans la région entre 1815 et 1818 ; Hoskins 1837, dans la région en 1832 et 1833) ;
- des ouvrages scientifiques présentant des témoignages développés à propos de la dépression de Kharga avant le XXe s. (Rennell 1800 ; Beadnell 1909) ;
- des cartes au 1:10 000e de la région, produites par le *Survey of Egypt* durant les années 1920 et 1930.

Les cartes au 1:10 000e (figure 130 et 131), tout d'abord, ont permis de vérifier que la plupart des buttes les plus élevées étaient encore cultivées dans les premières décennies du XXe s. suivant un système d'irrigation par gravité depuis des puits situées sur les points hauts, dans les secteurs que nous avions interprétés comme étant des tertres artésiens.

Caillaud et Hoskins mentionnent tous deux des buttes observées lors de leur passage. Nombreuses dans le secteur allant d'Aïn Gaga à Baris, elles s'accompagnent de palmeraies de doums et de dattiers. Hagageh (Ezbet Gaga) était un monticule couvert de sables, où poussaient des palmiers doums et des palmiers dattiers, et où se trouvait une source irrigant des petites parcelles de *doura* (sorgho d'Égypte) (Caillaud 1819). G.A. Hoskins (1837),

mentionne les mêmes éléments dans l'oasis d'Hadegage (Ezbet Gaga) et ajoute y avoir rencontré des agriculteurs de Baris (à environ 14 km), campant sur place pour récolter leurs champs de *doura*. Cette pratique de campement temporaire sur les champs explique pourquoi on observe d'immenses surfaces de parcellaires, mais peu de vestiges bâtis.

Baris, au début du XIXe s., est un village situé sur une butte, entouré de palmeraies et de champs de *doura* protégés par des haies de palmes (Hoskins 1837). Le problème de l'ensablement est déjà prégnant dans les rues et les maisons ; le sol pouvait s'élever par endroits d'un pied par an (environ 30 à 32,5 cm), contraignant les habitants à des travaux de déblais, ou à surélever progressivement les murs de leurs maisons (Caillaud 1819). La mention des buttes comme lieux où sont présents des palmiers et des habitations, de même que l'utilisation de haies de palmes apportent un éclairage majeur en comparaison avec les hypothèses de Brookes sur la formation des sols d'irrigation.

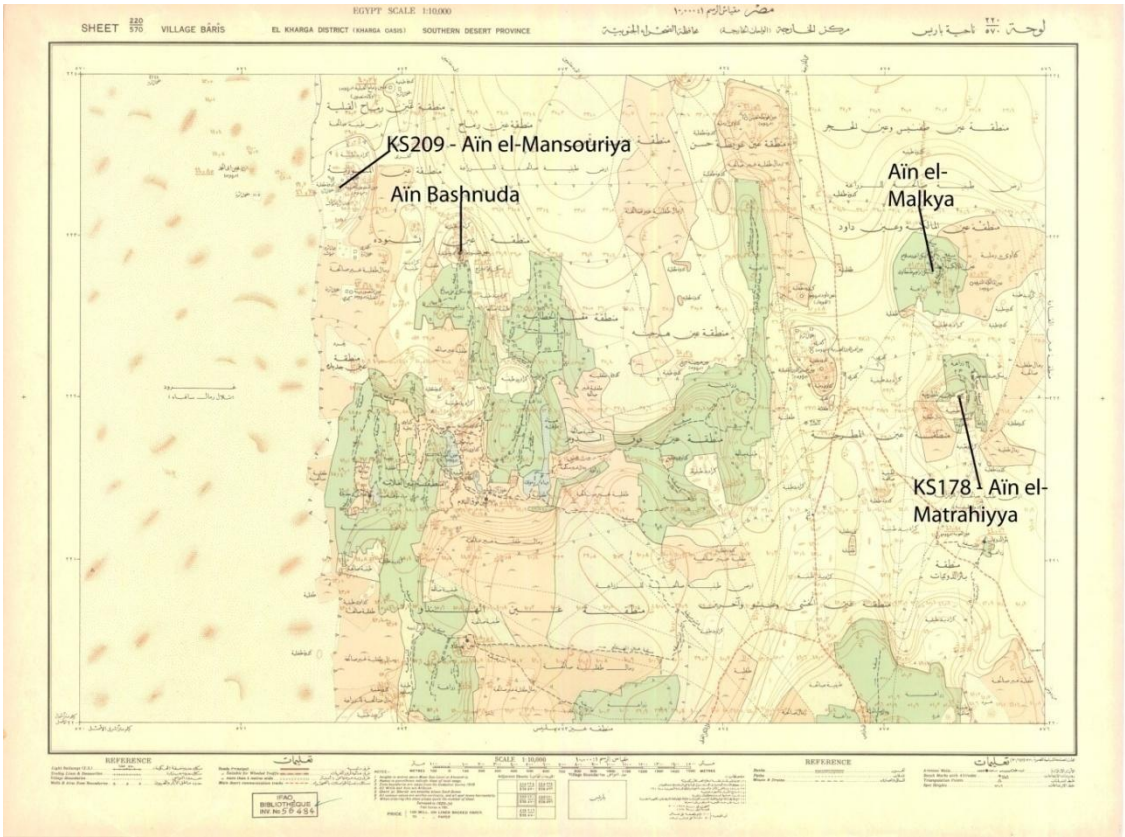


Figure 130 - Carte au 1:10 000e réalisée par le *Survey of Egypt* en 1931 (*Village Bârîs - Sheet 220/570*).

Du côté de la littérature scientifique ancienne, J. Rennell (1800) indique que les oasis sont comme des îles au milieu d'une mer de sable ; des îles qui naissent et croissent grâce aux sources d'eaux. Il émet ensuite l'hypothèse que les oasis se sont d'abord élevées en raison de la présence de végétation dont la dégradation a produit un sol croissant. Quant à H.J.L. Beadnell (1909), il a consacré un ouvrage entier à la dépression de Kharga qu'il

fréquenta assidûment de 1896 à 1905, et constitue donc une source d'informations extraordinaire. A propos des pratiques agricoles, l'auteur nous apprend ainsi que les cultures de *doura* étaient toujours très répandues. De longues périodes de jachère étaient observées et la plupart des parcelles étaient cultivées uniquement tous les 4 à 5 ans. Les cultures basses étaient généralement associées avec des palmiers doums ou à des palmiers dattiers. Sans protection adéquate, le vent pouvait détruire les cultures les plus fragiles (céréales et cultures maraîchères).

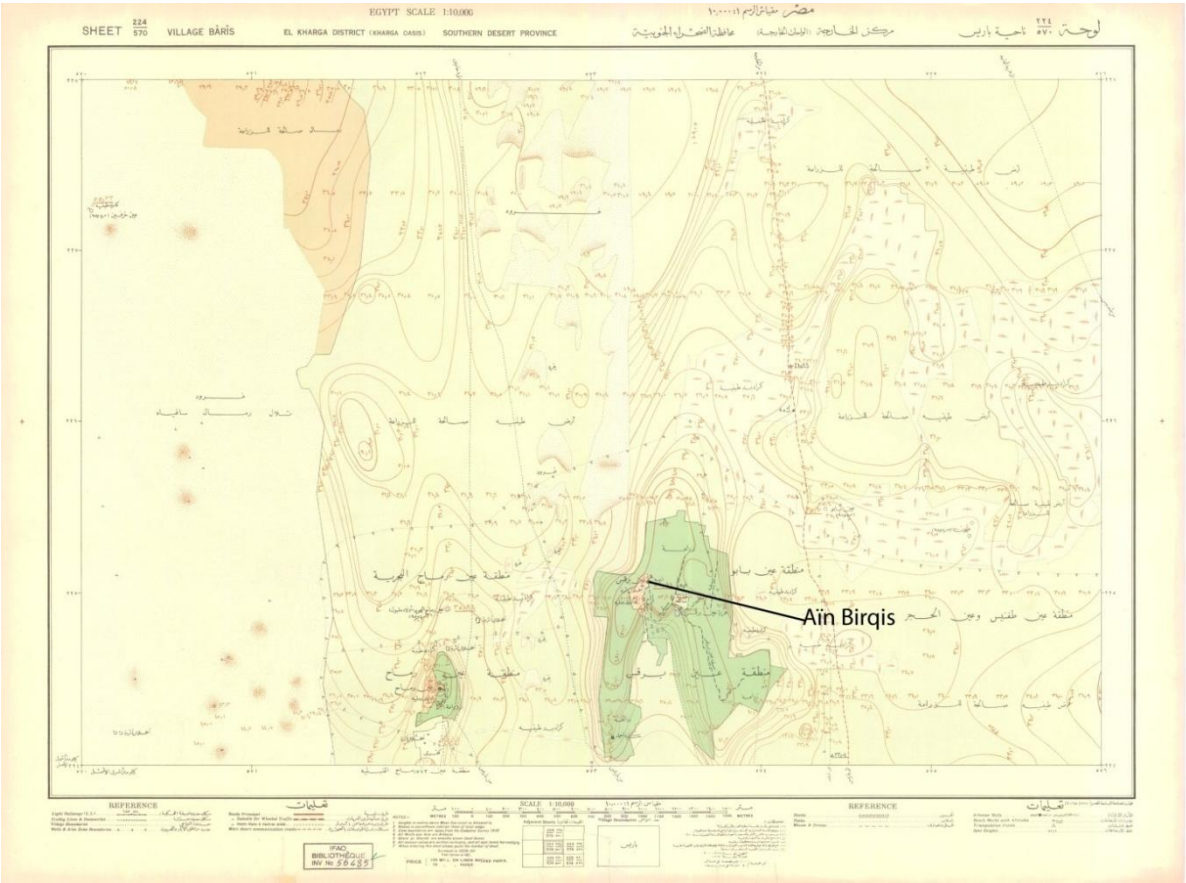


Figure 131 - Carte au 1:10 000e réalisée par le *Survey of Egypt* en 1931 (*Village Bârîs - Sheet 224/570*).

La plupart des puits traditionnels (certains remonteraient à l'Antiquité) offrait un débit de plus en plus limité, allant parfois jusqu'au tarissement. La fourniture en eau de puits voisins n'était pas uniforme, certains puits pouvant se tarir alors que les débits augmentaient dans d'autres situés à proximité. Certains puits abandonnés pouvaient redevenir utilisables après un curage. Si un puits était particulièrement bon et si les bonnes terres manquaient à proximité, l'eau pouvait être transportée sur de grandes distances (plus de 5 km), permettant ainsi la formation de « cours d'eau » (et de dépôts sédimentaires associés) suivant les thalwegs. Enfin, les forages, introduits dans le courant du XIXe s., se développaient de plus en plus, allant jusqu'à

entraîner la formation de marais dans les dépressions, en raison d'un débit excédant les besoins agricoles et domestiques.

H.J.L. Beadnell mentionne également de nombreuses buttes cultivées, dont certaines appartiennent au panel de buttes étudié dans notre travail (Aïn Dakhakhin, Aïn Gaga, Aïn Bella, Aïn Birqis, etc.). Il explique leur formation par un exhaussement lié à des apports éoliens sur les cultures et sur les puits. Les arguments qu'il avance sont nombreux :

- les puits de ces buttes, au contraire de ceux observés ailleurs dans la région, ne sont pas tubés dans leur partie sommitale. Il en déduit que le tubage se situe plus bas, au débouché originel des puits ;

- la colline d'Aïn Dakhakhin a été partiellement arasée par les oasiens une vingtaine d'années avant son passage, et plus d'un mètre de sédiments s'était déjà déposé lorsqu'il est venu dans l'oasis ;

- les agriculteurs tendaient à l'époque à encourager ce dépôt, soit en plantant des arbustes et des arbres sur les parcelles avant de mettre en place des cultures basses (à Maks-el-Qibli par exemple[41]) , soit en plantant au nord des parcelles, au vent, des haies de *Sesbania sesban* (arbuste à croissance rapide de la famille des légumineuses).

Ces sources anciennes et les témoignages qu'elles apportent concordent donc avec les propositions de I.A. Brookes (1990), citées précédemment, et les précisent. De plus, ils permettent de vérifier une certaine pérennité des pratiques au fil du temps. Néanmoins, l'expression « dépôt d'irrigation » est contestable, car elle semble indiquer un dépôt lié directement à la circulation de l'eau, alors que son origine semble principalement éolienne dans la région de Kharga.

[41]. Aujourd'hui encore, dans le secteur de Maks, les oasiens plantent de nombreux arbustes et palmiers en association ou en prélude de la plantation de cultures basses. Au contraire, dans le reste de la région de Baris, la plupart des parcelles nouvellement mises en culture le sont soit en palmeraie, soit en culture basse, sans association. Les premières années, de nombreuses parcelles sont plantées de luzerne, afin de fournir du fourrage et d'amender les sols en azote. Les agriculteurs de ces oasis épandent également des sédiments prélevés sur des yardangs et des méga-yardangs pour amender leurs champs. Les oasis de Maks el-Bahari, Maks el-Qibli et el-Ayoun constituent en ce sens une persistance du modèle de mise en culture traditionnelle décrit à la fois par H.G.L. Beadnell (1909) et par I.A. Brookes (1990).

VII.D. Une genèse complexe, à la croisée entre facteurs hydrogéologiques, éoliens et anthropiques

Les deux premiers ensembles composant les buttes de sédiments fins étant identifiés, il reste à comprendre le processus de genèse du troisième. L'observation des images satellitaires (figure 132) et de coupes ouvertes dans ces ensembles (figure 133) permet de reconnaître des flèches sableuses sous le vent, maintenues en place et stabilisées par la végétation, voire par des champs comme nous avons pu l'observer à KS178 - Aïn-el-Matrahiyya.

Figure 132 - Flèches sableuses stabilisées par d'anciens champs, sous le vent de la butte KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Image satellitaire de mars 2010.

Les buttes de sédiments fins du sud de la dépression de Kharga résulteraient d'une morphogenèse mixte impliquant quatre paramètres principaux :

- les dynamiques éoliennes, qui transportent une charge sédimentaire à même d'être captée par les obstacles (puits, champs, canaux et bâtiments) ou de former des *siouf* sous le vent des tertres et des dépôts. Ce paramètre est nécessaire à la formation des buttes car il garantit dans la dépression de Kharga une fourniture permanente en argiles, limons et sables ;

- l'artésianisme permettant initialement la formation des tertres et fournissant l'eau nécessaire à la végétation. Ce paramètre est la condition initiale de la formation des buttes ;

- la répartition des activités agricoles, l'organisation du parcellaire et du réseau d'irrigation, qui commanderont ensuite l'extension spatiale horizontale et verticale des dépôts de sédiments fins sur les champs ;

- l'abandon des sites, point de départ des processus d'ablation et de corrasion.

Selon les différentes combinaisons de ces paramètres, on observe plusieurs cas de figures et une variabilité de la morphologie des buttes. On peut établir la typologie de ces formations selon deux axes principaux : la hauteur et le degré d'érosion des buttes et leur organisation générale.

Figure 133 - Coupe ouverte suite à un prélèvement de sédiment à la pelle mécanique au sein du versant sud de la colline d'Aïn el-Matrahiyya. Les faciès correspondent à une flèche sableuse sous le vent pour la partie inférieure. Le sommet a été remanié par l'agriculture. Photographie : Yann Callot, novembre 2014.

On peut ainsi distinguer trois états en fonction de la taille des buttes et du degré d'érosion, comme indiqué dans le tableau récapitulatif des buttes (tableau 8, p. 73) :

- type 1 - les buttes basses généralement très érodées ;

- type 2 - les buttes disséquées (certaines ne sont plus visible que par la présence de quelques yardangs résiduels), souvent plus hautes que les précédentes ;

- type 3 - les buttes peu érodées qui dépassent toujours 10 mètres de hauteur par rapport à la plaine environnante ;

Concernant l'organisation générale des buttes on observe quatre types :

- type A - buttes circulaires ou elliptiques à tertre unique, avec ou sans chenal creusé à partir de la cuve du puits ;

- type B - buttes à tertre unique de formes irrégulières et allongées dans le sens du vent avec un chenal de puits sous le vent (orienté vers le sud) ;

- type C - buttes à tertre unique de formes irrégulières et allongées dans le sens du vent avec chenal vers l'est ou vers l'ouest ;

- type D - buttes à tertres multiples de formes complexes.

A partir de ces deux critères, on peut classer les buttes observées de manière à la fois simple et précise (figure 134 et tableau 26). Cependant, il est important de noter que, en étudiant à plus petite échelle l'ensemble constitué par les buttes KS161, KS164 et la butte située au sud de KS161, on pourrait les identifier comme ayant été une seule et unique butte de type D : ces buttes pourraient avoir été reliées entre elles, ainsi qu'à KS159, située au plus au nord, comme l'indiquent les alignements de yardangs.

Tableau 25 - Typologie des buttes de sédiments fins étudiées et de quelques buttes observées sur les images satellitaires ou sur le terrain, dont l'étude n'a pas pu être menée pour le moment.

Buttes de sédiment fin				
Toponyme	**Code IFAO**	**Altitude (m)**	**Epaisseur (m)**	**Type**
Aïn Foq	KS093	72	9	**1D**
Aïn el-Qasir	KS164	58	2	**1D**
Aïn el-Fatima	KS167	72	7	**1D**
Shams el-Din	KS177	40	2	**1?**
Aïn el-Mansouriya	KS209	46	8	**2A**
Aïn Zabiba	KS161	65	10	**2C**
Aïn el-Haweisha	KS156	61	6	**2 ?**
Aïn el-Malkya	Sans	53	19	**3A**
Butte au sud de KS161	Sans	67	7	**3A**
Ezbet Gaga	Sans	50	20	**3A**
Butte au nord est de KS209	Sans	49	11	**3B**
Dakhakhin	Sans	59	29	**3B**
Aïn Birqis	KS260	59	26	**3B**
Aïn Tafnis	KS174	53	13	**3C**
Aïn el-Mattrahiyya	KS178	54	15	**3C**
Aïn Bella	KS159	63	13	**3D**
Aïn Fila	KS207	60	14	**3D**
Aïn Bashnuda	Sans	49	9	**3D**

L'absence remarquable de puits à chenal de sortie orienté vers le nord s'explique probablement par une volonté d'éviter un comblement éolien rapide de la cuve des puits.

On observe ainsi 7 types de buttes bien identifiés et deux buttes dont le type est difficile à définir (figures 135 et 136).

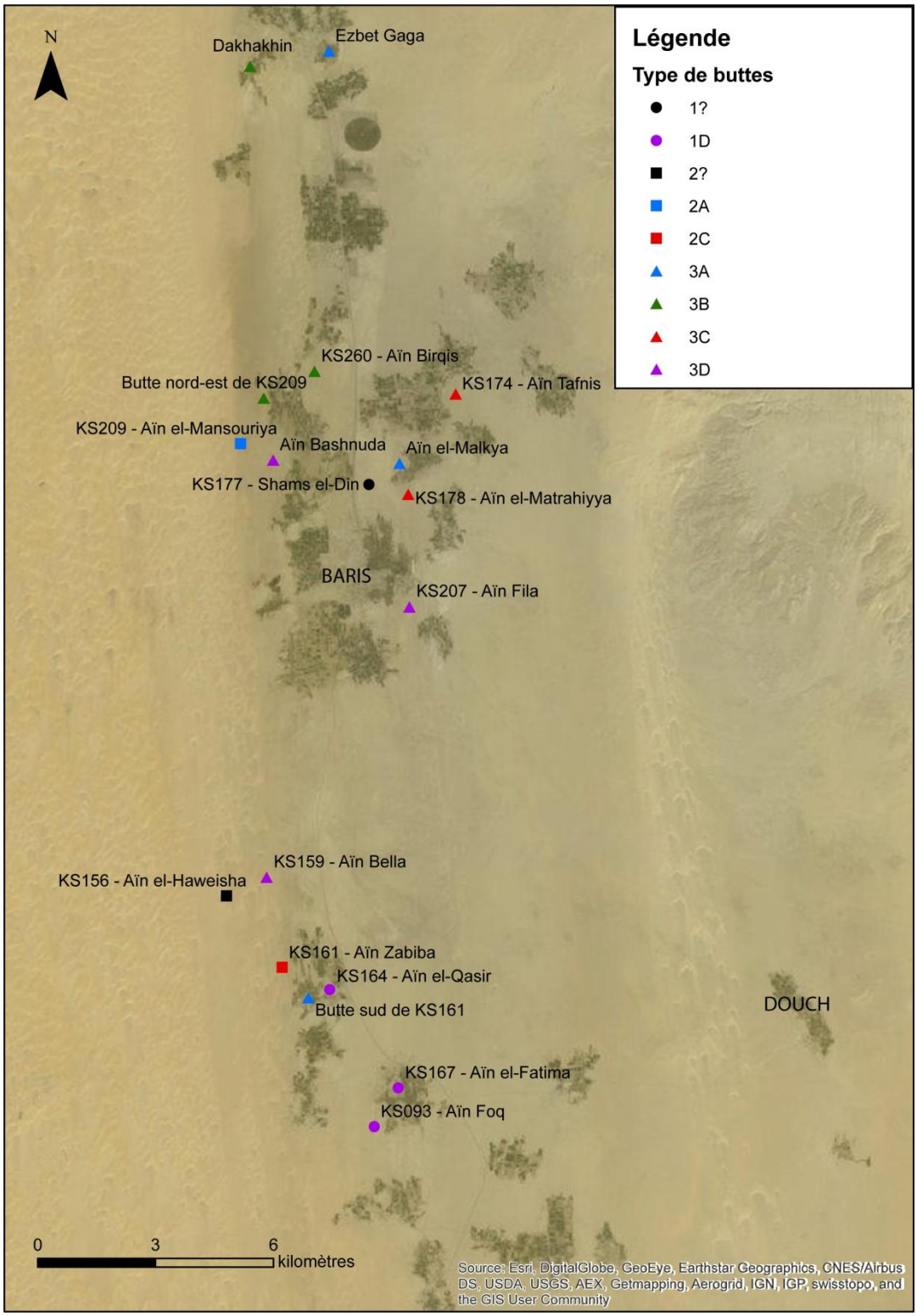


Figure 134 - Carte des buttes de sédiments fins selon leur typologie.

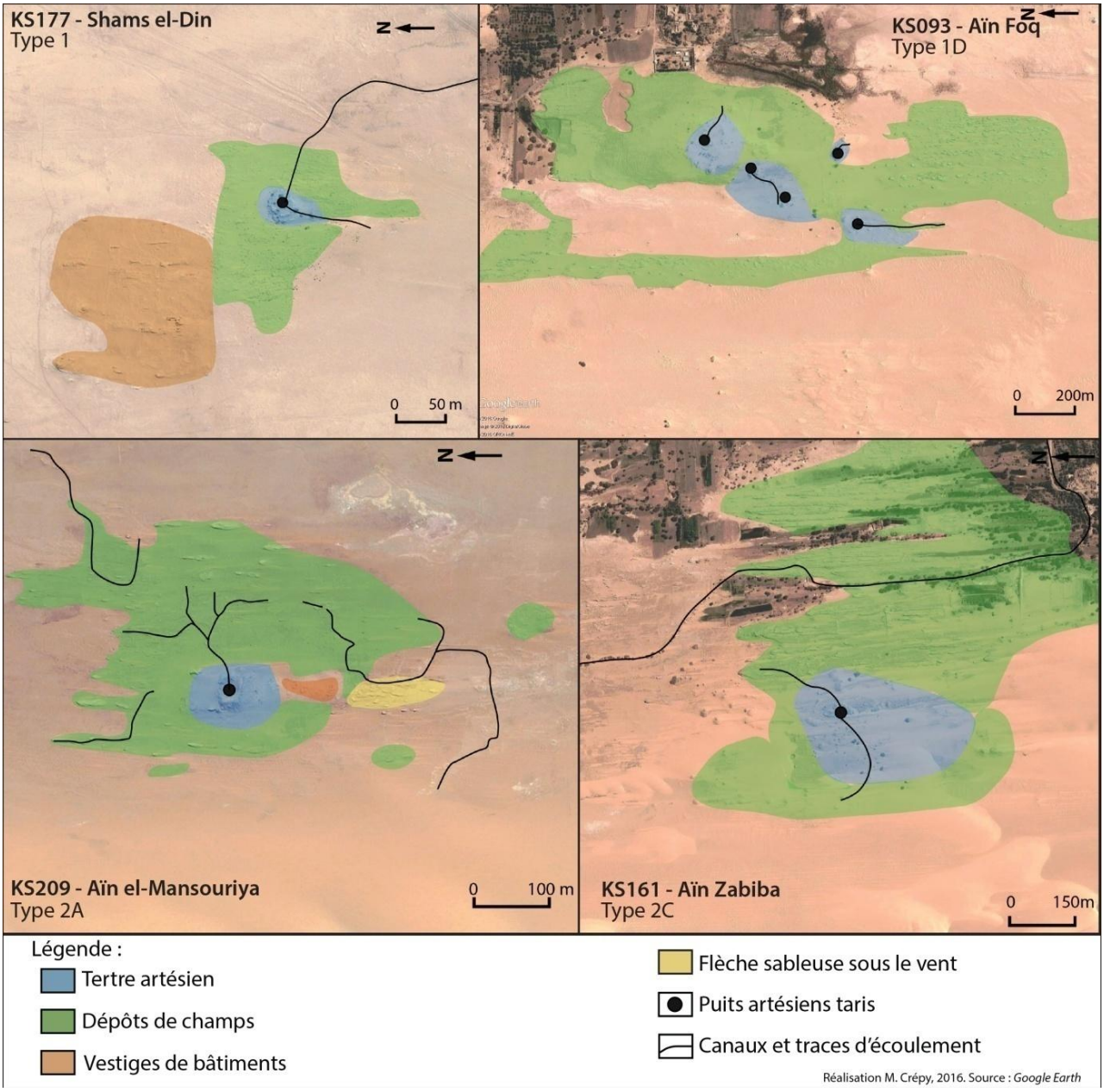


Figure 135 - Exemple de buttes de types 1 et 2.
Butte de KS177 - Shams el-Din (type 1 - butte basse très érodée) dont le degré d'ablation éolienne interdit de déterminer le type d'organisation.
Butte de KS093 - Aïn Foq (type 1D - butte basse très érodée à tertres multiples).
Butte de KS209 - Aïn el-Mansouriya (type 2A - butte disséquée circulaire à tertre unique).
Butte de KS161 - Aïn Zabiba (type 2C - butte disséquée allongée à tertre unique avec chenal principal vers l'est ou vers l'ouest).
Images satellitaires de mars 2010.

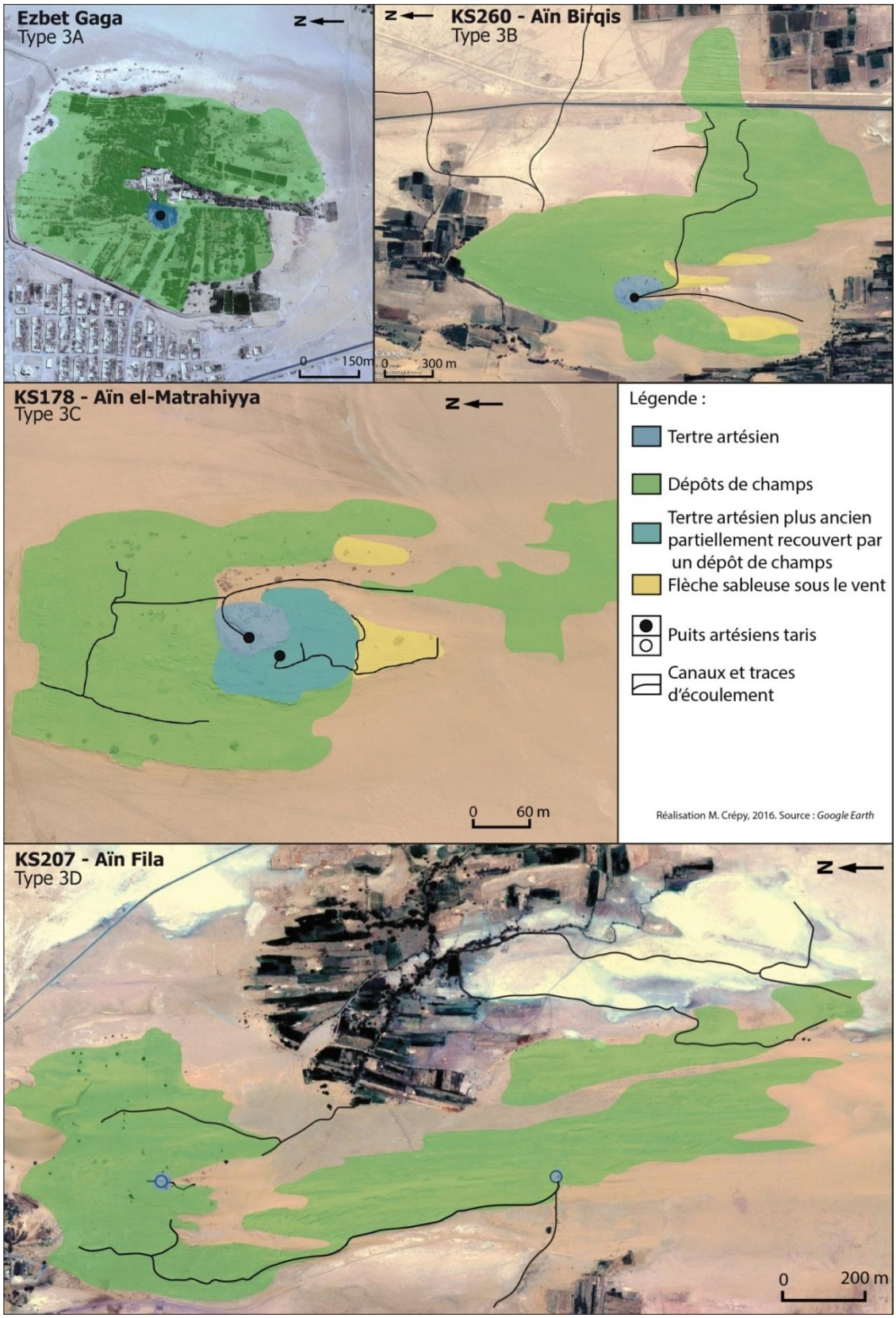


Figure 136 - Exemple de buttes de type 3.
Butte d'Ezbet Gaga (type 3A - butte peu érodée circulaire à tertre unique).
Butte de KS260 - Aïn Birqis (type 3B - butte peu érodée allongée à tertre unique avec chenal principal vers le sud).
Butte de KS178 - Aïn el-Matrahiyya (type 3C - butte allongée peu érodée à tertre unique avec un chenal principal vers l'est ou l'ouest).
Butte de KS207 - Aïn Fila (type 3D - butte allongée peu érodée à tertres multiples)
Images satellitaires de mars 2010.

L'étude stratigraphique et morphologique des buttes de sédiments fins, couplée à un recours aux récits de voyageurs et aux premiers ouvrages scientifiques concernant la région, permet donc d'identifier un processus morphogénétique mixte reposant sur des facteurs hydrogéologiques, éoliens et anthropiques. Des prélèvements ont été effectués sur plusieurs coupes des sites KS178 - Aïn el-Matrahiyya et KS260 - Aïn Birqis, afin de permettre leur étude sédimentologique au plus vite, dès lors que les conditions en Égypte seront plus favorables. Ces prélèvements sont essentiels car une partie de ces dépôts connaît une destruction rapide liée à de récentes extractions de sédiments (figures 137 et 138). Ces formes indiquent des taux de sédimentation et d'ablation très importants qu'il est essentiel d'étudier plus en détail, dans l'objectif de mieux comprendre les évolutions environnementales de la région.

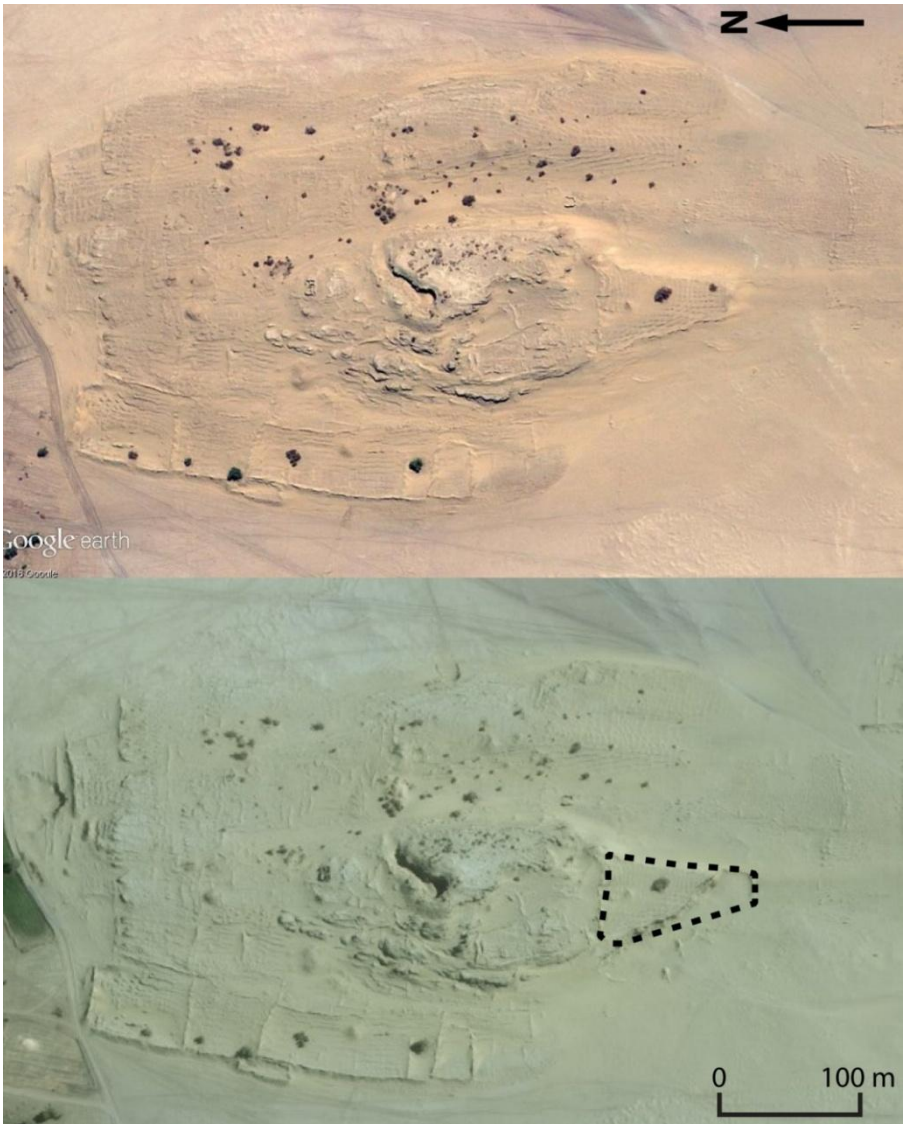


Figure 137 - Comparaison entre l'état de la butte de KS178 - Aïn el-Matrahiyya en mars 2010 (en haut) et en 2013 (en bas, image tirée de *Bing maps*). La flèche sableuse sous le vent est peu à peu détruite par les prélèvements de sédiments. D'autres buttes de la région ont d'ores et déjà été quasiment réduites à néant par de telles opérations, en particulier à proximité des routes.

Figure 138 - Front de carrière récent mesurant une centaine de mètres de long et grignotant progressivement la butte KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Photographie : Yann Callot, novembre 2014.

Chapitre VIII.
L'érosion éolienne de l'Antiquité à nos jours : taux de sédimentation et d'ablation dans le bassin sud de la dépression de Kharga

Afin de compléter l'étude des interactions entre dynamiques éoliennes et activités humaines dans la dépression de Kharga, il était essentiel d'estimer la vitesse des processus érosifs à l'œuvre. Une partie du travail de terrain a donc été consacrée à des relevés et à des mesures de hauteurs de yardangs et de buttes, dans l'objectif de calculer les taux d'ablation et de sédimentation éoliennes. Ce travail a fait l'objet d'une communication lors du colloque international pluridisciplinaire qui s'est déroulé à Djerba, en Tunisie, du 12 au 14 novembre 2013 et qui traitait d'érosion éolienne. Nous reproduisons ci-dessous dans son intégralité la publication qui a fait suite à ce colloque : **Crépy M. et Callot Y. (2015)** - Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Egypte), *Revue des Régions Arides 36 - Actes du Colloque international Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physique, métrologie et techniques de lutte »*, p. 71-95.

VIII.A. Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Égypte).

Les parties grisées correspondent à des paragraphes dont le contenu a déjà été mentionné en première partie. Les relire n'est donc pas nécessaire. Nous avons choisi de les présenter tout de même pour préserver la cohérence des articles.

Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Egypte)

Maël CRÉPY et Yann CALLOT

Université Lumière Lyon 2, UMR5133 Archéorient, M.O.M Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 7 rue Raulin, 69365 LYON cedex 7, France

m.crepy@univ-lyon2.fr ; yann.callot@univ-lyon2.fr

RÉSUMÉ

La dépression de Kharga, dans le désert libyque (Egypte), constitue un remarquable cas d'étude de l'activité éolienne et de ses effets : avec moins d'un millimètre de précipitations annuelles moyennes, le vent de secteur nord, très efficace, est le facteur de morphogenèse majeur à l'échelle de la dépression. La région est délimitée à l'ouest par un erg (prolongement sud de Ghard Abu Moharriq) et à l'est par un plateau calcaire marqué par la corrasion éolienne avec de nombreux systèmes crêtes couloirs. Au cœur de la dépression, là où se situent les oasis actuelles, tributaires de forages profonds, les espaces non cultivés comportent de très nombreux yardangs et des dépôts éoliens très épais (plus de 5 mètres de hauteur par endroit). Dans la partie sud de la région, les yardangs, particulièrement nombreux, sont originaux par leurs liens avec les vestiges archéologiques très étendus dans la région. Les travaux menés par l'IFAO depuis 1976 ont mis en évidence plusieurs périodes d'occupation depuis 2500BP durant lesquelles la densité d'installations agricoles fut remarquable ; pourtant la région est hyperaride depuis 4500BP environ. Les hommes ont donc été confrontés dans le passé aux processus éoliens sur des périodes longues (jusqu'à 1000 ans sans interruption, de 2500BP à 1500BP environ) et une partie des vestiges est directement liée aux dépôts éoliens.

Cette particularité fait de la partie sud de la dépression de Kharga un espace dont l'étude géoarchéologique permet de mieux cerner les évolutions environnementales liées aux processus de dépôt et d'érosion éolienne durant les 5000 dernières années. Les enseignements sont multiples :

- Datation et détermination des vitesses minimales de dépôt et d'érosion grâce aux vestiges archéologiques
- Exemples anciens de gestion de l'érosion des sols et de l'ensablement)
- Effets de l'anthropisation rapide d'un environnement contrôlé par les processus éoliens
- Mise en perspective de la durabilité des méthodes actuelles de gestion des oasis par comparaison avec les oasis antiques et historiques.

SUMMARY

Kharga basin (Western Desert of Egypt), is a good place to study aeolian activity and its effects: a powerful northwind is the most important morphogenetic factor in the basin, while in addition, the mean annual rainfall is smaller than 1mm.

The area is located between a sand sea - the South end of Ghard Abu Mohariqq - in the West and a limestone plateau in the East which is heavily wind-eroded, as evidenced by aeolian spits and mega-yardangs.

Apart from the oasis located in the basin, which use deep drill in the Nubian Sandstone Aquifer System, the place is desertic. There is a lot of yardangs and thick aeolian deposits (sometimes thicker than 5m).

In the South part of the basin the yardangs are often linked with some of the numerous archaeological remains.

Archaeological research led by the I.F.A.O. (Institut Français d'Archéologie Orientale) since 1976 brought out that there were several periods of intensive farming settlements between 2500BP and the 20th century. Yet the regional climate is hyperarid since 4500BP (at least).

Therefore, men and aeolian activities have interacted together in this basin on very significant timescale (around 1000 years without interruption between 2500BP and 1500BP).

Geoarchaeological study of the South of Kharga basin allow us to improve our understanding of the environmental evolutions linked with depositional and erosional aeolian processes for the last 5000 years.

The main contributions of the study are :

- The determination and the datation of minimal deposition and erosion rates thanks to the archaeological remains found in the yardangs

- The report of some ancient methods used to prevent desertification and its effects (soil erosion, sanding up)

- The report of the fast anthropisation of an environnement initially controlled by aeolian processes

- A reflection on the durability of the current techniques used against wind erosion and wind deposition in oasis management, by a comparison with the historic and ancient oasis.

1. INTRODUCTION

Les grandes sécheresses du Sahel dans les années 1970 et suivantes ont montré l'importance de l'érosion éolienne et de l'ensablement. Cela a généré de nombreux travaux sur le sujet, mais surtout sur le temps court. Pourtant, les dynamiques d'érosion éolienne et d'ensablement dans les milieux arides et sur leurs marges sont anciennes et l'alternance de phases climatiques plus ou moins arides à l'Holocène a participé à la modification des limites du désert (Rognon 1994).

L'Égypte, pays désertique en dehors de la vallée du Nil et des oasis, est particulièrement touchée par les dynamiques d'érosion, de transport et de dépôts éoliens. Au 5ème siècle avant J.C., Hérodote rapporte que l'armée de Cambyse II (roi de l'Empire Achéménide de 529 à 522BC.) a été prise dans un vent de sable et ensevelie durant son expédition vers les oasis du désert Libyque.[1] Si l'ensablement d'une armée paraît peu réaliste, et qu'il est plus probable que l'armée se soit perdue dans la tempête, ce texte montre bien que les dynamiques éoliennes ont frappé les consciences dès l'antiquité.

Dans ce contexte, le recours à la géoarchéologie peut permettre d'obtenir sur le temps long des données sur l'érosion éolienne, l'ensablement,

et sur l'ensemble des processus de désertification. Dans le sud de la dépression de Kharga, dans le désert Libyque (Égypte), occupé par des oasis depuis le 5ème siècle avant J.C., quelques sites archéologiques permettent ainsi de quantifier l'érosion et les dépôts éoliens à l'échelle séculaire

2. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE DE L'ÉTUDE

Situé dans la partie Est du Sahara, le territoire Égyptien comprend trois grands déserts : le Sinaï, le désert oriental et le désert occidental ou désert Libyque. Les espaces cultivés et peuplés sont concentrés dans le delta et la vallée du Nil, dans quelques villes côtières et dans les oasis du désert libyque.

2.1 Le désert libyque

Ce désert qui s'étend à l'ouest de la vallée du Nil se caractérise par une aridité marquée suivant un gradient nord/sud avec des précipitations annuelles moyennes comprises entre 200mm sur la côte méditerranéenne et moins d'1mm dans sa partie sud. Les rares épisodes de précipitations sont liés à des tempêtes hivernales (Brookes 2003). Plusieurs grandes oasis (Figure 1) exploitent aujourd'hui les différents aquifères de ce désert (Farafra, Siwa, Bahariya, Dakhla et Kharga) et constituent des espaces d'extension des zones de cultures, en marge de la vallée du Nil.

1 *Histoires*, Livre 3, XXV-XXVI

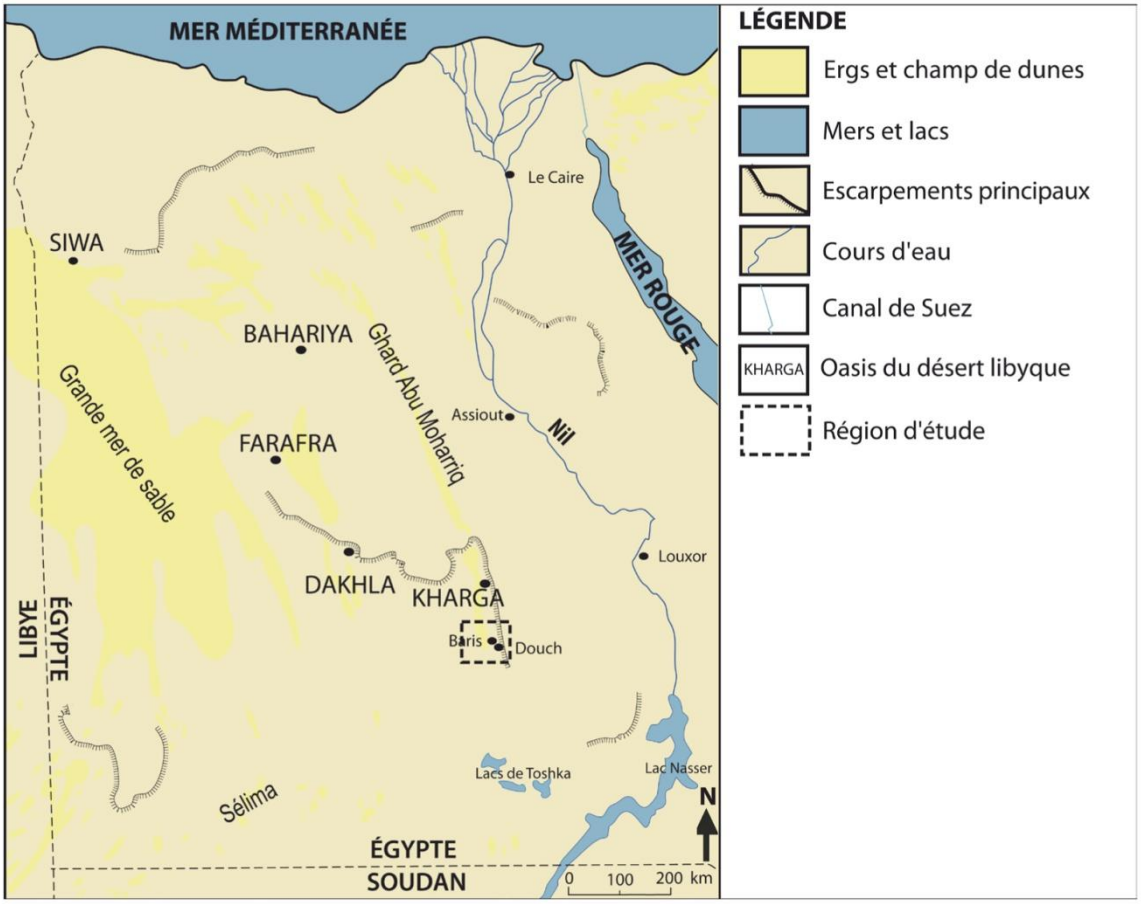


Figure 1. Carte de l'Egypte présentant les principaux ergs et les grands oasis du désert Libyque

2.2 La dépression de Kharga

Située dans le sud du désert Libyque (**Figures 1 et 2**), cette dépression occupe 200km du nord au sud et entre 40 et 85km de l'est à l'ouest (Embabi 2004). Elle abrite aujourd'hui l'oasis la plus méridionale d'Égypte, et s'intègre au projet de « Nouvelle Vallée » visant à employer les eaux des lacs de Toshka (Boëdec 2003) et des forages profonds pour augmenter les surfaces cultivables (Gummuchian 1975 ; Faggi 1983 ; Faggi et *al.* 1987).

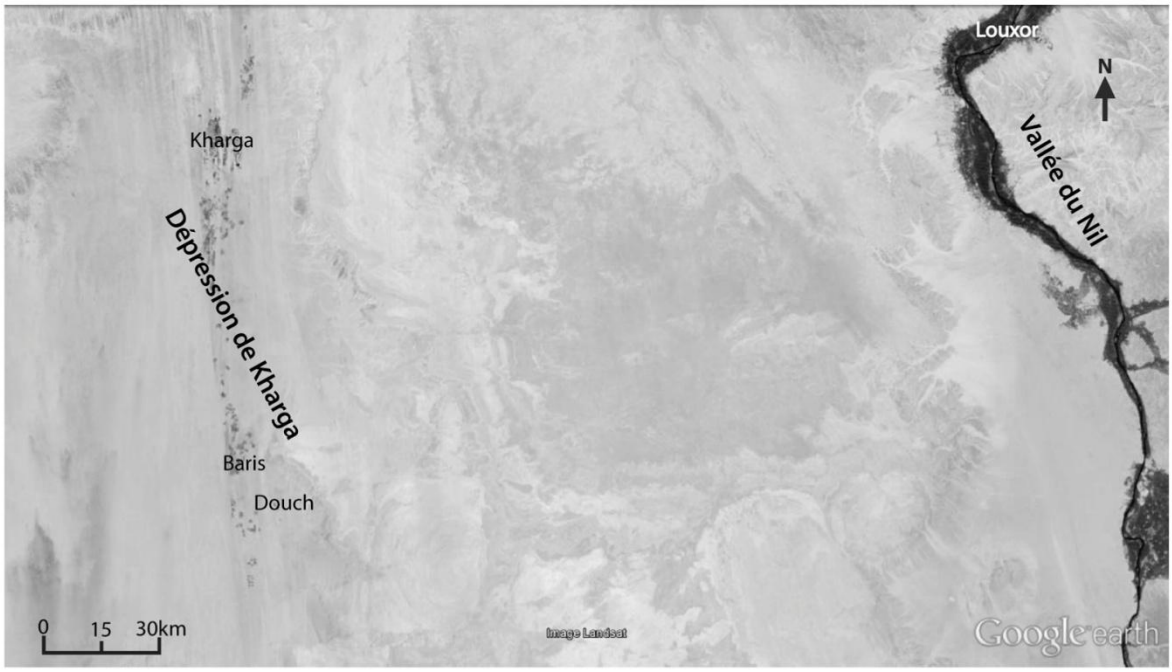


Figure 2. Image satellite localisant la dépression de Kharga par rapport à la vallée du Nil (août 2013, Landsat, Google Earth)

2.2.1 Une région à l'aridité prononcée

La dépression de Kharga constitue l'une des zones les plus arides du Sahara, avec des précipitations annuelles moyennes inférieures à 1mm (Traboulsi 1997) et un taux d'évaporation annuelle de 6000mm (Ezzat 1974). Il peut s'écouler plus de 5 ans sans la moindre pluie supérieure à 0,1mm en 24 heures (Griffiths 1972). Cette hyperaridité est en place depuis 5000-4500BP (Sanlaville 1997) au moins, et d'après Bubenzer et *al*. (2007), les précipitations annuelles moyennes n'auraient jamais dépassé 100mm à l'Holocène. La végétation n'a donc pu se développer que temporairement, dans de rares secteurs peu étendus dont l'approvisionnement en eau ne dépendait pas directement des précipitations.

2.2.2 La prépondérance des dynamiques éoliennes

Dans ce contexte d'hyperaridité, l'impact morphogénique des phénomènes éoliens a été prépondérant durant la seconde moitié de l'Holocène. D'après G. Coudé-Gaussen (*in* Coudé-Gaussen et *al*. 1995), les dynamiques éoliennes d'érosion, de transport et de dépôt sont conditionnées par des critères d'érosivité (paramètres aérologiques : vent et turbulences) et d'érodibilité (paramètres de surface : propriétés mécaniques des sols, propriétés hydriques, propriété chimiques et minéralogiques). La capacité d›érosion et de transport du vent dépend donc à la fois de ses caractéristiques propres (vitesses, directions, fréquence des turbulences), des caracté-

ristiques du matériel à éroder et du couvert végétal. L'augmentation de la rugosité peut limiter ou stopper la déflation éolienne lorsque la surface est plus ou moins recouverte par des obstacles non érodables tels que des éléments grossiers (Labiadh et *al*. 2011) au-delà d'un seuil lié à la taille de ces particules (Coudé-Gaussen *in* Coudé-Gaussen et *al*. 1995), de la végétation (Marticorena et *al*. 1997 ; Callot et *al*. 2000, Bergametti et *al*. 2010) ou des résidus de cultures (Abdourhamane Touré et *al*. 2011).

Dans la dépression de Kharga, les paramètres aérologiques ont probablement peu changé (en dehors de variations locales) durant la seconde partie de l'Holocène : stables à l'échelle de l'Holocène (Donner et *al.* 2000), les vents soufflent selon un régime unimodal de secteur Nord (Nofal 2002 ; Hereher 2010). Au contraire, l'érodibilité a connu des modifications importantes dans certains secteurs :

- la présence localisée de végétation a temporairement induit une augmentation de la rugosité éolienne, modifié les courants éoliens, protégé les sols de l›érosion, et permis le dépôt de sédiments fins.

- au fur et à mesure de la déflation de certaines surfaces, le vannage éolien a formé des pavages de déflation constitués d›éléments trop lourds pour être emportés par le vent. Ces pavages ont neutralisé les processus d›érosion éolienne, sans pour autant entraîner de dépôts importants.

En dehors de ces secteurs, l'ablation et la corrasion éolienne ont été très marquées, entrainant la formation de dépressions, de yardangs et de systèmes crêtes-couloirs, y compris dans des roches cohérentes tendres (grès et schistes argileux) et parfois même dures (calcaires).

2.2.3 Le système aquifère des grès de Nubie, une ressource souterraine capitale

Malgré des conditions climatiques extrêmes, la région n'est pas dépourvue de ressources en eau : le creusement hydro-éolien de la dépression aux dépens du plateau éocène (Hermina *in* Saïd 1990) et un système de failles (Thorweihe *in* Saïd 1990 ; Bousquet 1996) ont permis l'affleurement de l'eau du système aquifère des grès de Nubie. Cet aquifère dont la dernière période de recharge remonte à 7000BP (Gasse 2000) est aujourd'hui exploité par forage profond. Des vestiges de sources artésiennes ayant fonctionné à différentes périodes de l'Holocène et des restes de puits en fonction durant l'antiquité ou la période médiévale indiquent que le niveau de la nappe a été plus haut dans le passé et que son exploitation a été la clé des activités humaines dans la région.

2.2.4 L'installation des oasis antiques et la lutte contre les processus d'érosion et d'ensablement

L'affleurement des ressources en eau souterraine a facilité l'installation des hommes et la mise en culture des terres dès l'antiquité : des oasis pérennes ont existé durant différentes périodes de l'Holocène, reposant sur l'aménagement

de sources naturelles par des puits et sur des qanâts (type de foggaras[2]) (Reddé 1987 ; Bousquet 1996 ; Wuttmann *in* Pantalacci et *al.* 2006). La création et l'irrigation de palmeraies et de champs portant du blé, des plantes fourragères, du ricin et du lin (Newton 2013) et leur irrigation sur de grandes étendues ont accru les surfaces végétalisées. L'extension liée aux activités humaines de l'influence et de l'emprise spatiale de sources préexistantes a largement contribué à élargir les zones de rugosité éolienne et donc de dépôt éolien, y compris de sédiment fin (argiles et limons).

2.2.5 Un espace laboratoire pour l'étude de l'érosion éolienne sur le temps long

Ce contexte climatique, édaphique et archéologique fait de la partie sud de la dépression de Kharga une sorte de laboratoire et de modèle à taille réelle. L'aridité est restée extrême pour la seconde moitié de l'Holocène. En l'absence de rugosité, d'importantes surfaces ont été soumises à l'ablation éolienne, en dehors des secteurs irrigués par les sources ou les activités humaines. De plus l'érosion hydrique est quasi inexistante du fait de la rareté des précipitations et ses manifestations sont particulièrement reconnaissables. La sélection rigoureuse des sites d'étude permet de s'affranchir des rares périodes d'érosion hydrique : l'érosion mesurée est donc strictement liée aux dynamiques éoliennes.

L'extension par l'homme des espaces végétalisés a permis un dépôt éolien rapide sur les secteurs concernés. De ce fait, la succession et la variabilité spatiale des périodes d'occupations, (augmentation de la rugosité du sol) et d'abandons (baisse de la rugosité), entraîne au niveau local une alternance de périodes permettant un dépôt éolien et de périodes où l'érosion éolienne prédomine.

Enfin, la présence de vestiges archéologique permet de dater certaines de ces phases pour différents sites et donc d'estimer des temps d'érosion et/ou des temps de dépôt.

3. MÉTHODES ET SITES RETENUS

3.1 La région de Douch et de Baris

Située dans le sud de la dépression de Kharga (**Figures 2 et 3**), la région de Douch et de Baris s'étend sur un maximum de 28km d'est en ouest, de la bordure du plateau éocène jusqu'à l'erg qui prolonge Ghard Abu Moharriq. La zone étudiée mesure 20 km du nord (oasis d'Aïn Birqis) au sud (oasis de Meks El-Qibli).

3.1.1 Contexte géographique et hydrogéologique

Le rebord du plateau est formé d'un double front de cuesta lié à l'érosion différentielle des couches dures et des couches tendres des formations Gara (calcaires et schistes argileux), Kurkur (calcaire et bancs argileux), Dakhla (schistes argileux) et Douwi (phospho-

2 Galeries drainantes souterraines exploitant les eaux d'une nappe et permettant l'irrigation par gravité des terrains situés à l'aval.

rites) (Hermina *in* Saïd 1990). Au pied du plateau et des niveaux de glacis, le plancher de la dépression s'est formé aux dépens de la formation Quseir (schistes argileux, lits de grès et de silice). La formation de Quseir constitue une source de sédiments fins que la déflation éolienne peut aisément mobiliser (Bousquet 1996). Un linéament tectonique est/ouest (Hermina *in* Saïd 1990 ; Bousquet 1996) a entrainé l'affleurement de la formation sous-jacente de Taref (grès et argiles), sous la forme d'un alignement de collines (Tell-Douch, Aïn Manawir, Aïn Ziyada et Aïn Boreq). Le réseau de failles et de diaclases a permis des remontées artésiennes depuis les aquifères plus profond des grès de Nubie jusqu'à la surface, et dans les collines de grès de Taref.

De nombreux dépôts quaternaires recouvrent ces formations géologiques. La plupart peuvent être regroupés en deux grandes catégories :

- les formations éoliennes sableuses (voiles sableux, mégarides, nebkas, rebdous, siouf, et barkhanes)

- les formations de sédiments fins entaillées en yardangs.

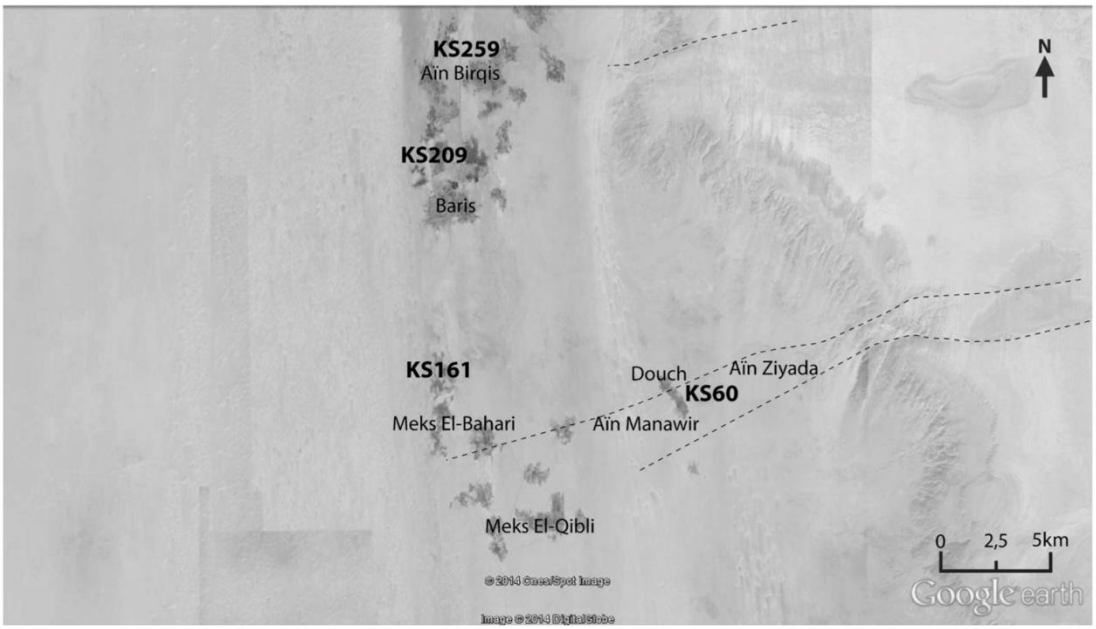


Figure 3. Image satellite de la zone d'étude (16/08/2013, Digital Globe, Google Earth). Les traits discontinus indiquent les failles principales. On repère aisément les oasis, reconnaissables à leur couleur sombre, le plateau calcaire à l'est, et l'erg à l'ouest.

3.1.2 Étude préliminaire des faciès des yardangs

Les prospections de terrain ont permis d'identifier quatre types de dépôts ayant été entaillés en yardangs durant l'Holocène :

- les dépôts de playas déjà abondamment cités par la bibliographie (Embabi 1972, 1999, 2004 ; Donner et *al.* 2000 ; Nofal 2002 ; Goudie 2007), reconnaissables par leur structure à alternance de lits fins dont la granulométrie varie selon l'alternance des périodes d'apports éoliens et des périodes d'apport par ruissellement.

- les dépôts de sources artésiennes décrits par Bousquet (1996) dans la région, ou par Adelsberger et *al*. (2010) dans la dépression de Dakhla. Ces dépôts sont composés d'éjectas artésiens (matériel arraché aux formations géologiques sous-jacentes), et de sédiment fin fixé par l'humidité et la végétation entretenues par les sources.

- les dépôts d'origine anthropique, tels que des tas de déblai de qanâts ou de puits, remaniés ou non par les dynamiques éoliennes et le ruissellement.

- les dépôts éoliens observés tantôt dans des yardangs, tantôt sous la forme de plaquages au sommet des collines. Ils sont liés à une augmentation locale de la rugosité éolienne, souvent Induite par d'anciennes installations humaines (champs et constructions). La présence de matériel archéologique datable en place dans certaines coupes permet d'd'estimer la durée des périodes de dépôts et d'érosion.

3.1.3 Un patrimoine archéologique riche

Étudiée par les chercheurs de l'Institut Français d'Archéologie Orientale (IFAO) du Caire depuis 1976, la région recèle de nombreux vestiges d'implantations humaines à l'Holocène. Après une occupation nomade de l'épipaléolithique (Briois et *al.* 2008) et au néolithique jusqu'à un hiatus dans l'occupation de la région commencant vers 2500 BC. (Bousquet 1996 ; Wuttmann et *al.* 1998), les activités humaines ont repris, de manière sédentaire de la seconde domination perse, au Vème siècle avant J.C. (Bresciani 1995, Newton et *al.* 2013) jusqu'à la fin de la période romaine, au Vème siècle après J.C. où la région connut une période de quasi abandon (Reddé 1987 ; Bousquet 1996). L'occupation de certains sites s'est pourtant poursuivie, plus dispersée et moins pérenne, de la fin de la période romaine jusqu'au milieu du vingtième siècle (Wuttmann *in* Pantalacci et *al.* 2006). Ce patrimoine archéologique conditionne les possibilités de datation des vitesses de dépôt et d'érosion éoliennes dans la région. Il est aujourd'hui menacé par l'extension des oasis menant à la destruction de certains sites.

3.2 Sélection des coupes à étudier

Des prospections de terrain ont permis d'identifier des coupes permettant de quantifier l'érosion et/ou le dépôt éolien par la disposition des vestiges archéologiques en place. Les observations de terrain ont ensuite été croisées avec les rapports de prospection

réalisés par les archéologues de l'I.F.A.O. afin d'identifier les périodes auxquelles remontaient les vestiges.

Une fois ce travail effectué, les coupes les plus favorables aux mesures du dépôt et de l'érosion éolienne ont été sélectionnées selon les critères suivants :

- présence d'éléments datables en place dans le dépôt
- début de la formation du dépôt et/ou de l'érosion comprise entre 5000BP et nos jours (période durant laquelle l'hyperaridité est confirmée par la bibliographie dans la dépression de Kharga) absence de perturbations des sites liées aux rares précipitations holocènes, éloignement des puits et des principaux écoulements d'irrigation, afin d'obtenir la certitude que seul le vent a pu déposer et éroder les sédiments étudiés
- possibilité pratique d'effectuer une mesure précise de la hauteur de la coupe.

3.3 Méthodes d'estimation de l'épaisseur des dépôts

Sur le site KS161, les mesures d'épaisseurs des coupes et d'altitudes ont été effectuées au GPS différentiel[3] (figure 4) au pied et au sommet de chaque couche distincte Sur les sites KS60, KS209 et KS259, la hauteur maximale des coupes a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban et d'un fil à plomb.

Cette méthode présente une limite menant à la sous-estimation des vitesses minimales de dépôt et d'érosion : le temps de dépôt ou d'érosion est surestimé car il est impossible d'identifier et de dater les éventuelles phases de stabilité (sans érosion ni dépôt) précédant ou entrecoupant les périodes d'activité éolienne. De même, une période de dépôt s'intercalant entre deux périodes d'érosion, ou au contraire, une période d'érosion entrecoupant deux périodes de dépôt pourraient passer inaperçues.

3.4 Sites et coupes retenus :

Au cours des prospections, quatre sites répondant aux critères énoncés plus haut ont été retenus (figure 3). Ils réunissent à la fois des yardangs et des vestiges archéologiques datables nombreux appartenant à des époques différentes.

3.4.1 Site KS161, coupe AJ

Situé à proximité immédiate d'un puits artésien (Aïn Zabiba) tari en bordure de l'erg, le site KS161 regroupe des vestiges d'occupation à des époques variées, de l'antiquité jusqu'au vingtième siècle, et l'oasis actuelle de Meks-el-Bahari le recolonise progressivement. La partie sud est occupée par un méga-yardang (figure 5) (environ 700m de longueur maximale pour 400m de largeur maximale et 11m de hauteur maximale) formé à partir du tertre de la source artésienne et du puits tari d'Aïn Zabiba et du dépôt éolien sablo-limoneux associé.

3 Mesures effectuées par Mohammed Gaber, assistant topographe à l'I.F.A.O.

Figure 4. Coupe AJ lors de la mesure de l'épaisseur des couches à l'aide du GPS différentiel. Les 3 points noirs indiquent les points de mesure d'altitude.

La partie nord, à une altitude inférieure de plusieurs mètres, recèle des vestiges de parcellaires romains (daté par les archéologues de l'IFAO en fonction du matériel archéologique en place). Ils sont reconnaissables au tracé encore bien visible des canaux d'irrigation et de drainage des parcelles. Les espèces cultivées sur ces champs ne sont pas connues pour l'heure, en l'absence d'étude paléobotanique sur ce site. Quelques yardangs mesurant plusieurs mètres de hauteur dont la composition est extrêmement similaire à celle du méga-yardang parsèment ce secteur. Certaines de ces buttes témoins, reposant directement sur le parcellaire romain indiquent des processus de dépôt éolien postérieurs à l'époque romaine.

La coupe AJ (Figure 4 et 6a) correspond à l'un de ces yardangs postérieurs à l'époque romaine qui surmonte le parcellaire. Il est constitué de 40cm de dépôt rubéfié correspondant au sol agricole exploité par les champs romains, et de 380cm d'apports éoliens recouvrant le dépôt rubéfié.. Malheureusement, aucun élément datant la fin de la période de dépôt ou le début de la période d'érosion n'a pu être découvert. La date d'observation et de mesure de la coupe a été choisie comme borne finale de la période de dépôt dans les calculs. Cette coupe permet donc uniquement d'estimer une vitesse minimale de dépôt, largement sous-estimée.

Figure 5. Extrémité nord est du mégayardang constituant la partie sud du site d'Aïn Zabiba. La hauteur maximale est ici de 8m environ.

3.4.2 Site KS259, coupe AE

Le site KS259 (Figure 7) recèle de très nombreux yardangs coiffés de vestiges de palmiers et de parcellaires datés de l'époque romaine (mobilier céramique associé datant la phase d'activité principale au 4ème siècle après J.C). La disposition des vestiges et la géomorphologie indiquent que la corrasion éolienne a formé ce paysage disséqué postérieurement à l'occupation romaine.

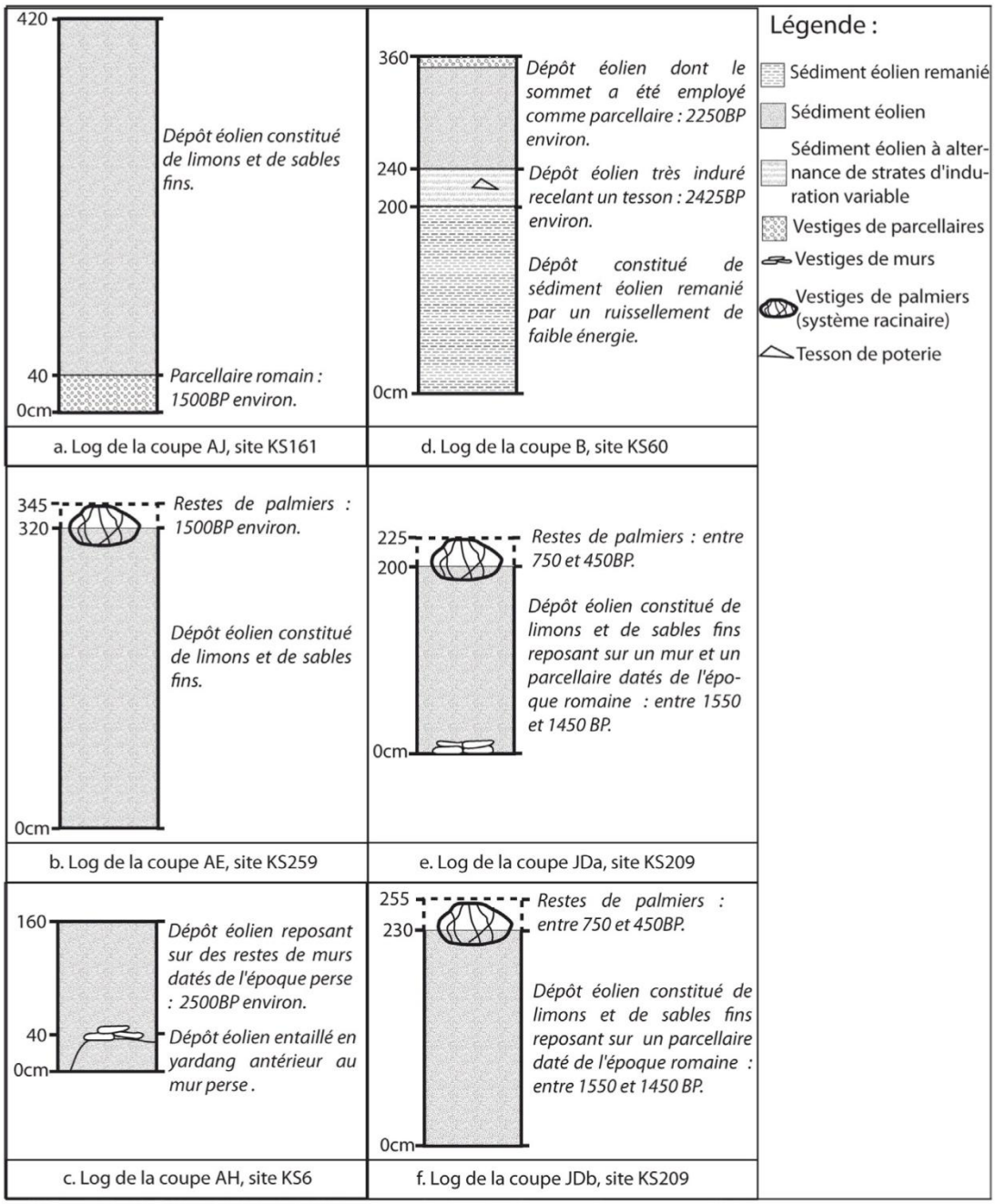


Figure 6. Logs de l'ensemble des coupes étudiées

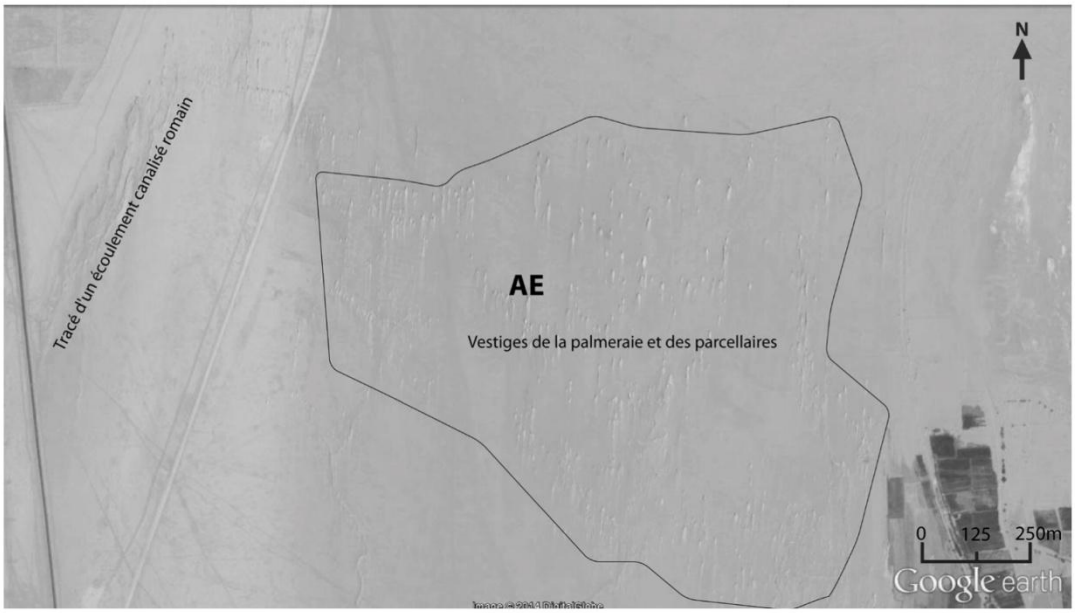


Figure 7. Image satellite du site KS259 (16/08/2013, Digital Globe, Google Earth) et localisation de la coupe AE. La ligne noire délimite le secteur dans lequel les vestiges sont bien visible et datés.

Figure 8. Vue au sol de la coupe AE. Les restes de palmiers sont bien visibles à l'avant et à l'arrière de la coupe où ils ont armé le yardang et limité son érosion.

L'un des yardangs (Figure 6b et 8) haut de 320cm (coupe AE) a été sélectionné pour étude. Aucun élément ne permet de dater le début du dépôt, et le début de la période d'érosion, assurément postérieur à l'occupation romaine n'a pas pu être daté avec précision. Il est très probable qu'une période de stabilité des dépôts due à la présence de restes végétaux ait précédé le début de la phase érosive. Ici, il est donc impossible de mesurer les temps et vitesse de dépôt, mais une vitesse minimale d'érosion peut être déterminée. Aucun pavage de déflation ne s'est formé et les dynamiques érosives sont encore à l'œuvre aujourd'hui : la borne supérieure de la période d'érosion a donc été fixée à l'année d'observation.

3.4.3 Site KS60, coupes B et AH

La colline de Tell-Douch (KS60) (Figure 9) et ses abords présentent un patrimoine archéologique varié. Les travaux de l'IFAO ont démontré l'occupation de cet espace durant la période prédynastique (4500BP environ) sous la forme de campements temporaires à proximité des sources artésiennes (Wuttmann et al, 1998), puis beaucoup plus densément avec l'installation d'oasis pérennes de l'époque Perse (5ème siècle avant J.C.) à la fin de l›époque romaine (5ème siècle après J.C.). Très dissymétrique, la colline présente une pente douce vers le sud et beaucoup plus abrupte sur son versant Nord contre lequel des placages éoliens limoneux se sont formés. Parmi les nombreux yardangs de sédiment fin du site, certains contiennent du matériel archéologique en place et correspondent à des dépôts d'origine éolienne contemporains de l'occupation antique des sites. Deux coupes (AH et B) ont été étudiées sur ce site.

La coupe AH (Figure 6c) mesure 160cm. Son faciès indique clairement deux phases successives de dépôt. La partie supérieure correspond à un dépôt sur un yardang préexistant. A l'interface entre les deux unités, 120cm sous le sommet de la coupe, se trouvent les restes d'un mur en brique crue d'époque perse datés de 2500BP environ (âge maximal) et construit sur le premier yardang. Cet élément permet de dater approximativement la fin de la période de stabilité, qui est antérieure ou synchrone de l'époque perse, et le début d'une période de dépôt synchrone ou postérieure à l'époque perse. Malheureusement, aucun élément, sur le terrain, ne permet de dater la fin de la période de dépôt ou le début de la période d'érosion. Les vitesses de dépôt sont donc largement sous-estimées pour cette coupe.

Située à 320m au nord-est de la précédente, la coupe B (Figure 6d), est constituée d'un épais dépôt (360cm) dont le faciès et la granulométrie indiquent deux dynamiques de dépôt successives :

- la partie inférieure est constituée d'un dépôt éolien remanié par un ruissellement de faible énergie
- la partie supérieure correspond à un dépôt strictement éolien.

Le sommet de ce dépôt entaillé en yardang est occupé par un parcellaire d'époque ptolémaïque (2250BP

environ), et un tesson d'époque perse ou postérieure (daté au plus tôt de 2425BP environ par l'arrivée des perses dans la région) a été identifié en place dans la coupe 140cm plus bas. Ce yardang permet donc de mesurer une vitesse de dépôt minimal avec une relative précision. La vitesse minimale d'érosion est sous-estimée : si la borne supérieure de la période d'érosion correspond à la date d'observation, il est impossible de savoir précisément quand le processus a commencé. La date retenue comme borne pour le début de l'érosion correspond à l'occupation ptolémaïque car l'érosion n'a pas pu reprendre massivement dans ce secteur avant la fin des cultures.

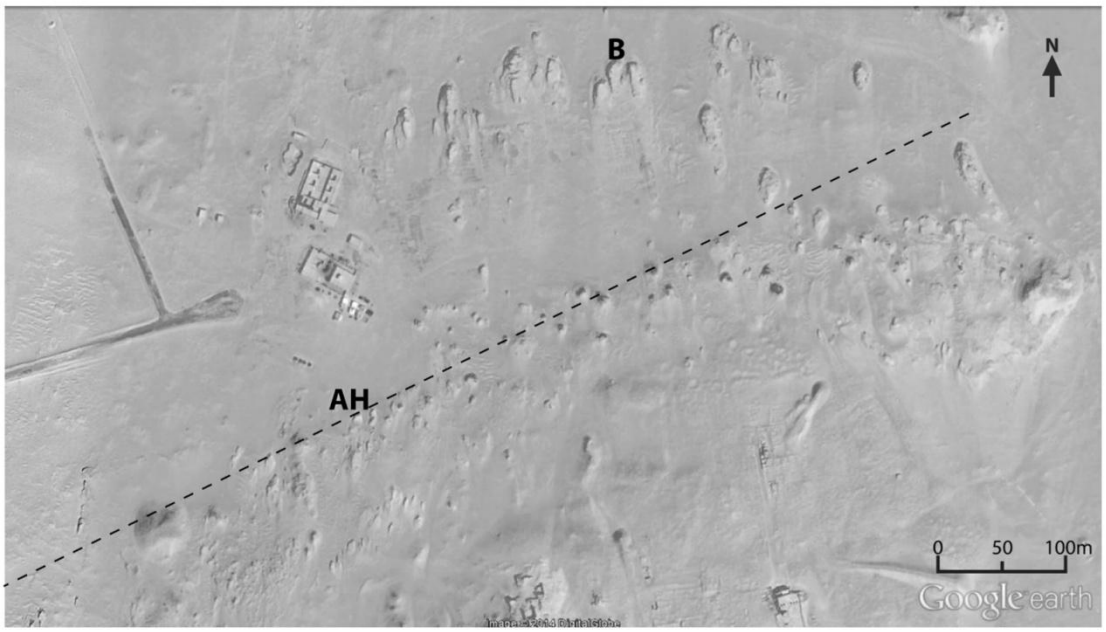


Figure 9. Image satellite du site KS60 (20/03/2004, Digital Globe, Google Earth) et localisation des coupes B et AH. Le trait pointillé correspond à la faille principale à l'origine de la colline de Tell-Douch et de la formation de nappes superficielles rechargées par artésianisme.

3.4.4 Site KS209, coupes JDa et JDb

Ce site (Figure 10) jouxtant l'erg est organisé autour d'un puits élevé (Ain-El-Mansouriya) qui a connu plusieurs phases d'activité. Il comporte des traces d'occupation humaine à l'époque romaine (4ème siècle après J.C.) et durant la période médiévale (13ème-15ème siècle). Au sud du puits, des yardangs recouvrent les installations romaines tout en étant coiffés de vestiges d'époque médiévale en place. Ce site se prête donc tout particulièrement à des mesures de dépôt et d'érosion.

Deux coupes éloignées d'une dizaine de mètres ont été mesurés, les coupes JDa (200cm) (Figure 6e) et JDb (230cm) (Figure 6f) Les deux coupes constituent un dépôt plutôt uniforme qui repose sur un jardin daté du 5ème siècle après J.C matérialisé par un enclos et des vestiges de conduits d'irrigation. A leur sommet se trouvent des restes de palmiers dont les datations s›échelonnent entre le 13èmeet le 15ème siècle. Les dynamiques érosives sont encore actives aujourd'hui. Ces coupes permettent donc d'estimer à la fois des vitesses minimales de dépôt et d'érosion.

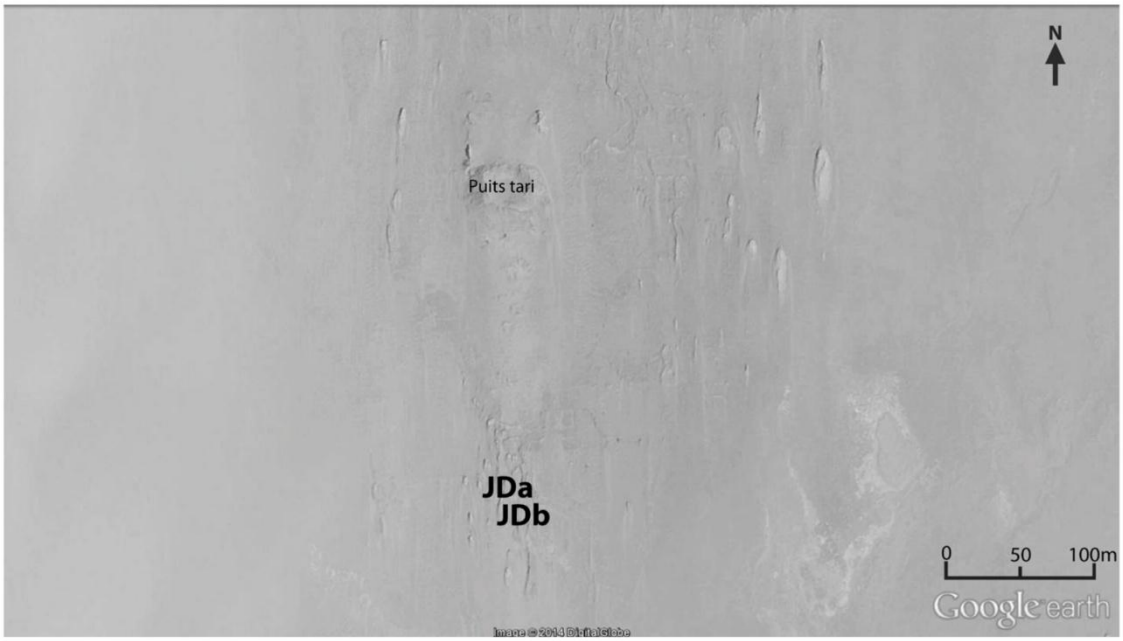


Figure 10. Image satellite du site KS209 (25/03/2010, Digital Globe, Google Earth) et localisation des coupes JDa et JDb

4. RÉSULTATS

Les résultats se présentent sous la forme de temps de dépôts et d'érosion maximaux et donc de vitesses moyennes minimales d'érosion et de dépôt en centimètres par siècle. Aucun élément sur le terrain ne permet de repérer d'éventuelles variations des vitesses de dépôt et d'érosion au cours du processus.

4.1 Processus et vitesses de dépôt

La coupe AH témoigne d'un dépôt de 120cm d'épaisseur en un maximum de 2560 ans soit une vitesse minimale de 5cm/siècle. La coupe AJ, avec un dépôt de 380cm en moins de 1560 ans donne une vitesse minimale de 24cm/siècle (Figure 9).

Les coupes B, JDa et JDb permettent d'obtenir des résultats plus fiables et plus précis,: le sommet de la coupe est daté par des vestiges, et du matériel en place dans les coupes permet de dater plus précisément le début de la période de dépôt. La vitesse minimale de dépôt calculée pour la coupe B est de 70cm/ siècle (140cm en un maximum de deux siècles). Les résultats obtenues sur le site KS209 sont plus modestes, avec une vitesse de dépôt comprise entre 18et 29cm/siècle pour la coupe JDa, et entre 21 et 33cm/siècle (200cm déposés dans un temps compris entre 700 et 1100 ans) pour la coupe JDb (230cm de dépôt) dans un temps compris entre 700 et 1100 ans) (Figure 9).

Les vitesses de dépôt oscillent donc entre 5cm/siècle et 70cm/ siècle.

4.2 Processus et vitesses d'érosion

Le principal facteur d'incertitude de ces résultats tient dans la difficulté de déterminer précisément quand le processus d'érosion a démarré. Le temps d'érosion est donc surestimé, et la vitesse correspondante est sous-estimée. Pour la coupe B, le temps d'érosion maximal est de 2362 ans pour une hauteur de 360cm, la vitesse calculée est donc de 15cm/ siècle. La coupe AH, avec 320cm érodés en un maximum de 1562 ans, témoigne d'une vitesse d'érosion minimale de 21cm/siècle. Les coupes JDa et JDb, ont permis de calculer des vitesses comprises entre 25 et 39cm/siècle (200cm en 812 à 512 ans) pour la coupe JDa et comprises entre 28 et 45cm/siècle (230cm en 812 à 512 ans) pour la coupe JDb (Tableau 1).

Les vitesses d'érosion varient donc de 15cm/siècle à 45cm/siècle.

Tableau 1 : Récapitulatif des vitesses de dépôt et d'érosion éolienne pour l'ensemble des coupes retenues.

Coupes et sites	Processus	Borne inférieure (âge BP)	Borne supérieure	Temps maximal de dépôt (années)	Hauteur concernée (cm)	Vitesse minimale (cm/siècle)
AJ, KS 161	**Dépôt**	Environ 1500	< ou = 2012EC	< ou = 1560	380	**24**
AH, KS60	**Dépôt**	Environ 2500	< ou = 2012EC	< ou = 2560	120	**4**
B, KS60	**Dépôt**	Environ 2500	Environ 2300BP	< ou = 200	140	**70**
JDa, KS209	**Dépôt**	Entre1550 et 1450	Entre 750 et 450BP	Entre100 et 700	200	**Entre 18 et 28**
JDb, KS209	**Dépôt**	Entre1550 et 1450	Entre 750 et 450BP	Entre 1100 et700	230	**Entre 20 et 32**
AE, KS259	**Érosion**	Postérieure à 1500	< ou = 2012EC	1562	320	**20**
B, KS60	**Érosion**	Postérieure à 2300	< ou = 2012EC	2362	360	**15**
Jda, KS209	**Érosion**	Entre 750 et 450	< ou = 2012EC	Entre 812 et 512	200	**Entre 24 et 39**
JDb, KS209	**Érosion**	Entre 750 et 450	< ou = 2012EC	Entre 812 et 512	230	**Entre 28 et 44**

5. DISCUSSION ET LIMITES

5.1 Une mesure imprécise :

Ce type d'étude constitue un indicateur utile pour connaitre les vitesses moyennes de dépôt et d'érosion dans la région de Kharga à une échelle pluriséculaire, mais aucune coupe ne permet d'observer d'éventuelles variations temporelles et les vitesses obtenues sont des vitesses minimales, sous-estimées dans la plupart des cas. De plus, comme cela a été indiqué précédemment, les résultats obtenus sont approximatifs.

5.2 L'efficacité des dynamiques éoliennes

Malgré tout, l'étude indique des vitesses parfois très importantes. La présence d'éléments plus grossiers en surface, au-delà d'un seuil variant en fonction de la vitesse des vents, protègent les dépôts de la déflation par la formation d'un pavage (Coudé-Gaussen *in* Coudé-Gaussen et al. 1995). Dans la région de Douch, le caractère éolien des dépôts implique leur homogénéité et l'absence d'éléments grossiers à même de former un pavage de déflation qui mettrait un coup d'arrêt à l'érosion ; cela explique que les dynamiques érosives soient encore actives sur tous les sites étudiés. Seuls de rares secteurs sont protégés de

l'érosion éolienne par la forte densité de tessons accumulés à la surface du sol.

5.3 Variabilité spatiale des vitesses calculées

Les résultats obtenus varient beaucoup selon les espaces concernés. Ces variations pourraient être expliquées par l'imprécision de la méthode mais il peut également s'agir de variations locales et hyper-locales de la rugosité et des dynamiques éoliennes, en lien avec les activités humaines et l'abandon des sites. Pour s'affranchir de ces particularités locales, la multiplication des sites d'étude est essentielle.

5.4 Prégnance des « perturbations » anthropiques

Les moyens de datation employés pour cette étude impliquent par leur origine humaine une perturbation anthropique des milieux. La présence de murs, de champs ou de palmiers a eu une influence sur l›érosion en canalisant les courants éoliens ou en armant les dépôts. Les vitesses mesurées correspondent toujours au résultat de l›interaction entre les activités humaines et les dynamiques éoliennes, et non aux effets du vent seul. Cela n'est pas un obstacle à l›étude des processus de dépôt : dans la seconde moitié de l'Holocène, aucun dépôt éolien n'aurait pu se produire sans activités humaines en raison de l'hyperaridité et du nombre réduit de sources.

Au contraire, les observations de terrain montrent que les dynamiques érosives ont également touché des dépôts géologiques plus anciens ou distants des sites. Les mesures d érosion obtenues dans cette publication peuvent donc permettre d'estimer les vitesses obtenues à distance des sites occupés. Néanmoins, il est probable que dans les premiers temps après l'abandon des sites, l'érosion ait été ralentie (dépôts armés par les vestiges de cultures et de bâtiments en brique crue) ou accélérée (frange supérieure des dépôts fragilisée par les pratiques agricoles).

5.5 Une problématique de désertification ?

La coexistence des dynamiques éoliennes étudiées et des sites archéologiques implique de prendre en compte des problématiques de désertification déjà prégnantes durant l'antiquité. Rendue possible par la présence d'eaux souterraines, les progrès techniques (creusement de qanâts ou foggaras), des volontés politiques (Chauveau 1998) et économiques fortes (Newton et *al*. 2013), la création ex nihilo d'oasis à l'époque perse a généré des problèmes d'ensablement et de corrasion éolienne des bâtiments dont les conséquences sont visibles sur les vestiges (Wuttmann et *al*. 1998). Des processus similaires à ceux de la désertification se sont donc mis en place en raison, non pas de surpâturage, de changement climatique ou d'une « avancée du désert », mais en conséquence de l'élargissement de l'œkoumène à une zone auparavant désertique. Dans ce contexte, la création d'oasis entraîne, de facto, le problème de la désertification : au système bioclimatique régional hyperaride, les activités humaines ont opposé un

système local contrôlé par les eaux du sous-sol et leur exploitation. Ceci explique la rapidité des processus érosifs après l'abandon des sites et rend comparable la situation antique aux problèmes actuels de désertification pouvant toucher les oasis.

6. CONCLUSION

Le contexte spécifique de la dépression de Kharga en fait une région qui se prête particulièrement bien à l'étude des processus de dépôt et d'érosion éoliens : en effet, la stabilité des conditions climatiques, les apports en eau du sous-sol et les vestiges d'activité humaine permettent de calculer des vitesses moyennes minimales de dépôt et d'érosion. Cependant, la méthode employée, parce qu'elle implique des activités humaines, limite l'étude aux secteurs anthropisés. Les vitesses calculées ne correspondent donc pas à des phénomènes strictement liés au vent, mais à l'interaction entre les actions éoliennes et les implantations humaines. L'étude met donc en lumière des phénomènes de désertification apparus dès la création des oasis, et une relation homme/milieu complexe à l'Holocène : les dynamiques éoliennes ont à la fois une fonction de ressources (dépôts cultivables, maintien de l'humidité) et une fonction de contraintes (ensablement, érosion). Ainsi, dès l'époque perse, les hommes ont pris en compte ces phénomènes dans l'aménagement du territoire : les murs du temple d'Aïn Manawir ont été renforcés et aménagés pour résister à la corrasion et une dune a été fixée par une pellicule d'argile mise en place par les hommes (Wuttmann et *al.* 1998). Aujourd'hui, les implantations de la « nouvelle vallée » sont encore confrontées aux mêmes problèmes : le passage de barkhanes sur les zones cultivées et les phénomènes d'ensablement et d'érosion sont prégnants dans ces oasis en extension. Les hommes luttent contre ces phénomènes par différents moyens, employant le sédiment des yardangs pour compenser les pertes sur les champs, et bétonnant certaines barkhanes pour les arrêter avant les cultures. Malgré des changements techniques, il apparait donc que la lutte contre la désertification est ancienne et que les méthodes employées ne produisent pas d'effet à long terme. Dans ce milieu hyperaride en marge de l'œkoumène, ce qui vient par le vent repart, à terme, par le vent. Seules des politiques volontaristes et des pratiques d'aménagement s'inscrivant dans la durée peuvent donc permettre de freiner les phénomènes d'érosion et d'ensablement, mais dès lors que ces efforts ne seront pas reconduits, les dynamiques éoliennes reprendront leur action.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- Abdourhamane Touré A., Rajot J.L., Garba Z., Marticorena B. Petit C. et Sebag D. 2011 , « Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel », *Catena 85,* pp. 205–214

- Adelsberger K.A. et Smith J.R. 2010, « Paleolandscape and paleoenvironmental interpretation of spring-deposited sediments in Dakhleh Oasis, Western Desert of Egypt », Catena, volume 83, pp.7-22.

- Bergametti G. et Gillette D.A. 2010, « Aeolian sediment fluxes measured over various plant/soil complexes in the Chihuahuan desert », *Journal of Geophysical research*, Vol. 115

- Brookes I.A. 2003, « Geomorphic indicators of Holocene winds in Egypt's Western Desert », *Geomorphology*, 56, 1-2, p.p. 155–166

- Boëdec F. 2003 « Une approche politique du contrôle de l'eau au Moyen-Orient », *Afrique contemporaine* 1/ 2003 (nº 205), p. 77-98

- Bousquet B. 1996, *Tell-Douch et sa région. Géographie d'une limite de milieu à une frontière d'Empire*, DFIFAO 31, Le Caire, 368 p.

- Bresciani E. 1995 « L'Égypte des satrapes d'après la documentation araméenne et égyptienne », *Comptes rendus des séances de l›Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 139e année, N. 1, pp. 97-108.

- Briois F., Midant-Reynes B., Wuttmann M. 2008, *Le site épipaléolithique de Ayn Manaweîr (oasis de Kharga, Egypte)*, IFAO, Le Caire, 154 p.

- Bubenzer O. et Riemer H. 2007, « Holocene Climatic Change and Human Settlement between the Central Sahara and the Nile Valley - Archaeological and Geomorphological Results », *Geoarchaeology*, 22(6), pp. 607-620.

- Callot Y., Marticorena B. et Bergametti G. 2000, Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert », *Geodinamica Acta*, 13, 245-270

- Chauveau M. 1998, « Une oasis égyptienne au temps des Perses. », *Égypte, Afrique et Orient,* 9, pp. 21-26.

- Coudé-Gaussen G. « L'érosion éolienne : aspects théoriques » *in* Coudé-Gaussen G.et Rognon P. (dir.) 1995, *Désertification et aménagement au Maghreb*, L'Harmattan, Paris, 313p.

- Donner J. et Embabi N.S. 2000, « The Significance of yardangs and ventifacted rock outcrops in the reconstruction of changes in the late Quaternary wind regime in the western desert of Egypt », *Quaternaire*, Volume 11, numéro 3-4, 2000, pp. 179-185

- Embabi N.S. 1972, « The semi-playa deposits of Kharga depression, Western Desert, Egypt », *Bulletin de la Société de Géographie d'Égypte*, volume 5, numéro 41-42, pp. 73 – 87

- Embabi N.S. 1999, « Playas of the Western Desert, Egypt », *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Geologica-Geographica*, volume 160, pp. 5-47

- Embabi N.S. 2004, *The geomorphology of Egypt. Landforms and Evolutin Vol.1: The Nile Valley and the Western Desert*, The Egyptian Geographical Society Special Publication, Cairo, 447p.

- Ezzat M.A. 1974, « *Groundwater Series in the Arab Republic of Egypt; Exploitation of Groundwater in El Wadi El Gedid Project Area.Part II* », General Desert Development, Ministry of Water Resources and Irrigation (Egypt)

- Faggi P. 1983 « Stato e progetti di sviluppo nel Terzo Mondo : il caso di Al-Sheykh Wali (New Valley - Repubblica Araba d›Egitto)», Padova, Instuto di Geografia, *Materiali* , 2.

- Faggi P., Maury R.G. 1987, « Étatisation de l›eau dans le projet «nouvelle vallée» en Égypte. », *L'homme et l'eau en Méditerranée et au Proche-Orient*, IV, L'eau dans l'agriculture, Séminaire de recherche 1982-1983 et journées des 22 et 23octobre 1983, Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux, pp. 103-110

- Gasse F. 2000, « Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum », *Quaternary Science Reviews*, 19, 1-5, pp. 189211

- Goudie A.S. 2007, « Mega-Yardangs : A Global Analysis *», Geography Compass*,1/1, 2007, pp. 65-81

- Griffiths J.F. 1972, « The Climate of the United Arabic Republic », *World Survey of Climatology*, vol.10 (Climates of Africa, Ed. by Griffiths, J.F). Amsterdam, London, New York, pp. 79–92

- Gummuchian H. 1975, « La République Arabe d'Égypte à la conquête de ses déserts », *Revue de géographie alpine*, Tome 63, numéro 2, pp 225-252

- Hereher M.E. 2010, « Sand movement patterns in the Western Desert of Egypt: an environmental concern », *Environment Earth Science*, 59, pp 1119-1127

- Hermina M. 1990, « The surroundings of Kharga, Dakhla and Farafra oasis », *in* Saïd R. (Dir.), *The Geology of Egypt*, Balkema, Rotterdam, 734 p.

- Labiadh M., Bergametti G., Attoui B. et Sekrafi S. 2011, « Particle size distributions of South Tunisian soils erodible by wind », *Geodinamica Acta*, 24:1, 37-47

- Marticorena B., Bergametti G., Gillette D.A. et Belnap J. (1997), « Factors controlling threshold friction velocities in semi-arid areas of the United States », *Journal of Geophysical research.*, 102

- Newton C., Whitbread T., Agut-Labordère D. et Wuttmann M. 2013, **« L'agriculture oasienne à l'époque perse dans le sud de l'oasis de** Kharga **(Égypte, Ve-IVe s.**

AEC) », *Revue d'ethnoécologie* [En ligne], 4, consulté le 07 janvier 2014. URL : http://ethnoecologie.revues.org/1294

- Nofal R.A. 2002, *Les yardangs des dépôts des anciennes playas des dépressions du Western Desert d'Egypte : Etude Géomorphologique*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille I), Octobre 2002, 248 p.

- Reddé M. 1987, « Une ville romaine dans le désert oriental d'Égypte : Douch », *Bulletin de la Société Française d'Archéologie Classique*, pp.215-220

- Rognon P. 1994 *Biographie d'un désert - Le Sahara*, L'harmattan, 347p.

- Sanlaville P. 1997, « Les changements dans l'environnement au Moyen-Orient de 20000 à 6000 BP », *Paléorient*, Vol. 23, 2, pp. 249-262

- Thorweihe, U. 1990, « Nubian Aquifer system » *in* Saïd R., *The Geology of Egypt*, Balkema, Rotterdam, 734 p.

- Traboulsi M., Sanlaville P. et BLANCHET G. 1997, « Le Moyen-Orient de 20000 ans BP à 6000 ans BP. Essai de reconstitution paléoclimatique », *Paléorient*, Vol.23, 2, pp.187-196

- Wuttman M., Barakat H., Bousquet B., Chauveau M., Gonon T., Marchand S., Robin M., Schweitzer A. 1998, « Ayn Manawir (oasis de Kharga). Deuxième rapport préliminaire », *Bulletin de l'Institut Français d'archéologie Orientale*, Le Caire, pp. 367-462.

- Wuttmann M. in Pantalacci L. et Denoix S. 2006, « Travaux de l'Institut français d'archéologie orientale en 2005-2006 », in BIFAO, Tome 106, Le Caire, 2006, pp. 334-453.

Tables des illustrations de l'article

Figure 1. Carte de l'Egypte présentant les principaux ergs et les grands oasis du désert Libyque 199

Figure 2. Image satellite localisant la dépression de Kharga par rapport à la vallée du Nil (août 2013, *Landsat*, *Google Earth*) 200

Figure 3. Image satellite de la zone d'étude (16/08/2013, *Digital Globe*, *Google Earth*). Les traits discontinus indiquent les failles principales. On repère aisément les oasis, reconnaissables à leur couleur sombre, le plateau calcaire à l'est, et l'erg à l'ouest. 203

Figure 4. Coupe AJ lors de la mesure de l'épaisseur des couches à l'aide du GPS différentiel. Les 3 points noirs indiquent les points de mesure d'altitude. 206

Figure 5. Extrémité nord est du mégayardang constituant la partie sud du site d'Aïn Zabiba. La hauteur maximale est ici de 8m environ. 207

Figure 6. Logs de l'ensemble des coupes étudiées 208

Figure 7. Image satellite du site KS259 (16/08/2013, *Digital Globe*, *Google Earth*) et localisation de la coupe AE. La ligne noire délimite le secteur dans lequel les vestiges sont bien visibles et datés. 209

Figure 8. Vue au sol de la coupe AE. Les restes de palmiers sont bien visibles à l'avant et à l'arrière de la coupe où ils ont armé le yardang et limité son érosion. 209

Figure 9. Image satellite du site KS60 (20/03/2004, *Digital Globe*, *Google Earth*) et localisation des coupes B et AH. Le trait pointillé correspond à la faille principale à l'origine de la colline de Tell-Douch et de la formation de nappes superficielles rechargées par artésianisme. 211

Figure 10. Image satellite du site KS209 (25/03/2010, Digital Globe, Google Earth) et localisation des coupes JDa et JDb 212

Tableau 1 : Récapitulatif des vitesses de dépôt et d'érosion éolienne pour l'ensemble des coupes retenues. 214

VIII.B. De nouveaux résultats grâce aux témoignages des voyageurs et des scientifiques (XIXe - XXe s)

Depuis la publication de cet article et en employant les mêmes méthodes, il a été possible d'effectuer deux estimations supplémentaires de taux de sédimentation à partir des sites KS260 - Aïn Birqis et KS178 - Aïn el-Matrahiyya. A KS178, le taux est compris entre 93 et 99 cm/siècle ; à Aïn Birqis, il est encore plus élevé, entre 161 et 171 cm/siècle. A partir d'informations fournies dans la bibliographie, il a été possible d'estimer trois taux de plus :

- F. Caillaud (1821) indique que lors de son passage, dans certains secteurs de Baris, les sédiments éoliens pouvaient s'accumuler sur plus d'un pied par an. On peut ainsi estimer un taux de sédimentation compris entre 2 800 et 3 300 cm/siècle. Ces valeurs sont très élevées, mais il est néanmoins nécessaire de rappeler, d'une part, que F. Caillaud n'a pas passé suffisamment de temps dans la région pour procéder à une mesure rigoureuse et que, d'autre part, il est possible que l'auteur fasse référence à des barkhanes telles que celles qui avancent aujourd'hui sur les champs ;

- H.J.L. Beadnell (1909) fournit des indications sur la colline de Dakhakhin et sur son évolution, qui permettent d'estimer un taux de sédimentation compris entre 400 et 1 000 cm/s. Très élevé, ce taux semble pourtant plausible dans le contexte cité par H.J.L. Beadnell : Dakhakhin se situait à proximité immédiate de l'erg et était l'un des premiers obstacles au vent depuis la partie nord de la dépression de Kharga à près de 50 km : la fourniture en sédiment éolien pouvait donc être très importante. De plus, l'aménagement des champs et la mise en culture des parcelles étaient à même d'augmenter considérablement la rugosité de surface locale, entraînant ainsi un dépôt rapide. En comparant l'épaisseur actuelle des dépôts avec l'épaisseur relatée par H.J.L. Beadnell, on parvient à une vitesse de dépôt entre 1905 et 2015 d'environ 363 cm/s. Ce taux plus faible, mais dans les mêmes ordres de grandeur, pourrait s'expliquer par des modifications des pratiques agricoles et la mise en culture de terres situées au nord de la colline, coupant ainsi une partie de l'apport sédimentaire ;

- le dépôt de 6 m d'épaisseur, contenant des céramiques, observé par Caton-Thompson et Gardner (1932) à Gala Hill, non loin de la ville de Kharga permet d'estimer un taux de sédimentation compris entre 65 et 95 cm/s. entre l'époque perse (320 avant notre ère environ) et l'époque byzantine (600 de notre ère environ). Des travaux ultérieurs sur ce site (Haynes

1985) conduisent à estimer un taux de sédimentation de 100 cm/s. entre 3 350 BP et 2 550 BP.

L'étude des taux de sédimentation et d'ablation éoliennes conduit à observer des taux très élevés : les taux d'ablation sont compris entre 15 et 44 cm/s. et les taux de sédimentation entre 4 et 3 330 cm/s. (bien que les incertitudes sur le texte de F. Caillaud à prendre comme borne haute le taux de 400 à 1 000 cm/s. obtenu à partir des descriptions d'H.J.L Beadnell, voire de 161 à 171 cm/s. calculé pour KS260 - Aïn Birqis à partir des travaux de terrain). Dans un environnement oasien, ces taux s'expliquent par le contraste entre l'hyperaridité climatique régionale et un contexte édaphique local de profusion des ressources en eau favorable au dépôt. Le transport éolien est quasiment continu, seules les zones humides ou végétalisées sont à même de stopper le sédiment, dans de très grandes quantités. Les sources et les puits constituent donc des éléments essentiels pour comprendre la répartition et l'épaisseur des dépôts. Les activités agricoles et l'aménagement intense d'un réseau d'irrigation, en permettant la construction des oasis, induisent également la grande extension spatiale des zones de dépôt. Les oasis du sud de la dépression de Kharga constituent donc un cas d'étude parfait de l'interface entre les hommes et leur milieu : non seulement les dynamiques éoliennes constituent à la fois une contrainte et une ressource pour les agriculteurs, mais la plupart des dépôts éoliens, en dehors de l'erg et de la proximité immédiate des sources, sont strictement conditionnés par les activités humaines. La morphogenèse singulière et la construction des paysages de la dépression de Kharga reposent donc sur le croisement entre trois éléments :

- le vent, élément essentiel à l'apport et à l'export sédimentaire en contexte hyperaride ;
- l'eau artésienne du sous-sol, ressource essentielle à la mise en place des éléments de piégeage du sédiment éolien ;
- les activités humaines, seules à même de curer les puits et de canaliser leur production, contrôlant ainsi l'épaisseur et l'extension des dépôts (dans la limite du potentiel de la nappe et des moyens techniques).

Les processus éoliens agissent comme un instrument de formation des paysages. Loin de subir les dynamiques éoliennes, ou de simplement tirer profit des dépôts associés et des ressources hydrogéologiques, les agriculteurs de la dépression de Kharga en ont fait des outils pour construire et entretenir leurs terres arables. Il semble donc essentiel pour mieux comprendre le système morphogénétique régional et les évolutions environnementales de réaliser une étude diachronique du peuplement, des activités humaines et des conditions de vie sur le temps long dans la dépression de Kharga.

Chapitre IX.
Vivre et cultiver dans la dépression de Kharga : construire les paysages de l'artésianisme et du vent

Afin de compléter l'étude géomorphologique, géoarchéologique et géohistorique de la dépression de Kharga, il était essentiel de s'intéresser aux conditions de vie dans la dépression de Kharga et aux pratiques ayant un impact sur l'environnement. Un article a donc été proposé et accepté pour le numéro 11 des *Cahiers de la Céramique Égyptienne* consacré à la céramique du désert occidental d'Égypte, dont la publication est prévue courant 2017. L'objectif de cette publication est de construire un bilan des conditions environnementales de 475 avant notre ère[42] à nos jours dans le sud de la dépression de Kharga, à partir de la bibliographie, de documents d'archives et d'observations de terrain. L'article est reproduit dans son intégralité ci-dessous : **Crépy M. et Callot Y.** (à paraître) - Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours. *In* Marchand S. (éd.), *Cahiers de la Céramique Égyptienne 11 : La céramique du désert occidental de la fin du Néolithique à l'époque arabe. La Marmarique, le Wadi Natroun et les oasis de Siwa, Bahariya, Dakhla et Kharga*. Le Caire, IFAO.

IX.A. Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours

Les parties grisées correspondent à des paragraphes dont le contenu a déjà été mentionné en première partie. Les relire n'est donc pas nécessaire. Nous avons choisi de les présenter tout de même pour préserver la cohérence des articles.

[42]. Début de la première domination perse, période durant laquelle les oasis ont été implantées dans le bassin sud de la dépression de Kharga (Chauveau 1998).

Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours

Maël Crépy et Yann Callot

Université Lumière Lyon 2, UMR5133 Archéorient, M.O.M. Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 7, rue Raulin, 69365 Lyon Cedex W, France.

m.crepy@univ-lyon2.fr , yann.callot@univ-lyon2.fr

Introduction

Nichée au cœur du désert libyque (figure 1), en dépit de conditions climatiques extrêmes, la dépression de Kharga recèle des oasis bien développées. L'irrigation rend possible l'agriculture dans l'une des régions les plus arides du monde, aux limites de l'œkoumène. La force du contraste entre les secteurs irrigués et le désert environnant, qui frappe encore de nos jours le voyageur comme le chercheur, nourrit depuis l'Antiquité la comparaison entre les oasis et des îles : les oasis étaient appelées « les îles des bienheureux » à l'époque d'Hérodote[43]. Les oasis de la dépression de Kharga semblent donc correspondre à un milieu bien délimité, et ce depuis l'Antiquité au moins.

Ce milieu est formé par la combinaison de facteurs anthropiques et naturels : sa mise en place repose en effet sur des conditions physiques, telles que la présence ou l'absence d'eau, l'érosion, le transport et les dépôts éoliens, et sur des décisions humaines (mise en place de l'irrigation, choix des techniques d'exploitation de l'eau, sélection des secteurs et des plantes à cultiver). L'oasis et son évolution se situent donc à la rencontre de trois grands facteurs : l'eau, le vent et les hommes. L'eau est essentielle : elle abreuve les hommes et les animaux, permet la croissance des plantes et l'agriculture. Les apports éoliens sont nécessaires à la formation de terres arables de qualité, tout en menaçant les implantations humaines d'ensablement. L'homme, enfin, par l'exploitation qu'il fait de l'eau et des sols, par les aménagements qu'il met en place pour en tirer parti, a un rôle central dans la formation et l'évolution des oasis.

Etudié et prospecté depuis 1976 par l'IFAO, le bassin sud de l'oasis de Kharga (figure 2), semble avoir été peuplé de l'Antiquité à nos jours. À ce titre, il constitue un espace privilégié pour l'étude de l'évolution sur le long terme de la relation hommes/environnement et du milieu oasien, permettant d'appréhender les grands mouvements de l'évolution géomorphologique régionale et les grands traits des conditions de vie des hommes peuplant

[43]. Hérodote, *Histoires* III, 26, p. 246 ; P.-H. Larcher 1850.

les oasis. En tirant parti du résultat des prospections de l'IFAO, d'observations géoarchéologiques de terrain et des récits des premiers voyageurs et chercheurs européens à avoir visité la dépression, il est possible de mieux comprendre les évolutions et les permanences du milieu, et d'approcher ainsi l'environnement dans lequel les hommes ont peuplé et aménagé les oasis.

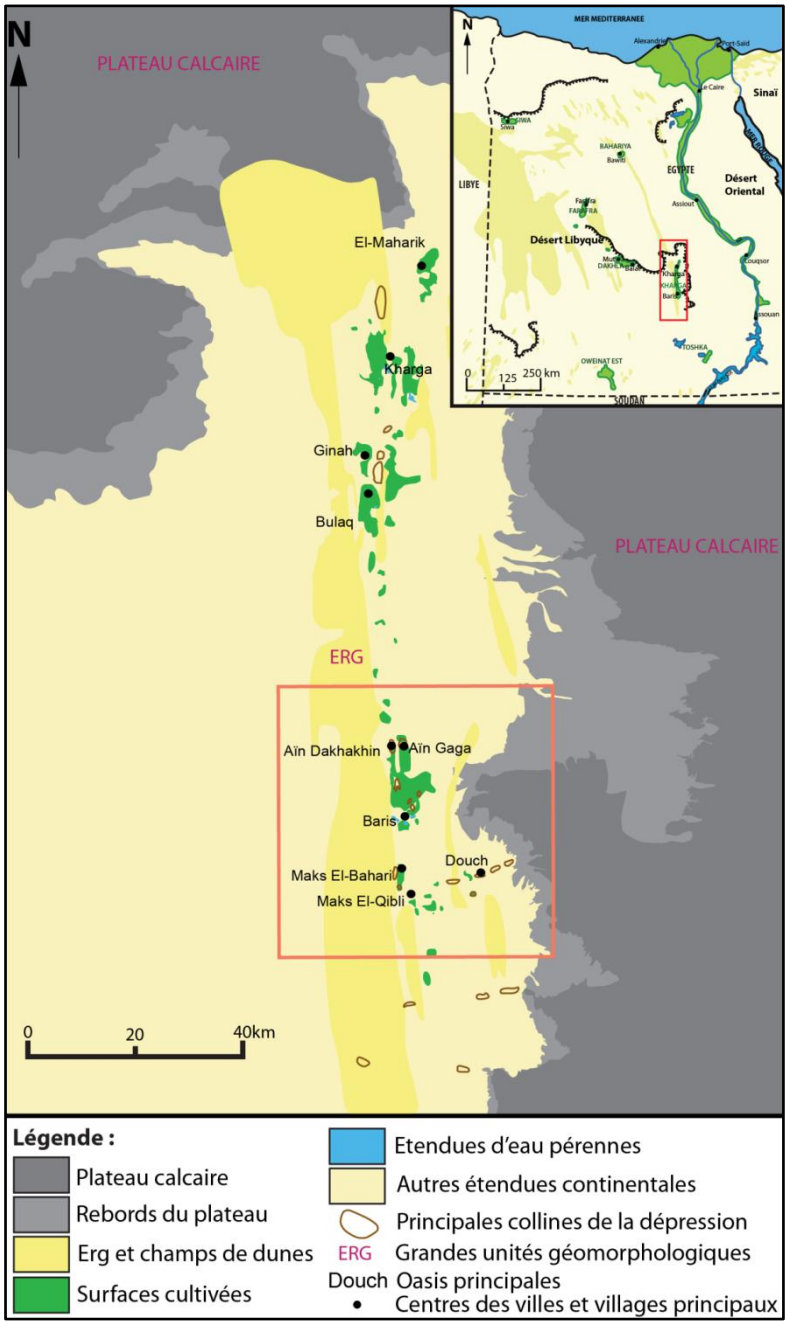


Figure 1 - Carton de localisation et carte de la dépression de Kharga. Le rectangle rouge indique l'emprise de la figure 2.

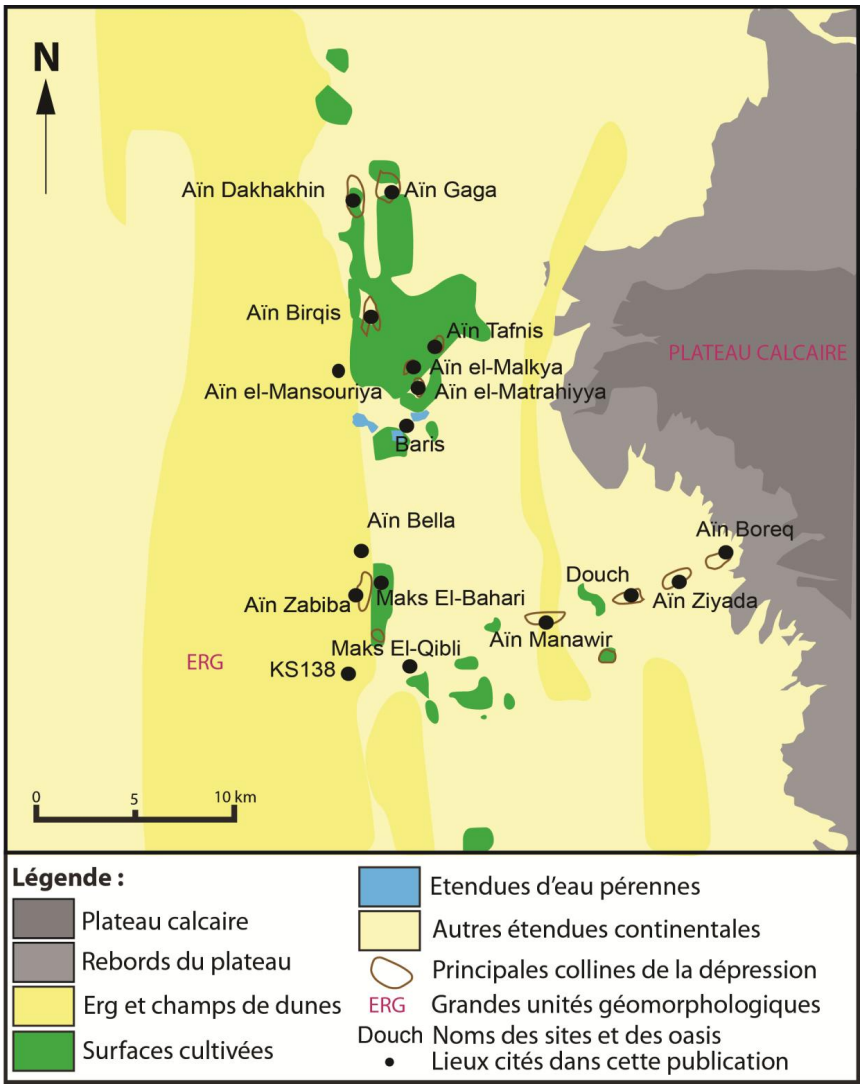


Figure 2 - Carte du bassin sud de l'oasis de Kharga localisant tous les sites cités dans l'article.

I. Un milieu relativement stable : hyperaridité climatique, eaux souterraines et pérennité de l'occupation du bassin sud de l'oasis de Kharga

Le projet nassérien de « Nouvelle Vallée », reposant sur des forages profonds équipés de pompes puisant l'eau des nappes artésiennes du système aquifère des grès de Nubie[44], et relancé en 1997 par Hosni Moubarak[45] est à l'origine du développement actuel des oasis du désert Libyque. Le bassin sud de Kharga montre donc une progression et une extension générale des zones de cultures et les nouveaux efforts annoncés par Abdel Fattah al-Sissi pour étendre les oasis pourraient bien accélérer le mouvement. Les conditions climatiques sont pourtant défavorables à l'agriculture tant en raison du manque de précipitations et des

[44]. GUMUCHIAN 1975, p. 229
[45]. DROZDZ 2007, p. 18

températures extrêmes que de la fréquence des vents efficaces (c'est-à-dire capables de mobiliser les sables dunaires). Les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 2 mm[46] et les températures oscillent entre 40,2°C en juin et 5,8°C en janvier, avec un taux d'évaporation potentielle moyen de 413,66 mm par mois[47]. La sécheresse y est donc absolue, d'autant que plusieurs années peuvent séparer deux épisodes de précipitations. Ces épisodes, généralement violents, produisent un ruissellement et une érosion hydrique importants, tant sur les dépôts de sédiments desséchés que sur les bâtiments de brique crue, à l'image d'une pluie qui a eu lieu à Douch dans la nuit du 6 au 7 novembre 2012 et qui endommagea plusieurs bâtiments de brique crue.

Ce climat extrême et les conditions de sécheresse absolue, en dehors des secteurs irrigués, laissent le champ libre aux dynamiques éoliennes pour remodeler les paysages. À partir des données présentées par M.E. Hereher (2010, p. 1122-1123), on observe que le vent est de secteur nord. On peut également calculer qu'il a soufflé depuis le nord 78 % du temps entre janvier 1968 et juillet 2007. Les vents ont été efficaces 25,6 % du temps, et 96,5 % des vents efficaces venaient du nord. Le vent n'a pas soufflé (période de calme) pendant seulement 0,8 % du temps. Les phénomènes éoliens sont donc prépondérants dans l'évolution géomorphologique actuelle de la région. Le résultat de ces dynamiques peut être particulièrement visible dans le paysage, par le déplacement des barkhanes (figure 3), dunes mobiles en croissant, ou la formation de yardangs (figure 4), buttes de sédiments ou de roches profilées par l'érosion éolienne aux dépens de dépôts ou de strates rocheuses autrefois plus étendus. Mais les effets des dynamiques éoliennes, loin de se cantonner à des formes aisément repérables, se manifestent également de manière beaucoup plus discrète, par le transport de sable libre et de limons, et par leur dépôt sur le moindre obstacle freinant les courants éoliens (figure 5), par la corrasion progressive des bâtiments, par la remobilisation de sédiments autrefois piégés au sol par de la végétation ou de l'humidité.

[46]. EMBABI 2004, p. 13
[47]. SOLIMAN 2013, p. 118

Figure 3 - Barkhanes situées au sud-est de Douch (KS060). Ces dunes en forme de croissant avancent à une vitesse variable : les plus petites sont les plus rapides, alors que les plus grandes sont beaucoup plus lentes. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 4 - Champs de yardangs sur le versant sud d'Aïn Ziyada (KS088). La présence de vestiges d'occupation antique au sommet des yardangs témoigne de l'efficacité de l'ablation éolienne dans ce secteur depuis la fin de l'époque romaine. Prise de vue : novembre 2010.

Dans ce contexte climatique extrême, et sans la possibilité de recourir aux moyens techniques employés actuellement pour obtenir l'eau issue du sous-sol, l'étendue des oasis antiques et médiévales interroge : les surfaces gigantesques de certains parcellaires anciens, antiques ou médiévaux, impliquent en effet la présence d'eau en quantité et de terres arables de qualité

afin de cultiver. L'agriculture dans le bassin sud de l'oasis de Kharga est attestée dès le milieu du Ve siècle avant notre ère à Aïn Manawir (KS089), et l'occupation a été continue dans le secteur jusqu'au VIe siècle au moins, à Douch (KS060). Elle a reposé sur le creusement de puits et de qanâts (galeries drainantes souterraines)[48]. Les prospections plus récentes ont permis de mettre en évidence une continuité de l'occupation du bassin sud de l'oasis entre la fin de l'Antiquité et nos jours, malgré l'abandon précoce de certains sites de collines comme Douch (KS060) ou Aïn Manawir (KS089) à la fin de l'Antiquité. Au contraire, certaines zones cultivées n'ont été abandonnées que dans les années 1960, à l'image d'Aïn Tafnis (KS174), Aïn el-Matrahiyya (KS178) Aïn Birqis (KS260) ou Aïn el-Malkya, cités par R.-M. Anwar (1959, p.19) dans son étude des sols et des eaux disponibles dans la région. Les modalités de l'occupation de la région entre l'Antiquité et le XXe siècle sont pour le moment peu connues même si des vestiges d'occupations ottomanes et médiévales ont été découverts en prospection[49].

Figure 5 - Dépôts de sables et de limons éoliens sous le vent de galets, au sud de Douch (KS060). Le vent vient de la droite (vent du nord) et les galets constituent un obstacle suffisant pour freiner les courants éoliens, entraîner un dépôt, puis le protéger contre la corrasion éolienne. Ceux visibles sur cette photographie sont restés dans la même position suffisamment longtemps pour permettre une induration du sédiment déposé sous le vent. Prise de vue : décembre 2011.

L'étendue des sites antiques, comme la pérennité de l'occupation, étonne, car les conditions climatiques sont restées relativement stables durant les cinq derniers millénaires : les

[48]. REDDÉ 2004, p. 173 ; WUTTMANN 2000, p. 111-112.
[49]. WUTTMANN, DACHY 2012, p. 8

précipitations n'auraient jamais dépassé 100 mm à l'Holocène [50] et le climat actuel hyperaride se serait mis en place il y a environ 5000 ans[51]. Les dynamiques éoliennes semblent également avoir été relativement constantes : la direction des vents, de secteur nord, est demeurée constante depuis le début de l'Holocène[52], au minimum, et les oasis antiques connaissaient déjà des problèmes d'ensablement[53]. Comment expliquer, alors que les conditions climatiques n'ont pas changé, l'installation et le maintien d'activités agricoles et de populations importantes dans la région à partir de la première domination perse (Douch, anciennement Kysis, pourrait avoir compté, à l'époque romaine, un millier d'habitants[54]) ?

L'eau puisée actuellement pour irriguer les oasis provient de nappes captives du Système aquifère des Grès de Nubie. La dernière période de recharge de cet aquifère correspond aux dernières périodes humides holocènes, entre le VIIIe et le IIIe millénaire avant notre ère[55]. L'aquifère ne connaît donc plus de recharge depuis 7000 ans, mais au contraire, une décharge permanente, y compris quand les ressources hydriques du sous-sol ne sont pas exploitées : une partie des eaux se perd par évaporation, jaillit par des sources artésiennes de plus en plus rares ou se déverse dans le système post-nubien, au nord, ou dans le Nil, à l'est[56]. L'aquifère constitue donc un héritage et un prolongement, localisé autour des sources et des points d'extraction de l'eau, des périodes humides holocènes. La profusion édaphique pallie, localement, l'hyperaridité climatique.

En raison de l'artésianisme du système des grès de Nubie, et d'un niveau des nappes autrefois plus haut, l'exploitation de l'eau a donc été possible, avec des variantes, de l'Antiquité jusqu'à nos jours. L'artésianisme a permis la constitution de nappes, perchées (dans les collines de grès) ou superficielles (dans le fond de la dépression), qui ont été largement exploitées par les hommes dès l'Antiquité, par un système d'extraction de l'eau reposant à la fois sur des puits, des qanâts, de profondes saignées couvertes et des citernes[57]. Dans certains secteurs, la fracturation des couches géologiques, d'origine tectonique a également permis l'apparition de sources et de puits alimentés directement depuis l'aquifère artésien.

Mais la baisse progressive des quantités d'eau dans le système aquifère des grès de Nubie, a limité la recharge des nappes superficielles et réduit la pression artésienne au fil du temps. Il

---

[50]. BOUSQUET 1996, p. 142
[51]. TRABOULSI et *al*. 1997, p. 194
[52]. DONNER, EMBABI 2000, p. 180 et 184.
[53]. BOUSQUET 1996, p.74 ; REDDE 2004, p. 11
[54]. REDDE 2004 p. 14
[55]. THORWEIHE 1990, p. 606
[56]. EBRAHEEM et *al*. 2002, p. 188, 190-191 et 195 ; GASSE 2000, p.204-205
[57]. BOUSQUET 1996, p. 48-49, 163

en résulte un abandon des sites fondés sur l'exploitation des nappes perchées et des sites localisés les plus en altitude (en dehors de secteurs rendus particulièrement favorables à l'artésianisme par la tectonique). Le tarissement des nappes perchées et superficielles a, du même coup, provoqué l'obsolescence des techniques d'exploitation de l'eau par qanâts, tranchées et saignées et semble avoir provoqué un « repli » des activités humaines vers les puits artésiens de plaine les plus pérennes.

La stabilité climatique n'est donc pas synonyme d'absence de changements environnementaux. Ces changements s'observent sur le temps long, en conséquence de l'appauvrissement progressif des ressources en eau souterraine, et sur un temps beaucoup plus court, en lien avec les variations des activités humaines. Il apparaît donc essentiel de faire le point sur les ressources et contraintes pour les activités humaines liées à l'eau et au vent et d'identifier ainsi des permanences et des différences diachroniques depuis l'Antiquité.

II. Vivre avec l'eau et le vent : conditions de vie et d'agriculture dans le bassin sud de l'oasis de Kharga durant l'Antiquité

Afin de mieux comprendre les conditions de vie des êtres humains ayant peuplé la région et d'en repérer les principaux changements, il est essentiel d'étudier les facteurs environnementaux liés à l'eau et au vent à la fois comme des éléments susceptibles d'être une ressource pour les hommes, ou une contrainte pesant sur leurs activités.

Figure 6 - Canaux d'irrigation dans l'oasis actuelle de Douch. Formé directement sur le substrat sablo-limoneux et délimité par des bourrelets de terre amovibles, il permet l'acheminement et le partage de l'eau entre les différentes parties de l'oasis. Le canal situé à gauche n'était pas en eau à cette période, mais un simple coup de houe, suivi de la formation d'un nouveau bourrelet dans le canal de droite permet de dévier l'eau vers d'autres secteurs. Prise de vue : novembre 2011.

II.1. L'eau dans le bassin sud de l'oasis de Kharga

Dans un premier temps, il est essentiel d'approfondir l'étude des facteurs environnementaux liés à l'eau. L'eau paraît, évidemment, une ressource essentielle. C'est bien par l'exploitation des eaux du sous-sol qu'il est possible de cultiver, d'abreuver le bétail et de nourrir les hommes, et ce, depuis l'Antiquité. Ce sujet a largement été traité, pour les périodes antiques par B. Bousquet (1996), mais les travaux géoarchéologiques menés à Douch depuis 2010 et l'observation des images satellitaires de la région permettent de compléter certaines des analyses du géomorphologue. L'irrigation des parcelles cultivées se décompose en quatre étapes : l'extraction de l'eau, l'acheminement de l'eau jusqu'aux parcelles, l'arrosage ou l'inondation des cultures et le drainage de l'excédent d'eau. À l'heure actuelle, l'extraction repose sur des forages profonds, et la pression artésienne, en baisse, est suppléée par l'installation de pompes remontant l'eau sur les dernières dizaines de mètres. L'eau est ensuite directement acheminée vers les parcelles, ou concentrée dans des bassins de rétention situés à proximité des forages. Elle est dirigée vers les parcelles dans des canaux formés à même le sol par la constitution de bourrelets de sable et de terre (cette méthode tend à disparaître, mais s'observe encore, dans l'oasis actuelle de Douch, par exemple, figure 6), dans des canaux bétonnés (figure 7), ou dans des tuyaux. L'irrigation peut se pratiquer selon des méthodes traditionnelles, par inondation ou par sillons et billons, ou bien, dans des secteurs mis en culture très récemment, en goutte-à-goutte ou par aspersion. Enfin, la question du drainage est centrale, car un mauvais drainage implique l'évaporation *in situ* de l'eau. Il peut s'ensuivre une salinisation rapide des parcelles qui nuit à l'agriculture, pouvant aller jusqu'à la formation d'encroûtements. Le drainage est actuellement assuré par un déplacement par gravité de l'eau vers les zones déprimées situées à proximité des cultures. La concentration des eaux ainsi opérée peut même provoquer la formation et le maintien d'étendues d'eau pérennes (figure 8) où peuvent être également déversées des eaux usées comme à Baris. Le drainage demeure un problème épineux pour les parcelles situées dans des secteurs déprimés ou dont les pentes sont insuffisantes : l'eau y stagne et l'évaporation se produit donc sur place.

Les techniques d'extraction étaient très différentes durant l'Antiquité : elles reposaient sur le creusement de puits, de saignées, de tranchées, de citernes qui, localisées à proximités de fractures des grès aquifères, pouvait se remplir par remontées artésiennes (leur fond pouvait être foré, pour en faciliter la recharge), de qanâts, de puits-qanâts (puits dont les eaux sont drainées et acheminés vers les cultures par une galerie souterraine), et de qanâts-puits (puits

approvisionné par un qanât)[58]. Le recours à ces techniques était rendu possible par le niveau plus élevé de la nappe à cette époque.

Figure 7 - Canal bétonné dans l'oasis actuelle de Douch. Prise de vue : novembre 2011.

Figure 8 - Marais formé par le drainage d'une partie des eaux d'irrigation de l'oasis actuelle d'Aïn Gaga. Prise de vue : novembre 2014.

[58]. BOUSQUET 1996, p. 163-175 et 194-195 ; WUTTMANN 2001, p.118

Au contraire, d'autres pratiques et techniques étaient très semblables à ce que l'on observe actuellement. La formation d'une cuve circulaire, et non d'un simple conduit, pour certains puits artésiens, indique une fonction de bassin de rétention, permettant de lisser les irrégularités de la décharge artésienne (celle-ci peut en effet varier, en fonction du remplissage des conduits de puits et des fractures naturelles les approvisionnant par les sédiments remontés des profondeurs avec l'eau sous pression) et d'optimiser le niveau de prélèvement de l'eau pour une irrigation par gravité des parcelles environnantes. Ces cuves, en l'absence de puits domestiques à l'intérieur des habitations[59], pouvaient aussi servir de réservoirs ou récupérer l'eau nécessaire à l'alimentation humaine, transportée et stockée dans des récipients.

Le transport de l'eau jusqu'aux parcelles, généralement opéré sur de courtes distances, pouvait exister sur des cours bien plus longs. À titre d'exemple, le site KS259, dont la période principale d'activité daterait du IVe siècle de notre ère, présente des restes d'aqueduc[60] visibles sur les images satellites : la distance sur laquelle on observe ces vestiges avec certitude dépasse 2800 m et une ligne de yardangs qui pourrait correspondre à la suite de son cours est encore visible sur 900 m supplémentaires (figure 9). L'acheminement de l'eau de la zone d'extraction aux parcellaires pouvait s'effectuer de plusieurs manières : tranchées couvertes et tunnels (parfois équipés de tuyaux ou de rigoles en céramique), hydragogues en céramiques directement posés sur la surface du sol ou surélevés (tubes circulaires ou auges), simple rigoles formées en sable et en terre. Les tubes et rigoles en céramique étaient constitués d'éléments placés bout à bout[61]. B. Bousquet (1996, p. 231) cite par exemple un hydragogue de 130 m de long constitué de 400 éléments de 30 cm de long pour 11 cm de diamètre. Le long des hydragogues, les fuites devaient donc être nombreuses.

Une fois acheminée aux parcelles, l'eau servait à l'arrosage selon quatre méthodes principales : l'inondation (submersion complète de la parcelle), l'irrigation par débordement latéral (imbibition progressive de parcelles en pente par un canal bordier), l'irrigation par sillons et billons (arrosage submergeant les sillons, mais laissant émergés les billons cultivés) et l'irrigation par canaris en terre poreuse (méthode consistant à remplir d'eau une cruche enterrée ou semi-enterrée au pied d'un arbre pour assurer un arrosage diffus et constant)[62]. D'après Olympiodore de Thèbes, l'arrosage des parcelles oasiennes était assuré tous les trois

[59]. BOUSQUET 1996, p. 257
[60]. WUTTMANN, DACHY 2012, p. 6-8
[61]. WUTTMANN 2001, p. 119-120
[62]. BOUSQUET 1996, p. 207-208 et 264

jours en été et tous les six jours en hiver[63], ce qui correspond assez bien aux calculs effectués par B. Bousquet (1996, p. 213) sur la fréquence d'arrosage nécessaire pour conserver une humidité des sols propice aux cultures. L'irrigation, par sa fréquence et son abondance, permettait ainsi de cultiver malgré l'hyperaridité climatique.

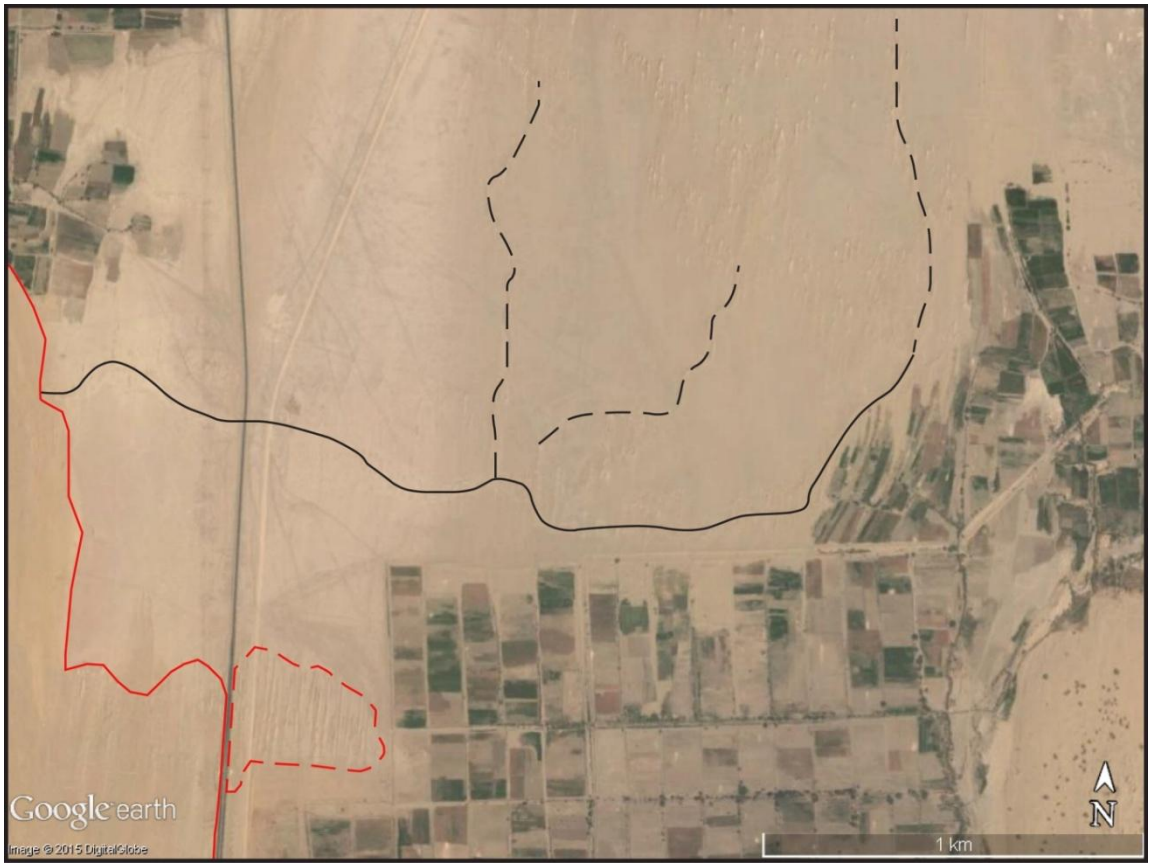


Figure 9 - Partie est d'Aïn Birqis (KS259), site d'époque romaine constitué d'un grand parcellaire entaillé en yardangs par la corrasion éolienne, et de plusieurs canaux transportant l'eau sur plusieurs kilomètres. Les traits rouges indiquent les limites de la butte de sédiment fin d'Aïn Birqis qui recouvre la partie ouest du site romain et mesure 26 m de haut. Les traits noirs indiquent les canaux alimentant les parcellaires romains. Les traits pointillés correspondent aux formes incertaines en raison de la corrasion éolienne et la déflation, qui ont été particulièrement actives sur ce site.

Les vestiges de parcellaires présentent également des indices de drainage insuffisant ou de sur-irrigation : des croûtes salées recouvrent certains des parcellaires antiques[64]. Les parcellaires les plus proches du fond des dépressions fermées et occupant les secteurs les plus bas ont ainsi connu une salinisation importante qui a précipité leur abandon, malgré les efforts des oasiens : certaines parcelles sont bordées de déblais salés correspondant au décapage des couches superficielles du sol[65], qui concentraient les sels précipités par l'évaporation de l'eau d'irrigation.

[63]. WAGNER 1987, p. 280
[64]. BOUSQUET 1996, p. 130
[65]. BOUSQUET 1996, p. 231

La rétention d'eau, l'irrigation et le drainage entraînaient aussi la formation, comme aujourd'hui, d'étendues d'eau temporaires ou pérennes provoquant, d'une part, la salinisation des terres situées à proximité immédiate des champs (figure 10), réduisant ainsi les possibilités d'extension des cultures dans de bonnes conditions, et permettant, d'autre part, la vie de mollusques. La présence de *Melania* et de *Bulins* découle donc, partiellement au moins des activités humaines. Or ces mollusques peuvent héberger des parasites transmissibles à l'homme. De même, il est probable que ces étendues d'eau aient permis la reproduction d'espèces de moustiques vecteurs de maladie. Par exemple, la bilharziose, maladie parasitaire dont le cycle de développement repose sur la cohabitation de mollusques aquatiques et d'êtres humains, pourrait avoir touché les oasis : certains des restes humains issus des nécropoles fouillées présentaient des traces évoquant cette maladie[66].

Figure 10 - Croûtes salées formées en marge de l'oasis de Douch, entre les cultures actuelles et le site antique. L'augmentation de la rugosité éolienne et le ralentissement des courants éoliens qu'elles impliquent expliquent le voile sableux qui les recouvre partiellement. Prise de vue : novembre 2011.

Enfin, lors d'épisodes de précipitations violentes, l'eau pouvait se révéler particulièrement destructrice : le ruissellement et les écoulements pouvaient en effet dégrader les parcellaires. B. Bousquet (1996, p. 226) suppose ainsi la destruction d'une partie du parcellaire antique d'Aïn Boreq (KS098) par une crue.

[66] DUNAND et *al.* 1992, p.192

L'eau constitue donc une ressource essentielle au fonctionnement du milieu oasien, dont l'utilisation doit être rigoureusement gérée pour limiter les risques de salinisation des sols. Elle est également vectrice de contraintes, en permettant le développement de maladies hydriques et, si elle est présente en excès, elle peut conduire à la dégradation des parcellaires. Malgré la baisse progressive du niveau de la nappe et l'évolution des moyens techniques, il apparaît que la maîtrise de l'eau et son impact sur les conditions de vie ont peu changé entre l'Antiquité et nos jours.

II.2. Le vent dans le bassin sud de l'oasis de Kharga

Les dynamiques éoliennes d'ablation, de transport et de dépôt sont conditionnées à la fois par des facteurs d'érosivité (paramètres aérologiques : vitesses des vents et turbulence) et d'érodibilité (paramètres de surface : couverture des surfaces topographiques, propriétés mécaniques, hydriques, minéralogiques et chimiques des sols)[67]. Les capacités d'érosion et de transport du vent dépendent donc à la fois de ses caractéristiques propres, de la nature du matériel à éroder et de la couverture végétale. L'érosivité n'a pas changé depuis la mise en place des conditions climatiques actuelles, antérieure à l'Antiquité : les éventuels changements dans les dynamiques éoliennes s'expliquent donc par des modifications de l'érodibilité, qui peuvent être liées aux activités agricoles.

Actuellement, les dynamiques éoliennes se manifestent à la fois par des phénomènes de corrasion éolienne (abrasion des sédiments, des plantes et des constructions par les grains transportés par le vent) et d'ablation (emport des sédiments en surface), de transport et de dépôt menant à des problèmes d'ensablement et à des dépôts de sédiments plus fins bénéfiques pour les cultures. La corrasion est efficace sur une hauteur limitée (un mètre au maximum)[68] : elle dégrade donc la base des murs et des dépôts sédimentaires.

Les travaux de B. Bousquet (1996) ont également apporté de nouvelles connaissances sur les dynamiques de dépôt et d'érosion dans l'Antiquité. Le géomorphologue a ainsi identifié des traces d'ensablement ponctuel à Douch (KS060) et Aïn Ziyada (KS088), mais pas d'activités dunaires[69] telles que l'on peut en constater aujourd'hui sur certains champs, à Baris par exemple. À l'inverse, des yardangs existaient déjà durant l'Antiquité, ce qui explique l'identification, dans certains d'entre eux, de phases de dépôts et d'ablation distinctes[70]. La

[67]. COUDE-GAUSSEN 1995, p. 133-143
[68]. CALLOT 2008, p. 295-296
[69]. BOUSQUET 1996, p. 74 et 242 ; REDDE 2004, p. 11
[70]. BOUSQUET 1996, p. 104 et 122

découverte d'un yardang contenant plusieurs briques d'époque perse sur un niveau correspondant à une phase de stabilité (figure 11), à Douch (KS060), le confirme : le mur a été construit sur la couche correspondant au sommet du yardang à l'époque, avant que de nouveaux dépôts éoliens le recouvrent. L'ablation, le transport et le dépôt éoliens étaient donc des processus actifs durant l'Antiquité, et les habitants des oasis ont déployé des méthodes de lutte contre ces phénomènes.

Figure 11 - Yardang contenant des briques d'époque perse reposant sur une strate indurée du dépôt à Douch (KS060). Le mur, appuyé sur le rebord d'un ancien yardang, et recouvert d'un épais dépôt postérieur, indique que des yardangs existaient déjà durant l'Antiquité. Durant l'Holocène, les phases de dépôts et d'ablation ont donc pu être multiples en un seul et même lieu. Prise de vue : décembre 2011.

En matière de lutte contre l'ensablement, il est remarquable que les entrées de bâtiments aient été précédées, à Douch, d'un muret bas visant à limiter la pénétration du sable[71], et qu'une dune ait été stabilisée par des dépôts de terres, avant la construction d'une agglomération romaine à son sommet à Aïn Manawir (KS089)[72]. De même, la présence d'un hydragogue à mi-hauteur d'une butte de sédiment fin, à Aïn Ziyada (KS088)[73], ou la présence de tessons, indiquent des dépôts contemporains ou postérieurs à l'Antiquité. Le recouvrement de parcellaires romains ou antérieurs par des dépôts éoliens actuellement entaillés en yardangs confirme l'importance de ces dépôts et des processus d'ablation[74] (figure 12). À Douch

[71]. REDDE 2004, p. 16 et 18
[72]. WUTTMANN et *al.* 1998, p. 380
[73]. BOUSQUET 1996, p. 196
[74]. CRÉPY, CALLOT 2015, p. 80-87

(KS060), ces dépôts ont exhaussé le sol des voies d'environ un mètre durant l'occupation du site[75].

Figure 12 - Yardang constitué aux dépens d'un dépôt de sédiment limoneux et sableux apporté par le vent et ayant recouvert un parcellaire d'époque romaine à Aïn Zabiba (KS161). Prise de vue : novembre 2012.

Les traces de lutte contre la corrasion sont plus complexes à identifier et ne reposent, pour l'heure, que sur des hypothèses. Les massifs de brique construits successivement le long du flanc nord du temple d'Osiris à Aïn Manawir (KS089)[76] pourraient avoir été bâtis en réponse à la corrasion éolienne. Le vent venant en effet du nord, et le temple étant situé dans une zone où les dynamiques éoliennes sont particulièrement actives, doubler le mur du temple pourrait avoir été nécessaire afin d'éviter qu'il ne soit sapé. De même, le doublement en pierre sèche du mur sud de la rue E-W de Douch, sur 80 cm à 1 m de hauteur[77] pourrait avoir servi à protéger les briques crues de la corrasion.

La déflation ancienne, enfin, est très complexe à identifier et à quantifier : il est difficile d'étudier des dépôts qui ont disparu. Cependant, les secteurs en proie à une déflation importante se repèrent par le mélange, en surface, des vestiges archéologiques d'époques différentes et des sédiments les plus lourds, que le vent n'a pas pu emporter. *De facto*, il est difficile de dater la déflation, en dehors des secteurs où des yardangs contiennent, en place,

[75]. REDDE 2004, p. 16
[76]. WUTTMANN et *al.* 1996, p. 401
[77]. REDDE 2004, p. 17

des vestiges archéologiques. Certains vestiges perchés, notamment des restes d'hydragogues dont le tracé a été rectifié, peuvent indiquer des périodes de déflation contemporaines de l'agriculture antique[78].

Les dynamiques éoliennes ont donc pesé sur les activités humaines durant l'Antiquité, mais les apports éoliens constituent également une ressource essentielle de l'agriculture. Les dépôts de sédiments éoliens fins constituent des terres arables de qualité qui ont été exploitées durant l'Antiquité[79], et la présence même de champs, en modifiant l'érodibilité des sols, a permis le dépôt de sédiments éoliens fins sur les cultures[80]. Les dépôts éoliens de sédiment fin constituent donc à la fois un substrat favorable à l'agriculture et un résultat de la présence de plantes cultivées. L'eau utilisée pour irriguer étant d'origine souterraine, et son contenu en sels minéraux étant peu équilibré et peu bénéfiques aux cultures (taux de calcium trop bas, pouvant être inférieurs à 40 ppm., et taux de sodium et de potassium trop élevés, jusqu'à 298 ppm.[81]), ces apports éoliens sont essentiels dans le processus de fertilisation des sols. Actuellement, dans l'oasis de Maks el-Bahari, les agriculteurs vont jusqu'à prélever le sédiment éolien fin issu des dépôts du site d'Aïn Zabiba (KS161) pour l'épandre sur les parcelles les plus récemment mises en culture.

II.3. L'eau, le vent et les champs

La présence simultanée de ressources en eau et de dépôts éoliens propices aux cultures a permis la mise en place d'une agriculture productive, participant ainsi à la prospérité des oasis. Malgré les difficultés liées à l'environnement désertique, les efforts et les aménagements des agriculteurs de l'Antiquité ont permis, à l'échelle régionale, la pérennité des installations agricoles[82] et l'association entre les cultures d'espèces végétales variées et des activités d'élevage[83]. Très peu de données sont disponibles à propos de ces dernières. Les pratiques agricoles n'étaient pas dénuées d'effet sur les ressources en eau et en sédiment éolien. L'installation, par exemple, de vergers à l'extrémité nord des cultures permettait de faire écran au vent et de protéger les cultures situées sous le vent[84]. De manière générale, tous les espaces cultivés pouvaient constituer des espaces de dépôts éoliens, où l'évaporation pouvait être renforcée (en raison de phénomènes d'évapotranspiration) ou amoindrie, en raison d'un

[78]. BOUSQUET 1996, p. 205 p.
[79]. BOUSQUET 1996, p. 110 et 257
[80]. CREPY, CALLOT 2015, p. 77
[81] ANWAR 1959, p. 18
[82]. REDDE 2004, p. 11
[83]. BOUSQUET 1996, p. 253 et 257.
[84]. BOUSQUET 1996, p. 251

couvert végétal suffisamment dense. Or, comme nous l'avons vu précédemment, les dépôts éoliens de sédiments fins étaient particulièrement bénéfiques aux cultures. Au contraire, les parcelles non-cultivées en raison d'une mise en jachère, d'un abandon, ou simplement de l'intervalle entre une récolte et la plantation suivante constituaient autant de lieux où la déflation éolienne sévissait en l'absence de protection des sols par les plantes.

B. Bousquet (1996, p. 258-259) identifie plusieurs types de parcelles distincts parmi les vestiges antiques : les vergers, les parcelles complantées, entourées de murs et présentant des structures en casier, des parcellaires ouverts, sans murs, et des parcellaires de campement, exploités plus temporairement. La présence de végétation ou d'eau modifiant les facteurs d'érodibilité en augmentant la rugosité éolienne (c'est-à-dire en apportant des éléments ralentissant les vents et limitant sa capacité de transport), les différents types de parcelles et les différentes méthodes d'arrosage auront des effets plus ou moins importants sur les dynamiques éoliennes. Les parcelles complantées de végétaux à cycles courts (comme le millet, par exemple) et de végétaux pérennes, comme les palmiers, assureront, surtout si elles sont entourées de murets, un dépôt de sédiment rapide. L'arrosage par inondation, de même que d'éventuels affleurements de la nappe souterraine, renforcera encore ce phénomène. Au contraire, les parcelles en jachère, ou les parcellaires de campement, moins souvent couverts par la végétation et arrosés, tendront plutôt vers des dynamiques de déflation ou de dépôt modéré. La présence de matériel archéologique bien daté a permis d'obtenir des vitesses minimales de dépôts et de déflation. Pour les sites étudiés (KS060-Douch, 161-Aïn Zabiba, 209-Aïn el-Mansourya et 259-Aïn Birqis-est), les vitesses de dépôt oscillent entre 4 et 70 cm par siècle, et les vitesses de déflation oscillent entre 15 et 44 cm par siècle[85].

L'eau et le vent ont joué durant l'Antiquité, et conservent aujourd'hui, un rôle central dans le maintien de l'agriculture et des activités humaines. Si les dynamiques éoliennes semblent avoir peu changé, la baisse progressive des ressources en eau depuis l'Antiquité, avant la mise en place des techniques de forage employées actuellement, a eu des effets sur l'occupation humaine de la région. Le surcreusement du qanât MQ4 (Aïn Manawir-KS089) sur quatre mètres de profondeur[86], puis l'abandon des sites de collines (KS060, 088, 089, et 098) et le repli vers des sites de plaine à la fin de l'Antiquité témoignent ainsi du rabattement des nappes. Afin de mieux saisir l'impact sur les conditions de vie et d'agriculture de cette diminution graduelle de la ressource en eau, il apparaît essentiel d'analyser la répartition

[85]. CREPY, CALLOT 2015, p. 89
[86]. WUTTMANN 2001, p. 134

diachronique des installations humaines et les modifications environnementales qu'elles ont impliquées, de l'Antiquité à nos jours.

III. Grandes tendances diachroniques de l'occupation humaine et effets environnementaux : colonisation, extension et contraction

La grande extension des parcellaires (la continuité de certains d'entre eux dépasse 200 ha) et leur distribution au sein de la dépression incitent à se poser la question de leur répartition diachronique, de l'Antiquité à nos jours. Les prospections de l'IFAO permettent d'avoir une vision d'ensemble plutôt complète de l'occupation du bassin sud de l'oasis de Kharga. On observe ainsi, de la XXVIIe dynastie au développement de la « Nouvelle Vallée », la succession de trois mouvements majeurs : la colonisation, l'extension et la contraction.

La colonisation, aux époques perse et ptolémaïque (V^{e} - Ier siècle avant notre ère), se manifeste par la fondation de plusieurs oasis dans le sud de la région sur un axe qui va d'Aïn Boreq (KS098) à KS138, situé dans l'erg, au sud de Baris et de Maks el-Bahari **(**figure 13 A). Cet axe longe un linéament tectonique qui a facilité les remontées artésiennes des aquifères profonds vers les nappes superficielles ou la surface topographique. Dès cette époque, quelques sites sont installés en plaine, dans un secteur situé au nord de Baris, et quelques sites isolés ont été implantés dans l'erg, probablement partiellement stabilisé par le haut niveau de l'aquifère artésien. Les faibles altitudes de la surface sur laquelle l'erg s'est développé (inférieures à celle de la colline d'Aïn Manawir, transformée à la même époque en château d'eau naturel par l'artésianisme) ont permis l'affleurement des nappes. Or, dans un erg, la présence d'humidité dans le substrat, voire d'étendues d'eau en surface et de végétation entraîne la stabilisation et l'espacement des dunes[87].

Entre le premier et le quatrième siècle de notre ère, les zones cultivées se sont densifiées à partir des premiers secteurs colonisés et se sont étirées vers le sud, le nord, et au sein de l'erg (figure 13 B). Le développement de nombreux sites au cœur même de l'erg pourrait avoir accru la stabilisation des dunes. Mais la baisse du niveau des nappes superficielles, en lien avec l'affaiblissement de la pression artésienne, a permis la remobilisation progressive du sable et aurait donc entraîné l'abandon de ces sites.

Enfin, la contraction des activités humaines s'est opérée à partir de la fin de l'époque romaine (IVe- Ve siècle). Les activités humaines ont occupé progressivement des espaces plus réduits. Les secteurs les plus hauts, désormais privés d'eau de recharge artésienne des nappes, ont été

[87]. KOCUREK 1998, p. 331

abandonnés au profit de sites de plaine (figure 13 C). Les qanâts, devenus obsolètes dans ce contexte, ont été délaissés, alors que les activités agricoles se concentraient autour de puits. Les sites s'organisent, lors de cette phase de contraction, le long de trois axes (figure 13 D, E et F) :

- un axe est-ouest du sud d'Aïn Ziyada (KS088 et KS094) à Aïn Zabiba (KS161) qui borde, comme l'un des premiers axes de colonisation de la région, un linéament tectonique ;

- un axe nord-sud qui s'étend d'Aïn Dakhakhin à el-Qasr, au sud de Maks el-Qibli. Cet axe ne présente pas de sites répertoriés sur environ 3500 m entre Baris et Aïn Bella (KS159) ; l'étude des images satellitaires de la région a néanmoins permis de repérer plusieurs sites non-prospectés situés dans cet intervalle. La zone dénuée de sites repérés ne mesure donc que 1500 m. Cet axe pourrait se justifier, partiellement au moins, par l'existence d'une faille, déjà supposée par M.M. El-Shazly et A. Shata (1960, p .5) suite à l'observation de la stratification géologique visible dans les puits de Baris. Elle aurait facilité l'approvisionnement en eau des puits en permettant la remontée vers la surface des eaux issues des aquifères profonds ;

- un axe est-ouest moins net, au nord de Baris, qui pourrait, sans certitude, être lié à une faille secondaire résultant de la faille précédemment citée.

La plupart de ces sites était déjà occupée lors de la phase d'extension, il s'agit donc des sites ayant connu la plus longue occupation. Les modifications du milieu générées par leur exploitation se sont donc exercées sur le long terme. Néanmoins, la continuité de leur occupation n'a pas encore été démontrée : au lieu d'avoir connu une occupation permanente, ces sites pourraient avoir été exploités durant des périodes distinctes, séparées de hiatus plus ou moins longs. Certaines formations géomorphologiques présentes dans la région poussent cependant à privilégier, au moins pour certains sites, l'hypothèse d'une occupation continue, ou quasi-continue. La plaine de Baris est en effet parsemée de buttes composées de sédiment fin (igure 14) d'une hauteur comprise entre 2 et 26 m et d'une surface pouvant dépasser 80 ha. Certaines d'entre elles ont été prospectées par l'IFAO et ont permis l'identification de sites archéologiques : Aïn Birqis (KS260), Aïn el-Matrahiyya (KS178) et Aïn Tafnis (KS174), par exemple. Ces buttes, et d'autres non prospectées par l'IFAO, présentent des vestiges de puits et d'écoulement, des parcellaires étagés le long des pentes et, au pied des versants, des parcellaires reposant sur des replats étendus dominant la plaine de quelques mètres. Ces vestiges s'accompagnent de restes de murs et de bâtiments datés du XXe siècle. Ces sites semblent avoir été exploités au XIXe ou au XXe siècle et à des périodes antérieures (souvent aux époques romaine et byzantine, parfois plus tardivement) et sont tous situés sur l'un des trois axes de contraction des sites précédemment indiqués.

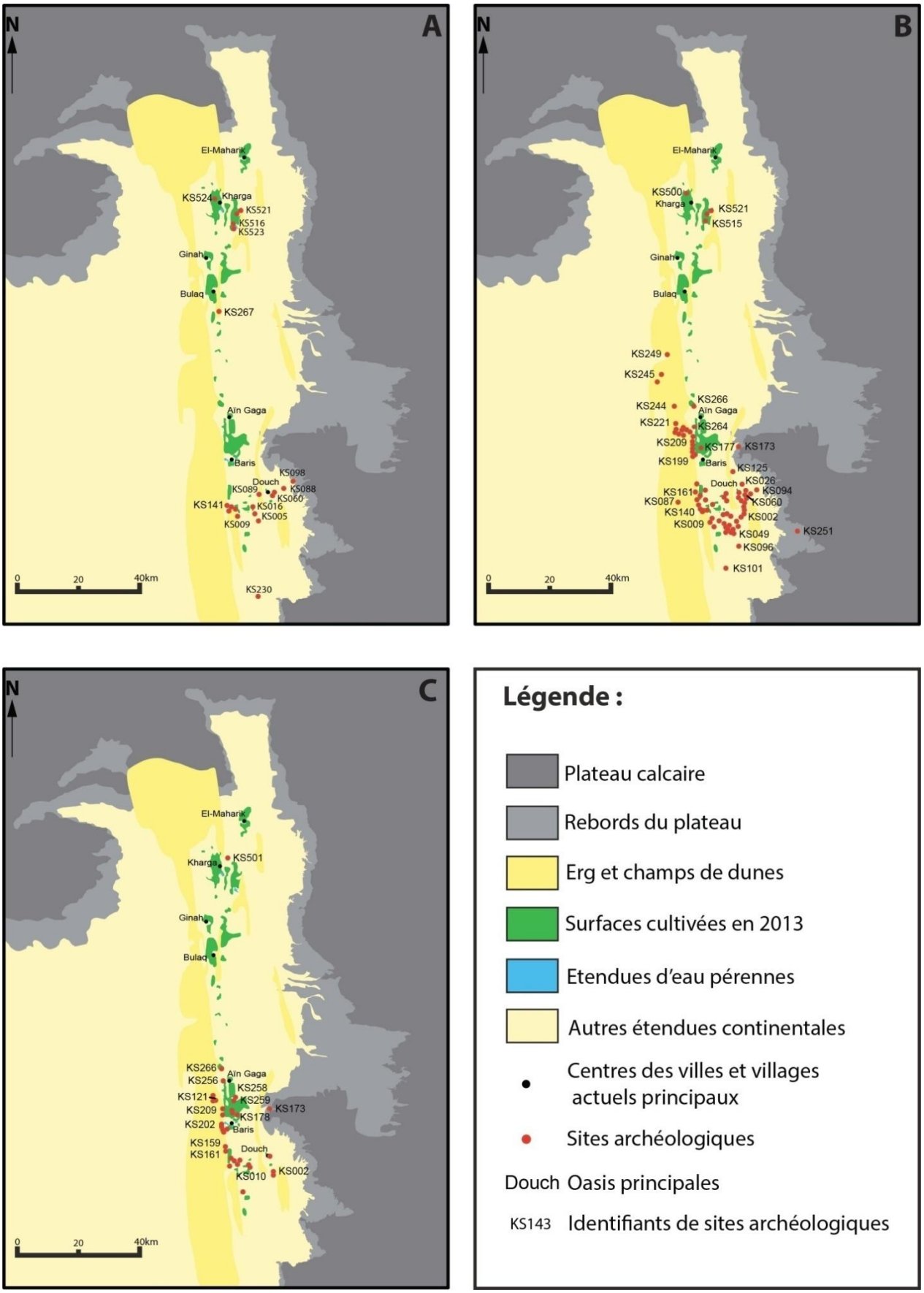


Figure 13 A, B et C - Cartes de répartition des sites archéologiques prospectés. A : époques perse et ptolémaïque (V^{e}-Ier s. avant notre ère). B : époque romaine (Ier-IIIe s. de notre ère). C : époques romaine et byzantine (IVe-VIIe s. de notre ère). Copyright IFAO Mission archéologique de Douch.

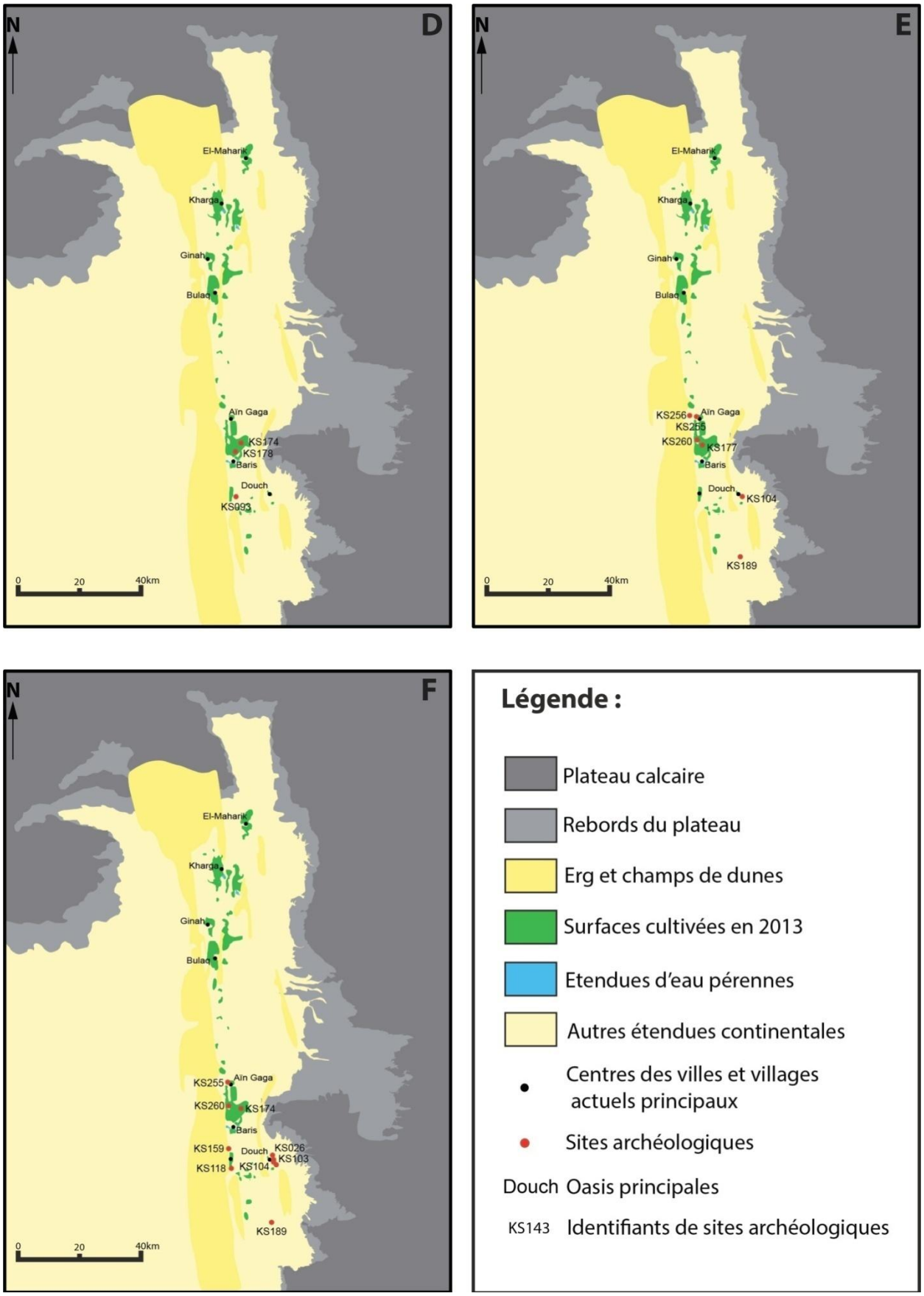


Figure 13 D, E et F- Cartes de répartition des sites archéologiques prospectés. D - époques pré-mamelouke et mamelouke (VIIIe-XVe s. de notre ère). E - époque ottomane (XVIe-XIXe s. de notre ère). F époque contemporaine (XIXe-XXe s. de notre ère). Copyright IFAO Mission archéologique de Douch.

Figure 14 - Butte de sédiment fin d'Aïn el-Matrahiyya. Mesurant 15 m de hauteur, elle s'organise autour d'un puits et présente des vestiges de parcellaires en terrasse sur ses versants. Au pied de la colline, on retrouve des céramiques romaines, les terrasses basses sont d'époque médiévale et les parcellaires les plus hauts et les plus proches du chenal du puits sont d'époque moderne. Prise de vue : décembre 2012.

Seules deux d'entre elles sont encore occupées de nos jours, à Aïn Gaga (figure 15) et à Aïn Dakhakhin. Ces buttes sont toutes constituées de manière similaire. Le point culminant correspond au tertre d'éjectas artésiens, de déblais et de sédiment éolien résultant du fonctionnement d'un puits. Le reste des collines est constitué de dépôts de sédiments fins apportés par le vent et captés par la végétation ou l'humidité et, parfois, directement au sud du tertre artésien, d'une flèche sableuse (*sif*) formée par un dépôt sous le vent. La forme de certaines de ces buttes et principalement des replats situés au pied des versants, semble indiquer une influence de l'organisation du parcellaire et des canaux sur la mise en place des dépôts. A Aïn Birqis (KS260) et à Aïn el-Matrahiyya, ces replats dominant la plaine s'étendent selon des formes que les processus naturels seuls ne peuvent expliquer (figure 16), en fonction des canaux et des vestiges de parcellaires. Pourtant, la plupart de ces sites n'ont pas permis d'identifier des restes de villages, ou d'autres éléments permettant d'affirmer avec certitude une occupation durable et répétée (nécessaire pour justifier jusqu'à 26 m de dépôt à Aïn Birqis-KS260), en dehors des traces de parcellaires. Plutôt que d'avoir entraîné la formation des dépôts, on aurait pu envisager la présence de champs et de parcellaires comme une simple protection contre la déflation : à partir d'une surface initiale correspondant au sommet des collines, la déflation aurait pu emporter tous les dépôts, hormis ceux protégés par des parcellaires et des niveaux d'irrigation indurés. Cependant, la superposition au sein des buttes de vestiges d'époques différentes, selon une stratification conforme à la succession

chronologique et la présence de sites romains partiellement recouverts par les dépôts (KS260)[88] disqualifient cette hypothèse et confirment celle du dépôt.

Les buttes de sédiments fins pourraient ainsi constituer des sites privilégiés pour l'étude de l'occupation de la région autour de puits au fonctionnement millénaire, avec une stratigraphie bien préservée de l'érosion éolienne : ces formations géomorphologiques liées aux activités humaines seraient donc d'un immense intérêt archéologique et géoarchéologique. Elles témoigneraient d'une remarquable stabilité à long terme de la relation hommes/environnement, des dynamiques éoliennes et des conditions de vie et de mise en valeur agricole. En dehors de ces buttes, les sites auraient probablement connu une occupation plus courte, ou un abandon plus précoce. Afin d'affiner cette hypothèse et la connaissance des conditions de vie dans le bassin sud de Kharga pour des périodes postérieures à l'Antiquité et antérieures au projet de « Nouvelle-Vallée », le recours aux cartes anciennes (entre 1727 et 1875) et aux récits des premiers voyageurs et scientifiques européens à avoir fréquenté la région (entre 1698 et 1914) est essentiel.

Figure 15 - Butte de sédiment fin d'Aïn Gaga, toujours occupée par une oasis de nos jours. Mesurant 18 m de haut, elle est couverte de palmeraies et de parcelles cultivées, parfois en terrasses. Le forage et le pompage de cette oasis ont été mis en place à proximité immédiate de l'ancien puits. Prise de vue : novembre 2014.

[88]. WUTTMANN, DACHY 2012, p. 6-8

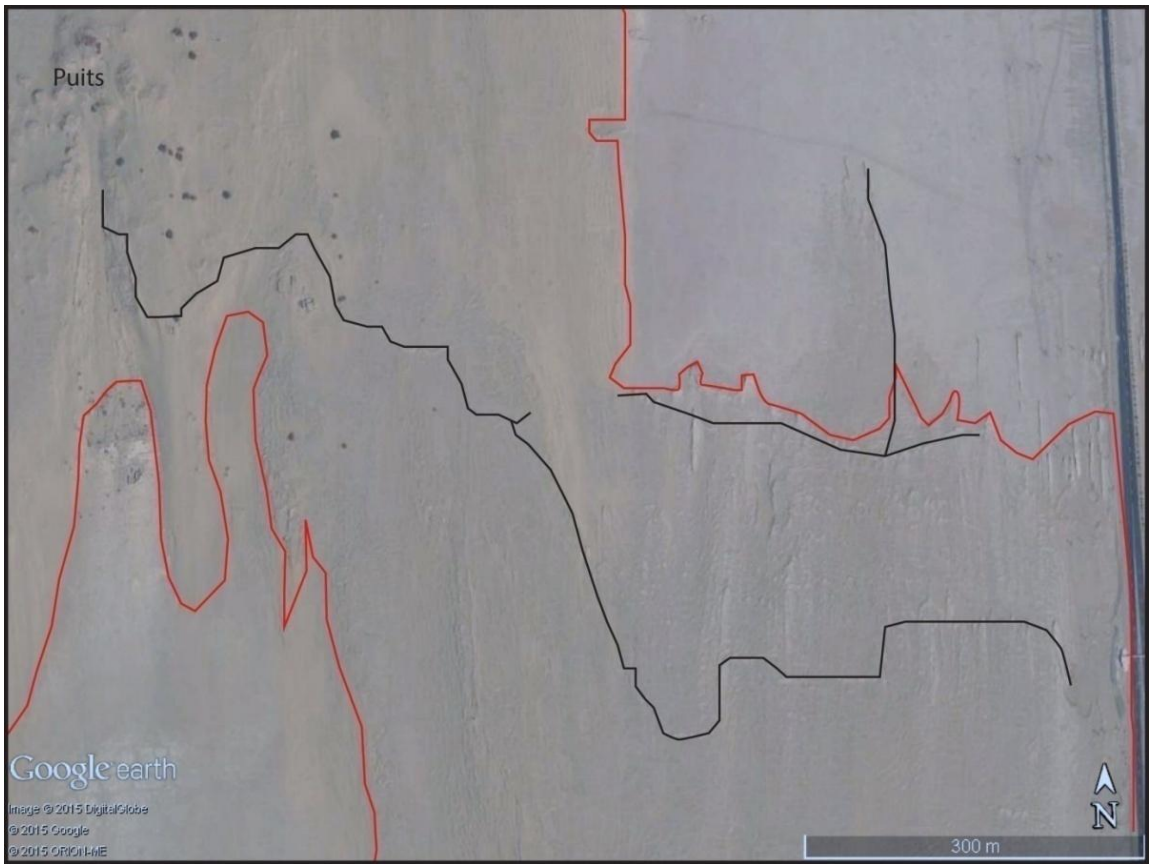


Figure 16 - Partie sud de la colline d'Aïn Birqis. Les traits rouges indiquent les limites de la colline, les traits noirs indiquent les canaux. Si l'existence de la butte n'était liée qu'au puits et à la végétation naturelle qu'il entretenait, elle serait profilée selon un axe nord/sud. L'extension de la colline vers l'est est donc liée à la présence des canaux et de parcellaires qui délimitent distinctement une terrasse surélevée de 5 à 8 m par rapport à la plaine environnante. De même, la ligne de yardangs qui longe le canal partant vers le nord signale un parcellaire situé un à deux mètres au-dessus de la plaine.

IV. Les récits de voyageurs et les travaux des premiers chercheurs : une mine d'informations du XVIIIe au XXe siècle

Afin de réaliser ce travail, les informations puisées dans des textes ou des cartes de différents auteurs ont été croisées entre elles, avec des cartes récentes et des images satellitaires. Les textes utilisés sont de différents types, du simple récit de voyage à l'ouvrage scientifique. Dans l'analyse des cartes, seule la toponymie a été exploitée.

Sept cartes ont été retenues pour l'étude :

- « Carte de L'Égypte » dressée en 1727 par Jean Baptiste Bourguignon d'Anville (figure 17a) ;
- « Carte de l'Égypte ancienne et moderne », établie en1762 par Rigobert Bonne (figure 17b) ;
- « Carte de l'Oasis de Thèbes » dressée par Edme François Jomard en 1820 (figure 17c)
- « Carte générale de l'Égypte et de la Nubie » établie par Frédéric Caillaud en1827 (figure17d) ;
- « Egypt » produite en1832 par John Arrowsmith (figure17e) ;

- la carte de l'Egypte produite par John Arrowsmith pour illustrer l'ouvrage de G.A. Hoskins (1837, ajout en appendice) (figure17f) ;
-« Das Mitteländische Meer und Nord-Afrika », produite en1875 par August Petermann et publiée en 1880 dans le « *Stieler's Hand-Atlas 14* » (figure17g).

Sept auteurs d'ouvrages ont été retenus :
- l'explorateur et médecin Jacques-Charles Poncet[89] qui traversa l'oasis en 1698, en chemin vers l'Éthiopie ;
- William George Browne[90], explorateur, qui la visita, en chemin vers le Darfour, en 1793 ;
- Frédéric Caillaud[91], minéralogiste et géologue, présent dans la région de 1815 à 1819 ;
- Bernardino Drovetti[92], diplomate passionné d'antiquités, qui fréquenta surtout la partie nord de l'oasis en 1819, en route vers Dakhla ;
- George Alexandre Hoskins[93], explorateur, s'y rendit en 1832 et 1833 ;
-Hugh John Llewellyn Beadnell[94]; géologue et géographe, qui la fréquenta pendant neuf ans (1896-1905) ;
-Ales Hrdlicka[95], anthropologue, séjourna à Kharga en 1909. Il ne s'est jamais rendu dans le bassin sud de l'oasis, mais les données qu'il a recueillies concernent l'ensemble de la dépression.
Nous aurions souhaité compléter ce corpus par les écrits de F.G. Rohlfs et de J. Ball que nous ne sommes pas parvenus, pour l'heure, à nous procurer.

[89]. Poncet 1709
[90]. Browne 1799
[91]. CAILLAUD 1821
[92]. DROVETTI 1821
[93]. HOSKINS 1837
[94]. BEADNELL 1909
[95]. HRDLICKA 1912

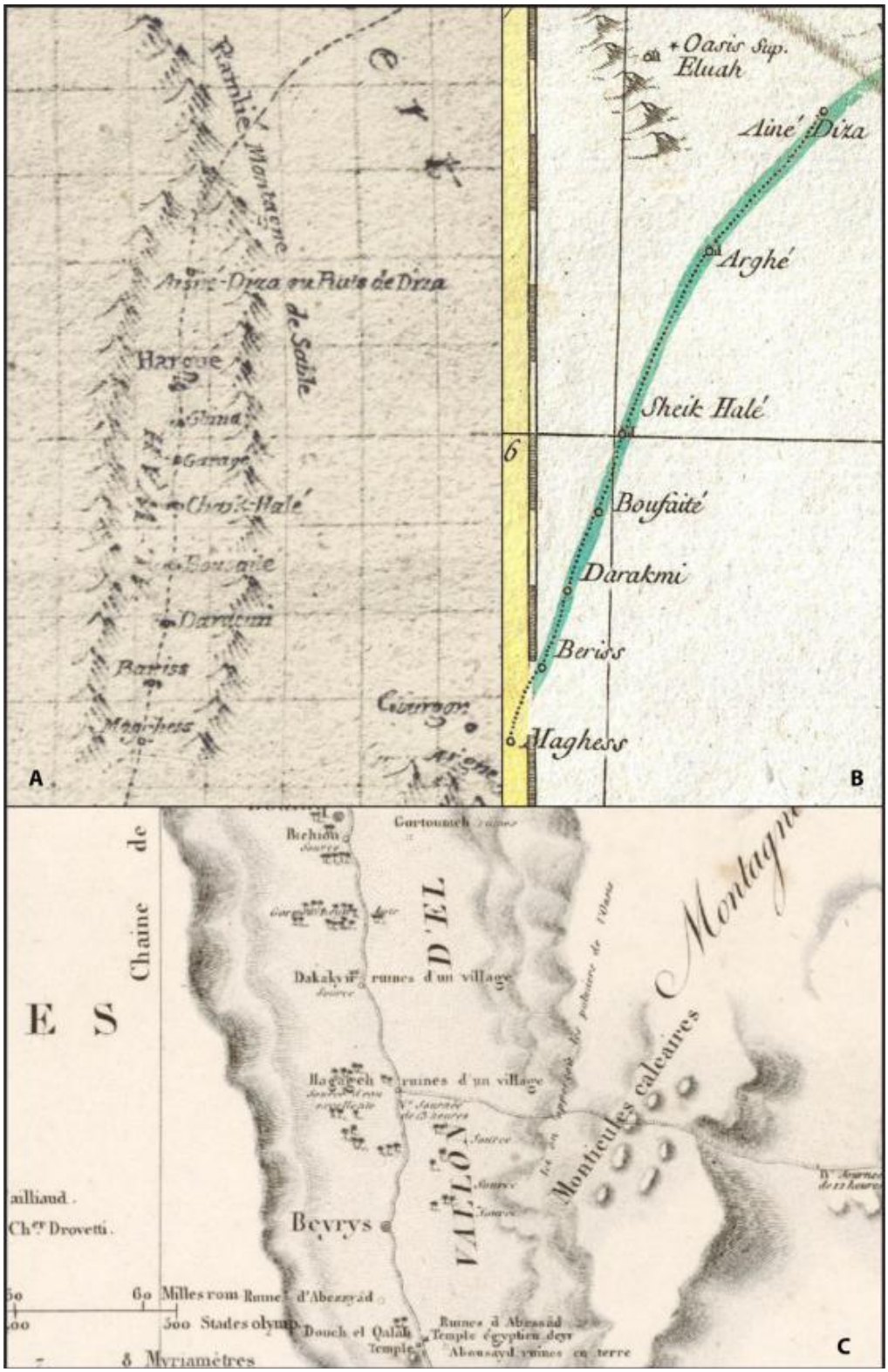


Figure 17 a, b et c -Extraits des cartes anciennes de la dépression de Kharga. A : Carte d'Anville, 1727 ; B : Carte de Bonne, 1762 ; C : Carte de Jomard, 1820. Ces trois cartes ont été obtenues grâce à la plateforme Gallica (http://gallica.bnf.fr/).

Figure 17 d, e, f et g - Extraits des cartes anciennes de la dépression de Kharga. D : Caillaud, 1827 ; E : Arrowsmith, 1832 ; F : Arrowsmith, 1837 ; G : Petermann, 1875. Les cartes d et e ont été obtenues grâce à la plateforme Gallica (http://gallica.bnf.fr/). La carte f a été fournie par *Google Books* (http//:books.google.com).

IV.1. Des lieux mentionnés de manière récurrente

L'étude des textes et des cartes permet ainsi de repérer plusieurs lieux souvent mentionnés, malgré des graphies différentes, voire des toponymes différents (tableau 1). À titre d'exemple, la ville de Kharga est désignée par les noms d'El-Khargeh, El Chargeh, Khargeh, Hargué, Arghé, Charjé et Helaoue. Les villages du bassin sud mentionnés par

plusieurs auteurs différents sont au nombre de sept. Il s'agit de Baris, Maks el-Bahari et Maks el-Qibli qui ne sont pas toujours distingués et sont parfois désignés sous le nom de Maks, Mughes, Maguhess ou Mex, Dakhakhin, Gaga, el-Qasr et Douch. Ces sept oasis, qui existent encore aujourd'hui, sont parfois mentionnées comme des sites abandonnés et parfois comme des sites occupés. Certains sites ne sont mentionnés que par un seul auteur, comme Aïn Bella et Aïn Birqis uniquement cités par H.J.L. Beadnell (1909, p. 81 et 83). On pourrait en conclure que ces sites n'existaient pas lors du passage des autres auteurs, mais la durée du séjour de H.J.L. Beadnell et la rigueur de son travail pourraient tout aussi bien expliquer qu'il soit le premier à les citer. Au contraire, la mention de l'abandon de Maks et de Gaga par B. Drovetti (1921 p. 99-100) pourrait être liée au peu de temps passé sur les lieux et à des informations de seconde main. L'occupation de certains sites pouvait également être saisonnière, avec des camps provisoires[96] (Gaga pouvait par exemple être cultivé et occupé temporairement par des habitants de Baris[97]), présentant ainsi l'apparence d'un abandon. La pratique de jachères (mise en culture d'une parcelle seulement une année sur quatre ou cinq)[98] pouvait également renforcer cette impression.

Tableau 1 - Mention des différentes sites dans les textes (en noir) et sur les cartes (en bleu)

	Baris	Maks	Dakhakhin	Gaga	Douch	El Qasr	Birqis	Aïn Bella
Poncet 1698	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
D'Anville 1727	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Bonne 1762	Occupé	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Browne 1798	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Caillaud 1815-19	Occupé	Occupé	Abandonné	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Drovetti 1819	Occupé	Abandonné	Abandonné	Abandonné	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Jomard 1820	Occupé	Non-cité	Abandonné	Indéterminé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Caillaud 1827	Occupé	Occupé	Occupé	Non-cité	Occupé	Indéterminé	Non-cité	Non-cité
Edmonstone 1819	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Arrowsmith 1832	Occupé	Occupé	Occupé	Non-cité	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité
Hoskins 1832-33	Occupé	Occupé	Non-cité	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Arrowsmith 1837	Occupé	Occupé	Non-cité	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Petermann 1875	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Beadnell 1896-1905	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé	Occupé
Hrdlicka 1909	Occupé	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité	Non-cité

Les auteurs et les cartographes nous donnent des indications sur l'occupation des sites à différentes époques. Baris, Maks, Dakhakhin et Gaga, représentés dès 1727 sur la carte d'Anville (Beiriss, Daracmi, Garage et Maguhess) étaient déjà occupés et connus des Européens à l'époque. Douch est mentionné pour la première fois par F. Caillaud (1821, p. 88) sous le nom de Douch el-Qalah.

96. HRDLICKA 1912, p. 4
97. HOSKINS 1837, p. 144
98. BEADNELL 1909, p. 10

IV.2. Les oasis, « un pays de douceur »[99] ?

L'étude des textes des premiers visiteurs européens de l'oasis apporte de nombreuses informations sur l'environnement à l'époque de leur passage, principalement sur les plantes présentes dans les oasis et dans le désert environnant, sur les dynamiques éoliennes et sur la topographie. Les végétaux observés par les auteurs sont le palmier (sans distinguer d'espèces[100], doum et dattiers[101]), la coloquinte, une plante nommée *senna* dont les champs seraient remplis, une plante appelée « *ezzula* »[102] dont la description pourrait correspondre à *Calotropis procera*, le sorgho, le millet et le riz[103], des grenadiers, des citronniers, des orangers, des abricotiers et des oliviers[104], le blé[105] et l'orge[106]. Les mûres, la luzerne, les tamarix[107] et les acacias[108] sont également cités. H.J.L. Beadnell (1909, p. 220) cite également le coton, précisant qu'il est rare et cultivé non pour sa fibre, mais pour son bois. Enfin, F. Caillaud (1821, p. 87) mentionne l'if, aperçu à distance, dont la présence dans les oasis est très peu probable. L'auteur a probablement cru reconnaître cet arbre en apercevant des tamarix (arbres qu'il ne cite nulle part dans ses écrits et ne connaissait peut-être pas). Tous les auteurs insistent sur la profusion de palmiers, allant jusqu'à employer les termes de « forêts »[109] ou de « bois »[110].

Les auteurs mentionnant des éléments à relier aux dynamiques éoliennes et à la topographie sont plus rares. Néanmoins, les informations apportées sont instructives. On apprend ainsi que les vents de sables étaient déjà craints[111], que l'ensablement de certains secteurs pouvait être rapide et que le village de Baris était particulièrement sujet à ce type de problèmes[112] : les rues et les bâtiments situés au nord pouvaient ainsi connaître un ensablement allant jusqu'à un pied (environ 30 cm) par an. Les habitants déblayaient le sable accumulé et surélevaient

---

[99]. Poncet 1709, p. 5
[100]. Poncet 1709, p. 5 ; Browne 1799 p. 186
[101]. CAILLAUD 1821 p. 86-87 ; EDMONSTONE 1819, p. 53 ; HOSKINS 1837 p. 78 ; BEADNELL 1909, p. 63, 73, 82, 84 ; Hrdlicka 1912, p. 10
[102]. Poncet 1709, p. 5-6
[103]. CAILLAUD 1821, p. 86-87 ; HOSKINS 1837, p. 85; BEADNELL 1909, p. 215 ; HRDLICKA 1912, p. 10
[104]. HOSKINS 1837, p. 85 ; BEADNELL 1909, p. 78 et 220
[105]. HOSKINS 1837, p. 85 ; HRDLICKA 1912, p. 10
[106] .BEADNELL 1909 p. 62 et 212 HRDLICKA 1912, p. 10
[107]. BEADNELL 1909 p. 77, 212 et 219-220
[108]. HOSKINS 1837, p. 78 ; BEADNELL 1909 p. 76-77
[109]. CAILLAUD 1821, p. 87
[110]. DROVETTI 1821, p. 99-100
[111]. Poncet 1709, p. 4
[112]. HOSKINS 1837, p148 ; BEADNELL 1909, p. 81

régulièrement les murs pour lutter contre ce phénomène[113]. H.J.L. Beadnell (1909, p. 81-82, p. 209) associe ce phénomène au manque de palmiers au nord de Baris (côté au vent) et indique que les champs cultivés au nord ne forment un écran protégeant partiellement l'oasis que lorsque les plantes sont à maturité. Il indique également que le sable transporté par le vent peut arracher ou couper les jeunes plants lorsqu'ils ne sont pas protégés.

Il n'est étonnamment pas fait mention des yardangs avant les travaux de H.J.L. Beadnell. Les seules mentions concernant la topographie des lieux concernent des buttes sur lesquelles sont installés certains des sites occupés à l'époque du passage des auteurs : Gaga se situait ainsi sur une butte désignée comme « un monticule couvert de sable » et Baris sur « un rocher élevé »[114] ou sur une « éminence »[115]. H.J.L. Beadnell ne se contente pas de mentionner ces buttes qui semblent l'avoir passionné : il propose une hypothèse de formation qui met en jeu la position des puits, les modalités d'agriculture et les dynamiques éoliennes et qui rejoint l'hypothèse d'un lien entre les zones cultivées et les buttes de sédiment fin énoncée précédemment. Partant du constat de l'absence de tubage en bois dans les puits des buttes de Dakhakhin et de Gaga, au contraire des puits de plaine, il en déduit que leur exutoire originel se situait plus bas et que les buttes se sont formées par l'accumulation progressive de sédiment éolien piégé par la végétation ; le sommet des tubes se situerait donc plusieurs mètres en dessous de la surface[116]. Cette hypothèse est confortée par l'observation des pratiques agricoles : les oasiens encourageaient ce dépôt en plantant des haies de *Sesbania sesban* freinant le vent afin d'améliorer la texture des terres arables et de les amender. Les puits situés au cœur des buttes des environs de Baris et les cultures qu'ils irriguaient se seraient donc trouvés au niveau de la plaine environnante lors de leur première période d'exploitation et se seraient surélevés depuis[117], ce qui concorde avec les observations réalisées lors de prospections menées entre 2010 et 2014. Le temps passé par H.J.L. Beadnell dans les oasis lui a permis de constater de lui-même la réalité du phénomène. A Aïn Bella (KS159), les terrasses cultivées se sont progressivement étendues verticalement et horizontalement en raison du dépôt des sédiments sur les cultures et les secteurs irrigués[118]. Cette extension pouvait être très rapide et une trop grande hauteur des buttes nuisait à l'agriculture : une vingtaine d'années avant le passage de l'auteur, l'exutoire du puits de Dakhakhin se situait au

[113]. CAILLAUD 1821, p. 88
[114]. CAILLAUD 1821, p. 86-88
[115]. HOSKINS 1837, p. 145
[116]. BEADNELL 1909, p. 78
[117]. BEADNELL 1909, p. 79, 208, 210-211 et 215
[118]. BEADNELL 1909, p. 83

sommet d'une éminence de 30 m de hauteur. Menacés par l'affaiblissement de la décharge du puits, les habitants décapèrent 8 à 9 m d'accumulation de sédiment (amenant ainsi la hauteur à 21 ou 22 m). Entre ces travaux et 1905, la butte mesurait déjà 23 m[119]. Ces données permettent d'estimer des vitesses de dépôt comprises entre 400 et 1000 cm par siècle, bien plus élevées que celles calculées dans d'autres lieux de l'oasis de Kharga[120]. Sa hauteur actuelle avoisine les 27 m, indiquant des vitesses de dépôt entre 1905 et 2015 d'environ 363 cm/siècle. L'intensité des phénomènes de dépôt pourrait s'expliquer par la position d'Aïn Dakhakhin, qui était à l'époque l'un des puits les plus septentrionaux du bassin sud de l'oasis : les sables et les poussières transportés par le vent y rencontraient donc les premiers obstacles susceptibles de les piéger. La fréquence des vents capables de déplacer du sable (1 jour sur trois, pour 1 seul jour sur 10 ou 11 sans vent)[121] pourrait également expliquer la prégnance des phénomènes de dépôt.

Ces apports éoliens perçus par les habitants comme essentiels pour fertiliser et alléger les sols préalablement à une mise en culture étaient ensuite favorisés[122] : les agriculteurs considéraient en effet la formation annuelle de dépôts constitués d'un mélange de sables et d'argiles comme un élément fertilisant nécessaire à de bonnes récoltes[123]. H.J.L. Beadnell (1909, p. 215) adhère à cette conviction des oasiens : constatant le faible nombre de plantations de riz (une plante très régénératrice pour les sols en milieu aride), il suppose que le dépôt annuel de sédiment éolien suffit à régénérer les terres et à leur donner une bonne qualité. L'absence de croûtes salées sur les parcelles des buttes prospectées entre 2010 et 2014 va également dans le sens de cette hypothèse. Le lessivage des sols et la précipitation des sels auraient été limités par les apports éoliens et les périodes de jachères : le maintien dans le temps de la qualité des sols aurait ainsi été assuré la durée d'occupation pluriséculaire des sites. Le vent et ses apports, de ce point de vue, constituent la condition d'une agriculture pérenne dans les oasis. D'autant plus que, dans le bassin sud de l'oasis de Kharga, si les problèmes d'ensablement étaient sérieux, particulièrement à Maks et Baris, les agriculteurs locaux étaient habitués à déplacer les champs et à exploiter de nouveaux puits[124].

---

[119].BEADNELL 1909, p. 79-80
[120]. CRÉPY, CALLOT 2015, p. 89
[121]. BEADNELL 1909, p. 198
[122]. BEADNELL 1909, p. 81
[123]. BEADNELL 1909, p .211-212
[124]. BEADNELL 1909, p. 210-211

IV.3. Irriguer et maintenir le débit des puits, un combat permanent

Des sources et des puits sont mentionnés à plusieurs reprises, alors que d'autres ne sont mentionnées qu'une seule fois (tableau 2), ce qui peut indiquer ou un changement de nom, ou un tarissement, ou bien encore que les auteurs ne se sont pas rendus exactement aux mêmes endroits.

Tableau 2 - Description des puits et des sources

	Caillaud 1821	Hoskins 1837	Beadnell 1909
Gaga	Source d'eau irriguant quelques carrés de sorgho	Bonne source d'eau	Bassin large et profond, débit irrégulier
Dakhakhin	Non mentionnée (mais indiquée sur Caillaud 1827)	Non mentionnée	Très grand bassin, débit variable
Baris	Source au milieu d'un trou rempli de terre	Source la plus abondante de l'oasis	Plusieurs grands puits semblables à ceux de Birqis, Gaga et Dakhakhin
Maks	Non mentionnée	Sources peu abondantes	Puits à l'extrémité sud, plus abondant que Gaga
Birqis	Non mentionnée	Non mentionnée	Grand bassin, débit irrégulier
Douch	Source sulfureuse sous un monticule sableux	Non mentionnée	Tarissement de plusieurs des puits. Utilisation de l'eau d'un puits situé plus au sud

La description la plus précise provient, une fois de plus de l'ouvrage d'H.J.L. Beadnell (1909) qui indique le fonctionnement des puits. Ils sont constitués d'un bassin qui retient les eaux issues du forage ou de la conduite du puits jusqu'à la décision des propriétaires du puits d'ouvrir l'une de ses berges et de déverser ses eaux vers les cultures (figure 18). Le remplissage du bassin est irrégulier, les remontées artésiennes étant perturbées par le sédiment obstruant les fissures et les forages dans lesquels l'eau circule, rendant essentiels des curages réguliers[125]. La répartition des eaux entre les ayants droit des puits s'organisait en tours d'eau et la distribution s'opérait par de nombreux canaux[126]. Les tarissements de puits et les baisses de débits étaient fréquents, surtout lorsque des puits étaient situés à proximité les uns des autres (phénomènes d'interférences, l'un privant l'autre d'approvisionnement en eau), obligeant parfois à un transport de l'eau sur de longues distances, depuis des puits situés loin des secteurs cultivés[127]. Le réemploi de puits anciens, parfois d'époque romaine, était fréquent et la profondeur de certains de ces puits atteignait 120 m[128]. H.J.L. Beadnell (1909, p. 189-196) décrit les techniques mises en œuvre pour remettre en eau d'anciens puits : d'abord, l'ancienne cuve du puits était déblayée, ensuite le conduit devait être curé, ce qui se révélait très compliqué en raison de la remontée artésienne de l'eau. Il fallait donc recourir à des plongeurs (spécialisés dans ces fonctions et payés en monnaie plutôt qu'en parts d'eau) passant entre

[125]. CAILLAUD 1821, p. 87-88, BEADNELL 1909, p. 77-84
[126]. CAILLAUD 1821, p. 88 ; BEADNELL 1909, p. 10
[127]. BEADNELL 1909, p. 8-9, 84-85 et 144-147.
[128]. BEADNELL 1909, p. 8

deux minutes et deux minutes trente immergés pour descendre dans le conduit, charger un panier de sédiments et se faire remonter par une corde tirée par les hommes restés en haut. A Dakhla, l'opération avait nécessité quatre ans de travail pour creuser de la sorte 29 m. Une fois le conduit déblayé, un tubage en bois était inséré et le puits pouvait couler à nouveau. Ces tentatives de remises en eau pouvaient se solder par des échecs au bout de plusieurs années de travail. Cette technique et l'idée de trouver des spécialistes en apnée et en plongée dans les oasis étonnent, mais elle a pourtant été repérée dans d'autres oasis du Sahara dont le système d'irrigation repose sur des puits artésiens, dans l'oued Rhir, par exemple, en Algérie, où certains plongeurs étaient capables de rester immergés près de six minutes[129]. Le réemploi et l'entretien des puits, conditions mêmes de l'agriculture dans le bassin sud, constituaient donc un travail de longue haleine qui devait être effectué régulièrement.

Figure 18 - Cuve ensablée et début du chenal (en bas à gauche) du puits d'Aïn el-Matrahiyya. La berge de rétention d'eau n'a pas été conservée. Prise de vue : novembre 2014.

IV.4. Démographie et santé

Les conditions démographiques dépendaient, au moins pour partie, de la productivité des puits et des parcelles. La production agricole et la qualité de l'eau de consommation étaient ainsi centrales, mais les conditions de drainage et de mise en valeur agricole jouaient également un rôle sanitaire. L'existence de rizières et la formation d'étendues marécageuses et

[129]. BERBRUGGER 1872, p. 72

d'étendues d'eau dans les zones de drainage[130], en plus de participer à la salinisation des terres, facilitait la propagation de fièvres[131], notamment la malaria[132]. Par ailleurs d'autres maladies, tels que des trachomes transmis par les mouches, la variole et la rubéole pouvaient régulièrement toucher les oasis[133]. Dans ces conditions, la croissance démographique était limitée, mais la population a tout de même doublé dans la dépression de Kharga entre 1815-1819 et 1907 (tableau 3). Cette augmentation pourrait être liée à la recrudescence, due aux évolutions techniques, du nombre de forages dans la seconde moitié du XIXe siècle[134].

Tableau 3 - Population de l'oasis de Kharga					
	Oasis de Kharga	"District de Baris"	Baris	Maks	Douch
Caillaud 1821	Moins de 4000	Non-cité	Environ 600	Non-cité	Non-cité
Hoskins 1837	Environ 4300	Non-cité	Environ 600	Environ 100	Environ 100
Beadnell 1909	8348	1566	Non-cité	Non-cité	Non-cité
Hrdlicka 1912	8424	1566	Non-cité	Non-cité	Non-cité

V.Ruptures et continuités

Le recours à la bibliographie archéologique et géoarchéologique concernant le bassin sud de Kharga, aux textes et aux cartes anciennes et à des prospections géoarchéologiques tend à démontrer non seulement l'absence de changements environnementaux brusques et la continuité de l'occupation de la région, mais également une pérennité de certaines pratiques.

Les dynamiques éoliennes se sont exercées à toutes les époques pour lesquelles nous avons obtenu des informations et les conditions climatiques sont demeurées extrêmes depuis des millénaires. La baisse progressive du niveau des nappes du système aquifère des grès de Nubie, en revanche, constitue un changement essentiel. Le couvert végétal et l'humidité des sols se réduisant, une plus grande quantité de sédiment a pu être déplacée par le vent, renforçant les phénomènes d'érosion éolienne et d'ensablement. Le système de qanâts est devenu obsolète et de nombreux puits se sont progressivement taris. Certains puits ont pourtant conservé de bonnes conditions de fonctionnement pendant des siècles, voire des millénaires, permettant ainsi une pérennité de l'occupation du bassin sud de l'oasis de Kharga.

L'occupation humaine, centrée sur les points d'eau, a connu dès la fin de l'Antiquité un repli progressif vers les sites de puits les plus pérennes et les plus durables. Aïn Birqis (KS260), par exemple, repose sur des vestiges d'époque romaine et fonctionna jusqu'aux années 1960.

[130]. BEADNELL 1909, p. 227
[131]. CAILLAUD 1821, p. 88 ; BEADNELL 1909, p. 9
[132]. HOSKINS 1837, p. 82-83
[133]. HRDLICKA 1912, p. 10, 14 et 18.
[134]. BEADNELL 1909, p. 9:

A l'heure actuelle, il est impossible de déterminer si le puits a fonctionné sans interruption depuis l'époque romaine ou s'il a connu un curage visant à le remettre en eau après un abandon, tels que ceux mentionnés par H.J.L. Beadnell (1909, p. 194-195). L'étude approfondie de la butte formée autour de ce puits semble essentielle pour le déterminer, mais l'épaisseur des dépôts sédimentaires constitués à Dakhakhin, à Gaga, à Matrahiyya (KS178) et à Birqis (KS260) indique des durées de dépôt, et donc d'exploitation agricole et d'extraction de l'eau, de plusieurs siècles. En extrapolant la vitesse de dépôt observée entre 1905 et 2015, il aurait fallu plus de 8 siècles d'occupation permanente pour former les dépôts d'Aïn Dakhakhin.

Tous les puits et toutes les zones agricoles n'ont pas eu un fonctionnement aussi long, ce qui explique la rareté des grandes buttes de sédiment fin. Le tarissement de certains puits et les phénomènes d'ensablement semblent avoir mis au cœur des stratégies d'adaptation le déplacement des champs et le transport de l'eau sur de plus grandes distances. Les oasiens vivaient donc d'activités sédentaires, mais itinérantes à plusieurs échelles de temps : selon un cycle court (le temps de la jachère ou de l'exploitation des parcellaires de campement) et selon un cycle plus long (le temps du passage d'une grande dune obligeant à déplacer les champs ou du curage d'un puits ensablé ne livrant plus assez d'eau). Cette itinérance participe à la vision, partiellement déformée, d'un passé glorieux ayant laissé de nombreux parcellaires : ils sont très nombreux et très étendus, mais ne correspondent pas aux surfaces effectivement cultivées à un seul et même moment. Les estimations de M. Reddé (2004, p. 14) quant à la population de Kysis (Douch) durant l'Antiquité indiquent une population du bassin sud plus importante à l'époque romaine qu'au XIXe siècle. Environ 1000 personnes auraient vécu à Kysis qui était le centre d'une toparchie, et probablement alors l'agglomération la plus peuplée du bassin sud, contre 600 à Baris (village le plus important du bassin sud à l'époque) lors du passage de G.A. Hoskins (1837, p. 89). L'occupation de la région était également plus étendue à l'époque romaine, particulièrement dans l'erg, ce qui tendrait à confirmer une population supérieure en nombre. Les chiffres demeurent cependant comparables.

Enfin, certaines pratiques semblent s'être perpétuées de l'Antiquité jusqu'à la mise en place de nombreux forages au XIXe siècle. La forme générale des puits romains est ainsi conservée, dans les grandes lignes, jusqu'au début du XXe siècle. La mise en jachère de certaines parcelles et l'existence de parcellaires de campement, liés à une exploitation temporaire, se sont maintenues. L'utilisation même de *Sesbania sesban* comme écran contre le vent, qui semble avoir joué un rôle important dans la formation des buttes de sédiment fin, pourrait être

très ancienne : des restes de cette espèce ont été découverts dans la nécropole de Douch[135]. Les qualités de cette plante sont multiples. Plantée au nord d'une parcelle, elle protège les cultures contre les sables transportés par le vent tout en permettant un dépôt diffus et progressif de sédiment sur les cultures. Elle n'entraîne donc pas, au contraire des haies de palmes, la formation d'une dune qui, à terme, menacerait les cultures. Les sédiments qui se déposent directement sur les champs entraînent une fertilisation et une régénération des sols par exhaussement, ce qui, dans un système d'irrigation reposant sur des puits artésiens, n'est pas un problème (tant que la hauteur des champs ne dépasse pas la hauteur que les eaux peuvent naturellement atteindre). De plus, *Sesbania sesban* facilite la fixation de l'azote et croît rapidement, ce qui en fait une plante particulièrement adaptée à la colonisation et à la défense contre les effets de l'érosion éolienne de nouvelles terres arables. Bien sûr, il est probable que d'autres plantes aient joué un rôle important dans le piégeage des sédiments, à l'image des tamaris (*Tamarix nilotica*), des acacias (*Acacia nilotica*) et des nombreux palmiers (*Phoenix dactylifera* et *Hyphaene thebaica*) poussant sur ou en bordure des parcelles, ainsi qu'à proximité des puits et canaux.

Le manque d'information sur la période comprise entre le Ve siècle et le XVIIIe siècle perturbe la compréhension des dynamiques régionales sur le temps long et interdit pour l'heure toute conclusion ferme. Les indices maigres dont nous disposons pour le moment, gagneraient à être complétés par des travaux de terrain plus approfondis ainsi que par l'étude de nouvelles sources d'informations. G.A. Hoskins (1837, p. 294-299) mentionne ainsi deux auteurs qui pourraient livrer des informations sur ces périodes : Al-Idrissi (1100-1165) et Aboul Féda (1273-1331).

Conclusion

En l'état actuel des recherches, il semble que, malgré la baisse progressive et naturelle (bien que renforcée aujourd'hui par les quantités d'eau extraites) des ressources en eau, le principal facteur de modification des conditions de vie soit l'évolution des techniques d'extraction de l'eau souterraine. La mise en place de qanâts, qui a permis l'implantation et l'extension des parcellaires à l'époque perse, correspond ainsi à la mise en valeur et à l'exploitation maximale d'une ressource en eau décroissante : elle a permis, pendant des siècles, le maintien des oasis. La baisse progressive du niveau des nappes a ensuite été compensée par des innovations techniques (forage de puits de plus en plus profonds), par le repli vers certains puits plus

[135]. BARAKAT, BAUM 1992, p. 26, 32-33, 59-60, 78-82 et 84-85

productifs et par la multiplication des puits en usage. Il s'ensuit donc deux logiques différentes, en fonction de la pérennité et du débit des puits. Les puits les plus durables et les plus abondants, bénéficiant probablement de conditions propices liées au système de failles régional et à la fracturation de l'aquifère ainsi que d'un meilleur entretien par les agriculteurs, ont permis une occupation sur le long terme. Elle se traduit par un impact morphogénétique important et une forte anthropisation du milieu à l'origine des buttes de sédiment fin de la région de Baris. L'exploitation de l'eau par les hommes, en opposant un obstacle au vent, a contribué à la formation d'épais dépôts sédimentaires. Au contraire, certains puits ont eu un fonctionnement moins long, ou peut-être épisodique. Il en découle une mobilité des activités agricoles que l'on constate aisément à Douch, où les puits et les parcellaires sont nombreux mais moins marqués et moins surélevés. Les dépôts sédimentaires y sont ainsi moins épais, mais très étendus. L'anthropisation du milieu par l'exploitation des eaux souterraines se manifeste donc de manière intense autour des puits pérennes et de manière diffuse à proximité des puits les moins durables. La continuité de l'occupation régionale, sans apports de progrès techniques majeurs entre l'Antiquité et le XIXe siècle, dans un contexte de baisse du niveau des nappes, a entraîné une contraction progressive de l'occupation humaine jusqu'à l'introduction de nouvelles méthodes de forage et de relevage de l'eau (là où l'artésianisme devenait insuffisant pour amener l'eau en surface). Ces nouvelles méthodes ont initié une nouvelle phase d'extension des parcellaires, en permettant, comme lors de l'introduction des qanâts à l'époque perse, de maximiser la part utilisable des eaux du système aquifère des grès de Nubie.

Le vent, l'eau et les hommes, constituent ainsi les facteurs principaux de l'évolution du milieu et des paysages du bassin sud de l'oasis de Kharga, de la XVIIe dynastie à nos jours. Les paysages et les conditions de vie ont donc évolué en fonction d'une constante, la présence de vent, et de quatre variables : le niveau des nappes souterraines, la population présente, les pratiques agricoles et le niveau technique d'extraction de l'eau. L'évolution et les changements du milieu reposent donc avant tout sur les activités humaines et sur le maintien des populations dans l'oasis. Le projet de « Nouvelle Vallée » et le choix du président égyptien Abdel Fattah al-Sissi de développer encore l'agriculture dans le désert Libyque devrait ainsi avoir un impact environnemental, paysager et humain non négligeable, peut-être comparable avec celui qu'eurent l'introduction des qanâts et le développement des oasis de la région à partir de la XVIIe dynastie.

Bibliographie

ANWAR 1959
R.M. Anwar (1959)**,** « Soil and Land Classification of Baris Plain in El Kharga Oasis ». *Publications de l'Institut du Désert d'Égypte*, 12, 1959, p. 1-51

BARAKAT et BAUM 1992
H.N. Barakat, N. Baum, *Douch II. La végétation antique*, DFIFAOXXVII, Le Caire, 1992

BEADNELL 1909
H.J.L. Beadnell**,** *An Egyptian oasis; an account of the oasis of Kharga in the Libyan desert, with special reference to its history, physical geography, and water-supply*. J. Murray, Londres, 1909

BERBRUGGER 1872
A. Berbrugger, *Les puits artésiens des oasis méridionales de l'Algérie*, seconde édtion, Alger, 1862

BOUSQUET 1996
B. Bousquet, *Tell-Douch et sa région. Géographie d'une limite de milieu à une frontière d'Empire*. DFIFAO XXXI, Le Caire, 1996

Browne 1799
W.G. Browne, *Travels in Africa, Egypt and Syria, from the year 1792 to 1798*, Londres, 1799

CAILLAUD 1821
F. Caillaud, « Voyage à l'Ouest », *in* E.F. Jomard (éd.) *Voyage à l'Oasis de Thèbes et dans les déserts situés à l'Orient et à l'Occident de la Thébaïde fait pendant les années 1815, 1816, 1817 et 1818, par M. Frédéric Caillaud (de Nantes)*, Imprimerie Royale, Paris, 1821, p. 85-98

CALLOT 2008
Y. Callot, « Formations éoliennes », *in Y.* Dewolf, G. Bourrié (dir.), *Les Formations superficielles*, Editions Ellipses, 2008, p. 293-320.

COUDE-GAUSSEN 1995, p.133-143
G. Coudé-Gaussen, « L'érosion éolienne : aspects théoriques », *in* Coudé-Gaussen G. et Rognon P. (dir.), *Désertification et aménagement au Maghreb.* L'Harmattan, 1995, p. 153-165.

CREPY, CALLOT 201
M. Crépy, Y. Callot, « Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Egypte) », *Revue des Régions Arides 36 - Actes du colloque international Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte*, Institut de Régions arides de Médénine (Tunisie), 2015, p. 71-94

DUNAND *et al.* 1992
F. Dunand, J.-L. Heim, N. Henein, R.Lichtenberg, *Douch 1 : La Nécropole de Douch, Tombes 1 à 72*, DFIFAO XXVI, Le Caire, 1992.

DONNER, EMBABI 2000
J. Donner, N.S. Embabi, « The Significance of yardangs and ventifacted rock outcrops in the reconstruction of changes in the late Quaternary wind regime in the western desert of Egypt», *Quaternaire* 11, 3-4, 2000, p. 179-185.

DROVETTI 1821
B. Drovetti, « Journal d'un voyage à la vallée de Dakel, par M. le chevalier Drovetti, consul général de France en Egypte vers la fin de 1818 », *in* E.F. Jomard (éd.) *Voyage à l'Oasis de Thèbes et dans les déserts situés à l'Orient et à l'Occident de la Thébaïde fait pendant les années 1815, 1816, 1817 et 1818, par M. Frédéric Caillaud (de Nantes)*, Imprimerie Royale, Paris, 1821, p. 99-105

DROZDZ 2007
M. Drozdz, « L'Ouest égyptien, une périphérie ? 50 ans d'évolutions socio-territoriales », *M@ppemonde*, 104, 2011, 21p.

EBRAHEEM *et al.* 2002
A.M. Ebraheem., S. Riad., P. Wycisk, A.M. Seif El-Nasr, « Simulation of impact of present and future groundwater extraction from the non-replenished Nubian Sandstone Aquifer in southwest Egypt », *Environmental Geology*, 43, 2002, p. 188-196.

EDMONSTONE 1824
A. Edmonstone, « Voyage à deux des oasis de la Haute-Egypte », *in* J.B. Eyriès et C. Malte-Brun (éd. et trad.), *Nouvelles annales des voyages, de la géographie et de l'histoire XXI*, Paris, 1824, p. 5-177

EL-SHAZLY, SHATA 1960
M.M. El-Shazly, A. Shata, « Contribution to the study of the stratigraphy of el Kharga Oasis », *Bulletin de l'institut du Désert d'Egypte X*, 1, 1960, p. 1-10

EMBABI 2004
N.S. Embabi, *The geomorphology of Egypt. Landforms and Evolution Vol.1: The Nile Valley and the Western Desert.*, The Egyptian Geographical Society Special Publication, Cairo, 2004

GASSE 2000
F. Gasse, « Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum », *Quaternary Science Reviews*, 19, 1-5, 2000, p. 189-211.

GUMUCHIAN 1975
H. Gumuchian, « La République Arabe d'Égypte à la conquête de ses déserts », *Revue de géographie alpine* 63, 2, 1975, p.225-252

HEREHER 2010
M.E. Hereher, « Sand movement patterns in the Western Desert of Egypt: an environmental concern », *Environment Earth Science*, 59, 2010, p.1119-1127.

Hérodote, *Histoires* III
Hérodote, *Histoires* III ; P.-H.Larcher (trad.), Paris 1850.

HOSKINS 1837
G.A. Hoskins, *Visit to the Great Oasis of the Libyan Desert*, Londres 1837

HRDLICKA 1912
A. Hrdlicka, « The Natives of Kharga Oasis, Egypt », *Smithsonian Miscellaneous Collections 59*, Washington, 1912

KOCUREK 1998
G. Kocurek, « Aeolian system responses to external forcing factors - A sequence stratigraphic view of the Saharan region », *in* A.S. Alsharshan, K.W. Glennie, G.L. Whittle, C.G.St.C. Kendall (dir.), *Quaternary deserts and climatic change*, Baalkema, Rotterdam, 1998, p. 327-338

Poncet 1709
J.-C. Poncet, *A Voyage to Aethiopia made in the years 1698,1699 and 1700*, Londres, 1709

REDDE 2004
M. Reddé, *Douch III. Kysis. Fouilles de l'IFAO à Douch, Oasis de Kharga (1985-1990).* DFIFAO 42, Le Caire, 2004

SOLIMAN 2013
S.M. Soliman, « Mitigation of Excessive Drawdowns via Rotational Groundwater Withdrawal (Case study: El Kharga Oases, Egypt) » *New York Science Journal*, 6, 1, 2013, p. 118-123

TRABOULSI *et al.* 1997
M. Traboulsi, P. Sanlaville, G. Blanchet, « Le Moyen-Orient de 20000 ans BP à 6000 ans BP. Essai de reconstitution paléoclimatique », *Paléorient*, 23, 2, 1997, p. 187-196.

WAGNER 1987
G. Wagner, *Les oasis d'Egypte à l'époque grecque, romaine et byzantine d'après les documents grecs (recherches de papyrologie et d'épigraphie grecques)*, IFAO, Le Caire, 1987

WUTTMANN *et al.* 1996
M. Wuttmann, B. Bousquet, M. Chauveau, P. Dils, S. Marchand, A. Schweitzer, L. Volay, « Premier rapport préliminaire des travaux sur le site de Ayn Manawîr (oasis de Kharga) », *BIFAO* 96, 1996; p. 385-45

WUTTMANN *et al.* 1998
M. Wuttman, H. Barakat, B. Bousquet, M. Chauveau, T. Gonon, S. Marchand, M. Robin, A.

Schweitzer, « Ayn Manawir (oasis de Kharga). Deuxième rapport préliminaire » *BIFAO*, Le Caire, 1998, p. 367-462.

WUTTMAN 2001
M. Wuttmann, « Les Qanâts de 'Ayn Manâwir (oasis de Kharga, Égypte) », *in* P. Briant, *Irrigation et drainage dans l'Antiquité, qanâts et canalisations souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce*. Persika 2, 2001, p. 109-135

WUTTMANN, DACHY 2012
M. Wuttmann, T. Dachy, « Aïn Manawir et la prospection de l'oasis de Kharga : La prospection et la carte archéologique de Kharga», *Rapport d'activités 2011-2012- Supplément au BIFAO 112*, 2012, p. 4-10

Table des figures

Figure 1 - Carton de localisation et carte de la dépression de Kharga. Le rectangle rouge indique l'emprise de la figure 2. 225

Figure 2 - Carte du bassin sud de l'oasis de Kharga localisant tous les sites cités dans l'article. 226

Figure 3 - Barkhane situées au sud-est de Douch (KS060). Ces dunes en forme de croissant avancent à une vitesse variable : les plus petites sont les plus rapides, alors que les plus grandes sont beaucoup plus lentes. 228

Figure 4 - Champs de yardangs sur le versant sud d'Aïn Ziyada (KS088). La présence de vestiges d'occupation antique au sommet des yardangs témoigne de l'efficacité de l'ablation éolienne dans ce secteur depuis la fin de l'époque romaine. 228

Figure 5 - Dépôts de sables et de limons éoliens sous le vent de galets, au sud de Douch (KS060). Le vent vient de la droite (vent du nord) et les galets constituent un obstacle suffisant pour freiner les courants éoliens, entraîner un dépôt, puis le protéger contre la corrasion éolienne. Ceux visibles sur cette photographie sont restés dans la même position suffisamment longtemps pour permettre une induration du sédiment déposé sous le vent. 229

Figure 6 - Canaux d'irrigation dans l'oasis actuelle de Douch. Formé directement sur le substrat sablo-limoneux et délimité par des bourrelets de terres amovibles, il permet l'acheminement et le partage de l'eau entre les différentes parties de l'oasis. Le canal situé à gauche n'était pas en eau à cette période, mais un simple coup de houe, suivi de la formation d'un nouveau bourrelet dans le canal de droite permet de dévier l'eau vers d'autres secteurs. 231

Figure 7 - Canal bétonné dans l'oasis actuelle de Douch. 233

Figure 8 - Marais formé par le drainage d'une partie des eaux d'irrigation de l'oasis actuelle d'Aïn Gaga 233

Figure 9 - Partie ouest d'Aïn Birqis (KS259), site d'époque romaine constitué d'un grand parcellaire entaillé en yardangs par la corrasion éolienne, et de plusieurs canaux transportant l'eau sur plusieurs kilomètres. Les traits rouges indiquent les limites de la butte de sédiment fin d'Aïn Birqis qui recouvre la partie ouest du site romain et mesure 26 m de haut. Les traits noirs indiquent les canaux alimentant les parcellaires romains. Les traits pointillés correspondent aux formes incertaines en raison de la corrasion éolienne et la déflation, qui ont été particulièrement actives sur ce site. 235

Figure 10 - Croûtes salées formées en marge de l'oasis de Douch, entre les cultures actuelles et le site antique. L'augmentation de la rugosité éolienne et le ralentissement des courants éoliens qu'elles impliquent expliquent le voile sableux qui les recouvre partiellement. 236

Figure 11 - Yardang contenant des briques d'époque perses reposant sur une strate indurée du dépôt à Douch (KS060). Le mur, appuyé sur le rebord d'un ancien yardangs, et recouvert d'un épais dépôt postérieur, indique que des yardangs existaient déjà durant l'Antiquité. Durant

l'Holocène, les phases de dépôts et d'ablation ont donc pu être multiples en un seul et même lieu. 238

Figure 12 - Yardang constitué au dépens d'un dépôt de sédiment limoneux et sableux apporté par le vent et ayant recouvert un parcellaire d'époque romaine à Aïn Zabiba (KS161). 239

Figure 13 A, B et C - Cartes de répartition des sites archéologiques prospectés. A : Epoques perses et ptolémaïques (V^{e}-I^{er}s. avant notre ère). B : Epoque romaine (Ier-IIIe s. de notre ère). C : Epoque romaine et Byzantine (IVe-VII^{e}s. de notre ère) 244

Figure 13 D, E et F- Cartes de répartition des sites archéologiques prospectés. D - Epoques pré-mamelouks et mamelouks (VIIIe-XV^{e}s. avant notre ère). E - Epoque ottomane (XVIe-XIXe s. de notre ère). F - Epoque contemporaine (XIXe-XXe s. de notre ère). 245

Figure 14 - Butte de sédiment fin d'Aïn el-Matrahiyya. Mesurant 15 m de hauteur, elle s'organise autour d'un puits et présente des vestiges de parcellaires en terrasse sur ses versants. Au pied de la colline, on retrouve des céramiques romaines, les terrasses basses semblent d'époque médiévale, et les parcellaires les plus haut et les plus proches du chenal du puits sont d'époque moderne. 246

Figure 15 - Butte de sédiment fin d'Aïn Gaga, toujours occupée par une oasis aujourd'hui. Mesurant 18 m de haut, elle est couverte de palmeraies et de parcelles cultivées, parfois en terrasse. Le forage et le pompage de cette oasis ont été mis en place à proximité immédiate de l'ancien puits. 247

Figure 16 - Partie sud de la colline d'Aïn Birqis. Les traits rouges indiquent les limites de la colline, les traits noirs indiquent les canaux. Si l'existence de la butte n'était liée qu'au puits et à la végétation naturelle qu'il entretenait, elle serait profilée selon un axe nord/sud. L'extension de la colline vers l'est est donc liée à la présence des canaux et de parcellaires qui délimitent distinctement une terrasse surélevée de 5 à 8 m par rapport à la plaine environnante. De même la ligne de yardangs qui longe le canal partant vers le nord signale un parcellaire situé un à deux mètres au-dessus de la plaine. 248

Figure 17 a, b et c -Extraits des cartes anciennes de la dépression de Kharga. A : Carte d'Anville, 1727 ; B : Carte de Bonne, 1762 ; C : Carte de Jomard, 1820. Ces trois cartes ont été obtenues grâce à la plateforme Gallica (http://gallica.bnf.fr/) 250

Figure 17 d, e, f et g - Extraits des cartes anciennes de la dépression de Kharga. D : Caillaud, 1827 ; E : Arrowsmith, 1832 ; F : Arrowsmith, 1837 ; G : Petermann, 1875. Les cartes d et e ont été obtenues grâce à la plateforme Gallica (http://gallica.bnf.fr/). La carte f a été fournie par *Google Books* (http//:books.google.com). 251

Figure 18 - Cuve ensablée et début du chenal (en bas à gauche) du puits d'Aïn el-Matrahiyya. La berge de rétention d'eau n'a pas été conservée. 257

Table des tableaux

Tableau 1 : Mention des différents sites dans les textes (en noir) et sur les cartes (en bleu) 252
Tableau 2 : Description des puits 256
Tableau 3 : Population de l'oasis de Kharga 258

IX.B. Un erg moins hostile durant l'Antiquité ?

Depuis la soumission de l'article, un nouvel axe de travail a été développé. Il repose sur le croisement, par l'utilisation d'un logiciel de SIG, entre le modèle numérique d'élévation *GDEM ASTER* et les sites exploités exclusivement durant la période romaine (dans l'erg et dans l'extrême sud de la dépression). Les exutoires de qanâts à Aïn Manawir et Tell-Douch donnent un point de repère essentiel : situés entre 80 et 85 m d'altitude, ils indiquent que l'artésianisme faisait remonter les eaux jusqu'à ce niveau durant leur période d'exploitation. Cela indique que, lors de la période romaine, la surface piézométrique se situait suffisamment haut pour que les suintements et les remontées soient plus nombreux qu'aujourd'hui dans l'erg (figure 139). Des nappes superficielles, voire des nappes perchées dans les dunes, pourraient s'être formées ; de tels phénomènes sont attestés pour le Grand Erg Occidental, en Algérie (Callot et Fontugne 2008), mais la configuration de l'erg étudié étant très différente, des études complémentaires seraient nécessaires pour le vérifier. Par ailleurs, en période plus humide, un erg se stabilise et ses édifices sableux s'espacent (Kocurek 1998). Dans cette situation, l'erg constituait un secteur plus aisé à coloniser et où l'eau ne manquait pas.

Des indices sur le terrain (dépôts témoignant de l'avancée de barkhanes en milieu humide et concrétions ferrugineuses - figure 140) tendent à confirmer que l'erg a été nettement plus humide dans le passé et que l'artésianisme y a été beaucoup plus fort. Malheureusement, il est pour l'heure impossible d'obtenir des datations. La découverte de puits, d'aqueducs et de regards de qanâts indique en tous cas que l'irrigation avait une source locale et n'était pas canalisée depuis l'extérieur de l'erg. De l'eau était donc disponible sur place lors de l'installation des agriculteurs romains, suffisamment proche de la surface pour influer sur le choix des sites d'installation. L'exploitation agricole de l'erg a probablement accentué sa stabilisation, tout en précipitant l'abaissement des nappes artésiennes, initiant l'état de déséquilibre du système qui mena à la remobilisation des sables et à l'abandon des sites.

Quelques oasis de la région de Baris exploitaient encore des puits traditionnels dans les années 1950 (figure 141) : Aïn el-Malkya, Aïn Birqis, Aïn el-Matrahiyya, Aïn Tafnis et Baris (Anwar 1959). Elles se situent toutes à une altitude comprise entre 48 et 54 m. On peut ainsi estimer le rabattement de la surface piézométrique dans une fourchette de 25 à 30 m en 15 à 16 siècles. Cependant, à la fin du XIXe s., un puits fonctionnait encore à une altitude de 70 m dans l'oasis de Douch (Beadnell 1909). Le rabattement n'a donc pas été uniforme, sous l'effet de phénomènes naturels (tectonique) ou anthropiques (cônes de pompage).

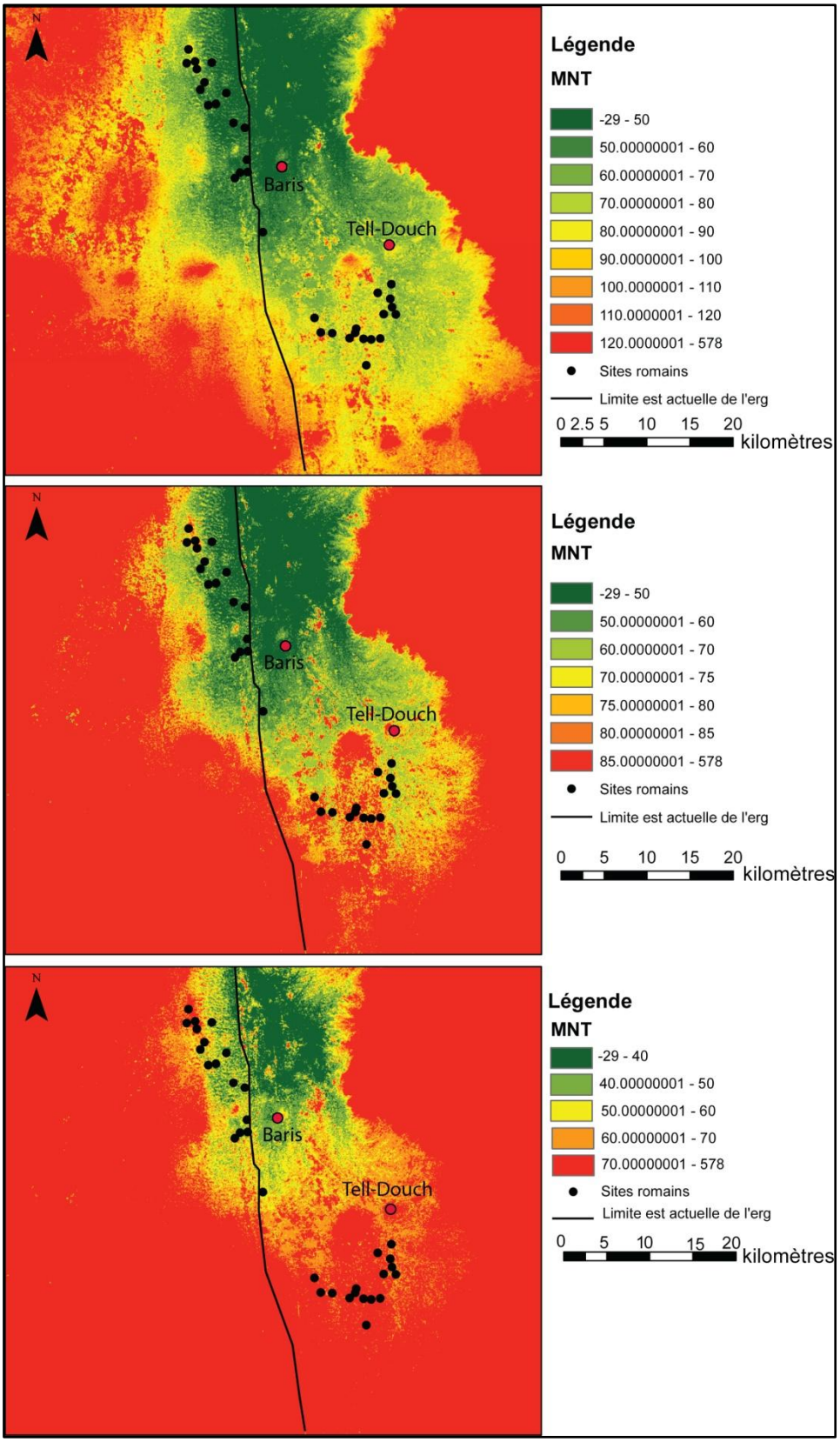


Figure 139 - Sites archéologiques de l'erg et de l'extrême sud de la dépression de Kharga, uniquement occupés à l'époque romaine. Trois discrétisations différentes ont été adoptées pour le modèle *GDEM ASTER* afin de mettre en évidence des groupes de sites, en fonction de leur altitude et des points de remontées artésiennes connues. L'état 1 met en évidence en rouge tous les espaces situés au-dessus de l'altitude des plus hauts puits et sorties de qanâts connus. L'état 2 indique en rouge les espaces situés au-dessus de l'altitude des exutoires de qanâts les plus bas à Aïn Manawir. L'état 3 indique en rouge les espaces situés au-dessus de l'altitude des puits de plaine en fonctionnement lors de l'abandon de certains sites à la fin de l'époque romaine.

Figure 140 - Concrétions ferrugineuses au sommet d'une butte sur le site KS221, au cœur de l'erg. Prise de vue : novembre 2010.

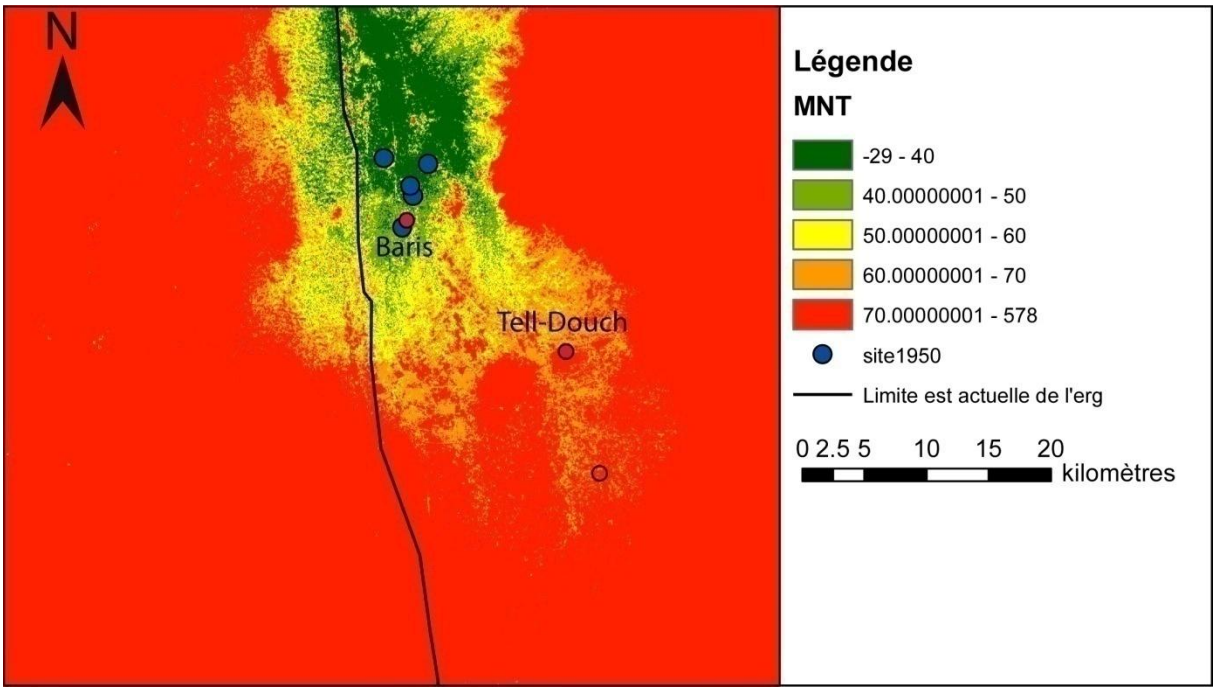


Figure 141 - Emplacement des 5 sites exploitant encore un puits artésien sans pompage et sans forage profond dans les années 1950, en comparaison avec les altitudes (*GDEM ASTER*). Ils se trouvent tous en dessous de 50 m d'altitude.

Conclusion :
Le vent et l'agriculture, facteurs principaux de la morphogenèse oasienne

Les travaux de terrain, l'observation d'images satellitaires et les analyses sédimentologiques et stratigraphiques, complétées par des documents anciens permettent, dans une logique reposant sur les principes de l'actualisme et sur des données diachroniques, de construire une image nuancée de la relation hommes/environnement sur le temps long à l'échelle de la région.

Les précipitations ont eu, depuis l'Antiquité, un impact morphogénétique limité spatialement et chronologiquement (chapitre V). Au contraire, le vent a été constant et a ainsi contribué à la formation et à l'érosion de dépôts variés occupant d'immenses surfaces, mais leur genèse implique l'intervention de facteurs non éoliens (chapitre VI). Les activités agricoles sont l'un de ces facteurs, le principal peut-être, en mettant en place des surfaces de piégeage sédimentaire (chapitres VII et VIII). L'alternance de périodes de mise en culture et de déprise implique donc des phases successives de dépôt/ablation particulièrement rapides et prononcées (chapitres VIII et IX). Dans ce cadre, il apparaît que les hommes ne se sont pas seulement adaptés à l'environnement éolien, mais l'ont également mis à profit, construisant, au fil du temps, des terres arables de qualité (chapitres VII et IX).

Le vent est bien le facteur environnemental prépondérant, lié directement au système climatique, mais les activités agricoles ont profondément modifié son action à l'échelle locale. Sans irrigation et sans culture, les dynamiques éoliennes auraient principalement produit de l'ablation et du transport (et des accumulations sableuses « naturelles », dunes et placages) ; au contraire, l'eau du sous-sol, diffusée en surface, a permis le maintien d'une végétation et la mise en place de dynamiques de dépôt dans les secteurs anthropisés. Le vent, quasi-constant, voit donc ses effets modifiés ponctuellement dans le temps et dans l'espace en fonction des installations et des pratiques oasiennes. Les activités oasiennes et leurs cycles, depuis 2 500 ans, ont conditionné les surfaces et les temps de dépôt, puis d'ablation. De cette relation hommes/environnement sur le temps long découlent les paysages du vent de la dépression de Kharga, dont l'évolution se prolonge aujourd'hui.

Troisième partie
Décrire et modéliser les paysages du vent : essais de typologie et de synthèse

Introduction

Les paysages du vent, par leur nature de palimpseste juxtaposant des formations résultant de processus ou de temporalités divers, rendent difficile la reconstitution précise d'une trame d'évolution environnementale sans travaux à plusieurs échelles. Un site ou un dépôt isolé ne représentent pas l'évolution environnementale de la région, mais seulement une situation paléoenvironnementale locale à très locale. Construire une synthèse des apports constitués par nos travaux nécessite donc de s'extraire de ces effets de sites.

Pour ce faire, l'établissement d'une typologie des formations observées et leur description, sans tenter d'en tirer des conclusions immédiates sur l'évolution environnementale de la région est essentiel (chapitre X) : en nous affranchissant partiellement des questions de temporalité de formation et de distribution régionale, nous pourrons ainsi exposer les processus à l'œuvre et leur signification (paléo)environnementale.

Dans un second temps, il est essentiel de renoncer, temporairement au moins et en l'état actuel des recherches, à l'établissement d'une chronologie régionale précise de l'évolution environnementale de la dépression de Kharga. La variété des sites et leur fonctionnement asynchrone nuisent à cette entreprise. La multiplicité des signaux, en provenance de différents sites, et les travaux portant sur le temps long permettent en revanche d'identifier et de décrire les grandes lignes de l'évolution de l'environnement régional depuis environ 2 500 ans et de

produire des modèles descriptifs centrés sur les processus à l'œuvre à l'échelle locale (chapitre XI). Ces éléments seront complétés par une réflexion à propos des jeux d'échelles inhérents aux oasis et aux logiques sociétales liées à leur mise en place et à leur revitalisation.

Enfin, les pistes à privilégier afin d'approfondir la compréhension des interactions hommes/vent/artésianisme sur le temps long dans la dépression de Kharga et ailleurs seront exposées (chapitre XII).

Chapitre X.
Typologie des formations hydro-éoliennes, anthropo-éoliennes et anthropo-hydro-éoliennes de la dépression de Kharga

Les milieux arides sont étudiés par les géomorphologues depuis de nombreuses années, et les typologies des formations naturelles qu'on peut y observer sont généralement assez complètes. Les formes éoliennes y sont la plupart du temps bien décrites, y compris dans les manuels (Cooke *et al.* 1993 ; Goudie 2002, 2013). Au contraire, les formations dont la genèse implique à la fois des processus éoliens et hydriques ou anthropiques, pourtant nombreuses dans les oasis et à leur proximité, ont été moins décrites. Liées au contexte oasien et aux activités humaines, elles sont pourtant nombreuses dans les régions les plus anthropisées du Sahara.

Ainsi, dans la dépression de Kharga, cultivée depuis 2 500 ans, malgré l'apparente prépondérance des phénomènes éoliens, les travaux menés depuis 2010 nous ont conduit à la construction progressive d'une typologie des formes dont la genèse mêle activités éoliennes et facteurs hydriques et/ou anthropiques afin de construire un outil de travail efficace et de combler un manque de la bibliographie concernant les milieux arides.

Pour faciliter le travail des membres de la mission de l'IFAO à Douch lors des descriptions géomorphologiques de sites, ce chapitre comportera aussi la mention de toutes les formes éoliennes identifiées dans la région, en mobilisant la typologie générale développée par Y. Callot (2008). Seuls les types présentant des particularités régionales importantes seront développés, les autres seront seulement mentionnés (tableau 27). La description des formes mixtes (tableau 28) sera plus complète, car elle comprend des éléments nouveaux.

X.A. Formations éoliennes d'accumulation et formes d'ablation

Déjà bien décrites, ces formations ont été observées sur le terrain lors des missions ou sur les images satellitaires disponibles sur le logiciel *Google Earth*. Six d'entre elles présentent des particularités locales ou régionales rendant une description nécessaire : les lœss sahariens, les voiles sableux, les barkhanes, les ergs, les mégarides et les yardangs.

Tableau 26 - Formes éoliennes de la dépression de Kharga déjà décrites dans la typologie de Y. Callot (2008). Les cases grisées indiquent les formations qui ne présentent pas de particularités régionales importantes. Les cases blanches correspondent aux formations dont les particularités régionales seront décrites dans le texte ci-dessous.

Formes éoliennes de la dépression de Kharga			
Sous-catégorie	**Type**	**Lieu d'observation**	**Remarque**
Accumulations limono-sableuses et sablo-limoneuses	**Lœss saharien**	Presque partout	Voir texte ci-dessous
Accumulations éoliennes sableuses libres	**Sable libre**	Presque partout	Formation très mobile
	Voile sableux	Presque partout	Voir texte ci-dessous
	Nappage sableux	Secteurs végétalisés ou proximité de l'erg	
	Ride éolienne	Presque partout	
	Barkhane	Erg et cordons dunaires	Voir texte ci-dessous
	Erg	Bordure ouest de la dépression	Voir texte ci-dessous
Accumulations éoliennes liées à un obstacle	**Nebka**	Presque partout	Parfois formée sous le vent de céramiques
	Rebdou	A proximité des puits	Jusqu'à 8 m de hauteur
	Placage sableux	A proximité des collines et du plateau	Peu de placages au vent
	Sif		Lié à des obstacles
	Silk	A proximité du plateau	Lié à des obstacles
Accumulations éoliennes sablo-graveleuses	**Méga-ride**	Presque partout	Voir texte ci-dessous
Formes d'ablation, de corrasion et de déflation éoliennes	**Pavage désertique**		Parfois formé par des céramiques
	Stries et cupules de corrasion	Affleurements rocheux	Sur lœss et sur roches cohérentes
	Yardangs	Zones de lœss ou de playas	Voir texte ci-dessous
	Dépression hydro-éolienne		D'échelle métrique à kilométrique
	Système crêtes-couloirs	Sur le plateau	Uniquement en roches cohérentes

X.A.1. Lœss saharien

Ces dépôts (figure 97, p. 143) sont constitués de limons et de sables fins transportés par le vent et déposés dans des secteurs où la rugosité aérodynamique est plus importante (zone de végétation ou d'humidité). Au fur et à mesure du dépôt, la végétation se développe (dans le cas de plantes pérennes : arbres et arbustes) ou un plus grand nombre de pousses colonise le dépôt nouvellement formé (dans le cas de plantes annuelles). L'épaisseur augmente donc au fil du temps et peut dépasser plusieurs mètres. Les principales spécificités régionales des lœss sahariens de la dépression de Kharga sont leur formation très récente, ainsi que leur stratigraphie présentant rarement des horizons pédologiques (généralement peu développés), peut-être en raison de vitesses de sédimentation trop importantes pour permettre la pédogenèse (par ailleurs toujours lente en domaine hyperaride).

Leur faciès est généralement très homogène car le processus de dépôt et la charge sédimentaire restent globalement identiques, malgré des variations granulométriques (médianes comprises entre 24 et 105 µm) pour les échantillons étudiés. Certains dépôts, plus rares, sont moins homogènes et présentent une strate rubéfiée (figure 61, p. 101), en lien avec d'anciens incendies, ou un changement plus ou moins net dans la cohésion du dépôt (lié à un hiatus dans la sédimentation - figure 11 de l'article des *Cahiers de la Céramique Égyptienne*, chapitre IX).

Particulièrement repérables dans les secteurs où ils ont été érodés en yardangs, ces dépôts d'une épaisseur apparente comprise entre 50 cm et environ 8 m ont également été reconnus sous la surface actuelle dans des sondages archéologiques (échantillons 114 et 115) et lors de sondages à la tarière manuelle réalisés par M. de Dapper (communication personnelle). Les surfaces et les volumes concernés par ces dépôts pourraient donc être très importants.

La formation de lœss sahariens dans le sud de la dépression de Kharga est attestée durant l'Holocène par le foyer daté de l'Ancien Empire en place dans la coupe G (*cf.* chapitre VI), et il est probable qu'elle soit encore à l'œuvre dans certains secteurs particulièrement végétalisés. Par ailleurs, un processus similaire, mais influencé par les activités humaines, est attesté de l'Antiquité au XXe s. (voir *infra* - lœss sableux et dépôts de champs).

X.A.2. Les voiles sableux

Ces formations centimétriques majoritairement sableuses recouvrent de grandes surfaces, dans la région. Les voiles sableux présentent des divergences notables par rapport à la définition de Y. Callot (2008). Ils sont moins bien triés et leur distribution peut varier fortement d'une année à l'autre. Cette plus grande mobilité limite la formation de pellicule rousse (telle que décrite par Coudé-Gaussen 1995 et Callot 2008) en surface, particulièrement dans les secteurs les plus au sud, car les oxydes de fer à l'origine de la rubéfaction des grains sont régulièrement ôtés par les chocs liés au transport par saltation. Ceci pourrait être lié aux vitesses très importantes des vents lors des événements les plus violents et/ou à l'hyperaridité, qui assèche les dépôts et facilite leur remobilisation. Dans la plupart des secteurs situés au sud de Maks el-Qibli et de Douch, on trouve, immédiatement sous le voile, un sable rubéfié qui pourrait correspondre à une pellicule rousse ensevelie (figure 81, p. 128).

X.A.3. Méga-ride

Il s'agit de grandes rides (figure 142 et 143) mesurant jusqu'à 90 cm de hauteur dans la dépression de Kharga et constituées de trois composantes à la granulométrie nettement différenciée :

- le front croulant sous le vent, qui contient le sable le plus fin ;
- la micro-dépression située sous le vent de l'édifice, au pied du front est recouverte d'un sable très légèrement plus grossier ;
- le revers en pente douce situé au vent est constitué en surface d'un mélange de sables grossiers et de graviers portant les marques d'un transport éolien.

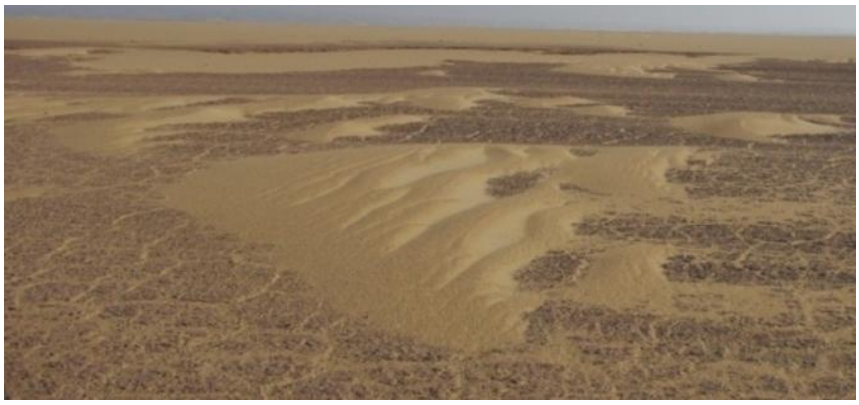


Figure 142 - Méga-rides de petite taille (5 à 40 cm de haut) formées sur la surface de dépôts de playas préhistoriques sur le site KS097. On observe une forme générale s'approchant d'un croissant. Prise de vue : décembre 2011.

Figure 143 - Grandes méga-rides dans l'extrême sud de la dépression de Kharga. Leur forme est quasi-rectiligne. L'échelle mesure environ 15 cm. Prise de vue : décembre 2011.

Contrairement à celles observées dans la partie occidentale du Sahara, qui comportent rarement des arêtes et qui se trouvent généralement sur des dunes ou en périphérie de massifs dunaires (Callot 2008), les méga-rides de la dépression de Kharga ont une distribution beaucoup plus large, y compris sur des substrats non-sableux (figure 142) et comportent presque toutes une arête vive. En plan, on observe deux types de formes, quasi-rectilignes ou en croissant. Les vitesses de vent nécessaires à leur formation, au vu de la granulométrie grossière du revers (médiane de 1 850 µm pour l'échantillon 117 dont une partie des grains déplacés appartient à la classe des graviers, *cf.* chapitre VI) doivent être très élevées.

X.A.4. Barkhane

Il s'agit de dunes en forme de croissant qui avancent progressivement dans le sens du vent et dont la vitesse est corrélée à la hauteur : plus une barkhane est haute et plus son déplacement sera lent (Coursin 1964 ; Clos-Arceduc 1969 ; Callot 2008). Leur versant au vent est en pente douce, alors que leur versant sous le vent constitue un front correspondant à la pente d'équilibre des talus, provoquant ainsi des coulées de sables. Leur formation progressive passe par quatre étapes principales : le bouclier, le bouclier barkhanique, le dièdre barkhanique et la barkhane. Les cornes des barkhanes, formées de part et d'autre du front, peuvent être dissymétriques en cas de coalescence de barkhanes, et des coalescences successives peuvent

former des édifices plus complexes (Callot 2008). D'après d'autres auteurs (Cooke *et al.* 1993 ; Embabi 2004 ; Goudie 2013), on peut ajouter un cinquième stade constitué de barkhanes très imposantes qui en produisent de plus petites, par l'extrémité de leurs cornes.

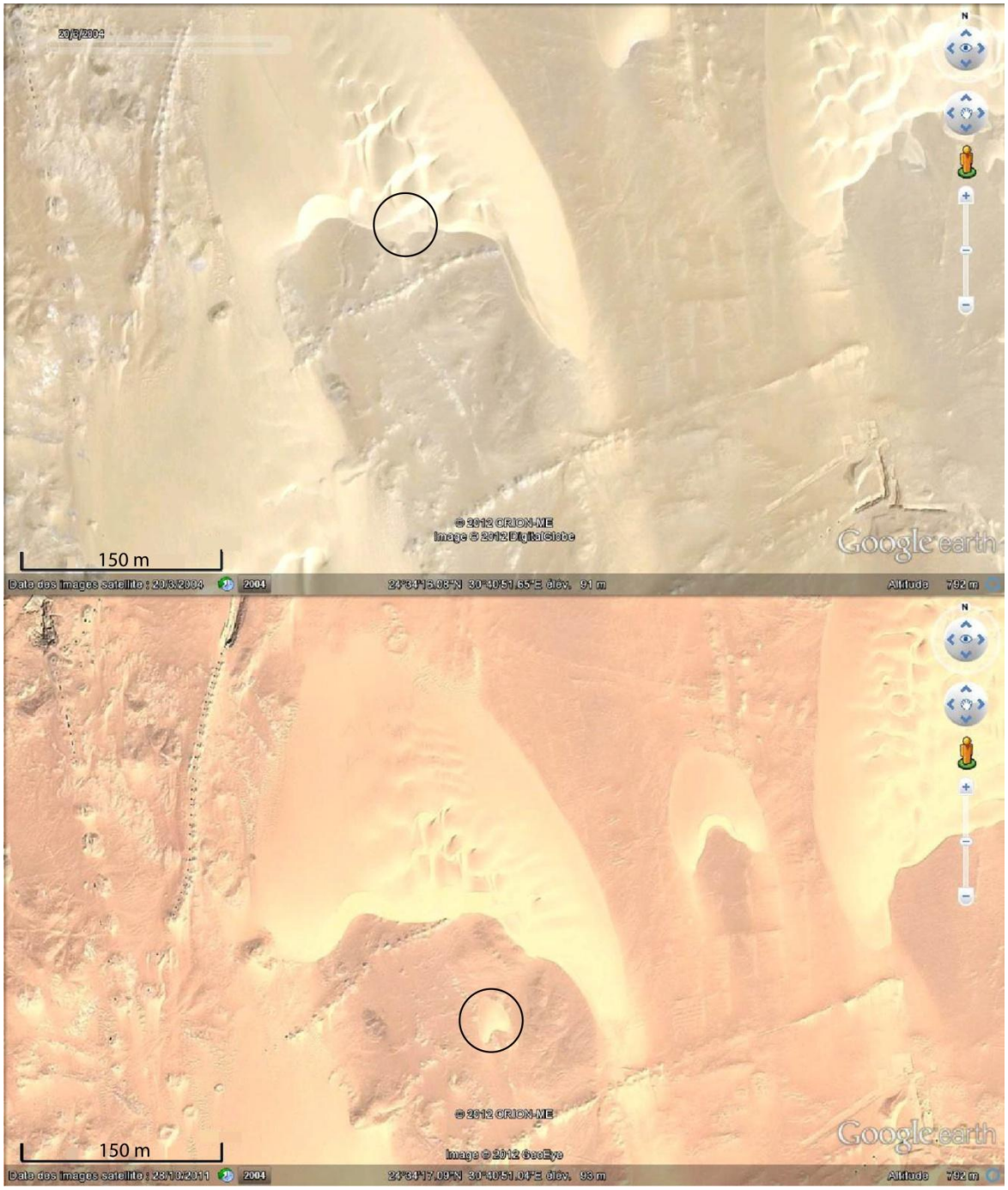


Figure 144 - Images satellitaires de barkhanes sur le site KS089 - Aïn Manawir. En comparant l'image du haut, datée de mars 2004 et l'image du bas, datée d'octobre 2011, on observe une petite barkhane (signalée par le cercle noir) se formant à partir du front de la grande barkhane située au centre.

Dans la région de Baris, on observe également des dynamiques très différentes : de grandes barkhanes semblent s'affaisser et « lâchent » de plus petites barkhanes par leur front

(figure 144). Ce phénomène, particulièrement fréquent dans la région, est lié, d'après des travaux de modélisation informatique, de photo-interprétation et d'expérimentation en laboratoire, à des collisions entre barkhanes, dans l'axe ou avec un décalage (Hersen et Douady 2005 ; Katsuki 2005 ; Vermeesh 2011 ; Worman *et al.* 2013). De tels phénomènes pourraient également se produire sans collision sur de très grandes barkhanes, si des figures sédimentaires se développent à proximité de leur front (Gao *et al.* 2015) : cela est confirmé par les petites formations et les fronts croulants que l'on peut observer sur le sommet des barkhanes d'Aïn Manawir (figure 144), entraînant la formation de plus petits édifices. Dans la région de Baris, la morphologie des dunes tend à indiquer que les collisions latérales sont majoritaires, mais une étude systématique par photo-interprétation ou par télédétection est nécessaire pour le vérifier.

X.A.5. Erg

Il existe de nombreuses définitions, incluant différentes fourchettes de surfaces et de taux de couverture sableuse minimaux pour décrire les ergs. Ainsi leur surface minimale est comprise, selon les auteurs, entre 100 km^2 (Callot 2008) et 30 000 km^2 (Cooke *et al.* 1993) et le pourcentage de surfaces recouvertes de sable est compris entre 20 % (Wilson 1971 ; Fryberger et Ahlbrandt 1979) et 50 % (Cooke *et al.* 1993). Pour certains auteurs, la présence de dunes n'est même pas obligatoire pour parler d'erg, tant que la couverture sableuse est importante (Embabi 1998). Dans la dépression de Kharga, l'erg situé à l'ouest est discontinu, constitué majoritairement de barkhanes et d'édifices barkhanoïdes complexes ; il correspond au prolongement dans la dépression de Kharga de l'un des principaux ergs égyptiens, le Ghard Abu Moharik. Il s'étend du nord au sud sur plusieurs centaines de km^2, sa surface exacte dépendant du taux de recouvrement sableux admis : très dense au nord et à l'est, le couvert dunaire se fait plus lâche vers le sud et vers l'ouest. De plus, certains secteurs, au cœur de l'erg présentent des espaces interdunaires très étendus (plus de 150 ha).

Sa délimitation selon une description strictement géographique reposant sur des critères physiques ou naturels est donc difficile. On peut au contraire aisément le délimiter en suivant une définition anthropocentrée, en fonction de son impact sur les activités humaines : il constitue actuellement un obstacle limitant les déplacements sur l'axe est-ouest le long d'une bande continue de 120 km et de plus de 1 000 km^2 qui n'est traversée par aucune route et présente un couvert sableux assez dense. Il se prolonge vers le nord et le sud, mais les dunes y

sont moins nombreuses, et des routes le traversent. Les oasiens n'ont exploité et peuplé ce secteur que durant quelques siècles lors de la période romaine et les grandes routes commerciales traditionnelles le longeaient du nord au sud sans le traverser. On peut donc définir localement l'erg comme un espace étendu dont le couvert sableux et le transit sédimentaire sont suffisants pour être un frein majeur aux activités humaines.

Il constitue ainsi un sujet d'étude essentiel dans le cadre d'une étude géoarchéologique, en ce qu'il a un impact plurimillénaire sur l'implantation des sites et des voies : l'exception romaine contraste ainsi avec l'absence totale d'activités antérieures et actuelles (en dehors de prospections archéologiques ou géologiques).

X.A.6. Yardang

Figure 145 - Yardangs sur le site KS088 - Aïn Ziyada. Le vent vient de la gauche. On observe plusieurs formes de yardangs, en fonction de différences initiales dans la topographie et l'induration des dépôts. Le yardang au premier plan est ainsi très court et étroit, alors que les yardangs à l'arrière plan sont plus longs et massifs. Prise de vue : novembre 2010.

Ces buttes aérodynamiques (figure 145) sont formées par des phénomènes d'ablation et de déflation éoliennes au sein de tous types de dépôts de sédiments, de roches meubles (argilites) ou de roches cohérentes (grès de la formation de Taref). Ils se caractérisent par une face au vent généralement plus haute et plus large que leur face sous le vent, mais leur forme peut

varier en fonction du matériel aux dépens duquel ils se forment, de facteurs topographiques et édaphiques, d'activités humaines ou de la présence de végétation. Ils peuvent se former aux dépens de tous les types d'accumulations citées précédemment, à condition que le sédiment ait été stabilisé. B. Bousquet (1996) a ainsi développé une remarquable typologie des yardangs dans le secteur de KS060 - Tell-Douch et de KS088 - Aïn Ziyada. Elle ne constitue cependant qu'un état à l'issue de ses travaux : le nombre et la très grande variabilité des yardangs dans la région la rendent incomplète, malgré son développement impressionnant. Elle offre toutefois un outil précieux pour travailler sur les yardangs. Leur particularité essentielle découle de leur caractère souvent composite, mêlant des dépôts naturels et des vestiges d'activités humaines (déblais, canaux, etc.) ; ceci entraîne la genèse de formes atypiques (figure 146). Les observations de terrain ont donc permis de repérer des types non mentionnés par B. Bousquet (1996), sans pouvoir pour autant les décrire ici avec suffisamment de précision. Leur étude mériterait d'être poursuivie afin de mieux identifier l'impact des activités anthropiques sur leur formation et leur évolution, et de construire une typologie exhaustive.

Figure 146 - Yardang situé à proximité du site KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams. Le vent vient de la droite. La crête située à l'extrémité opposée du yardang et perpendiculaire à son axe est liée à des vestiges de canaux : l'induration liée à la circulation de l'eau a protégé les dépôts de l'érosion. Prise de vue : novembre 2012.

X.B. Formes d'accumulation anthropo-éoliennes et hydro-éoliennes

Au contraire des formes strictement éoliennes, la plupart des formations mixtes, impliquant des processus liés à l'eau et/ou aux activités des hommes, ont été moins étudiées. Certaines d'entre elles ont tout de même été largement décrites, telles que les playas et les semi-playas (Embabi 1972, 1999, 2004 ; Donner et Embabi 2000 ; Nofal 2002 ; Goudie 2007) et les tertres artésiens de source (Meinzer et Hare 1915 ; Ponder 1986, 2004 ; Mudd 2000 ; Adelsberger et Smith 2010 ; Côte 2012 ; Torab 2014), mais leurs spécificités régionales justifient une description. D'autres ont seulement été mentionnées, sans étude approfondie, comme les tertres artésiens de puits (Beadnell 1909 ; Caton-Thompson et Gardner 1932 ; Torab 2014) ou les lœss sableux des dépôts de champs (Beadnell 1909 ; Brookes 1990) et les travaux menés depuis 2010 permettent d'en améliorer la compréhension. Enfin, certaines formations, comme les vestiges d'avancée de barkhanes, les playas de drainage et les dépôts sous le vent de galets ne semblent pas avoir été décrites jusqu'alors.

Tableau 27 - Formes éoliennes mixtes de la dépression de Kharga. Leur description est développée ci-dessous, dans le texte.

Formations éoliennes mixtes de la dépression de Kharga		
Sous-catégorie	**Type**	**Lieu d'observation**
Accumulations hydro-éoliennes	**Vestige d'avancée de barkhane**	A proximité de l'erg et des cordons actuels
	Playa et semi-playa	KS241, extrême sud
	Tertre artésien de source	Près des anciennes sources
	Dépôt sous le vent de galets	KS096 et 097
Accumulations anthropo-éoliennes	**Dune-afreg**	Proximité des oasis actuelles et anciennes
	Dune stabilisée	
Accumulations hydro-anthropo-éoliennes	**Dépôt de canal et chenal anthropique**	
	Playa de drainage	
	Lœss sableux et dépôt de champ	Emplacement des oasis actuelles et anciennes
	Tertre artésien de puits	

X.B.1. Formes d'accumulation hydro-éolienne

Cette catégorie regroupe trois types de dépôts nés de la conjonction entre des facteurs éoliens et hydriques.

X.B.1.a. Dépôt sous le vent de galets

Ce sont des dépôts indurés limono-sableux de petite taille qui ne se trouvent que dans certains secteurs de la dépression de Kharga, accolés à des galets d'épandages de paléo-oueds dans des thalwegs (figure 147). Deux processus distincts pourraient expliquer leur formation :

- lorsque la surface du sol est suffisamment humide (dans des secteurs où les eaux souterraines sont proches de la surface), un dépôt se forme sous le vent des galets et s'indure progressivement en raison de son humectation ;

- le dépôt est formé partout autour des galets par des apports de particules fines lors d'épisodes de précipitations. Il s'indure avant son assèchement total.

Figure 147 - Dépôts limono-sableux indurés sous le vent de galets d'épandage de paléo-oued sur le site KS097, dans un thalweg. Le vent vient de l'angle en haut à droite de la photographie. A proximité, se trouvent un secteur couvert de nombreuses nebkas et les dépôts d'avancée de barkhanes de la figure 148. Prise de vue : décembre 2011.

Une fois le dépôt constitué, quelle qu'en soit la genèse, la corrasion éolienne reprend dès qu'il s'assèche complètement, lui donnant une forme particulière de rampe raccordant le sommet de

la face sous le vent du galet au sol. Dans certains cas, la partie sommitale du dépôt peut se briser, rompant son lien avec le galet, dans d'autres, le lien se maintient mais le vent exporte la partie inférieure du dépôt, formant une sorte d'arche. L'étude n'a pas pu être poussée suffisamment pour pouvoir définir la pente moyenne de leurs arêtes mais elle semble généralement inférieure à 45°.

X.B.1.b. Vestige d'avancée de barkhane en milieu humide

Ces petits dépôts indurés sablo-limoneux, obliques en coupe et courbes en plan correspondent au contour d'un dos de barkhane (figure 148). Ils s'expliquent par l'avancée de barkhanes sur une surface humide, voire en eau, permettant l'induration du dépôt par la précipitation de $CaCO_3$. Dans la plupart des cas, ces formations sont observées sans qu'il soit possible de les associer à la barkhane ayant conduit à leur mise en place. Certaines semblent particulièrement anciennes : à KS161 - Aïn Zabiba, elles recouvrent directement un parcellaire d'époque romaine. Une de ces formes a été observée à proximité du site KS097 en 2011, à proximité immédiate de la barkhane ayant entraîné sa formation, confirmant ainsi le processus.

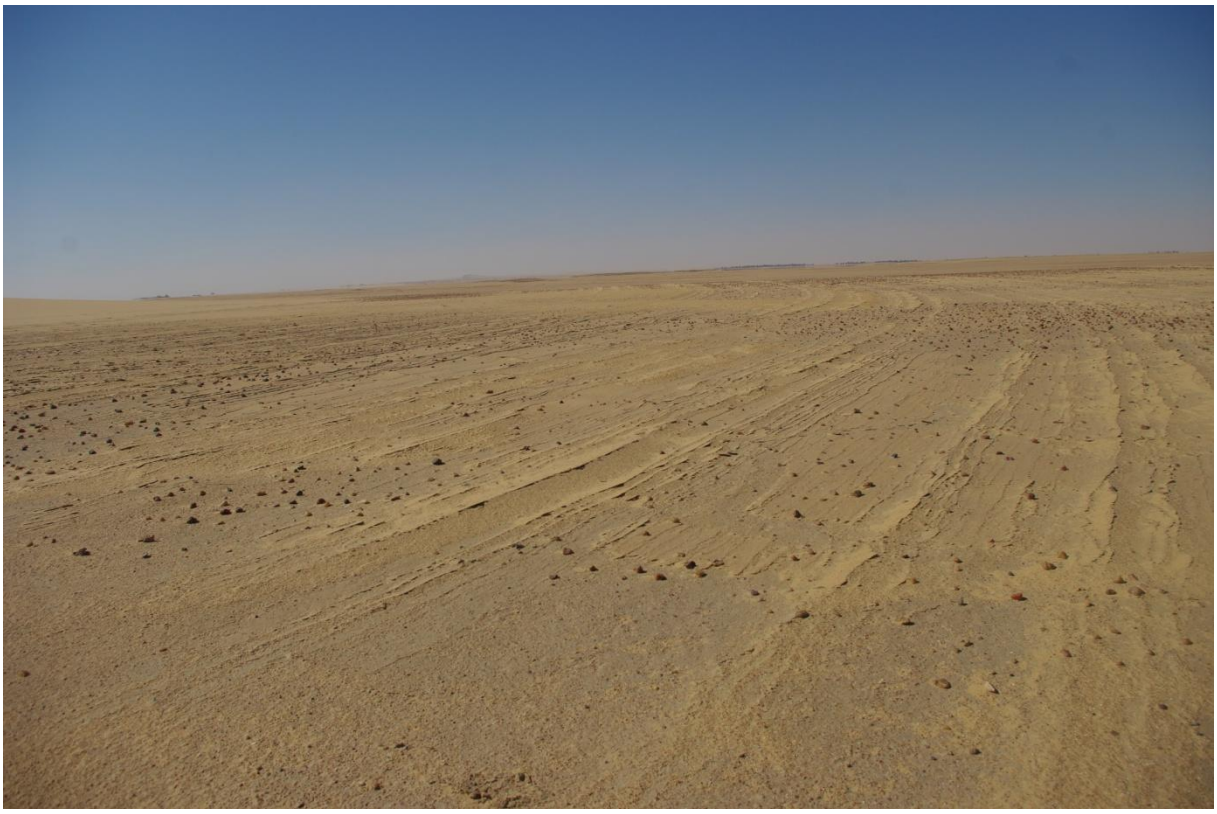


Figure 148 - Dépôts formés par le passage d'une barkhane en milieu humide à proximité de KS097. Prise de vue : décembre 2011.

X.B.1.c. Tertres artésiens (*spring mounds)*

Ces formations limono-sableuses à sablo-limoneuses (figure 9, p. 40) sont étroitement liées à l'artésianisme du système aquifère des grès de Nubie : on les observe dans différentes régions du monde, ayant une caractéristique commune : la présence de sources artésiennes actuelles et/ou anciennes (Adelsberger et Smith 2010 ; Côte 2012 ; Meinzer et Hare 1915; Mudd 2000 ; Ponder 1986, 2004). L'émergence de l'eau s'accompagne de la formation d'un petit plan d'eau et d'une remontée d'argilites et de sables issus des formations géologiques sous-jacentes. La présence de végétaux, liée à l'humidité locale, permet de capter une partie de la charge sédimentaire fine transportée par le vent, mettant ainsi en place des conditions idéales pour le développement d'une végétation plus dense. Celle-ci accélère le dépôt et permet son extension, augmentant ainsi son épaisseur et la surface occupée. Le tertre s'élève donc progressivement tant que la hauteur accumulée ne dépasse pas la surface piézométrique de la nappe. Il se forme donc une butte pentue, indurée par la précipitation du $CaCO_3$ contenu dans l'eau et par le système racinaire, dont le centre est généralement occupé par une dépression remplie par l'eau de la source. Dans la dépression de Kharga, les tertres artésiens étudiés ne contenaient pas de tufs. Leur état actuel varie en fonction des conditions d'érosion locale et de l'époque de tarissement des sources.

X.B.1.d. Playa et semi-playa

Ces dépôts sablo-limoneux (figure 10, p. 40) ont été l'objet de nombreuses études (Wendorf et Schild 1980 ; Embabi 1972, 1999, 2004) et leur description sera donc peu développée. Il s'agit d'accumulations fréquentes en milieu lacustre, ou palustre, présentant les marques stratigraphiques et sédimentologiques d'une alternance entre des apports sédimentaires par ruissellement et par transport éolien captés par le plan d'eau temporaire d'une part, et des apports sableux massifs liés aux activités éoliennes en période d'assèchement d'autre part. Il est néanmoins essentiel de les mentionner, car elles sont, finalement, moins fréquentes que ne l'estime N.S. Embabi (2004) : nombre de playas ou de semi-playas supposées naturelles et préhistoriques correspondent en fait à des dépôts historiques d'origine partiellement anthropique.

X.B.2 Formes mixtes anthropo-éoliennes

Quasiment toutes les formes citées comme strictement éoliennes présentent des variantes liées aux activités humaines ; les activités anthropiques (construction, agriculture, etc.), en produisant des obstacles au vent, peuvent renforcer l'accumulation. Par ailleurs certains de ces dépôts ne peuvent se former qu'en lien avec des aménagements humains.

X.B.2.a. Dune-afreg

Ces dunes perpendiculaires au vent sont formées par la mise en place de haies de palmes au vent des parcelles, afin d'éviter qu'elles ne soient envahies par le sable libre ou les dunes (figure 149). Leur croissance progressive, si les haies sont régulièrement entretenues, les amène à mesurer plusieurs mètres. On observe dans la région la trace d'anciennes dunes afregs qui furent développées en réseau d'édifices de tailles modestes (figure 36, p. 71). De nos jours, la plupart sont très réduits et concernent de petites oasis.

Figure 149 - Dune-afregs au nord d'un hameau situé à proximité d'Aïn Dakhakhin.

X.B.2.b. Dunes stabilisées

Dans certains cas, les oasiens sont allés jusqu'à bloquer une dune mobile sur place et à la stabiliser. Ce fut le cas à KS089 - Aïn Manawir dès l'époque romaine, où une dune fut figée à l'aide d'argile humide. De nos jours, on observe le même type de pratiques ; recourant au

plâtre, au béton ou à l'argile, les oasiens fossilisent en place des édifices dunaires. On observe ainsi, à l'est de la route de Baris à Kharga, une barkhane complètement stoppée dans son avancée vers les cultures situées au sud (figure 150). De même, les flèches sableuses sous le vent des buttes de sédiments fins ont été stabilisées par leur mise en culture.

Figure 150 - Barkhane stabilisée et stoppée dans son avancée à l'est de la route de Baris à Kharga. Prise de vue : novembre 2012.

X.B.3. Formes mixtes hydro-anthropo-éoliennes

Cette catégorie regroupe l'ensemble des formes à genèse complexe impliquant à la fois des facteurs éoliens, hydrologiques et anthropiques. Pour être plus précis, on pourrait parler de genèse « hydrauéolienne[136] », car l'étendue de ces formations est commandée par la répartition des ouvrages hydrauliques construits par les oasiens et par les pratiques agricoles liées à l'exploitation de sources et de puits par des canaux et des champs. Ces formations partagent donc des caractères avec certaines formes strictement éoliennes (lœss sahariens), avec les formes hydro-éoliennes et avec les formes anthropo-éoliennes.

[136]. L'expression a d'abord été employée par Nicolas Jacob-Rousseau, maître de conférences en géographie à l'université Lumière Lyon 2, durant le dialogue qui s'engagea après une présentation de ces formes lors du séminaire « Stratégies de gestion de l'eau à travers le temps et l'espace », qui s'est déroulé à Lyon le 30 novembre 2015.

X.B.3.a. Dépôts de canaux et de chenaux anthropiques

Le long des canaux d'irrigation et des fossés de drainage (maçonnés ou non), la présence d'humidité, voire d'eau, et de végétation, a permis le dépôt et l'induration de sédiments éoliens remaniés ou non par les écoulements. Ces formations sont généralement sablo-limoneuses, transformées par les curages et se retrouvent aujourd'hui mises en relief par l'érosion différentielle, qui a moins de prise sur ces dépôts souvent très cohésifs (figure 151) et forment ainsi des reliefs inversés. De tels dépôts peuvent se déployer sur des linéaires de plusieurs kilomètres de long, comme à l'ouest de KS060 - Tell-Douch, à l'est de KS260 - Aïn Birqis ou à l'est de Genah où un canal de plus de 9 km de long est identifiable sur les images satellitaires. La partie amont de ce canal était encore en eau, semblable en apparence à une rivière, à la fin du XIXe s. (Beadnell 1909).

Figure 151 - Vestiges de canal d'époque romaine sur le site KS161 - Aïn Zabiba. La déflation et l'érosion différentielle l'ont mis en relief. Prise de vue : décembre 2011.

X.B.3.b. Playas de drainage

Ces dépôts sont semblables en de nombreux points avec les playas décrites plus tôt. Les principales différences sont les suivantes :

- elles sont systématiquement associées à des parcellaires actuels ou anciens ;
- elles contiennent des fragments de céramiques (ou de plastiques et autres détritus pour les plus récentes) ;

- leur alimentation en eau est plus pérenne car elle correspond au surplus d'eau d'irrigation des parcelles qui sont évacuées vers de petites dépressions ;

- en conséquence, le dépôt de sédiment fin est plus fréquent et régulier que dans le cas des playas et des semi-playas d'origine non anthropique.

Ce type de dépôt se forme donc dans des secteurs où se concentrent les eaux de drainage des parcelles et les eaux usées des oasis (figure 21, p. 52).

X.B.3.c. Lœss sableux et dépôts de champs

Des dépôts sédimentaires semblables à des lœss sahariens par leur apparence générale, mais contenant plus de sables fins ont été observés dans de nombreux secteurs (figure 152). Nous avons choisi de les désigner par le terme de lœss sableux, en raison d'un processus génétique identique (dépôts de sédiments fins et homogènes dans des secteurs dont la végétation renforce la rugosité de surface). Cependant, ces dépôts, dans la très grande majorité des cas, ont été reconnus dans des secteurs occupés par des vestiges de parcellaires ou des parcellaires récents. Les rares cas où les parcellaires n'étaient plus nettement visibles correspondent tout de même à des secteurs d'activités humaines développées, mais on ne peut pas exclure complètement leur formation en dehors de zones agricoles (la coupe F par exemple, qui en l'absence d'éléments de datation, ne peut pour l'heure être reliée à l'occupation de KS060 - Tell-Douch). Cependant, tous les dépôts de parcellaires étudiés appartiennent à cette catégorie des lœss sableux. Ils se forment donc par piégeage des sédiments éoliens sur la végétation entretenue par les oasiens, d'où le choix du terme de « dépôt de champ » qui semble plus exact et plus clair que le terme de « dépôt d'irrigation » employé par I.A. Brookes (1990). À sédimentologie identique, on parlera donc de « lœss sableux » lorsque le contexte agricole de dépôt est incertain ou exclu, et de « dépôt de champ » lorsqu'il est démontré.

Les variations sédimentologiques sont à relier avec des facteurs topographiques locaux, des variations dans le transport sédimentaire éolien, et des pratiques agricoles différentes (protection des parcelles, étagement ou non des cultures, pratique de la jachère, type de végétation cultivée, méthode d'irrigation, durée d'exploitation, etc.). Ces variations mériteraient d'être mieux étudiées, mais il semblerait pour le moment que les secteurs cumulant la présence de palmiers (doums ou dattiers) et de cultures basses aient entretenu les dépôts les plus développés et contenant les sédiments les plus fins. Leur médiane granulométrique oscille entre 110 et 210 µm, et leur épaisseur varie entre quelques décimètres et plus de 20 m (butte de KS260 - Aïn Birqis).

Figure 152 - Dépôt de lœss sableux constitué sur d'anciens champs étagés sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Photographie : Yann Callot, novembre 2014.

X.B.3.d. Tertres artésiens de puits

Semblables aux tertres de sources, ces formations sont généralement plus développées en surface comme en épaisseur, en raison de l'augmentation du débit et de sa pérennité, liées aux travaux de curage (figures 153 et 154). On retrouve généralement au sein de ces tertres des déblais constitués d'un mélange d'argilites et de sédiments éoliens formant de gros agglomérats entassés lors des travaux d'entretien et de nettoyage des cuves et des conduits. Les tertres encore fonctionnels au XXe s. ont presque tous été profondément modifiés par l'ouverture d'une gorge permettant de suivre la baisse du niveau de la nappe due à l'affaiblissement de l'artésianisme sans recourir à des méthodes de relevage de l'eau. Des tertres de ce type ont également été identifiés dans les oasis de Bahariya et de Farafra (Torab 2014). Repérer ces tertres avec certitude est parfois complexe, soit parce que la déflation et la corrasion éolienne en ont profondément modifié la forme, soit parce que l'entretien des puits, les canaux d'irrigation et les cultures les ont largement remaniés ou partiellement recouverts (dépôts de canaux et lœss sableux des dépôts de champs).

Figure 153 - Tertre du puits artésien du site KS209 - Aïn el-Mansouriya, dont la forme circulaire est perturbée par les vestiges archéologiques et les déblais de curage. Prise de vue : novembre 2012.

Figure 154 - Cuve et chenal de déversement du puits artésien du site KS178 - Aïn el-Matrahiyya, vus depuis l'aval. Date: novembre 2014.

La triple interaction entre les facteurs hydrologiques, éoliens et anthropiques sur le temps long, en ce qu'elle produit des formes d'échelles spatiales et temporelles très diverses, explique l'hétérogénéité de cette typologie. Elle demeure bien sûr incomplète, et certaines

formations nécessiteraient la poursuite d'études dans la région. Elle correspond à l'état actuel de notre travail sur les dynamiques éoliennes et sur leurs interactions avec l'artésianisme et les activités humaines dans la dépression de Kharga depuis l'Antiquité. Construite à partir de plusieurs méthodes complémentaires (géomorphologie, sédimentologie, travaux sur des sources anciennes, etc.), elle propose ainsi un cadre et un outil fonctionnels pour les futurs travaux archéologiques et géomorphologiques dans la région et décrit les différentes formes élémentaires constitutives des paysages du vent.

A partir de l'ensemble des résultats présentés dans la partie précédente et dans ce chapitre, il est possible de concevoir des modèles d'évolutions environnementales et paysagères liés à différentes périodes d'occupation à l'échelle régionale et à différents types de sites d'implantation humaine à l'échelle locale. La définition de ces modèles successifs permettra de présenter une synthèse des interactions hommes/eau/vent depuis l'Antiquité et une description diachronique et multiscalaire du système morphogénétique oasien.

Chapitre XI. Morphogenèse anthropo-éolienne, types de sites et modélisation descriptive

L'étude géomorphologique, géohistorique et géoarchéologique de la dépression de Kharga que nous avons menée sur le temps long ne permet pas de décrire précisément des instantanés ou des séquences de l'évolution environnementale à l'échelle d'un site ou d'une coupe. Elle vise au contraire à poser des jalons et à décrire les grandes lignes de l'évolution morphogénétique et environnementale à l'échelle régionale, afin de répondre à la difficulté de reconstituer l'évolution du climat, de l'environnement et de la morphogenèse à partir de sites envoyant des signaux opposés pour une même période.

Le grand nombre de sites d'étude, dont le fonctionnement peut être asynchrone, permet ainsi de dépasser cette difficulté : multiplier les signaux, même (surtout ?) s'ils ne concordent pas, permet de distinguer des tendances générales[137]. Plutôt que de chercher à définir prématurément une chronologie très précise des évolutions environnementales et paysagères dans la région, notre travail s'est donc centré autour de la conception de modèles descriptifs à l'échelle régionale, et d'une typologie des sites d'oasis en fonction de leur évolution morphogénétique. Cette démarche permet de réduire les effets de site et d'analyser, sur le temps long, le rôle des activités humaines dans la formation des paysages du vent en distinguant deux échelles essentielles, locale et régionale. Ces éléments concernent surtout la partie sud de la dépression de Kharga, au sein de laquelle se trouve la majeure partie des sites étudiés. Un travail sur de plus nombreux sites du nord entraînerait probablement des modifications des modèles et la description de nouveaux types de sites.

Ce chapitre présentera donc d'abord des modèles descriptifs d'évolution environnementale et paysagère pour quatre grandes périodes comprises entre le IIIe millénaire avant notre ère et l'actuel. Trois types de sites découlant localement de ces modèles seront ensuite décrits, en fonction des modes d'accès aux eaux du sous-sol, des modes d'irrigation mis en œuvre, et des

[137]. À ce titre, la démarche s'inscrit dans la continuité de l'approche développée par Y. Callot (1987) pour traiter les paléolacs du Grand Erg Occidental en Algérie : le " bruit de fond" de sites très divers est lissé par leur nombre qui permet de faire émerger des tendances " robustes " à partir de fonctionnements parfois opposés.

impacts paysagers de leur exploitation. Enfin, nous reviendrons sur le décalage entre les dynamiques régionales sur le temps long et les dynamiques locales à plus court terme, liées à la mise en place et au fonctionnement d'oasis, en insistant sur le rôle des hommes dans la formation des environnements locaux.

XI.A. Synthèse de l'évolution morphogénétique régionale : les modèles à l'origine des paysages actuels

XI.A.1. De l'aridification aux activités agricoles à l'époque perse (IIIe millénaire avant notre ère - Ve s. avant notre ère) : l'eau et le vent avant les oasis

Afin de mieux définir le rôle des activités humaines dans l'évolution morphogénétique régionale et de proposer des modèles descriptifs convaincants, il est essentiel de décrire précisément le système en fonctionnement depuis l'aridification de la région aux alentours de 4 500 BP et avant la mise en place des oasis.

Les effets de l'aridification climatique ont été limités par les eaux du système aquifère des grès de Nubie : sa recharge ancienne et son volume le déconnectant des variations climatiques à court terme, l'aquifère écrête les variations annuelles et pluriannuelles de la pluviométrie. Les sources artésiennes ont ainsi formé une mosaïque de zones refuges où la végétation a pu se maintenir. Les traces d'occupation datées de cette période dans le bassin sud de la dépression sont toutes concentrées autour de ces sources, principalement sur les collines de grès mais aussi en plaine. Les sources, concentrant à la fois eau, végétation et abri du vent (grâce aux tertres), auraient ainsi servi de lieu de repli pour les pasteurs nomades en migration vers le sud ou vers la vallée du Nil, moins arides, ou d'étapes pour des groupes en déplacement le long de ce qui deviendrait le *darb el-Arbaïn* ou « route des 40 jours » (Smith 1980).

Temporaires, ces occupations ont eu un impact faible sur l'environnement, se limitant à des aménagements légers des sources (Briois *et al.* 2008, 2012) ou à une augmentation des départs de feux de végétation. Le système reposait donc sur deux facteurs : l'eau et le vent ; on peut parler d'évolution paléoenvironnementale et morphogénétique contrôlée par les eaux

souterraines et les apports éoliens (figure 155, encadré en pointillés). Les installations et les activités humaines étaient strictement tributaires de l'activité des sources et limitées dans le temps et l'espace par leur débit. Le quasi-abandon de la partie sud de la dépression, alors que le nord demeurait peuplé pose toutefois question.

Le débit des sources, probablement faible en raison de l'exhaussement progressif des exutoires (par piégeage de sédiment éolien) pourrait avoir joué un rôle : en l'absence de moyens d'extraction de l'eau, les quantités disponibles diminuent drastiquement au fil du temps. En raison des apports sédimentaires, certains griffons de sources ont également pu se combler, alors que l'artésianisme demeurait important par ailleurs, comme en témoignent les vestiges de suintements sur les collines de grès de Taref ou le fonctionnement asynchrone de certaines sources pourtant situées sur une même faille (Bousquet 1996).

Cette mobilité des points d'eau, se déplaçant au fur et à mesure de l'obstruction ou de la désobstruction des griffons, pourrait également expliquer la déprise régionale : pour des groupes nomades, l'absence de points d'eau stables dans la durée constitue une contrainte forte pour les activités pastorales et les longs déplacements.

La topographie des sites à cette époque pourrait correspondre à la représentation proposée dans la figure 156 A.

XI.A.2. De l'époque perse à la fin de la période romaine (Ve s. avant notre ère - Ve s. de notre ère) : une colonisation fondée sur l'exploitation intensive des ressources du milieu permise et limitée par les technologies d'extraction de l'eau

Au contraire, les modifications environnementales devinrent profondes à partir de la reprise de l'occupation du bassin sud de la dépression de Kharga. Le creusement de puits aux emplacements des sources et de qanâts dans les collines (Robin et Bousquet 2000) permit de créer des conditions édaphiques localement propices à une agriculture pérenne, malgré des conditions bioclimatiques régionales hyperarides.

Dénuée de caractère saisonnier, à l'inverse des crues du Nil, cette ressource en eau permit l'installation d'un couvert végétal presque permanent dans les secteurs cultivés, expliquant ainsi l'exhaussement rapide des terres arables. L'ablation a moins de prises sur des sols moins

souvent à nu, et l'augmentation de la rugosité de surface a entraîné la fixation des sédiments fins. Le transport éolien, dans le cas d'un régime de vents monodirectionnel, maximalise le vannage et permet le dépôt de sédiments très homogènes dans l'ensemble de la région. Tant à l'échelle inter-site qu'à l'échelle intra-site, les dépôts se sont donc constitués assez uniformément sur des secteurs de rugosité comparable. Seuls certains des dépôts situés à proximité immédiate de l'erg sont nettement plus sableux en raison d'apports de sables plus grossiers par saltation depuis les dunes.

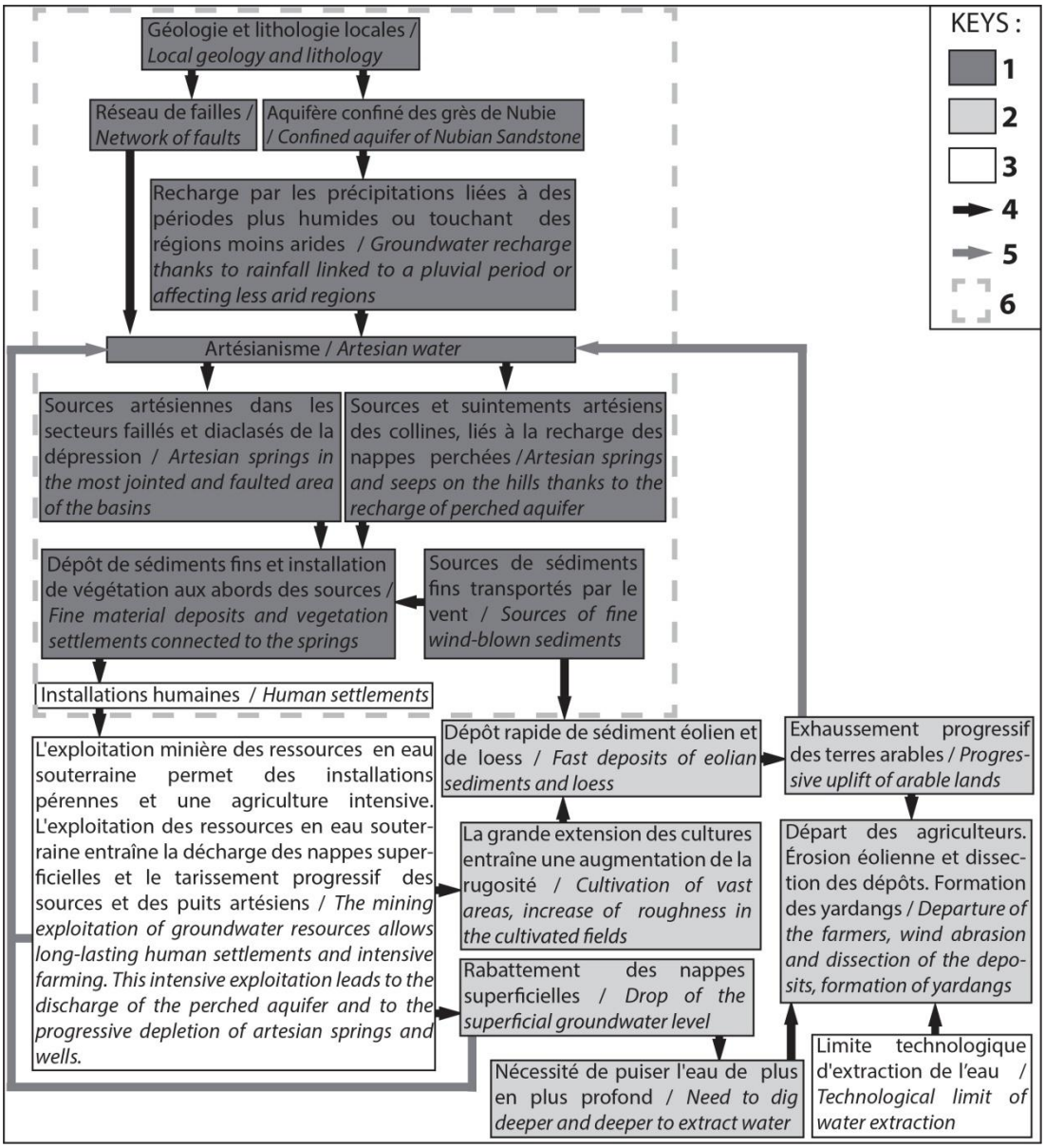


Figure 155 - Modèle d'évolution environnementale et paysagère développé pour la période allant de l'installation des oasis à l'époque perse (Ve s. avant notre ère) jusqu'à la fin de la période romaine marquée par la brusque réduction de l'emprise spatiale des oasis (Ve s. de notre ère).
1. Facteurs mésologiques ; 2. Facteurs anthropo-mésologiques ; 3. Facteurs anthropiques ; 4. Relations entre deux facteurs ; 5. Relations entre deux facteurs impliquant un déséquilibre et nuisant à la durabilité du système ; 6. Dans l'encadré en pointillé : modèle d'évolution environnementale et paysagère pour la période allant de l'aridification de la région (5 800 BP environ) au hiatus dans son occupation humaine (4 500 BP environ).
Ce modèle peut s'appliquer de manière asynchrone sur des sites voisins. Figure tirée de Crépy et Callot (2016).

Les activités agricoles ont donc transformé profondément les processus morphogénétiques de certains des espaces de la région : de zones-sources de sédiment et de transport éoliens, les zones agricoles sont devenues des zones de dépôt. Il n'est pas exclu qu'une partie des dépôts trouve son origine dans le déplacement de sédiments par les oasiens, au gré de leurs besoins. Mais cette hypothèse induit la nécessité de trouver des stocks de sédiments exploitables. Dans un contexte bioclimatique hyperaride, seules les zones végétalisées (végétation spontanée ou cultivée) permettent la constitution de tels stocks. De plus, les déplacements de sols par les oasiens, lorsqu'ils sont observés, se font des points hauts vers les points bas.

Dès l'abandon des sites, quelle qu'en soit la raison, le système bioclimatique régional reprend rapidement le dessus : l'ablation et le transport éoliens redeviennent rapidement la règle, expliquant ainsi les taux d'ablation très élevés (Crépy et Callot 2015).

L'entretien des puits et des qanâts, curés régulièrement, en pérennisant les écoulements, a pu permettre la mise en place d'oasis pluriséculaires, lorsque les conditions étaient réunies ; KS060 - Tell-Douch et KS089 - Aïn Manawir en sont probablement les deux meilleurs exemples. Au contraire, certains sites ont eu un temps de fonctionnement beaucoup plus court, pour des raisons qui demeurent souvent méconnues : si l'abandon des sites de l'erg, cernés par les dunes, paraît (peut-être à tort) simple à expliquer, l'abandon de certains sites de la plaine de Baris ne trouve pas d'explications environnementales immédiates. Peut-être que des travaux plus approfondis permettraient de les identifier, et que les raisons de leur abandon sont à trouver ailleurs, dans des décisions humaines ou des contingences sans lien avec les conditions environnementales.

On peut donc parler d'évolution paléoenvironnementale et paysagère contrôlée par les eaux souterraines, les apports de sédiments éoliens et les activités humaines (figure 155). Ce système oasien implique un déséquilibre : il accroît le dépôt des sédiments, ce qui entraîne un exhaussement progressif des terres arables. Ceci, combiné à la baisse générale du niveau de la nappe du système aquifère des grès de Nubie depuis 7 000 BP (Gasse 2000) amoindrissant la recharge des nappes perchées des collines, réduit en quelques siècles la pression artésienne. Le débit des puits et des qanâts s'est donc affaibli, jusqu'au tarissement dans certains cas (Bousquet 1996).

Les sites où une exploitation particulièrement intensive était menée, tel que KS089 - Aïn Manawir (la colline a comporté au moins 20 qanâts différents - Wuttmann *et al.* 2000) ont ainsi connu une grave crise en lien avec la baisse des débits et le tarissement des nappes.

Lorsque le surcreusement des qanâts (Wuttmann *et al.* 2000) ne suffit plus parce que la surface piézométrique se situe sous la surface de la plaine environnante, l'eau disponible pour l'irrigation manque : un puits nécessitant le relevage de l'eau fournit moins. En l'absence de solutions d'extraction de l'eau plus efficaces, le site est généralement abandonné : à la fin du IVe s. de notre ère et durant le siècle suivant, de nombreuses oasis ont connu une déprise (Wuttmann 2006).

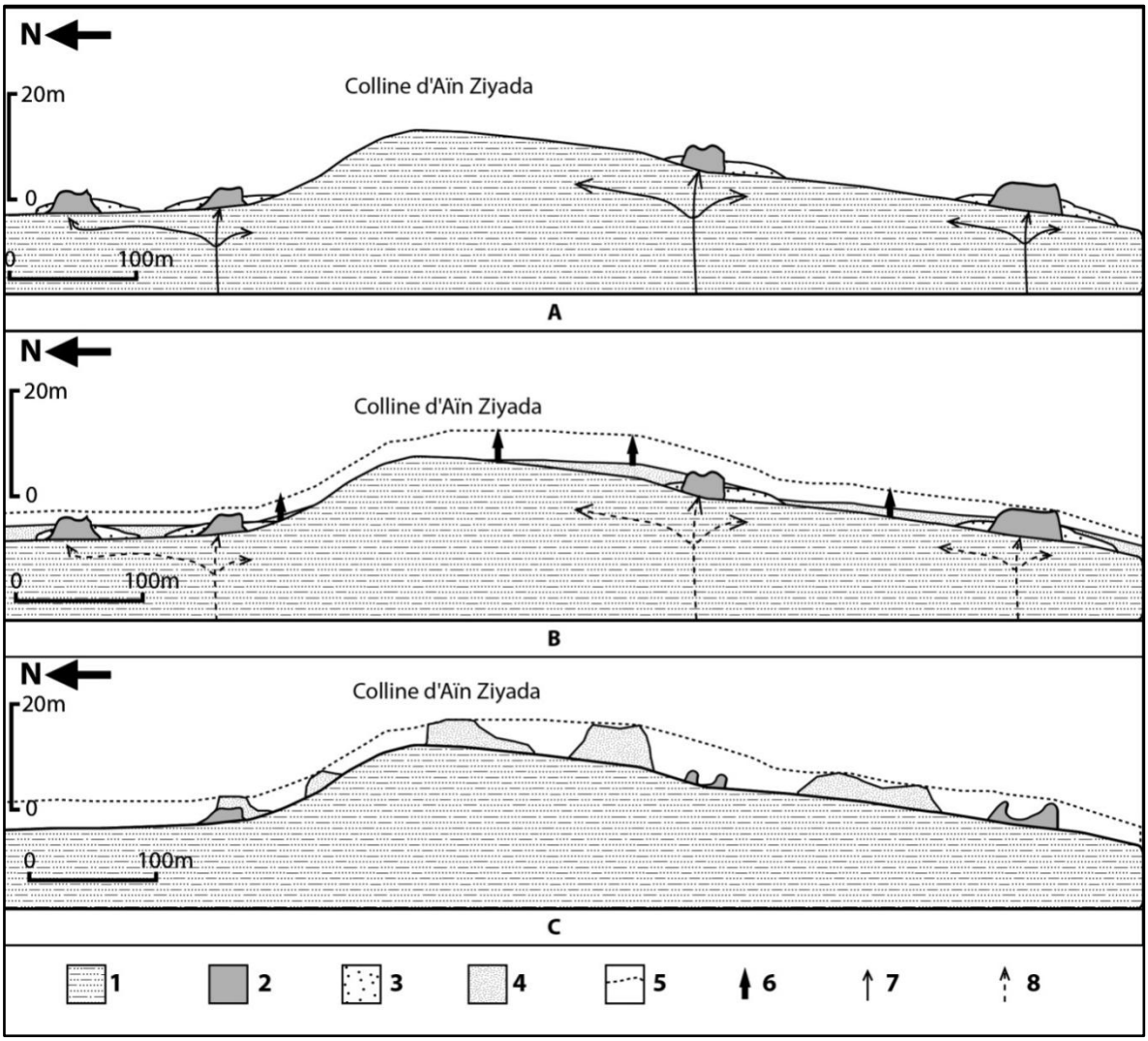


Figure 156 - Reconstitution de l'évolution géomorphologique du site KS88 - Aïn Ziyada.
A. Schéma synthétique de la topographie il y a environ 5 000 ans.
B. Schéma synthétique de la topographie il y a environ 2 000 ans
C. Schéma synthétique de la topographie actuelle.
1. Formation de Taref : grès et schistes argileux ; 2. Ejectas artésiens, fragments de grès et de schistes argileux de la formation de Taref, remaniés et épandus autour des sources ; 3. Dépôts éoliens limoneux et sablo-limoneux liés à l'humidité et la végétation entretenues par les sources : secteurs d'installation privilégiés par les camps temporaires ; 4. Dépôts éoliens limoneux liés aux cultures et activités anthropiques, d'extension plus large ; 5. Niveau maximal supposé des dépôts éoliens liés aux activités humaines ; 6. Exhaussement progressif lié au dépôt éolien sur les champs ; 7. Remontées artésiennes et recharges des aquifères superficiels ; 8. Remontées artésiennes et recharges des aquifères superficiels affaiblies : le processus est devenu insuffisant pour permettre l'exploitation de la plupart des nappes superficielles entre le Ier et le Ve s. de notre ère.
Figure tirée de Crépy et Callot (2016).

Durant la période romaine, qui semble correspondre à un optimum du peuplement du bassin sud de la dépression de Kharga, la topographie a pu correspondre à la reconstitution proposée dans la figure 156 B pour la colline de KS088 - Aïn Ziyada, probablement abandonnée à la fin de cette période (Bousquet 1996). L'uniformité du dépôt est démontrée par le niveau actuel du sommet des yardangs et des vestiges antiques.

A partir de la fin de l'Antiquité, l'érosion et la déflation ont largement modifié les dépôts, sculptant des yardangs à partir de formations plus étendues. La succession de ces deux premiers systèmes morphogénétiques, couplée à la reprise de l'ablation, permet d'expliquer une bonne partie des paysages actuels de la région. On peut le voir au travers de l'exemple de la colline de KS088 - Aïn Ziyada (figure 156 C). Sur les sites où les activités agricoles se sont maintenues (ou ont été ultérieurement remises en place), comprendre la formation des paysages nécessite de prendre en compte des processus légèrement différents (*cf. infra*, II.A.3. et II.A.4.).

XI.A.3. De la fin de l'époque romaine à la fin de la période ottomane (Ve s. - XIXe s.) : contraction des sites, mobilités des activités

A la fin de la période romaine, tous les sites n'ont pas été abandonnés. Certains ont perduré, d'autres pourraient même avoir été nouvellement colonisés[138]. On constate néanmoins une contraction générale des sites : leur nombre se réduit et ils se resserrent autour de quelques axes de failles (*cf.* chapitre IX : Crépy et Callot, à paraître). Les observations de terrain indiquent pour cette époque, deux types de sites principaux :

- des sites très étendus présentant peu de vestiges (à l'exception de parcellaires), et des dépôts peu épais ;
- des sites moins étendus présentant à l'inverse beaucoup plus de vestiges, souvent d'époques différentes, et des dépôts très épais.

Pour cette période, les contraintes restent les mêmes que dans le système précédent, si ce n'est que des stratégies sont mises en place pour pallier la raréfaction générale des ressources en eau. Les oasis deviennent moins nombreuses et plus dispersées. Certaines se pérennisent,

[138]. En l'absence de fouilles ou de sondages sur la plupart des sites et en se fondant uniquement sur les ramassages menés en surface lors des prospections, il est cependant impossible d'en être certain.

particulièrement dans les zones basses situées le long de trois grands axes de failles ; d'autres au contraire ne sont que des champs cultivés épisodiquement sous la forme de parcellaires de campement (*cf.* chapitre IX : Crépy et Callot, à paraître). Les oasiens ont donc dépassé le problème de la limite technologique d'extraction de l'eau en se recentrant sur des puits au débit plus important et en cultivant temporairement des zones étendues, parfois situées assez loin de leurs lieux de vie habituels (près de 15 km dans certains cas, entre Baris et Ezbet Gaga - Beadnell 1909). Deux logiques différentes sont donc combinées : le maintien des activités agricoles à très long terme sur certains sites (KS178 - Aïn el-Matrahiyya, KS260 - Aïn Birqis et Baris) et un semi-nomadisme en fonction du débit des puits et du temps de jachère sur d'autres sites (réemploi de parcellaires romains à KS026 - Aïn Khalil). Ces éléments nécessiteraient des travaux de terrain plus approfondis afin d'être précisés et développés, mais la rareté des sites archéologiques prospectés pour ces époques est un obstacle important. La recherche de sources anciennes sur la région semble donc une solution intéressante pour avancer sur ces questions tant qu'il sera impossible de se rendre sur le terrain.

En l'état actuel des prospections, il apparaît que les sites se sont raréfiés progressivement entre la fin de la période romaine et le XVIIIe s. Durant les dernières décennies de ce siècle et pendant le suivant, les implantations semblent au contraire s'être multipliées, poussées par des mouvements de colonisation à l'initiative des Ottomans (Bousquet 1996), puis par la mise en place de forages plus profonds et plus efficaces (Beadnell 1909).

XI.A.4. Du XIXe s. à nos jours : un retour au modèle antique ?

Le XIXe s. donna donc lieu à une multiplication des sites occupés et à un nouveau développement agricole. De nombreux puits furent forés, parfois en surnombre, provoquant des tarissements rapides par la surexploitation locale des nappes (Beadnell 1909). Après l'arrivée au pouvoir de G.A. Nasser, les forages furent de nouveau encouragés, ainsi que des pompages, dans le cadre du projet « Nouvelle Vallée » (Gummuchian 1975 ; Faggi 1983 ; Faggi et Maury 1987 ; Burmil 2003 ; Tallet *et al.* 2011).

En parallèle, les derniers sites sur puits traditionnels (dont KS178 - Aïn el-Matrahiyya et KS260 - Aïn Birqis) déclinaient lentement, jusqu'à leur abandon dans les années 1960. Il est probable que leur déclin, déjà bien engagé auparavant, ait été précipité par la multiplication des forages, raréfiant localement les ressources en eau disponibles. Les sites constitués sur ou

autour des buttes de lœss sableux se sont donc déplacés vers les plaines et les dépressions environnantes, au plus près de forages modernes. Les rares buttes qui fonctionnent encore actuellement (Ezbet Gaga et Aïn Dakhahin) le doivent à l'installation des forages, puis des pompages, à l'emplacement même des anciens puits, à proximité des points culminants des buttes.

Depuis cette période, le projet « Nouvelle Vallée » a connu deux épisodes de relance et d'investissements dans la dépression de Kharga, la première sous l'impulsion d'Hosni Moubarak dans les années1990 (Drozdz 2011), la seconde étant actuellement en cours, sous l'égide d'Abdel Fatah al-Sissi. Le mouvement actuel de développement des oasis, profitant de moyens techniques permettant d'augmenter et de régulariser les apports en eau, n'est pas sans rappeler la multiplication des sites lors de la période romaine. Si les technologies employées diffèrent, les logiques demeurent les mêmes, avec une intensification de l'exploitation des ressources en eau et la multiplication des infrastructures (qanâts lors de l'époque romaine, pompages et forages profonds aujourd'hui). Il est donc possible que le modèle descriptif présenté pour l'époque romaine (figure 155) s'applique également à l'époque actuelle : si l'artésianisme n'est plus suffisant pour provoquer l'apparition de sources ou de suintements artésiens, il permet encore de limiter les profondeurs de pompage. L'eau ainsi extraite à peu de frais permet d'irriguer le désert, et d'étendre les champs et les surfaces de dépôts éoliens (horizontalement et verticalement). La surface piézométrique pourrait, à terme, passer sous les niveaux accessibles au pompage, ou, du moins, sous les niveaux assurant la rentabilité de l'exploitation de la nappe (Bakhbakhi 2006 ; Soliman 2013). Sans évolution technique dans les méthodes de pompage, une nouvelle période de contraction des sites pourrait donc avoir lieu.

XI.B. Une évolution morphogénétique différenciée à l'échelle des sites

A l'échelle des sites, on observe, en lien avec les modèles présentés ci-dessus, un fonctionnement original : l'agriculture est souvent associée aux phénomènes d'ablation et rarement à des processus de dépôt. Dans la dépression de Kharga, c'est l'inverse : l'agriculture permet l'accumulation, son arrêt réactive les dynamiques d'ablation et de transport. De tels cas ont déjà été identifiés dans d'autres régions du monde, mais le dépôt y est lié directement à

l'irrigation, ou au ruissellement apportant des sédiments au champ, et pas à des apports éoliens. Au Yémen, d'épais dépôts se sont formés à la suite de dérivations d'oueds à des fins agricoles (Coque-Delhuille et Gentelle 1997 ; Gentelle 2003) et de processus de colluvionnement dans des terrasses de culture (Wilkinson 1999, 2003). Dans le nord de la dépression de Kharga, G. Caton-Thompson et E.W. Gardner (1932) ont identifié des dépôts de débordement des puits antiques. C.V.Jr. Haynes (1985) a cependant présenté, à propos des mêmes dépôts, l'hypothèse d'un rôle des apports éoliens sur la végétation. Seul I.A. Brookes (1990), dont le travail se fondait sur l'observation de parcellaires récents, a déjà décrit la formation de dépôts de sédiments éoliens fins sur des champs de l'oasis de Dakhla, qu'il nomme « *irrigation deposits* ». Les dépôts observés dans la dépression de Kharga peuvent en être rapprochés, même si nous préférons les termes de « lœss sableux » (insistant sur leurs caractères sédimentologiques) ou de « dépôts de champs » (rappelant le rôle de l'agriculture dans leur genèse).

A l'échelle locale, ces formes se répartissent de manières différentes selon les types de sites sur lesquels elles se déposent. Nos travaux ont d'ores et déjà permis d'en identifier trois, dépendant de différentes stratégies d'exploitation de l'eau (qanâts, puits unique pérenne, puits multiples) et de gestion des contraintes éoliennes (défense au vent, protection locale, canalisation de l'eau vers des secteurs épargnés et mobilité, fixation volontaire des sédiments).

XI.B.1. Les sites sur qanâts : un déplacement progressif des activités et des lieux de dépôt vers le bas des collines

Les sites sur qanâts constituent le premier type identifié, en raison de l'orientation initiale de nos travaux sur les collines de KS060 - Tell-Douch, KS088 - Aïn Ziyada, KS089 - Aïn Manawir et KS098 - Aïn Boreq. Le travail nécessaire au forage des qanâts et l'éventuel rôle défensif et symbolique des collines (on y trouve des temples et des forts - Reddé 1987, 2004 ; Bousquet 1996) impliquent une occupation longue, sans grande mobilité possible. Pour faire face à l'ensablement, on ne peut déplacer les installations : les stratégies de défense au vent et de protection locale prennent toute leur importance. On peut supposer, même si nous n'en avons pas observé les vestiges, la présence de brise-vent au vent des parcelles. La fixité pluriséculaire des villages et des parcelles implique le dépôt de gros volumes de sédiments.

Pour autant, cela n'implique pas une immuabilité des finages, qui ont connu de grandes modifications. Dans le contexte d'abaissement progressif de la surface piézométrique (renforcé par l'intensification de l'exploitation des eaux souterraines), le principe même des qanâts, et de l'irrigation par gravité associée, implique un déplacement des parcelles cultivées de l'amont vers l'aval[139]. Au fur et à mesure du surcreusement des qanâts pour suivre l'abaissement des nappes perchées, les zones de culture se sont donc déplacées du haut vers le bas des collines afin de se maintenir en aval des exutoires : les vestiges très érodés de champs perses et ptolémaïques se trouvent haut sur les versants, les champs ptolémaïques se situent un peu plus bas, et les champs romains occupent le pied des versants, au bord des dépressions (figure 157). L'étagement des zones cultivées au fil des siècles se traduit également par un étagement des surfaces de rugosité et des dépôts de champs : la sédimentation suit une progression verticale descendante le long des versants.

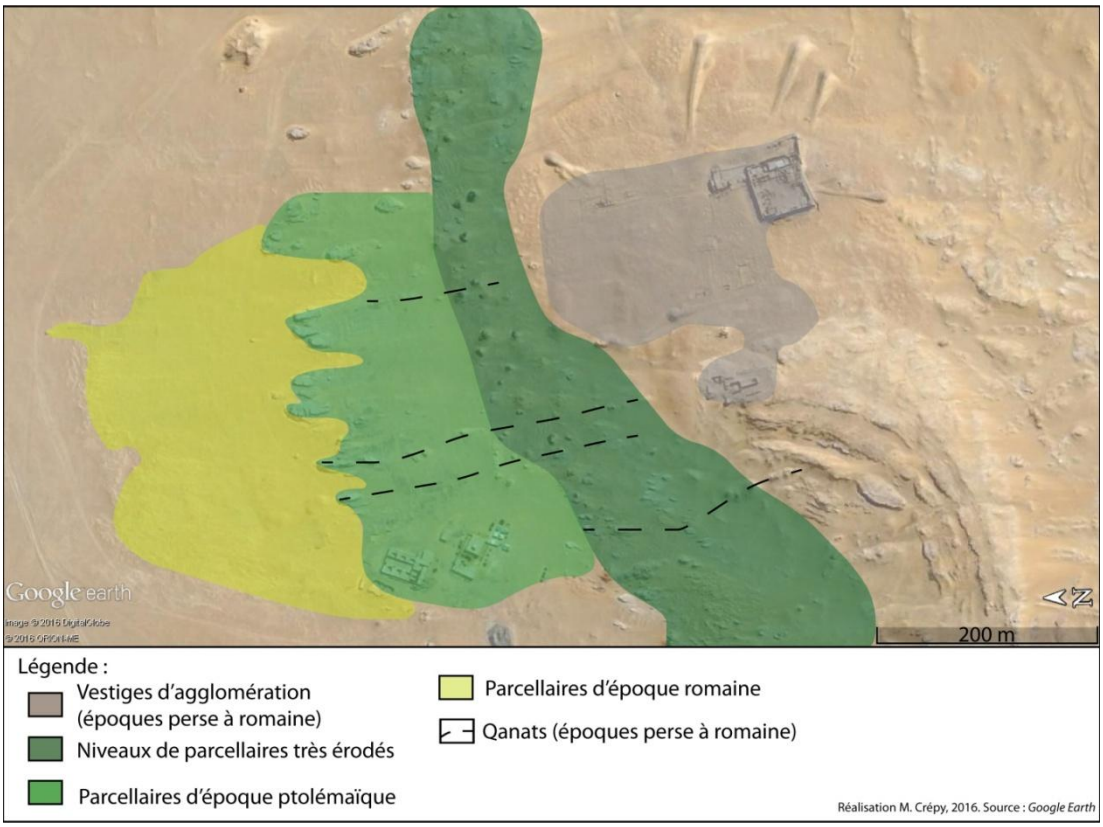


Figure 157 - Distribution des cultures sur le versant nord de la colline de KS060 - Tell-Douch. Le prolongement et le surcreusement des qanats au fil du temps a entraîné un déplacement des parcellaires du haut vers le bas du versant. On trouve ainsi un secteur de parcellaire très érodé, d'époques perse et ptolémaïque, à proximité immédiate de l'agglomération antique. Plus bas, au pied d'une ligne de yardangs suivant un axe est-ouest se trouve un grand parcellaire ptolémaïque. Enfin, les parcellaires romains sont situés au pied de coupes abruptes de plus de 3 m d'épaisseur dans le dépôt exploité à l'époque ptolémaïque. Les grandes ruptures chronologiques coïncident donc avec les principales ruptures dans la topographie des lieux (axe de yardangs séparant le vert sombre du vert pâle, rupture de pente séparant le vert pâle du jaune).

[139]. J. Bisson (2003) a observé et décrit le même type d'étagement de l'amont vers l'aval lié à la baisse progressive de nappes dans des oasis sur foggaras de la région de Timimoun, en Algérie, durant les dernières décennies du XXe s.

À la fin de l'époque romaine, après colonisation du fond des dépressions et percement de puits, l'écart entre le niveau des nappes et le niveau des terres arables est devenu trop important pour permettre l'irrigation par les moyens techniques disponibles et ces sites ont souvent été abandonnés (Bousquet 1996). Fréquents durant l'Antiquité, ils semblent avoir cessé d'être exploités dès la fin de l'époque romaine. Seul un site postérieur est attesté, dans le nord de la dépression : à la fin du XIXe s. un qanât antique creusé dans le plateau éocène donnait encore un peu d'eau exploitée pour l'agriculture (Beadnell 1909). Nous n'avons malheureusement jamais pu nous y rendre.

XI.B.2. Les sites de plaine sur puits pérennes : un système à l'origine des buttes de lœss sableux

Le second type identifié regroupe les sites de plaine qui se sont maintenus durant plusieurs siècles autour de puits au fonctionnement pérenne. Là encore, la fixité des installations a entraîné le dépôt éolien d'un grand volume sédimentaire. A l'image des sites sur qanâts, ceux-ci dépendent grandement de stratégies de défense contre l'érosion éolienne, comme des brise-vents ou des haies au vent, qui s'accompagnent ici de mesures volontaires permettant la fixation des sédiments *in situ*. Ces sites sont à l'origine des buttes de sédiments fins de la région de Baris (décrites au chapitre VII). Ils impliquent donc la formation de dépôts épais et relativement étendus (pouvant dépasser 80 ha), dont la forme est conditionnée à la fois par le débit des puits, les secteurs cultivés, et les zones où les oasiens favorisent le dépôt.

Au fur et à mesure que le débit s'amoindrit, les surfaces irrigables se réduisent et se resserrent autour du tertre du puits, ne permettant aux processus de sédimentation de se maintenir que sur des secteurs plus réduits. Ces buttes présentent donc un étagement progressivement construit. Ainsi sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya on observe (figure 158) :

- des vestiges de parcellaires d'époque romaine correspondant à des dépôts peu épais (2 à 3 m au maximum) mais étendus (environ 40 ha) dans la plaine environnant la colline. La majeure partie de ce parcellaire pourrait se trouver sous les champs actuels au sud. De telles installations supposent un très gros débit ;

- une zone à dépôts plus épais (au moins 10 m par endroit) d'environ 2,7 ha, au sein de laquelle ont été retrouvés des vestiges médiévaux. On peut supposer que ces parcellaires médiévaux se poursuivent sous le reste de la butte, recouverts par les dépôts de champs de

l'oasis des XIXe et XXe s. (pour un total d'environ 10 ha). Cette contraction traduit la réduction du débit, qu'elle soit due à un colmatage partiel du puits ou à un artésianisme plus faible (exhaussement des sols et abaissement de la surface piézométrique) ;

- un parcellaire moderne dont l'étendue en 1930 était de 8 ha environ. Les lœss sableux y sont épais de près de 17 m au maximum. Ce dernier système correspond à une période de très faible débit, probablement conforme aux descriptions de Beadnell (1909).

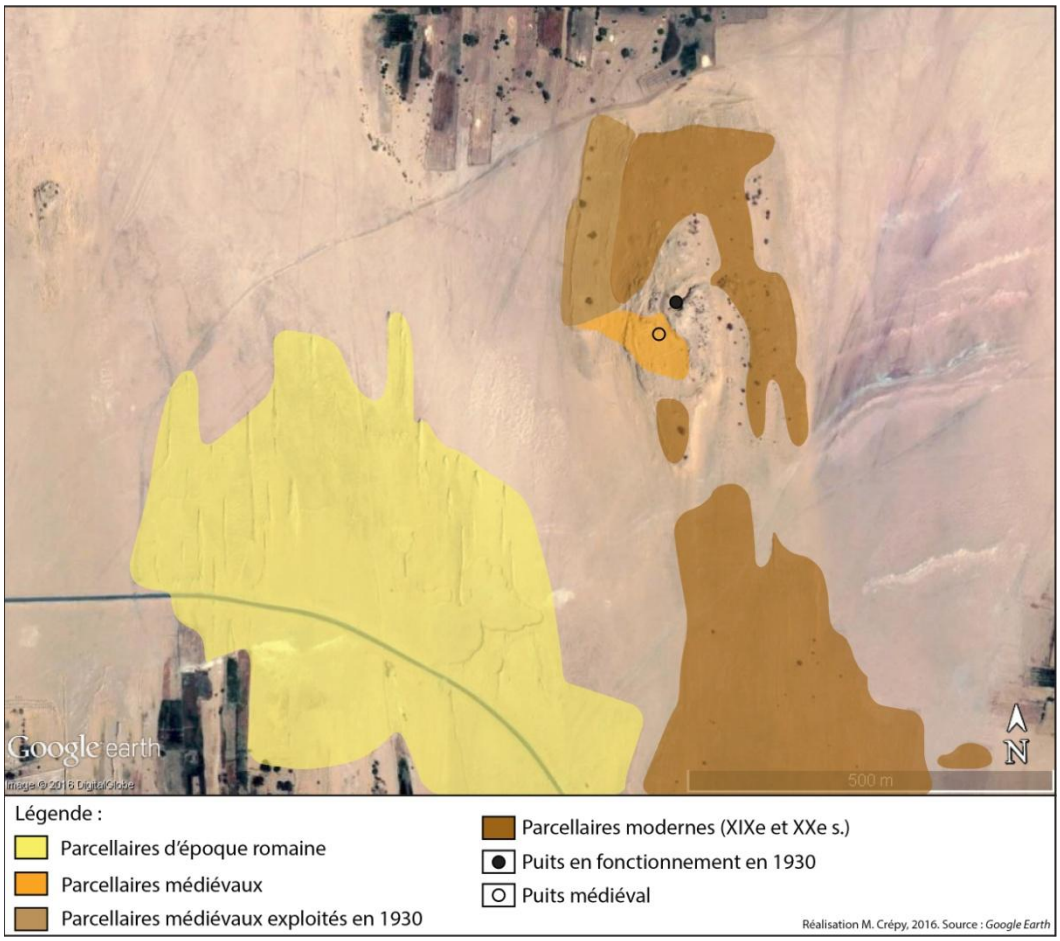


Figure 158 - Distribution des parcellaires à KS178 - Aïn el-Matrahiyya. En plaine, on observe un parcellaire romain très érodé à l'ouest et un parcellaire moderne à l'est (réemploi probable d'un ancien parcellaire romain). Les niveaux les plus bas de la colline présentent des traces d'occupation médiévale. Le sommet, en dehors du tertre artésien, et à l'exception notable d'un puits et de parcelles médiévaux, est occupé par un parcellaire moderne recouvrant probablement des vestiges médiévaux (une telle superposition a été observée sur le nord ouest de la butte). La délimitation entre les parcellaires médiévaux et les parcellaires modernes est abrupte, haute de plusieurs mètres, rappelant en apparence une terrasse de culture, mais non maçonnée.

La sédimentation suit donc une progression ascendante se concentrant progressivement autour des tertres de puits. Ces sites sont surtout attestés pour les périodes médiévales et modernes, et toujours entourés de parcellaires romains étendus autour de canaux en provenance de leur puits principal. Actuellement, ce type de site n'est toujours en activité qu'aux oasis d'Ezbet Gaga et d'Aïn Dakhakhin. Étudier précisément leur fonctionnement serait donc riche d'enseignements.

XI.B.3. Les sites de plaine sur puits multiples ou sur canaux : des dépôts très étendus, mais d'épaisseur réduite

Ce type comprend les zones de plaine dont l'agriculture reposait sur des canaux venant d'un ou plusieurs puits extérieurs au site et/ou sur plusieurs puits situés sur place (figure 159). Il correspond, selon les lieux, à une stratégie de déplacements des cultures vers des zones moins soumises à l'érosion éolienne (canal de 9 km de long à Genah pour éloigner les cultures de l'erg) ou à une mobilité des sites liée à la réduction du débit des puits (comme à Douch à la fin du XIXe s. - Beadnell 1909). Pour compenser le faible apport d'eau par puits, les oasiens pouvaient en utiliser plusieurs en alternance, selon des cycles plus ou moins longs. Dans certains secteurs, les vestiges de puits sont donc très nombreux (figure 160).

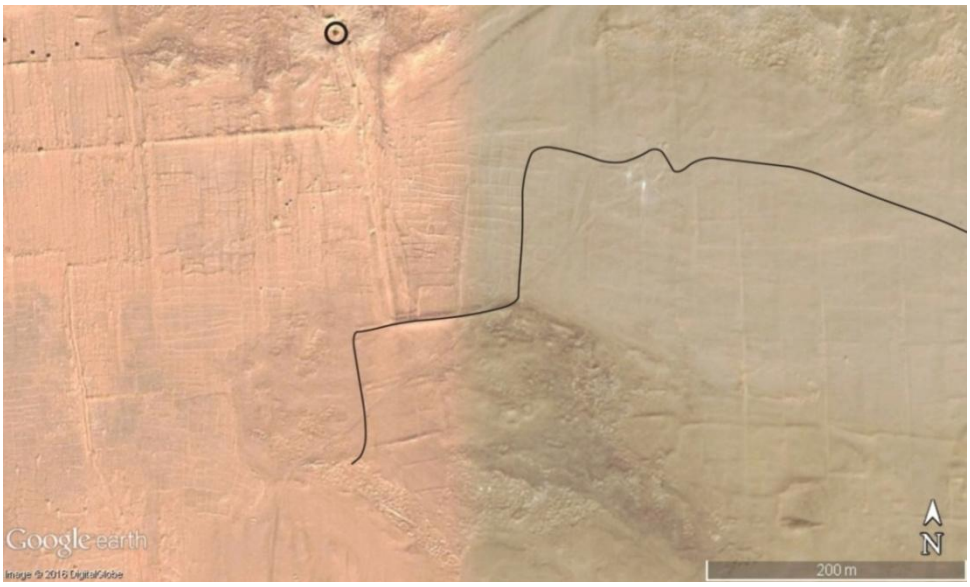


Figure 159 - Image satellite d'une partie du site de KS026 - Aïn Khalil. Le cercle signale un puits, la ligne noire longe la délimitation entre le parcellaire romain non remanié et le parcellaire réemployé à l'époque moderne, reconnaissable à ses parcelles plus petites et moins régulières.

Ces logiques impliquent une plus grande mobilité des parcelles et sont largement défavorables aux plantations arborées et arbustives. Elles permettent une plus grande extension des dépôts de champs, mais une moindre épaisseur (de quelques centimètres à environ 3 m) : la rugosité de surface est moindre, les temps de sédimentation sont plus courts et peuvent être entrecoupés de phases d'ablation. De tels sites dépassent fréquemment la centaine d'hectares (plus de 180 ha à KS026 - Aïn Khalil, presque 300 ha à KS259 - Aïn Birqis-est).

La sédimentation suit sur ces sites une progression surtout latérale : les dépôts s'étendent beaucoup mais s'élèvent peu. Beaucoup d'installations romaines de la région de Baris correspondent à ce type (KS026 - Aïn Khalil, KS161 - Aïn Zabiba, KS259 - Aïn Birqis-est,

ainsi que la plupart des sites de l'erg et de l'extrême sud). Nombre d'entre eux ont été réemployés durant les périodes postérieures, réactivant des phases de sédimentation. De nos jours, de tels sites se développent en marge de la plupart des oasis.

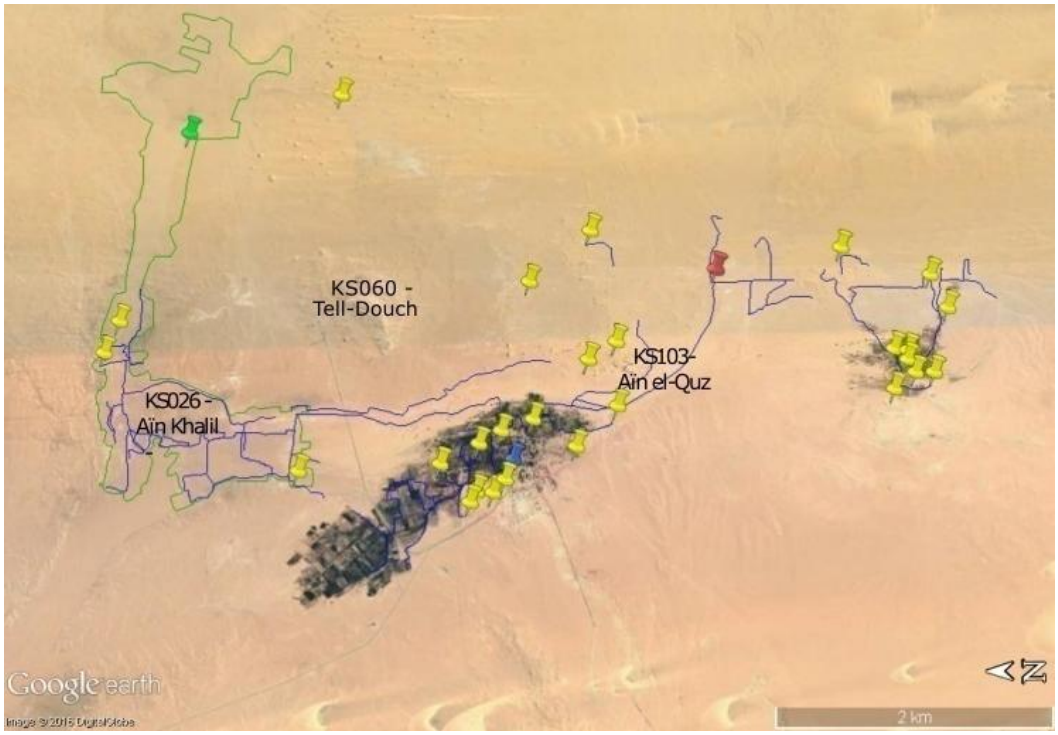


Figure 160 - Image satellite de la zone de Douch. Les lignes bleues représentent des vestiges de canaux. Le polygone vert délimite le parcellaire préservé du site de KS026 Les punaises jaunes indiquent les puits taris, la rouge correspond à Aïn Johar (puits qui alimentait l'oasis de Douch à la fin du XIXe. s. - Beadnell 1909), la bleue signale le pompage actuel et la verte signale un forage abandonné.

XI.C. Raréfaction régionale des ressources sur le temps long et profusion locale liée aux aménagements sur le temps court

XI.C.1. Dégradation environnementale et réduction progressive des ressources en eau : des phénomènes régionaux à macro-régionaux

Les modèles descriptifs et les types de sites identifiés au travers de nos travaux permettent de confirmer la grande tendance régionale de raréfaction des ressources en eau à l'échelle régionale. L'hyperaridité climatique régionale vers 4 500 BP (Sanlaville 1997) a pu voir ses premiers effets limités par l'artésianisme du système aquifère des grès de Nubie. Mais il n'a

pas été rechargé depuis 7 000 ans (Gasse 2000) et il est naturellement, même en excluant les prélèvements humains, déficitaire (Thorweihe 1990) ; il tend donc à se décharger. Sur le temps long de l'Holocène, cette situation a permis la mise en place d'un environnement « hostile » où l'on peut par endroits parcourir des kilomètres sans observer la moindre végétation.

XI.C.2. Le système oasien : un accroissement local de la ressource disponible temporairement déconnecté de l'évolution régionale sur le temps long

Les activités humaines ont pourtant constitué, au sein de cet environnement régional, des sites où l'impression de profusion l'emporte. À première vue incompatibles avec le contexte bioclimatique, les paysages locaux sont largement tributaires des travaux des oasiens à l'origine de la régularisation des apports artésiens et de la diffusion de l'eau dans le désert. Ces modifications profondes de l'environnement et de la morphogenèse ne se limitent pas aux zones agricoles : en marge des oasis, l'épandage des eaux de drainage, le tracé des canaux et les nappes superficielles liés à l'irrigation ont contribué à la construction de paysages et de formations atypiques en milieu hyperaride. Dans un contexte régional de dégradation, les activités humaines ont ainsi permis localement des améliorations à plus ou moins long terme.

Suite à l'abandon d'un site, en raison du tarissement d'un puits ou d'une phase d'ensablement, ou pour des raisons indépendantes de l'environnement physique, le système bioclimatique régional reprend progressivement la main : les sols s'assèchent et l'érosion éolienne reprend, même si certains végétaux (palmiers ou tamarix par exemple) peuvent survivre quelques décennies. Les paysages de la dépression de Kharga sont formés par cette distorsion entre le local et le régional et l'alternance de cycles d'abandon et de recolonisation des sites. Les hommes ont donc tenu un rôle majeur dans l'évolution des formations superficielles de la dépression de Kharga depuis 2 500 ans, en s'affranchissant, au moins partiellement, des conditions environnementales régionales.

XI.C.3. Le poids de l'économie, de la politique et de l'histoire

Les moyens déployés durant l'Antiquité pour parvenir à implanter et maintenir les oasis de la dépression de Kharga, particulièrement celles du bassin sud, après un hiatus de peuplement de

près de 2 000 ans dans l'occupation régionale, interrogent. D'une part, l'eau n'était probablement pas plus abondante au milieu du IIe millénaire avant notre ère qu'au milieu du IVe millénaire avant notre ère. D'autre part, l'ampleur de la colonisation suggère qu'il ne s'agit pas d'une action spontanée d'un groupe d'agriculteurs, mais qu'une volonté politique ou économique et une organisation plus aboutie étaient à l'œuvre. Créer *ex nihilo* des oasis, *a fortiori* dans le désert Libyque, l'une des zones les plus arides au monde, ne s'improvise pas.

Une telle organisation a été mise en évidence dans le sud de la dépression, lors de la fondation du site KS089 - Aïn Manawir à l'époque perse : l'oasis a été créée en lien avec le temple d'Amon à Hibis, dans le nord de la dépression (Chauveau 1998) et les plantations ont été tournées vers une culture de rente, et non vers une exploitation vivrière (Newton *et al.* 2013). Pour l'époque romaine, des logiques similaires, économiques et politiques, ont été démontrées pour la dépression de Kharga par une approche historique (Ferron 2013). A la charnière du XIXe et du XXe s., des logiques semblables ont présidé à la revitalisation des oasis, menée par les Britanniques et dont témoignent les travaux de H.J.L. Beadnell (1909). Enfin, le projet « Nouvelle Vallée » et ses nombreuses relances sont des exemples supplémentaires de ces aménagements volontaristes et partiellement coordonnés, à visée économique et/ou politique. Ces efforts ponctuels dans le temps semblent avoir joué un grand rôle dans les cycles de déprise/reprise au sein de la dépression de Kharga.

Par ailleurs, il est essentiel d'identifier une influence de l'histoire et du passé dans la mise en place de ces projets et dans le développement actuel de la dépression de Kharga. Le projet « Nouvelle Vallée » s'est largement développé à partir d'oasis préexistantes (à l'exception notable de la région d'Oweinat est) alors même qu'il ne s'agit pas forcément des lieux les plus adaptés : le contexte hydrogéologique actuel de la dépression de Kharga n'est pas favorable aux projets de développement, à l'inverse des régions de Farafra et Dakhla (Thorweihe 1990). Cependant, la « Grande Oasis », citée par de nombreux auteurs depuis Hérodote, constitue un symbole qui ne peut être laissé de côté dans les projets de développement de l'État égyptien. De manière plus pragmatique, il est également plus facile de développer des installations préexistantes que d'en créer de nouvelles, d'autant que le passé agricole de l'oasis a permis la formation de terres arables de bonne qualité.

Le politique, l'économie et le caractère symbolique et historique de la région de Kharga ont donc joué (et jouent encore) un rôle central dans son évolution environnementale et dans la formation de ses paysages.

Chapitre XII. Perspectives

Les résultats obtenus ne constituent évidemment pas un point final mais un nouveau bilan intermédiaire, faisant suite, 20 ans plus tard, au travail remarquable de B. Bousquet (1996). Les années consacrées à cette région si riche n'ont pas permis d'approfondir tous les sujets. Plusieurs axes nécessiteraient donc d'être prolongés ou développés. Les conditions actuelles en Égypte ne permettent pas de retourner sur le terrain, mais certains travaux pourraient être menés sans avoir à se rendre sur place.

XII.A. Étendre notre approche dans le désert Libyque

XII.A.I. Approfondir et compléter l'étude des buttes et des yardangs de sédiments fins

L'approfondissement de l'étude de ces formations constitue l'axe le plus évident, et l'un des plus urgents à mener (les aménagements actuels tendent à les détruire). Étudier plus précisément leur sédimentologie est donc une priorité, mais l'inaccessibilité temporaire du terrain limite les possibilités. Heureusement, de nombreuses coupes ont pu être prélevées durant les missions précédentes, en particulier au sein de yardangs d'Aïn Ziyada et de Tell-Douch et de certaines des buttes (KS178 - Aïn el-Matrahiyya, KS260 - Aïn Birqis en particulier). Une mission d'analyses en laboratoire au Caire permettrait donc de développer cet axe.

La réalisation de sondages ou de carottages géoarchéologiques au travers des dépôts de sédiment de KS161 - Aïn Zabiba, de KS178 - Aïn el-Matrahiyya et de KS260 - Aïn Birqis, est également une perspective prometteuse, qu'il faudrait mettre en œuvre si la mission de l'IFAO à Douch se tenait de nouveau. Cela permettrait de préciser les hypothèses de dépôt.

Effectuer un sondage ou un carottage dans l'une des oasis actuelles sur butte de sédiment fin (Dakhakhin et Ezbet Gaga) permettrait de travailler sur une stratigraphie supposée complète de l'Antiquité à nos jours. Accompagner cette démarche par un programme de datation OSL (pour l'instant impossible dans le respect de la législation Égyptienne en raison du manque de

matériel sur place), par la mise en place de pièges à sables dans l'oasis de Gaga ou de Dakhakhin, par un suivi topographique fin, sur plusieurs années, permettrait de quantifier les apports actuels et de produire une description diachronique précise de la formation des buttes de sédiments fins et des dépôts de champs.

Par ailleurs, la partie sud de la dépression est largement surreprésentée au sein de nos sites d'étude ; il serait nécessaire de mener plus de prospections dans les zones centrale et septentrionale. Se rendre sur place est exclu pour le moment, mais la publication très récente de résultats de travaux géoarchéologiques dans le nord, à El-Deir (Bravard *et al.* 2016), laisse entrevoir des possibilités de discussions et d'échanges propices à l'amélioration de la compréhension du système morphogénétique régional et des conditions d'agriculture depuis l'Antiquité, par comparaison entre les deux espaces.

Enfin, étendre l'étude, au moins à partir d'images satellitaires, à l'oasis de Dakhla (à environ 150 km à l'ouest de la ville de Kharga) serait pertinent : cette oasis repose également sur les eaux du système aquifère des grès de Nubie, et on y observe de nombreux édifices très semblables aux buttes de sédiments fins de la dépression de Kharga. A terme, se rendre dans cette région permettrait de vérifier si les modèles et les dynamiques identifiés à Kharga s'y appliquent également ou s'il faut les nuancer et les adapter. Le même genre de travail serait également souhaitable dans les oasis de Farafra et de Bahariya, où des tertres artésiens ont déjà été étudiés (Torab 2014), afin de vérifier si des buttes de sédiments fins ont pu se former et de produire un bilan plus complet du fonctionnement morphogénétique des oasis du sud du désert Libyque, qui partagent la même ressource en eau et les mêmes modes de mise en valeur.

XII.A.2. Enrichir les données concernant les périodes médiévales et ottomanes.

Le corpus de données réuni est satisfaisant, malgré quelques manques, pour l'Antiquité et pour la période courant du XIXe s. à nos jours, mais il mériterait d'être complété entre ces deux périodes, afin de combler une partie des « blancs » de la chronologie ; pour la période allant du VIe à la fin du XVIIIe s., les informations sont lacunaires. Des prospections plus poussées des zones susceptibles d'avoir accueilli des sites durant ces périodes seraient idéales, mais sont inenvisageables, pour le moment. Le recours aux sources anciennes, parce qu'il

permettrait d'obtenir rapidement des données complémentaires doit donc être privilégié. Différentes pistes ont d'ores et déjà été identifiées, mais posent pour l'heure des problèmes pratiques. Tout d'abord, les « Mémoires de Lenoir du Roule sur l'Égypte » transmis en 1701 au chancelier de Pontchartrain, qui mentionnent et décrivent les oasis situées dans la dépression de Kharga (D'Anville 1766), pourraient apporter un éclairage intéressant sur la fin du XVIIe s. ; le manuscrit n'est malheureusement disponible qu'à la Bibliothèque de l'Institut de France, dont les conditions de consultation sont complexes et longues à remplir[140]. Les écrits en arabe d'Al-Idrissi (1100-1165) et d'Aboul Féda (1273-1331) pourraient aussi livrer des informations sur la période allant du XIIe au XIVe s., mais les étudier rigoureusement nécessiterait de lire les documents en arabe (et non des versions traduites). Une collaboration avec un arabophone, si possible un historien intéressé par ces problématiques, serait donc à envisager.

XII.A.3. Mettre en place une étude systématique de la répartition diachronique des sites archéologiques

Une fois le corpus de données complété (ou dès à présent, pour construire un bilan provisoire), un travail d'analyse spatiale de la répartition diachronique des sites archéologiques, croisée avec d'autres données (*GDEM ASTER*, axes de failles, données géologiques, sites actuels) permettrait d'améliorer la compréhension générale des relations hommes/environnement dans la région et de l'histoire du peuplement de la dépression de Kharga. Une étude systématique confrontant l'altitude des sites, leurs époques d'occupation et leur proximité aux axes de failles connus permettrait, par exemple, d'estimer plus précisément le rabattement de la surface piézométrique au fil du temps, et d'en observer les accélérations ou les ralentissements, correspondant à des phases d'exploitation plus ou moins importantes.

[140]. Pour pouvoir consulter un ouvrage dans cette bibliothèque, il faut avoir auparavant été présenté au directeur par deux membres de l'Institut de France.

XII.B. Confronter les typologies et les modèles à d'autres régions du monde

XII.B.1. La nécessaire comparaison avec d'autres oasis artésiennes

Nombreuses en Égypte (Dakhla, Siwa, Farafra et Bahariya), les oasis artésiennes sont aussi présentes dans d'autres régions du monde. Au Sahara, on en trouve en Tunisie, dans la région du Nefzaoua, et dans le Bas-Sahara algérien. Il paraît essentiel, à l'avenir, de comparer le fonctionnement des oasis artésiennes de la dépression de Kharga avec celles d'autres régions égyptiennes et sahariennes, voire plus lointaines. Le peuplement de ces régions est-il aussi ancien et durable ? Selon quelles modalités ? Les modèles descriptifs développés à Kharga s'y vérifient-ils ?

Pour dépasser l'échelle macro-régionale du Sahara, une comparaison avec les sites (actuels ou anciens) sur sources et puits artésiens et/ou sur qanâts dans d'autres secteurs, permettrait d'améliorer la connaissance de ces systèmes et de leur fonctionnement. Les marges arides syriennes apportent à ce titre un éclairage intéressant : la combinaison entre artésianisme et creusement de qanâts (Geyer 2006) et la « Ruée vers l'Est » lors de l'époque byzantine (Geyer et Rousset 2001) rappellent la situation observée dans la région de Baris à l'époque romaine, malgré des différences notables (temps d'exploitation des sites, rôle du climat). Confronter nos résultats à ceux obtenus dans cette région (ou d'autres) permettrait d'identifier des points communs et des divergences, améliorant ainsi les connaissances tant sur les oasis artésiennes que sur les fronts pionniers des marges arides de l'œkoumène.

XII.B.2. Les formes anthropo-hydro-éoliennes, spécificités régionales ?

Les formes anthropo-hydro-éoliennes observées à Kharga ne sont probablement pas uniques et pourraient être étudiées dans les régions oasiennes du monde entier, y compris si leur alimentation en eau n'est pas artésienne. Leur existence repose en effet sur l'essence même des oasis, qui recèlent eau, végétation et activités humaines au sein de contextes régionaux favorables au transport éolien (sécheresse et faible couvert végétal). La typologie proposée au

chapitre X mériterait ainsi d'être complétée par des formations observées dans des oasis du monde entier, reposant ou non sur l'artésianisme. Cette analyse à une échelle plus globale pourrait s'appuyer tant sur un travail de photo-interprétation ou de télédétection que sur des missions de terrain.

Conclusion : un désert durablement marqué par les activités humaines

Bien que provisoires et nécessitant des compléments, les typologies et les modèles descriptifs proposés dessinent la trame générale de l'évolution des paysages de la dépression de Kharga depuis 2 500 ans et démontrent l'importance des activités humaines dans le système morphogénétique régional. Des dynamiques similaires peuvent s'appliquer à différents moments et en différents lieux, voire sur un même site pendant des périodes différentes : des trois types de sites décrits, deux sont attestés durant l'Antiquité, le XIXe s. et de nos jours, avec des impacts morphogénétiques similaires pour toutes ces périodes. Les changements environnementaux rapides sont au cœur des préoccupations et des angoisses contemporaines, mais nous observons ici, à une autre échelle temporelle, la répétition de cycles persistant de l'époque perse à nos jours, qui se surimposent à la trajectoire globale tendant vers la dégradation des conditions environnementales.

Les choix strictement humains et le contexte sociétal, économique ou politique constituent également des facteurs importants intervenant sur la morphogenèse. Les systèmes oasiens de la dépression de Kharga dépendent, pour partie au moins, de décisions prenant peu en compte les facteurs environnementaux : le renouveau du projet « Nouvelle Vallée », en s'appuyant (encore) sur cette région, fait ainsi fi d'un contexte hydrogéologique pourtant peu favorable. Les cycles d'extension/contraction des oasis ne s'organisent donc pas seulement en fonction de fluctuations « naturelles », mais aussi (surtout ?) en lien avec les progrès techniques (extraction ou conservation de l'eau, techniques d'irrigation) et les volontarismes politiques ou économiques.

La construction et les évolutions diachroniques des oasis dépendent donc de facteurs multiples agissant selon des temporalités différentes (disponibilité de l'eau et des sols, niveau technique, choix politiques, contexte économique, commerce transsaharien, conflits, épidémies, etc.). Traiter et comprendre de tels objets impliquent donc de multiplier et de combiner des approches différentes, dans un cadre pluridisciplinaire dépassant largement les limites de la géographie, de l'archéologie et de l'histoire.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consistait en l'explication des conditions de formation des paysages du vent dans la dépression de Kharga depuis 2 500 ans, résultant de processus éoliens, mais aussi de facteurs hydrogéologiques, de conditions édaphiques, et des activités humaines. Il s'est déroulé en trois grandes étapes :

- identifier les processus morphogénétiques à l'œuvre en contexte désertique d'une part, et en contexte oasien d'autre part ;
- étudier l'ensemble des facteurs (climatiques, édaphiques, hydrogéologiques, hydrologiques, topographiques, éoliens et anthropiques) d'évolution environnementale de la dépression de Kharga et déterminer leurs rôles respectifs dans la délimitation entre les espaces oasiens et les espaces désertiques ;
- reconstituer les grandes tendances d'évolution environnementale sur le temps long historique, qui sont à l'origine des paysages du vent que l'on observe aujourd'hui, nés du contraste entre le désert et les oasis.

La première étape n'a pas posé de difficulté majeure parce qu'elle consistait en une description des processus morphogénétiques à l'œuvre et des formations observées, à l'échelle des sites et à un instant donné. La seconde, les processus à l'œuvre ayant évolué au fil du temps, impliquait d'ajouter une profondeur temporelle à la réflexion, et d'y introduire une approche actualiste, nécessaire pour comprendre la signification des nombreux dépôts hérités et pour en produire une analyse paléoenvironnementale. La troisième, visant à la reconstitution des grandes tendances environnementales et paysagères, à partir d'une multiplicité de signaux, concordants ou discordants, nécessitait une réflexion multiscalaire, diachronique, pluridisciplinaire et systémique.

Dans un premier temps, il était essentiel afin de relever ce triple défi, de tirer parti de la riche production scientifique concernant notre terrain d'étude et notre période d'étude. Nous nous sommes donc livré à la présentation des acquis concernant notre terrain d'étude sous l'angle d'une distinction entre les héritages, tant humains que géomorphologiques, et les dynamiques récentes, qu'il s'agisse d'évolution de l'environnement ou des activités anthropiques. Par une présentation du contexte régional de notre zone d'étude, l'Égypte, et plus particulièrement le désert Libyque, nous avons pu montrer l'écart fondamental entre le milieu désertique, découlant du système climatique régional hyperaride, et les zones d'activités humaines, fondées sur des ressources en eau allochtones et « fossiles » : la vallée du Nil et les oasis. Le

fleuve et les ressources en eaux souterraines constituent ainsi des éléments exogènes (le premier parce qu'il provient d'ailleurs, les secondes parce qu'elles sont héritées d'autres temps) qui compensent localement l'âpreté du climat.

Dans la dépression de Kharga, au cœur d'une des zones les plus arides du monde et à l'aridification ancienne, l'artésianisme du Système aquifère des Grès de Nubie, lié au relief et au contexte hydrogéologique, a généré des sources qui ont localement mis en place des conditions édaphiques particulièrement favorables à l'installation de la végétation. L'aménagement de ces zones par les hommes, en régularisant et en augmentant la décharge de la nappe, a donné naissance aux oasis plurimillénaires que l'on observe encore de nos jours. La proximité au point d'eau est une constante du peuplement de la région depuis le début de l'Holocène. Les modalités d'occupation ont beaucoup évolué au fil du temps, d'installations temporaires durant la Préhistoire et jusqu'au début de l'Ancien Empire, à une période de raréfaction des installations entre le milieu du IIIe millénaire avant notre ère et le milieu du Ier millénaire avant notre ère, suivie d'une période de colonisation du Ve s. avant notre ère au IVe s. de notre ère. Depuis lors le nombre de sites s'est réduit, jusqu'à l'introduction de techniques de forages profonds au XIXe s, et à la mise en œuvre de pompages motorisés.

Le panel de sites étudié correspond à différentes périodes (préhistoriques, antique de l'époque perse à l'époque romaine, médiévale, moderne et actuelle), à des durées d'occupation variables (d'une cinquantaine d'années à Koweït, à des siècles à Douch), ainsi qu'à des contextes topographiques et hydrogéologiques variés (butte témoin, colline d'origine tectonique, butte de sédiments fins, plaine, erg). Il permet ainsi une étude diachronique tant à l'échelle locale qu'à celle de la dépression et l'introduction de distinctions de fonctionnement entre les types de sites. Ce bilan permet de constater que la distorsion, depuis 4 500 ans, entre l'aridité climatique régionale et la profusion hydrogéologique et édaphique localisée, renforcée par le statut de front pionnier de la région et par les activités humaines, introduit un jeu d'échelles temporelles et spatiales complexe. Le temps long de la constitution des ressources en eau s'oppose ainsi au temps, très court, de leur exploitation ; l'interaction entre le sable venu de centaines de kilomètres au nord et d'une source ou d'un puits n'irriguant que quelques mètres carrés peut générer, localement, un tertre artésien.

Dans un second temps, il a fallu rendre compte de cinq années de travail sur le terrain et en laboratoire. Le programme initial de recherche ayant été profondément modifié par les événements politiques et sociaux en Égypte, il a fallu adapter nos travaux et nos directions de recherche. Ces questions pratiques, qui ont d'abord été un frein, nous ont poussé à envisager de nouveaux axes qui se sont révélés fonctionnels et complémentaires tant pour aborder les

processus morphogénétiques à l'œuvre que leurs interactions avec les activités humaines. Saisissant l'opportunité rare d'observer l'impact direct d'une pluie dans un milieu hyperaride, nous lui avons consacré une part de notre travail. Les paysages du vent étant au cœur de notre sujet, le reste de nos travaux a été consacré aux effets du vent étudiés selon quatre axes :

- sédimentologie des formations éoliennes ;
- genèse des buttes de sédiments fins ;
- taux d'ablation et de dépôt éoliens sur le temps long ;
- conditions de vie des oasiens du sud de la dépression de Kharga depuis le 5e s. av notre ère.

Ces directions de recherche, en faisant appel à des méthodes variées, ont permis de dépasser les difficultés d'accès au terrain et de résoudre une partie des problèmes scientifiques que posait l'étude des paysages du vent. La combinaison de méthodes de sédimentologie, de traitement d'archives, d'analyse spatiale et de photo-interprétation nous a permis d'identifier différents processus morphogénétiques à l'œuvre dans la région, de nos jours ou dans le passé, et d'en identifier les modalités d'interaction. Grâce au croisement de ces différentes méthodes nous avons pu consolider nos hypothèses, et vérifier la très grande variabilité spatiale et temporelle de l'évolution environnementale et paysagère en fonction des ressources naturelles, mais surtout en fonction de l'utilisation qu'en faisaient les hommes : le vent, qui prédomine dans le système environnemental à l'échelle régionale, voit son impact morphogénétique considérablement modifié par les activités humaines. L'ablation et le transport sont prégnants dans le désert, alors que les oasis et les points d'eau entraînent le dépôt des sédiments. La juxtaposition de ces deux espaces et la proximité entre zones sources et zones de dépôts maximisent les processus d'érosion éolienne dans son ensemble (ablation, transport, dépôt). En fonction des activités humaines, un même espace peut connaître des cycles d'abandon et de recolonisation qui s'accompagneront de changements fondamentaux dans les conditions environnementales et morphogénétiques locales.

Enfin, il était nécessaire de produire une synthèse de nos résultats et de les mettre en relation afin de proposer des clefs de compréhension du système à l'origine des paysages du vent. Une typologie des formations caractéristiques de ces paysages a donc été développée, tant pour constituer un bilan de notre travail que pour proposer un outil fonctionnel dans la description géomorphologique des sites de la dépression de Kharga. Produire cette typologie constituait une étape essentielle afin de faciliter la comparaison entre des sites aux contextes géographiques et archéologiques ou historiques variés.

Cette comparaison a mis en évidence une autre particularité du système, le caractère cyclique et asynchrone de l'évolution de l'environnement à l'échelle des sites, qui ne permet pas de construire une chronologie précise à l'échelle régionale. L'état des oasis dépendant aussi de décisions et d'activités humaines parfois détachées de toute considération mésologique, il est très complexe d'identifier précisément la part de la disponibilité des ressources dans l'abandon d'un site ou dans son développement. Nous avons donc pris le parti de déterminer de grandes tendances de ces évolutions, présentées par des modèles descriptifs mettant en relation des processus naturels et des dynamiques anthropiques.

Si le système a connu quelques modifications entre l'Antiquité et nos jours (baisse progressive du niveau de la surface piézométrique du Système aquifère des Grès de Nubie, moyens techniques d'extraction de l'eau et d'irrigation), son fonctionnement demeure relativement similaire d'une époque à l'autre, depuis la création des oasis à l'époque perse, il y a 2 500 ans environ. Le fonctionnement de deux des trois types de sites identifiés, qui s'est répété de l'Antiquité à nos jours, confirme la relative stabilité de ce système et son caractère cyclique, en fonction de la raréfaction locale des ressources, ou de limites techniques et d'autres facteurs humains. L'économie, la politique et le poids du passé agricole de la dépression de Kharga semblent avoir un rôle majeur dans le développement ou la déprise des oasis et dans la morphogenèse locale : il est donc essentiel de les prendre en compte dans l'évolution de la région.

Les paysages du vent de la dépression de Kharga sont nés de la distorsion entre des conditions régionales, tendant vers une dégradation environnementale liée au climat et à l'amoindrissement progressif des ressources en eaux « fossiles », et des conditions locales tendant vers une amélioration des conditions édaphiques, grâce aux aménagements humains et aux activités agricoles. Lors de l'abandon d'un site, la tendance régionale reprend le dessus. Les paysages du vent, tels que nous les observons dans la dépression de Kharga, doivent donc leur existence et leur maintien, depuis 2 500 ans, aux activités des oasiens. L'abandon des oasis conduirait, à terme, à leur destruction par l'érosion.

En 1996, B. Bousquet a intitulé son ouvrage consacré à l'étude de l'environnement et de l'irrigation dans la région de Douch : *Tell-Douch et sa région : géographie d'une limite de milieu à une frontière d'empire*. Vingt ans plus tard, nos travaux indiquent que cette région a plus probablement été une mosaïque d'oasis dont chaque limite du finage constituait une « limite de milieu » tranchant avec le désert environnant. À une échelle plus régionale, il apparaît que la délimitation entre la région occupée par les oasis et les secteurs situés plus au sud, désertiques, pourrait être due à des facteurs strictement humains : la « frontière

d'Empire » aurait progressivement permis la mise en place d'une limite de milieu résultant d'activités anthropiques, et non l'inverse. Des ressources en eau étaient disponibles plus au sud, ils auraient donc pu être colonisés. Pourtant, ces secteurs n'ont été peuplés que bien plus récemment, à la fin du XXe s. : alors que les ressources naturelles étaient similaires, ils ont donc connu une évolution morphogénétique différente.

Notre recherche pose donc la question, au-delà de la formation des paysages du vent, du rôle et de l'importance relative des facteurs « naturels » et des facteurs anthropiques dans la constitution des milieux, de la géomorphologie des oasis et des interfaces entre espaces oasiens et désertiques. L'imbrication de ces deux milieux marqués par des processus morphogénétiques distincts, voire opposés, donne lieu à des formations éoliennes, hydro-éoliennes, anthropo-éoliennes et anthropo-hydro-éoliennes originales. Plusieurs de ces objets ont pu être identifiés dans la dépression de Kharga. Tenter de les retrouver ailleurs, de les observer et d'en découvrir de nouveaux types est maintenant essentiel afin d'en affiner la compréhension. Le potentiel de l'étude de ces formations dans l'analyse des relations hommes/vents et sociétés/environnements sur le temps long est immense : leur distribution géographique, principalement dans les oasis et sur leurs marges, en fait des témoins de conditions environnementales passées et de stratégies d'adaptation et d'aménagement mises en œuvre par les oasiens. Il s'agit ainsi d'un sujet d'étude prometteur, qui mériterait d'être développé à l'avenir, toujours par une analyse pluridisciplinaire, globale et diachronique.

Bibliographie

Abdourhamane Touré A., Rajot J.L., Garba Z., Marticorena B. Petit C. et Sebag D. (2011) – Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel, *Catena 85,* 205–214.
DOI : 10.1016/j.catena.2011.01.002

Abdrabbo E.M., El Hansy R.M., Hamed K.M. (2000) – Collapsibility of Egyptian lœss soil. *In* Rahardjo H., Toll D.G., Leong E.C., *Unsaturated Soils for Asia: Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils UNAT-ASIA 2000 Singapour*, Balkéma, 595-600.

Abell P., Hoelzmann P. (2000) –Stable Isotopes and Palaeoclimates in NW Sudan.- *Global and Planetary Change*, 26, 1-3: 1-12.

Adams J.M., Faure H. (1997) – Preliminary Vegetation Maps of the World since the Last Glacial Maximum: An Aid to Archaeological Understanding, *Journal of Archaeological Science*, 24, 7,623-647.
DOI : 10.1006/jasc.1996.0146

Adelsberger K.A., Smith J.R. (2010) – Paleolandscape and paleoenvironmental interpretation of spring-deposited sediments in Dakhleh Oasis, Western Desert of Egypt. *Catena*, 83, 7-22.
DOI : 10.1016/j.catena.2010.06.009

Agut-Labordère D. (2014) – L'orge et l'argent. Les usages monétaires à 'Ayn Manâwir à l'époque perse, *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 69, 1, 75-90.

Agut-Labordère D., Newton C. (2013) – L'économie végétale à 'Ayn-Manâwir à l'époque perse : achéobotanique et sources démotiques. *Achaemenid Research on Texts and Archaeology*. 2013.005, 49 p.

Alex M. (1985) – *Klimadaten ausgewählter stationen des vorderen Orients*, Wiesbaden, 418 p.

Ambroggi R.P. (1966) – Water under the Sahara. *Scientific American*, 214, 5, 21-29.

Amit R., Enzel Y., Mushkin A., Gillespie A., Batbaatar J., Crouvi O., Vandenberghe J., An Z. (2013) – Linking coarse silt production in Asian sand deserts and Quaternary accretion of the Chinese Loess Plateau. *Geology*, 42, 1, 23-26.
DOI : 10.1130/G34857.1

Anwar R.M. (1959) – Soil and Land Classification of Baris Plain in El Kharga Oasis. *Publications de l'Institut du Désertd'Égypte*, 12, 1-51

Assalay A. M., Roger C. D. F., Smalley I. J. (1996) – Engineering properties of loess in Lybia. *Journal of Arid Environment*, 32, 373-386.
DOI : 10.1006/jare.1996.0031

Assalay A. M., Roger C. D. F., Smalley I. J., Jefferson I. J. (1998) – Silt :°2-62 µm, 9- 4φ. *Earth-Science Reviews*, 45, 61-88.
DOI : 10.1016/S0012-8252(98)00035-X

Ayeb H. (2011) – La hidropolitica des Egipto: el fracasso de una estrategia hidropolitica. *In* Ayeb, H. (dir), *El agua en el mundo arabe : percepcion global y realidades locales*, Casa Arabe, Madrid, 107-139.

Bagnold R.A. (1941) – *The Physics of blown sand and desert dunes*, Methuen, 265 p.

Bagnouls F., Gaussen H. (1957) – Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 66, 355, 193-220

Bakhbakhi M. (2006) – Nubian Sandstone Aquifer System. *In* Foster S. et Loucks D. (dir.), *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers.* IHP VI, Series on Groundwater n°10, UNESCO/IAH, 75-81.

Balland D. (1992) – La place des galeries drainantes souterraines dans la géographie de l'irrigation en Afghanistan. *In* Balland D. (dir.), *Les eaux cachées. Etudes géographiques sur les galeries drainantes souterraines*. Paris, 97-121.

Barakat H.N. et Baum N. (1992) – *Douch II* : *La végétation antique de Douch (Oasis de Kharga), une approche macrobotanique*. DFIFAO XXVII, IFAO, 105p.

Barnes M. et Fleming D. (1991) – Filtration-Gallery irrigation in the Spanish New World. *Latin American Antiquity*, 2, 1, 48-68.*L*

Bazzana A., Bertrand M., Cressier P., Guichard P., Montmessin Y. (1987) –L'hydraulique agraire dans l'Espagne médiévale. *In* Réparaz A.de, *L'eau et les hommes en Méditerranée.* CNRS, 43-66.

Bazzana A. et Meulemeester J. de (2009) – *La Noria, l'aubergine et le Fellah. Archéologie des espaces irriguées dans l'Occident musulman médiéval (9e-15e siècles).* Archéological Report Ghent University 6, 498p.

Beadnell H.J.L. (1909) – *An Egyptian oasis; an account of the oasis of Kharga in the Libyan desert, with special reference to its history, physical geography, and water-supply*. J. Murray, Londres, 248 p.

Berbrugger A. (1862) – *Les puits artésiens des oasis méridionales de l'Algérie*, seconde édition, Alger, 136 p.

Bergametti G., Gillette D.A. (2010) – Aeolian sediment fluxes measured over various plant/soil complexes in the Chihuahuan desert, *Journal of Geophysical research*, 115.
DOI : 10.1029/2009JF001543

Besançon J., Geyer B., Muhesen S., Rousset M.-O. (2000) –Les plateformes gypseuses et les tertres de source de la région de 'Ayn al Zarqa (Syrie du Nord*). Bulletin de l'association des géographes français*, 77e année, 1. L'eau dans les milieux arides et semi-arides. La mondialisation de la distribution, 10-16.

Besançon, J, Geyer B. (2006) – Chapitre 1 - Contraintes écogéographiques et modes d'occupation du sol. *Les marges Arides du Croissant fertile. Peuplements, exploitation et contrôle des ressources en Syrie du Nord*, Travaux de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 43, 11-54

Billard A. (2000) – Le vent et l'eau dans la construction et le démantèlement du plateau des lœss en Chine. *Bulletin de l'association des géographes Français*, 77, 17-23.
DOI : 10.3406/bagf.200.2143

Bisson J. (2003) – *Mythes et réalités d'un désert convoité : Le Sahara*. L'Harmattan, 479p.

Boëdec F. (2003) – Une approche politique du contrôle de l'eau au Moyen-Orient. *Afrique contemporaine*, 205, 77-98.
DOI : 10.3917/afco.205.0077

Boucharlat R. (2001) – Galeries souterraines de captage dans la Péninsule d'Oman au 1er millénaire avant J.-C. Questions sur leurs relations avec les galeries du Plateau iranien, *In* Briant P. (dir.), *Irrigation et drainage dans l'Antiquité. Qanat et canalisations souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce.* Persika 2, 157-183.

Bousquet B. (1996) – *Tell-Douch et sa région. Géographie d'une limite de milieu à une frontière d'Empire*. Documents de Fouilles de l'Institut Français d'Archéologie Orientale, 31, Le Caire, 368 p.

Bousquet B., Robin M. (2000) – L'eau dans le désert libyque : dépression de Kharga (désert occidental, Égypte). *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 2000, 1, 179-190. DOI : 10.3406/bagf.2000.2144

Bravard J.-P., Mostafa A., Garcier R., Tallet G., Ballet P., Bolo A., Chevalier Y., Tronchère H. (2016) – Rise and Fall of an Egyptian Oasis: Artesian Flow, Irrigation Soils, and Historical Agricultural Development in El-Deir, Kharga Depression, Western Desert of Egypt. *Geoarchaeology: an International Journal,* 1-20, pré-publication
DOI : 10.1002/gea.21566

Bresciani E. (1995) – L'Égypte des satrapes d'après la documentation araméenne et égyptienne. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 139, 1, 97-108.
DOI : 10.3406/crai.1995.15442

Breuning-Madsen H., Awadzi T.W (2004) – Harmattan dust deposition and particle size in Ghana. *Catena*, 63, 23-38.
DOI : 10.1016/j.catena.2005.04.001

Briant P. (2001) – Polybe X.28 et les qanâts : le témoignage et ses limites. *In* Briant P. (dir.), *Irrigation et drainage dans l'Antiquité. Qanat et canalisations souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce.* Persika 2, 15-40.

Brinkmann P.J., Heinl M. (1986) – Numerical ground water model. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen. Reihe A: Geologie und Palaeontologie.* 72, 135–155.

Briois F., Midant-Reynes B., Wuttmann M. (2008) – *Le site épipaléolithique de Ayn Manaweîr (oasis de Kharga, Égypte)*. IFAO, Le Caire, 154 p.

Briois F., Midant-Reynes B. (2010) L'oasis de Kharga dans la Préhistoire : aux origines des cultures prédynastiques. *Archéo-Nil*, 20, 43-50.

Briois F., Midant-Reynes B., Marchand S., Tristant Y. Wuttmann M., De Dapper M., Lesur J., Newton C. (2012) – Neolithic occupation of an artesian spring : KS043 in the Kharga Oasis, Egypt. *Journal of Field Archaeology*, 37, 3, 178-191.
DOI : 10.1179/0093469012Z.00000000018

Brookes I.A. (1990) – Anthropogenic irrigation sediments, Dakhla Oasis, Egypt. *In* Bottema S., Entjes-Nieborg G. et Zeist W.V. (dir.) : *Man's Role in the Shaping of the Eastern Mediterranean Landscape*, 113-125

Brookes I.A. (1993) – Geomorphology and Quaternary Geology of the Dakhla Oasis Region, Egypt. *Quaternary Science Review*, 12, 529-552
DOI : 10.1016/0277-3791(93)90068-W

Brookes I.A. (2003) – Geomorphic indicators of Holocene winds in Egypt's Western Desert. *Geomorphology*, 56, 1-2, 155–166.
DOI : 10.1016/S0169-555X(03)00076-X

Browne W.G. (1799) – *Travels in Africa, Egypt and Syria, from the year 1792 to 1798*, Londres, 496 p.

Brunotte E., Maurer B., Fischer P., Lomax J., Sander H. (2009) – A sequence of fluvialand aeolian deposits (desert loess) and palaeosoils covering the last 60 ka in the Opuwo basin (Kaokoland/Kunene Region, Namibia) based on luminescence dating, *Quaternary International*, 196, 71-85
DOI : 10.1016/j.quaint.2008.06.008

Bubenzer O., Riemer H. (2007) – Holocene Climatic Change and Human Settlement between the Central Sahara and the Nile Valley - Archaeological and Geomorphological Results. *Geoarchaeology*, 22(6), 607-620.
DOI : 10.1002/gea.20176

Burmil S. (2003) – Landscape and water in the oases of Egypt's western desert. *Landscape Research*, 28, 4, 427-440.
DOI : 10.1080/0142639032000150158

Caillaud F. (1821) –Voyage à l'Ouest, *In* Jomard E.F. (éd.) *Voyage à l'Oasis de Thèbes et dans les déserts situés à l'Orient et à l'Occident de la Thébaïde fait pendant les années 1815, 1816, 1817 et 1818, par M. Frédéric Caillaud (de Nantes)*, Imprimerie Royale, Paris, 85-98

Cailleux A., Tricart J. (1959) – *Initiation à l'étude des sables et des galets. Tome 1*. Centre de documentation universitaire, 376 p.

Callot Y. (1987) – *Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental : dynamique éolienne et paléolacs holocènes*. Thèse d'État en Sciences Naturelles, université Pierre-et-Marie-Curie (Paris 6), Mémoires des Sciences de la Terre, 87-21, 412 p.

Callot Y, Marticorena B., Bergametti G. (2000) – Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert. *Geodinamica Acta*, **13,** 245-270.
DOI : 10.1016/S0985-3111(00)01044-5

Callot Y. (2008) – Formations éoliennes. *In* Dewolf Y., Bourrié G. (dir.), *Les Formations superficielles*. Editions Ellipses, 293-320.

Callot Y., Fontugne M. (2008) – The Holocene lacustrine sites in the eastern part of the Great Western Erg (NW Algerian Sahara): geomorphological and paleoclimatic interpretation. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, 187-200

Capot-Rey R. (1953) – *L'Afrique blanche française. II. Le Sahara français*. PU, Paris, 564p.

Caton-Thompson G., Gardner E.W. (1932) – The Prehistoric Geography of Kharga Oasis. *Geographical Journal*, 80/5, 369-409.

Caton-Thompson G. (1952) – *Kharga oasis in prehistory*. Londres, Athlone Press, 213 p.

Chamley H., Coudé-Gaussen G., Debrabant P., Rognon P. (1987) – Contribution des aérosols à la sédimentation quaternaire de l'Ile de Fuertaventura (Canaries). *Bulletins de la Société Géologique de France*, 8,3, 5, 939-952.

Chauveau M. (1998) – Une oasis égyptienne au temps des Perses, *Égypte, Afrique et Orient*, 9, 21-26.

Chauveau M. (2011) – Les archives démotiques du temple de Ayn Manâwir. *Achaemenid Research on Texts and Archaeology*. 2011.002, 19p.

Clos-Arceduc A. (1969) – *Essai d'explications de formes dunaires Sahariennes*, Etude de Photo-interprétation 4, Publications de l'Institut Géographique National, Paris, 66 p.

Collet L.-W. (1926) – L'oasis de Kharga dans le désert libyque, *Annales de Géographie*, 35, 198, 527-534.

Cooke R., Warren A., Goudie A (1993) – *Desert Geomorphology*, UCL Press, 1993, 526 p.

Coque-Delhuille B., Gentelle P. (1998) – Aeolian dust and superficial formations in the arid part of Yemen. *In*: Alsharshan A.S., Glennie K.W., Whittle G.L., Kendall C.St.C (dir.), *Quaternary Deserts and Climatic Change*. Balkéma, 199-208

Côte M. (2012) – *Signatures Sahariennes. Terroirs et territoires vus du ciel*. Presses Universitaires de Provence. 308 p.

Coudé-Gaussen G. (1986) – Observations au MEB de poussières sahariennes prélevées aux Canaries. *Symposium INQUA « Changements globaux en Afrique »*, Dakar, 83-86.

Coude-Gaussen G. (1987) – The perisaharan loess: sedimentological characterization and paleoclimatical significance. *GeoJournal*, 15, 177-183.
DOI : 10.1007/BF00157945

Coudé-Gaussen G. (1991) – *Les poussières sahariennes. Cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques*, Editions John Libbey Eurotext**,** 485 p.

Coudé-Gaussen G. (1995) – L'érosion éolienne : aspects théoriques. *In* Coudé-Gaussen G. et Rognon P. (dir.), *Désertification et aménagement au Maghreb.* L'Harmattan, 153-165.

Coudé-Gaussen G. et Rognon P. (1986) – Paléosols et lœss du Pléistocène supérieur de Tunisie et d'Israël, *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 23, 3-4, 223-231.
DOI : 10.3406/quate.1986.1818

Coursin A. (1964) – Observations et expériences faites en avrile et mai 1956 sur les barkhanes du Souehel et Abiodh (région est de Port-Etienne*), Bulletin de l'I.F.A.N. XXVI*, A, 989-1022

Crépy M., Callot Y. (2015) – Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Egypte), *Revue des Régions Arides 36 - Actes du colloque international Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte*, Institut de Régions arides de Médénine (Tunisie), p. 71-94

Crépy M., Callot Y. (2016) – Les dépôts de sédiments fins dans le sud de la dépression de Kharga (désert libyque, Égypte) : indices d'une morphogenèse éolienne et anthropique, *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*, 22, 3, 325-342
DOI : 10.4000/geomorphologie.11499

Crépy M. et Callot Y. (à paraître) – Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours. *Cahiers de la Céramique Égyptienne 11 : La céramique du désert occidental de la fin du Néolithique à l'époque arabe. La Marmarique, le Wadi Natroun et les oasis de Siwa, Bahariya, Dakhla et Kharga*. IFAO

Crouvi O., Amit R., Enzel Y., Porat N., Sandler A. (2008) – Sand dunes as a major proximal dust source for late Pleistocene loess in the Negev desert, Israel. *Quaternary Research 70*, 275-282.
DOI : 10.1016/j.yqres.2008.04.011

Crouvi O., Amit R., Enzel Y., Gillespie A.R. (2010) – Active sand seas and the formation of desert loess, *Quaternary Science Reviews*, 29, 2087-2098.
DOI : 10.1016/j.quascirev.2010.04.026

Crouvi O., Schepanski K., Amit R., Gillespie A.R., Enzel Y. (2012) – Multiple dust sources in the Sahara Desert: the importance of sand dunes. *Geophysical Research Letters*, 39, Letter 13401.
DOI : 10.1029/2012GL052145

Cruz-Uribe E. (1986) – The Hibis Temple Project. *Journal of the American Research Center in Egypt*. 23, 157–166.
DOI : 10.2307/40001096

Cruz-Uribe E. (1987) – Hibis Temple Project. *Varia Aegyptiaca* 3, 215–230.

Dachy T. (2015) – *Kharga (Egypte) durant la Préhistoire holocène. L'occupation humaine d'une oasis et sa périodisation*. Thèse de doctorat en Préhistoire soutenue le 07/09/2015. Université Toulouse 2, 746 p.

Dare-Edwards A.J. (1984) – Loessic clays of South-East Australia. *Loess Letter: Supplement*, 2, 3-16.
DOI : 10.2307/622237

Dearing J.A., Livingstone I.P., Bateman M.D., White K. (2001) – Palaeoclimate records from OIS 8.0-5.4 recorded in loess-Palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating. *Quaternary International 76-77*, 43-56.
DOI : 10.1016/S1040-6182(00)00088-4

Demangeot J. (2006) –*Les Milieux « naturels » du globe*. 10ème édition, Armand Colin, Collection U, 364 p.

Denis E. (1998) – Les échelles de la densification. Le peuplement de l'Égypte. *Revue de géographie de Lyon*, 73, 3, 183-201.
DOI : 10.3406/geoca.1998.4826

Donner J., Embabi N.S. (2000) – The Significance of yardangs and ventifacted rock outcrops in the reconstruction of changes in the late Quaternary wind regime in the western desert of Egypt. *Quaternaire*, 11, 3-4, 179-185.
DOI : 10.3406/quate.2000.1667

Dregne H.E. (1976) – *Soils of Arid Regions*. Elsevier Scientific Pub. Co., 237 p.

Drovetti B. (1821) – Journal d'un voyage à la vallée de Dakel, par M. le chevalier Drovetti, consul général de France en Egypte vers la fin de 1818, *In* Jomard E.F. (éd.) *Voyage à l'Oasis de Thèbes et dans les déserts situés à l'Orient et à l'Occident de la Thébaïde fait pendant les années 1815, 1816, 1817 et 1818, par M. Frédéric Caillaud (de Nantes)*, Imprimerie Royale,Paris, 1821, p. 99-105

Drozdz M. (2011) – L'Ouest égyptien, une périphérie ? 50 ans d'évolutions socio-territoriales. *M@ppemonde*, 104, 21p.

Dunand F., Heim J.-L., Henein N., Lichtenberg R. (1992) – *Douch 1 : La Nécropole de Douch, Tombes 1 à 72*, DFIFAO XXVI, Le Caire, 369 p.

D'Anville .J.-B.B. (1766) – *Mémoires sur l'Égypte ancienne et moderne suivis d'une description du Golfe Arabique ou de la Mer Rouge.* Paris, Imprimerie Royale, 277 p.

Ebraheem A.M., Riad S., Wycisk P., Seif El-Nasr, A.M. (2002) – Simulation of impact of present and future groundwater extraction from the non-replenished Nubian Sandstone Aquifer in southwest Egypt. *Environmental Geology*, 43, 188-196.
DOI : 10.1007/s00254-002-0643-7

Edmonstone A. (1824) – Voyage à deux des oasis de la Haute-Egypte, *In* J.B. Eyriès et C. Malte-Brun (éd. et trad.), *Nouvelles annales des voyages, de la géographie et de l'histoire XXI*, Paris, 1824, p. 5-177

El Mosallamy M., Abd El Fattah T.T., El Khouly M. (2015) – Experimental study on the determination of small strain-shear modulus of loess soil. *Housing and Building National Research Center Journal*, sous-presse.
DOI : 10.106/j.hbrcj.2014.11.010

El-Shazly M.M., Shata A. (1960) – Contribution to the study of the stratigraphy of el Kharga Oasis, *Bulletin de l'institut du Désert d'Egypte X*, 1, 1960, 1-10

El-Wakil L. (2003) – Hassan Fathy (1900-1989) et André Ravéreau (1919-) : destins croisés. *In* Baudouï R., Potié P., *André Ravéreau, l'atelier du désert.* Editions Parenthèses, 75-84.

Embabi N.S. (1972)–The semi-playa deposits of Kharga depression, Western Desert, Egypt. *Bulletin de la Société de Géographie d'Égypte*, 5, 41-42, 73–87.

Embabi N.S. (1998) – Sand seas of the western desert of Egypt. *In* Alsharshan A.S., Glennie K.W., Whittle G.L., Kendall C.St.C., *Quaternary Deserts and Climatic Change*. Balkéma, 495-509.

Embabi N.S. (1999) – Playas of the Western Desert, Egypt, *Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Geologica-Geographica*, 160, 5-47.

Embabi N.S. (2004) – *The geomorphology of Egypt. Landforms and Evolution Vol.1: The Nile Valley and the Western Desert.* The Egyptian Geographical Society Special Publication, Cairo, 447 p.

Ezzat M.A. (1974) – *Groundwater Series in the Arab Republic of Egypt; Exploitation of Groundwater in El Wadi El Gedid Project Area. Part I-IV*, General Desert Development, Ministry of Water Resources and Irrigation (Egypt), 614 p.

Faggi P. (1983) – Stato e progetti di svilupponel Terzo Mondo : il caso di Al-Sheykh Wali (New Valley - Repubblica Araba d'Egitto). *Materiali 2*,Instuto di Geografia, Padova, 39 p.

Faggi P., Maury R.G. (1987) – Étatisation de l'eau dans le projet « nouvelle vallée » en Égypte. *L'homme et l'eau en Méditerranée et au Proche-Orient, IV, L'eau dans l'agriculture*, Séminaire de recherche 1982-1983 et journées des 22 et 23octobre 1983, Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux, 103-110.

Ferron E. (2013) – Conquête d'un milieu, adaptation à une multitude de réalités : l'exemple de la conquête romaine des espaces oasiens égyptiens. *Conserveries mémorielles* [En ligne], numéro 13, consulté le 25 avril 2014. URL : http://cm.revues.org/1431

Floret C., Pontanier R. (1984) – Aridité climatique, aridité édaphique. *Bulletin de la Société Botanique de France - Actualités Botaniques*, 131, 265-275.

Fryberger S.G., Ahlbrandt T.S. (1979) – Mechanisms for the formation of eolian sand seas. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 23, 4, 440-460.

Gao X., Narteau C., Rozier O. (2015) – Development and steady states of transverse dunes: a numerical analysis of dune pattern coarsening and giant dunes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120, 20 p.
DOI : 10.1002/2015JF003549

Garcier R. et Bravard J.-P. (2014) – La durabilité des oasis : aperçus de géographie historique à partir du cas de l'oasis de Kharga, Égypte. *In* Marshall A., Lavie E., Chaléard J.-L., Fort M., Lombard J. (dir.). *Oasis dans la mondialisation : ruptures et continuités,* Actes du colloque international, Paris, 16 et 17 décembre 2013. 29-36.

Gardner E.W. (1932) – Some Problems of the Pleistocene Hydrography of Kharga, Egypt. *Geological Magazine*, 69, 9, 386-421.

Gardner E.W., Caton-Thompson G. (1952) – The Physiographic settings. *In* Caton-Thompson G., *Kharga oasis in prehistory*, Londres, Athlone press, 1-21.

Gasse F. (2000) – Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1-5, 189-211.
DOI : 10.1016/S0277-3791(99)00061-X

Gaussen H., Bagnouls F. (1952) – L'indice xérothermique. *Bulletin de l'Association des géographes français*, 222-223, 9e année, 10-16

Gentelle P. (2003) – *Traces d'eau : un géographe chez les archéologues.* Paris, Belin, 239 p.

Geyer B. (1999) – *Aridité et sociétés au Proche-Orient. Une problématique géoarchéologique.* Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 168 p.

Geyer B., Rousset M.-O. (2001) – Les steppes arides de la Syrie du Nord à l'époque byzantine ou « la ruée vers l'est ». *In* B. Geyer (dir.), *Conquête de la steppe et appropriation des terres sur les marges arides du Croissant fertile*, T.M.O. 36, Lyon, MOM, 111-121.

Geyer B., Besançon J., Rousset M.-O. (2006) – Les Peuplements Anciens. *In* Jaubert R. Et Geyer B. (dir.), *Les marges arides du Croissant fertile. Peuplements, exploitation et contrôle des ressources en Syrie du Nord*, TMO 43, Lyon, MOM, 55-69.

Geyer B. (2009) – Pratiques d'acquisition de l'eau et modalités de peuplement dans les Marges arides de la Syrie du Nord, *In* al-Dbiyat M. et Mouton M. (dir.), *Stratégies d'acquisition de l'eau et société au Moyen-Orient depuis l'Antiquité : études de cas*. B.A.H. 186, Beyrouth, IFPO, 25-44.

Gibst H.J., Holland W.Y. (1960) – Petrographic and Engineering Properties of loess, *Engineering Monographs*, 28, 42 p.

Giraudi C. (2005) – Eolian sand in peridesert northwestern Libya and implications for Late Pleistocene and Holocene Sahara expansions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 218, 161-173.
DOI : 10.1016/j.palaeo.2004.12.014

Gischler C.E. (1976) – *Present and future trends in water resources development in the Arab States*. UNESCO, Cairo, 114 p.

Goblot H. (1979) – *Les qanâts : une technique d'acquisition de l'eau*, Mouton, 236 p.

Goedicke H. (1981) – Harkhuf's Travel. *Journal of Near Eastern Studies*. 40, 1-20.

Gonon T., Thiers C., Wuttmann M. (2005) – Les qanâts d'Ayn Manawir (Oasis de Kharga, Égypte) : techniques de creusement et dynamique de l'exploitation d'une ressource épuisable, de la Première Domination Perse au IIe siècle de l'ère commune. *Internationales Frontinus-*

Symposium « *Wasserversorgung aus Qanaten – Qanate als Vorbilder im Tunnelbau* ». Bonn, Frontinus Gesellschaft, 39-57.

Goudie A.S. (2002) – *Great Warm Deserts of the World: landscape and evolution*. Oxford University Press, 476 p.

Goudie A.S. (2007) –Mega-Yardangs: A Global Analysis, *Geography Compass*, 1/1, 65-81. DOI : 10.1111/j.1749-8198.2006.00003.x

Goudie A.S. (2013) – *Arid and Semi-Arid Geomorphology*, Cambrigdge University Press, 461 p.

Goudie, A.S. Parker A.G., Bull P.A., White K., Al-Farraj A., (2000) – Desert loess in Ras Al Khaimah, United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments*, 46, 123-135.
DOI : 10.1006/jare.2000.0663

Griffiths J.F. (1972) – The Climate of the United Arabic Republic, *World Survey of Climatology*, vol.10 (Climates of Africa, Ed. by Griffiths, J.F). Amsterdam, London, New York, 79–92

Gumuchian H. (1975) – La République Arabe d'Égypte à la conquête de ses déserts. *Revue de géographie alpine* 63, 2, 225-252
DOI : 10.3406/rga.1975.1415

Habachi L. (1972) – The second Stela of Kamose and his Struggle against the Hyksos Ruler and his Capital. *Abhandlungen des Deutschen Achäologischen Instituts Kairo*, 8, 67 p.

Haynes C. V. Jr. (1985) - Quaternary studies, Western Desert, Egypt and Sudan, 1979-1983 field seasons. *National Geographic Society Research Reports* 19, 269-341

Heinl M.,Thorweihe U. (1993) – Groundwater Resources and Management in SW Egypt. Geopotential and Ecology. *Catena Supplement*, 26, 99-121.

Hereher M.E. (2010) – Sand movement patterns in the Western Desert of Egypt: an environmental concern. *Environment Earth Science*, 59, 1119-1127.
DOI : 10.1007/s12665-009-0102-9

Hermina M. (1990) – The surroundings of Kharga, Dakhla and Farafra oasis. *In* Saïd R. :*The Geology of Egypt*, Balkema, Rotterdam, 259-292.

Hérodote (-484 -420) – *Histoires* III. P.-H.Larcher (trad.), Paris 1850.

Hersen P., Douady S. (2005) – Collision of barchan dunes as a mechanism of size regulation. *Geophysical Research Letters*, 32, L21403, 5 p.
DOI : 10.1029/2005GL024179

Hoskins G.A. (1837) – *Visit to the Great Oasis of the Libyan Desert*, Londres, 338p.

Hrdlicka A. (1912) – The Natives of Kharga Oasis, Egypt, *Smithsonian Miscellaneous Collections 59*, Washington, 153 p.

Humlum J. (1965) – Underjordiske vandingskanaler : karez, qanat, foggara. Deres konstruktion, virka made, geografiske udbredelse og cirkumglobale spredning. *Skrifter fra geografisk Institut*, Arhus, 81-132. Traduction par Michael Friis Jensen, revue par Emmanuel Salesse, disponible dans la base de données de la mission archéologique à Douch.

Ikram S. et Rossi C. (2004) – An Early Dynastic *serekh* from the Kharga oasis. *Journal of Egyptian Archaeology*. 90, 211-215

Issar A.S. (1990) – *Water Shall Flow from the Rock - Hydrogeology and Climate in the Lands of the Bible*. Berlin, Springer Verlag, 213p.

Issar A.S., Zohar M. (2007) – *Climate Change. Environment and history of the Near East*. Berlin, Springer Verlag, 290 p.

Joly F. (2007) – Les eaux sauvages des régions arides. Notions de base sur l'hydrologie des déserts. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2006, 4, 285-298.
DOI : 10.4000/geomorphologie.93

Katsuki A, Nishimori H., Endo N., Taniguchi K. (2005) – Collision dynamics of two barchan dunes simulated using a simple model. *Journal of the Physical Society of Japan*,74, 2, 538-541

Kehl H., Bornkamm R. (1993) – Landscape Ecology and Vegetation Units of the Western Desert of Egypt. *Catena supplement 26*, 155-178.

Kindermann K., Bubenzer O., Nussbaum S., Riemer H., Darius F., Pöllath N., Smettan U. (2006) – Palaeoenvironment and Holocene land use of Djara, Western Desert of Egypt, *Quaternary Science Reviews*, 25, 13-14, 1619-1637.
DOI : 10.1016/j.quascirev.2005.12.005

Kleindienst M.R., Churcher C.S., McDonald M.M.A., Schwarcz H.P. (1999) – Geography, geology, geochronology and geoarchaeology of the Dakhleh Oasis region: an interim report. *In* Churcher C.S., Mills A.J. (dir.) *Reports from the Survey of Dakhleh Oasis, Western Desert of Egypt, 1977–1987*. Oxbow Monograph 99, 1-54.

Kocurek G. **(1998)**, Aeolian system responses to external forcing factors - A sequence stratigraphic view of the Saharan region, *in* Alsharshan A.S., Glennie K.W., Whittle G.L., Kendall C.G.St.C. (dir.), *Quaternary deserts and climatic change*, Baalkema, Rotterdam, p. 327-338

Kuper C. et Kröpelin S. (2006) – Climate-Controlled Holocene Occupation in the Sahara: Motor of Africa's Evolution, *Science*, 313, 5788, 803-807.
DOI : 10.1126/science.1130989

Labiadh M., Bergametti G., Attoui B. et Sekrafi S. (2011) – Particle size distributions of South Tunisian soils erodible by wind, *Geodinamica Acta*, 24 : 1, 37-47
DOI : 10.3166/ga.24.37-47

Laurent J.Y., Albrecht A. (1993) – L'utilisation de la diffraction laser pour la détermination de la granulométrie : application aux sols, agrégats, perte en terre. *Agriculture Intensive dans les Iles de la Caraïbe : Enjeux, Contraintes et Perspectives : Congrès annuel*, Fort de France, 1993, 328-336

Leveau P. (2009) – Les conditions environnementales dans le nord de l'Afrique à l'époque romaine. Contribution historiographique à l'histoire du climat et des relations homme/milieu. *In* Hermon H. (dir.), *Sociétés et climats dans l'empire romain. Pour une perspective historique et systémique de la gestion des ressources en eau dans l'Empire romain.* Naples, Editoriale scientifica, 309-361.

Littmann T. (1989) – Spatial Patterns and Frequency Distribution of Late Quaternary Water Budget Tendencies in Africa. *Catena*, 16, 163–188.
DOI : 10.1016/0341-8162(89)90039-8

Magee P. (2005) – The Chronology and Environmental Background of Iron Age Settlement in Southeastern Iran and the Question of the Origin of the Qanat Irrigation System. *Iranica Antiqua*, 40, 217-231.

Mainguet M. (1995) – *L'Homme et la sécheresse.* Masson, 335 p.

Manassa C. (2012) – Middle Nubian Ceramics from Umm Mawagir, Kharga Oasis. *In* Forstner-Müller I., Rose P., *Nubian pottery from egyptian cultural contexts of the middle and early New Kingdom.* Vienne, Osterreichisches Archäologisches Institut, 129-148.

Marchand S. (2013) – Aïn Manawir et la prospection de l'oasis de Kharga : La Céramique. *Rapport d'activités 2012-2013 - Supplément au BIFAO 113*, 17.

Marticorena B., Bergametti G., Gillette D.A. et Belnap J. (1997) – Factors controlling threshold friction velocities in semi-arid areas of the United States, *Journal of Geophysical research.*, 102
DOI : 10.1029/97JD01303

Marticorena B., Bergametti G., Aumont B., Callot Y., N'Doumé C.N., Legrand M. (1997) – Modeling the atmospheric dust cycle: 2. Simulation of Saharan dust sources. *Journal of Geophysical Research*, **102,** 4387-4404.
DOI : 10.1029/96JD02964

McDonald M.M.A., Hawkins A.L., Kleindienst M.R. (2006) – The Kharga Oasis Prehistory Project (KOPP): research during the 2006 field season. *Nyame Akuma*, 66, 2-15.

Meinzer O.E., Hare R.F. (1915) – *Geology and Water Resources of Tularosa Basin, New Mexico.* United States Geological survey, Water Supply Paper 343. 317 p.

Merzbacher G. (1913) – Die Frage der Entstehung des Lösses, *Petermanns Geographisches Mitteilungen*, 59, Janvier 16-18, Février 69-74, Mars 126-130.

Michel F., Courard L. (2006) – Apport de la granulométrie laser dans la caractérisation physique des fillers calcaires. *Actes de la septième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)^{2}B* , Toulouse, France, 19 et 20 juin 2006, 40-49

Midant-Reynes B., Briois F (2009) – Un site pré-badarien dans l'oasis de Kharga (Égypte) : KS043. *De Méditerranée et d'ailleurs... Mélanges offerts à Jean Guilaine.* Toulouse, Collège de France, 533-541.

Midant-Reynes B. (2010) – De la vallée du Nil aux oasis du désert occidental d'Égypte, *Les nouvelles de l'archéologie* [En ligne], 120-121 | 2010, consulté le 12 août 2015. URL : http://nda.revues.org/1016, 9p.

Mudd G.M. (2000) – Mounds springs of the Great Artesian Basin in South Australia: a case study from Olympic Dam. *Environmental Geology 39 (5).* 463-476.
DOI : 10.1007/s002540050452

Nettleton W.D., Chadwick O.A. (1996) – Late Quaternary, redeposited loess-soil developmental sequences, South Yemen. *Geoderma*, 70, 21-36
DOI : 10.1016/0016-7061(95)00063-1

Neumann K. (1989) – Holocene vegetation of the Eastern Sahara: charcoal from prehistoric sites. *The African Archaeological Review*, 7, 97-116.
DOI : 10.1007/BF01116839

Newton C., Whitbread T., Agut-Labordère D., Wuttmann M. (2013) – L'agriculture oasienne à l'époque perse dans le sud de l'oasis de Kharga (Égypte, Ve-IVe s. AEC). *Revue d'ethnoécologie*[En ligne], 4, consulté le 07 janvier 2014. URL : http://ethnoecologie.revues.org/1294
DOI : 10.4000/ethnoecologie.1294

Nofal R.A. (2002) – *Les yardangs des dépôts des anciennes playas des dépressions du Western Desert d'Égypte : Etude Géomorphologique.* Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille I), Octobre 2002, 248 p.

Nouaouria M.S., Guenfoud M., Lafifi B. (2008) – Engineering properties of loess in Algeria. *Engineering Geology*, 6, 99, 85-90.
DOI : 10.1016/j.enggeo.2008.01.013

Nouboué-Teukeng F.F.D. (2011) – *Bulinus globosus et B. truncatus (Gastropoda : Planorbidae) : variabilité génétique et implications dans la transmission de Schistosoma haematobium au Cameroun*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Université de Yaoundé I. 152 p.

Obruchev V.A. (1911) – The question of the origin of loess – in defence of the Aeolian hypothesis, *Izv. Tomsk. Tekhnol. Inst*., 33.

Osing J. (1990) – Zur Anlage un Dekoration des Tempels von Hibis. *Studies in Egyptology Presenter to Miriam Lichtheim II*, 751-767.

Pachur H.J. et Hoelzmann P. (1991) – Palaeoclimatic implications of Late Quaternary lacustrine sediments in Western Nubia, Sudan. *Quaternary research*. 36, 257-276.
DOI : 10.1016/0033-5894(91)90002-M

Poncet J.C. (1709) – *A Voyage to Aethiopia made in the years 1698,1699 and 1700*, Londres, 138 p.

Ponder W.F. (1986) – Mounds Springs of the Great Artesian Basin. *In* De Deckker P. et Williams W.D. (dir.), *Limnology in Australia*. CSIRO, 403-420

Ponder W.F. (2004) – Desert Springs of the Australian Great Artesian Basin. *In :* Sada, D.W. et Sharpe, S.E. (dir.). *Conference Proceedings, Spring-fed Wetlands: Important Scientific and Cultural Resources of the Intermountain Region, May 7-9, 2002, Las Vegas. NV.* Desert Research Institute. http://www.dri.edu/images/stories/conferences_and_workshops/spring-fed-wetlands/spring-fed-wetlands-ponder.pdf

Rathjens C. (1928) – Löss in Tripolitanien. *Zeitschrift der Gesellsachaft zur Erdkunde zu Berlin*, 211-228.

Reddé M. (1987) – Une ville romaine dans le désert oriental d'Égypte : Douch. *Bulletin de la Société Française d'Archéologie Classique*, 1, 215-220.

Reddé M. (2004) – *Douch III. Kysis. Fouilles de l'IFAO à Douch, Oasis de Kharga (1985-1990).* DFIFAO 42, Le Caire, 258 p.

Rennell J. (1800) – *The Geographical System of Herodotus Examined; and Explained by a Comparison with those of Other Authors and with Modern Gerography.* Bulmer and Co., 767 p.

Riemer H. (2006) – Archaeology and Environment of the Western Desert of Egypt: 14C-based human occupation history as archive for Holocene palaeoclimatic reconstruction. *In* Youssef S.A.A.0 (dir.), *Geology of the Tethys*. Cairo, The Tethys Geological Society, 553–564.

Riemer H., Kindermann K. (2008) – Contacts between the Oasis and the Nile: A résumé of the Abu Muhariq Survey 1995-2002. *In* Midant-Reynes B., Tristant Y. (dir.), *Egypt at its Origins 2. Proceedings of the International Conference "Origin of the State. Predynastic and Early Dynastic Egypt", Toulouse 2005. Orientalia Lovaniensia Analecta 172.* Leuven, 610-633.

Robin M., Bousquet B. (2000) – L'eau dans le désert libyque : dépression de Kharga (désert occidental, Egypte). *Bulletin de l'Association des Géographes Français.* 77, 4, 24-32.
DOI : 10.3406/bagf.2000.2144

Rögner K., Knabe K, Roscher B., Smykatz-Kloss W., Zöller L. (2004) – Alluvial loess in the Central Sinaï: Occurence, origin, and palaeoclimatological consideration. *In* Smykatz-Kloss W., Felix-Henningsen P., *Palaeoecology of Quaternary Drylands - Lectures Notes in Earth Sciences 102*, 79-99.
DOI : 10.1007/978-3-540-44930-0_6

Rognon P. (1994) – *Biographie d'un désert - Le Sahara*. L'Harmattan, 350p.

Rossi C., Ikram S. (2013) – Evidence of desert routes across northern Kharga (Egypt's Western Desert). *In* Förster F., Riemer H., *Desert Road Archaeology in Ancient Egypt and Beyond*. Africa Prehistorica 27, 265-282.

Palluault S. (2012) – L'achèvement de la Grande Rivière artificielle en Libye : et maintenant, quelle gestion de l'eau ? *Méditerranée* [En ligne], 119 | 2012, mis en ligne le 30 novembre 2014, consulté le 13 août 2015. http://mediterranee.revues.org/6396, 9-16.

Saïd R. (1993) – *The Nile river: Geology, hydrology and utilization*. New-York, Pergamon Press, 320 p.

Salem O.M. (1992) – The Great Manmade River Project. *Water Resources Dev.*, 8, 4, 270-278.

Sanlaville P. (1997) – Les changements dans l'environnement au Moyen-Orient de 20000 à 6000 BP. *Paléorient*, 23, 2, 249-262.
DOI : 10.3406/paleo.1997.4664

Schild R., Wendorf F. (2001) – Geomorphology, Lithostratigraphy, Geochronology and Taphonomy of Sites. *In* Wendorf F., Schild R., *Holocene settlement of the Egyptian Sahara . Vol. 1, The archaeology of Nabta Playa*, Dordrecht, Kluwer Academic,11-50.
DOI : 10.1007/978-1-4615-0653-9_2

Simons P. (1973) – Der Osten der Sahara. *In* Schiffers H. (dir.), *Die Sahara und ihre Randgebiete. Vol.3 Regionalgeographie*, München, 433-535.

Smalley I. (1995) – Making the Material : the Formation of Silt-sized Primary Mineral Particles for Loess Deposits, *Quaternary Science Reviews*,14, 645-651.
DOI : 10.1016/0277-3791(95)00046-1

Smith A.B. (1980) – Domesticated cattle in the Sahara and their introduction into West Africa. In Williams M.A.J. and Faure H. (Eds), The Sahara and The Nile: Quaternary Environments and Prehistoric Occupation in Northern Africa, Balkema, Rotterdam, 607 p.

Smith B.J.,Wright J.S., WhalleyW.B. (2002) – Sources of non-glacial, loess-size quartz silt and the origins of "desert loess". *Earth-Science Reviews* 59, 1-26.
DOI : 10.1016/S0012-8252(02)00066-1

Smith H.S., Smith A. (1976) – A Reconsideration of the Kamose Texts; *Zeitschrift fur Ägyptische Sprache und Altertumskunde*, 103, 48-76.

Sohma H., Wushiki H. (2010) – Underground Irrigation Canals in the Arid Regions through the High-resolution Satellite Images and Field Works. *Journal of Arid Land Studies*, 21, 2, 75-79.

Soliman, K.H. (1972) – The Climate of the United Arabic Republic. *In* Griffiths J.F. (dir.), *Climates of Africa*,World Survey of Climatology, *10*, Amsterdam, London, New York, 79–92

Soliman S.M. (2013) – Mitigation of Excessive Drawdowns via Rotational Groundwater Withdrawal (Case study: El Kharga Oases, Egypt). *New York Science Journal*, 6, 1, 118-123

Stahr K., Jahn R., Huth A., Ganer J. (1989) – Influence of eolian sedimentation on soil formation in Egypt and Canary Island Deserts. *Catena Supplement*, 14, 127-144.

Stokes S., Horrocks J., (1998). A reconnaissance survey of the linear dunes and loess plains of northwestern Nigeria: granulometry and geochronology. In: Alsharhan, A.S., Glennie, K.W., Whittle, G.L., Kendall, C.G.S.C. (dir.), *Quaternary Deserts and Climatic Change*. Balkéma, 165-174

Strabon (-64 - entre 21 et 25) – *Géographie.* Tome 1 - 2ème partie. Trad. G. Aujac, Les Belles Lettres, Paris, 1969, 197 p.

Sutcliffe J.V., Parks Y.P. (1999) – *The Hydrology of the Nile.* IASH Special Publication no.5, 192 p.

Tallet G., Bravard J.-P., Garcier R.J. (2011) – L'eau perdue d'une micro-oasis. Premiers résultats d'une prospection archéologique et géoarchéologique du système d'irrigation d'El-Deir, oasis de Kharga (Égypte). *In* Abadie-Reynal C. et Vipard P. (dir), *Histoire des réseaux d'eau courante dans l'Antiquité -réparations, modifications, réutilisations, abandon, récupération.* Nancy, Presses Universitaires de Nancy, 173-188.

Tallet G. (2014) – Culture matérielle et appartenances ethniques : quelques questions posées par les nécropoles d'El-Deir (oasis de Kharga, Égypte). *Dialogues d'Histoire Ancienne supplément 10*, 219-255.
DOI : 10.3917/dha.hs91.0219

Thorweihe, U. (1990) – Nubian Aquifer system. *In* Saïd R., (dir.) *The Geology of Egypt*, Balkema, Rotterdam, 734 p.

Torab M. (2014) – Geomorphology of fossil springs mounds in some selected portions of Western Desert Oasis of Egypt. *In* Efe R., Ozturk M. (dir.) *Environment and Ecology in the Mediterranean Region II*, Cambridge Scholars Publishing, 317-329.

Traboulsi M., Sanlaville P., Blanchet G. (1997) – Le Moyen-Orient de 20000 ans BP à 6000 ans BP. Essai de reconstitution paléoclimatique. *Paléorient*, 23, 2, 187-196.
DOI : 10.3406/paleo.1997.4660

Tsoar H., Pye K. (1987) – Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 34, 139-153.
DOI : 10.1111/j.1365-3091.1987.tb00566.x

Vermeesch P. (2011) – Solitary wave behavior in sand dunes observed from space. Geophysical Research Letters, 38, L22402, 3 p.
DOI : 10.1029/2011/GL049610

Vogg R., Wehmeier E. (1985) – Arid environment and land classification of the South Valley, Toshka. *Journal of Arid Environments*, 9, 1-12.

Wagner G. (1987) – *Les oasis d'Egypte à l'époque grecque, romaine et byzantine d'après les documents grecs (recherches de papyrologie et d'épigraphie grecques)*, IFAO, Le Caire, 436 p.

Wendorf F., Schild R. (1980) – *Prehistory of the Eastern Sahara*. Academic Press, New-York, 414 p.

Whittington D., Guariso G. (1983) – *Water Management Models in Practice: A Case Study of the Aswan High Dam*. Amsterdam, Elsevier, 268 p.

Wilkinson T.J. (1999) – Settlement, soil erosion and terraced agriculture in highland Yemen: a preliminary statement. *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies*, 29, 183-191.

Wilkinson T.J. (2003) – *Archaeological Landscapes of the Near East*. Tucson, The University of Arizona Press, 260 p.

Wilson I.G. (1971) – Desert sandflow basins and a model for the development of ergs. *Geographical Journal*, 137-2, 180-199
DOI : 10.2307/1796738

Worman S.L., Murray A.B., Littlewood R., Andreotti B., Claudin P. (2013) – Modeling emergent large-scale structures of barchan dune fields. *Geology*, 41, 10, 1059-1062

Wright J.S. (2001) – "Desert" loess versus "glacial" loess: quartz silt formation, source areas and sediment pathways in the formation of loess deposits. *Geomorphology*, 36, 231-256.
DOI : 10.1016/S0169-555X(00)00060-X

Wuttmann M., Bousquet B., Chauveau M., Dils P., Marchand S., Schweitzer A., Volay L. (**1996)** – Premier rapport préliminaire des travaux sur le site de Ayn Manæwîr (oasis de Kharga), *BIFAO* 96, p.385-451,

Wuttman M., Barakat H., Bousquet B., Chauveau M., Gonon T., Marchand S., Robin M., Schweitzer A. (1998) – Ayn Manawir (oasis de Kharga). Deuxième rapport préliminaire. *BIFAO 98*, Le Caire, 367-462.

Wuttmann M., Gonon T., Thiers C. (2000) – The Qanats of 'Ayn Manawir (Kharga Oasis, Egypt). *Proceedings. The First International Symposium on Qanat, Yazd, Iran May 8-11, 2000*, vol. 4, Yazd, 162-169.

Wuttmann M. (2001) – Les Qanâts de 'Ayn Manâwir (oasis de Kharga, Égypte). *In* Briant P., *Irrigation et drainage dans l'Antiquité, qanâts et canalisations souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce*. Persika 2, 109-135.

Wuttmann M. (2006) – La prospection du sud de l'oasis de Kharga. *In* Pantalacci L. et Denoix S. (dir.) : *Travaux de l'Institut français d'archéologie orientale en 2005-2006*,BIFAO, 106, , 334-453.

Wuttmann M., Dachy T (2012) – Aïn Manawir et la prospection de l'oasis de Kharga : La prospection et la carte archéologique de Kharga. *Rapport d'activités 2012-2013- Supplément au BIFAO 112*, p. 4-10

Wuttmann M., Dachy T., Briois F. (2013) – Aïn Manawir et la prospection de l'oasis de Kharga : La prospection et la carte archéologique de Kharga. *Rapport d'activités 2012-2013 - Supplément au BIFAO 113*, 18-22.

Yaalon D.H., Dan J. (1974) – Accumulation and distribution of loess-derived deposits in the semi-desert and desert fringe areas of Israel. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband 20*, 91-105.

Yaalon D.H., Ganor E. (1979) – East Mediterranean trajectories of dust carrying storms from the Sahara and Sinai. *In* Morales C. (dir.) *Saharan Dust: Mobilization, Transport, Deposition*, Wiley, 187-193.

Table des figures

Figure 1 - Grandes unités géographiques de l'Égypte. 18
Figure 2 - Carte des isohyètes des précipitations annuelles moyennes en Égypte d'après Embabi (2004). 20
Figure 3 - Carte de direction des vents actuels et des paléo-vents holocènes. Modifié d'après Donner et Embabi (2000) et Hereher (2010). 22
Figure 4 - Cartes des grandes unités et des oasis de la dépression de Kharga. 27
Figure 5 - Carte des grandes unités du bassin sud de la dépression de Kharga. 28
Figure 6 - Yardangs fins orientés nord-sud formés dans des dépôts de sédiment, à l'est de Baris, dans le sud de la dépression de Kharga. Image satellitaire de mars 2010. 30
Figure 7 - Système Crêtes-Couloirs sur le plateau calcaire au nord-est de Baris. Image satellitaire de mars 2004. 31
Figure 8 - Modèle numérique d'élévation d'une résolution de 30 m (GDEM ASTER, source : NASA) et principales failles connues de la dépression de Kharga. Les failles sont en apparence moins nombreuses dans les parties les plus basses, mais il s'agit d'un biais lié au comblement sédimentaire de ces zones qui masque la plupart des accidents touchant les formations sous-jacentes. Réalisé avec ArcMap 10 à partir du GDEM ASTER et de la carte géologique numérique vectorielle de l'Égypte (échelle la plus fine d'environ 1:8000). 36
Figure 9 - Tertre d'une ancienne source artésienne (*spring mound*) à l'est de KS060 - Tell-Douch. A proximité, se trouvent des concentrations lithiques, vestiges d'occupations préhistoriques, et, à quelques centaines de mètres vers l'est, des parcellaires antiques. Sauf indication contraire, les clichés sont réalisés par l'auteur. Prise de vue : novembre 2010. 40
Figure 10 - Dépôts de playas érodés sur le site KS097. Les polygones de dessiccation, profonds et comblés par des sables fins, résultent de l'assèchement des dépôts. La corrasion éolienne est à l'origine de l'érosion des dépôts. Les concentrations lithiques, vestiges d'occupations préhistoriques, sont nombreuses dans le secteur. Prise de vue : décembre 2011. 40
Figure 11 - Frise chronologique représentant les principales variations climatiques et les principaux repères chrono-culturels dans le sud de la dépression de Kharga. Pour plus de précisions sur la périodisation relative à la Préhistoire, voir Dachy (2015). Le gris sombre indique les données tirées de Wendorf et Schild (1980), le gris moyen indique les données tirées de Sanlaville (1997) et le gris clair met en évidence le hiatus d'occupation de la région (correspondant à l'Ancien Empire, au Moyen Empire et au Nouvel Empire dans la vallée du Nil). Ar. : période aride à hyperaride ; Pl. :période dite « pluviale », période moins aride. 1. Époque perse ; 2. Époque ptolémaïque ; 3. Époque romaine ; 4. Époque byzantine ; 5. Époque arabe pré-mamelouke ; 6. Époque mamelouke ; 7. Époque ottomane ; 8. Époques moderne et actuelle. Figure tirée de Crépy et Callot 2016. 42
Figure 12 - Versant sud de KS060 - Tell-Douch. Au moins six qanâts différents, indiqués par les pointillés, sont identifiables. Leur sens d'écoulement va du nord vers le sud. Image satellitaire de mars 2004. 43
Figure 13 - Lignes de regards restaurés par l'IFAO et exutoire du qanât MQ5 à KS089 - Aïn Manawir. Cet ouvrage, comme la plupart des autres qanâts du site, a été remanié entre l'époque perse et la fin de l'époque romaine. Prise de vue : novembre 2012 44
Figure 14 - Intérieur de la galerie du qanât MQ4, fouillé par l'IFAO, sur le site de KS089 - Aïn Manawir. La photographie a été prise en partie avale de l'ouvrage (ce qui explique la profondeur relativement faible), au droit d'un regard. Prise de vue : novembre 2010. 45

Figure 15 - Versant sud de la colline d'Aïn Ziyada, photographié depuis le sommet d'un yardang (visible au premier plan). La zone rectangulaire sableuse visible à son sommet correspond au comblement d'un regard de qanât antique. Le sommet des autres yardangs visibles présente régulièrement des vestiges d'occupation humaine, à l'image du bâtiment au loin, daté de l'époque perse à ptolémaïque (V^e-IVe s. avant notre ère). Prise de vue : novembre 2010. 46
Figure 16 - Bâtiment daté de l'époque perse à ptolémaïque (V^e-IVes. avant notre ère) photographié depuis le nord et situé, comme le bâtiment de la figure 15, au sommet d'un grand yardang. Les dépôts de sédiment fin ont été protégés par les vestiges, ce qui explique le profil atypique de ce yardang et la largeur de sa face au vent. Prise de vue : décembre 2012. 47
Figure 17 - Vue depuis le nord des champs récents de l'oasis ancienne d'Ezbet Gaga. La végétation rase et l'absence de strate arbustive ou arborescente, au premier plan, contrastent fortement avec les champs traditionnels sous palmeraies que l'on devine sur la butte, au fond. Prise de vue : novembre 2014. 50
Figure 18 - Cultures ex-nihilo entre l'oasis ancienne d'Ezbet Gaga (ou Ezbet Aïn Gaga) au nord et le nouveau village d'Aden au sud. La plupart des parcelles sont de grande taille et une seule strate de culture est présente : on trouve ainsi des plantes fourragères, maraîchères ou des céréales dans certaines parcelles, des palmiers dans d'autres, mais la culture traditionnelle en parcelles contenant à la fois des palmiers et une strate herbacée est très rare dans ce modèle. Les cultures sur pivot, dont l'image donne un exemple, semblent amenées à se développer, avec la création entre 2012 et 2014 d'un second ensemble sur pivot à proximité du premier. Image satellitaire de février 2010. 50
Figure 19 - Vue de la partie traditionnelle de l'oasis de Douch. Au premier plan, parcellaire ensablé par les apports éoliens, séparé des parcellaires cultivés par un canal d'irrigation par gravité. Sur les parcellaires cultivés, on repère trois strates de végétation : une strate herbacée constituée d'oignons, de salades et de plantes fourragères ; une strate arbustive constituée de jujubiers (*Ziziphus spina-christi*), de jeunes palmiers-dattiers (*Phoenix dactylifera*) et d'autres arbres fruitiers ; une strate arborescente constituée de palmiers-dattiers matures (palmes longues vert pâle et stipe unique) et des palmiers doums (*Hyphaene thebaica*), reconnaissables à leurs palmes plus courtes, vert vif et à la ramification du stipe). Prise de vue : novembre 2011. 51
Figure 20 - Préparation de futures parcelles agricoles au sud du site de KS241 - Aïn Gaga entre Ezbet Gaga et Aden. Après un premier aplanissement à l'origine des marques visibles au premier plan et de la dispersion de débris de yardangs, une pelle mécanique, au second plan, finit le travail. L'oasis visible au fond est Aïn Tafnis. Enfin, au dernier plan, les collines de KS060 - Tell-Douch (à gauche) et de KS089 - Aïn Manawir (à droite) s'élèvent au-dessus du fond de la dépression. Photographie : Tiphaine Dachy, novembre 2012. 51
Figure 21 - Zone d'épandage des eaux de drainage (et d'une partie des eaux usées, parfois apportées par camions citernes) située à l'est d'Ezbet Gaga. Prise de vue : novembre 2014. .. 52
Figure 22 - Cultures non irriguées de pastèques dans des fosses creusées dans le sable à Gourmashine. Le tracé suit les limites des fosses plantées de pastèques. Image satellitaire de février 2010. 52
Figure 23 - Plantation récente de palmiers sur une parcelle préparée pour la mise en culture de plantes céréalières, maraîchères ou fourragères dans la partie nord de Maks el-Bahari. Au dernier plan, cultures céréalières et maraîchère sous palmeraies (palmiers-dattiers et palmiers doum). Prise de vue : décembre 2012. 53
Figure 24 - Cartes des sites étudiés. Les trois cadres d'emprises correspondent aux figures 25 à 27. 57
Figure 25 - Carte des sites étudiés dans le nord de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 1 de la figure 24). 58

Figure 26 - Carte des sites étudiés en partie médiane de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 2 de la figure 24). 58
Figure 27 - Carte des sites étudiés dans le sud de la dépression de Kharga (cadre d'emprise 3 de la figure 24). 59
Figure 28 - Corrasion éolienne sur les calcaires de la partie sommitale de la butte témoin KS046 - Gebel Bayyan el-Qibli. Prise de vue : novembre 2011. 60
Figure 29 - Dépôts de playas érodés et partiellement recouverts de sable libre et de méga-rides éoliennes, au sud du site KS097. Les lignes correspondent aux limites des principaux dépôts de playas. Image satellitaire de mai 2010. 62
Figure 30 - Parcellaires et puits sur le site KS094 - Aïn el-Dushiyya. Trois puits (localisés par les cercles) sont visibles : l'un d'eux est couvert de sédiment fin et de végétaux, à l'extrême nord-ouest, le second se situe au sud du premier et forme une dépression circulaire comblée de sables, et le troisième, situé plus à l'est et probablement curé au XIXe ou au XXe s., est entouré de déblais. Image satellitaire de mars 2004. 63
Figure 31 - Parcellaires et principaux canaux (en traits pointillés) du site KS026 - Aïn Khalil. Le canal visible au sud-est tirait son eau d'un puits situé à plus de 3 km au sud, sur le site KS103. Image satellitaire d'octobre 2011. L'un des puits du site (signalé par un cercle) est également visible à l'extrême nord-est, entouré d'une couronne de déblais et d'un chenal d'écoulement vers le sud-sud-est. Image satellitaire de mars 2004. 64
Figure 32 - Partie sud-est du site KS259 - Aïn Birqis-est. Deux canaux (signalés par les pointillés) en provenance de KS260 sont bien visibles. Les parcellaires, au contraire, ont été tellement érodés qu'ils ne sont plus visibles. Fragmentaires, ils ont pu être détectés au sommet des yardangs lors des prospections. Image satellitaire de mars 2010. 65
Figure 33 - Vestiges de parcellaire romain (dans le cadre) partiellement recouverts par une dune, au cœur de l'erg, sur le site KS221. Au nord-est, on observe la présence d'un puits (signalé par un cercle), marqué par une dépression très abrupte au sein d'une petite butte (bassin du puits et écoulement vers l'ouest). Image satellitaire de février 2010. 66
Figure 34 - Parcellaire et canal d'irrigation d'époque romaine sur le site KS221, au cœur de l'erg. Le canal visible ici se prolonge de l'autre côté de la dune, d'où la photographie a été prise. Prise de vue : novembre 2010. 67
Figure 35 - Colline de Tell-Douch vue depuis l'ouest-nord-ouest. Au premier plan, le fond de la dépression est couvert de croûtes salées et de sable vif. Prise de vue : décembre 2011. 70
Figure 36 - Colline d'Aïn Ziyada (partie nord du site KS088, délimitée par les pointillés). De très nombreux yardangs et vestiges de tertres artésiens érodés par le vent y sont visibles. À l'extrême nord, on observe d'anciennes dune-afregs abandonnés. Image satellitaire de mars 2004. 71
Figure 37 - Colline de KS089 - Aïn Manawir vue depuis le nord. A gauche, on repère le bout d'une des barkhanes appartenant au cordon qui traverse le site. Sont également visibles le tracé du qanât MQ4 (repérable à la série de murets en brique reconstruits par l'IFAO) et l'agglomération d'époque perse, au débouché de l'ouvrage. Prise de vue : novembre 2012. ... 72
Figure 38- Extrémité est de la colline de KS098 - Aïn Boreq (délimitée par les pointillés). Le parcellaire ptolémaïque bien visible, et tributaire de qanâts perçant la colline, occupe le fond d'un paléo-oued. Son état de conservation indique donc que l'oued n'a plus connu de crues importantes depuis plus de deux millénaires. 72
Figure 39 - Butte de KS 177 - Shams el-Din (contours en pointillés). La portion la mieux conservée, au sud, correspond à l'un des anciens puits (signalé par un cercle). Image satellitaire de mars 2010. 74
Figure 40 - Vestiges de la butte KS156 - Aïn el-Haweisha (contours en pointillés). La partie sud n'est plus visible que par quelques *rebdous* et yardangs ; la partie nord, partiellement

recouverte par une barkhane, est un peu mieux conservée et on y observe encore un puits (signalé par le cercle). 75
Figure 41 - Partie centrale des vestiges de la butte KS209 - Aïn el-Mansourya (contours en pointillés). La zone concernée par les yardangs se prolonge à la fois au nord et au sud. Le point culminant se situe sur la couronne de déblai du grand puits (signalé par un cercle), recreusé à plusieurs reprises depuis l'époque romaine. L'erg, visible à l'ouest, couvre une partie du site. Image satellitaire de mars 2010. 76
Figure 42 - Vue de la partie sud de KS209 depuis le puits principal de KS209- Aïn el-Mansourya. Les yardangs sombres visibles au pied de la pente recouvrent des installations romaines, et sont coiffés par un jardin d'époque médiévale. Prise de vue : décembre 2011. .. 77
Figure 43 - Mega-yardang, vestiges de la butte d'Aïn Zabiba dominant la plaine environnante de 10m. Au premier plan, culture de maïs de l'oasis actuelle de Maks el-Bahari recolonisant un parcellaire d'époque romaine partiellement recouvert par la butte. Le méga-yardang, formé par la corrasion éolienne, a été largement retouché du fait de prélèvements de sédiment par les agriculteurs locaux. Prise de vue : novembre 2012. 78
Figure 44 - Butte KS159 - Aïn Bella (contours en pointillés, puits signalé par un cercle), en bordure de l'erg. Éloignée des implantations humaines actuelles, cette butte ne doit son érosion qu'aux dynamiques éoliennes. Image satellitaire d'octobre 2011. 79
Figure 45 - Butte KS260 - Aïn Birqis (contours en pointillé et puits signalé par un cercle) soumise à la corrasion éolienne et à des prélèvements de sédiments et des aplanissements d'origine anthropique, au nord et au sud-ouest. Image satellitaire de mars 2010. 79
Figure 46 - Butte KS178 - Aïn el-Mattrahiyya (vue depuis l'ouest). Le point culminant correspond au tas de déblais du puits. Prise de vue : décembre 2012. 80
Figure 47 - Butte KS178 - Aïn el-Mattrahiyya. L'état de conservation exceptionnel du site permet d'observer un parcellaire étagé et la présence d'anciennes terrasses de cultures, ainsi qu'un puits profond avec un écoulement vers le nord-est. Cependant, la butte est aujourd'hui menacée par des prélèvements de sédiments effectués à la pelle mécanique à ses extrémités nord et sud. 81
Figure 48 - Oasis de Koweït, créée ex-nihilo dans le cadre du projet « *New-Valley* ». Image satellitaire de décembre 2011. 83
Figure 49- Ezbet Douch, oasis ancienne redynamisée par les investissements du projet « *New-Valley* ». Les parcelles situées au nord de la route sont des créations récentes qui s'étendent progressivement. À l'ouest, extrémité orientale de la colline de KS089 - Aïn Manawir traversée par des barkhanes. Image satellitaire d'octobre 2011. 83
Figure 50 - Oasis d'Aïn Dakhakhin, sur la butte ensablée à l'ouest, et d'Ezbet Gaga, situé sur la butte circulaire à l'est. Les observations de H.J.L. Beadnell (1909) et les coupes observées à proximité des sites (qui n'ont, malheureusement, pas pu être prospectés) indiquent que ces éminences sont essentiellement constituées de dépôts de sédiment fin. Les versants les plus abrupts sont cultivés en terrasses. La strate arborescente est particulièrement développée dans ces deux oasis qui semblent avoir été autrefois plus étendues. Des restes de parcellaires érodés sont visibles sur l'ensemble des deux buttes. La tendance actuelle est toutefois à la reconquête, dans ces deux oasis comme à Douch, Baris, et Maks el-Bahari, où les cultures actuelles s'étendent sur des parcellaires autrefois abandonnés. Image satellitaire de février 2010. 84
Figure 51 - Au nord de KS060 - Tell-Douch, nappes sableuses marquées par les effets de *splash* et micro-dépression ayant accueilli une mare temporaire durant l'épisode de précipitations. La bande claire située à l'interface entre les dépôts sableux et les dépôts argileux est due à la précipitation de sel. Les stries sur les versants sont probablement liées au ruissellement et à la microtopographie : leur orientation est indépendante des directions de vent (même si le vent peut les avoir ensuite retouchées). Prise de vue : novembre 2012. 91

Figure 52 - Fentes de dessiccation observées à KS060 - Tell-Douch en décembre 2011. La plus longue observée sur le terrain a pu être suivie sur près de 20 m, et leur profondeur se limitait à quelques décimètres, voire un peu plus d'un mètre pour les plus importantes. Ces fentes constituent des points d'infiltration rapide pour l'eau météorique et semblent, par endroit au moins, avoir guidé les écoulements et favorisé le ravinement. Prise de vue : novembre 2012. 92
Figure 53 - Concentration des écoulements dans des traces de roues sur substrat sableux, au nord-est du temple en pierres de Douch. En raison de la faiblesse des précipitations, de la taille réduite du bassin versant et de la désorganisation du réseau hydrographique par les phénomènes éoliens, la micro-topographie a joué un rôle majeur dans la concentration des écoulements. Prise de vue : novembre 2012. 93
Figure 54 - Traces de ruissellement en filets et en nappe sur la partie ouest du versant nord de Tell-Douch. Au pied des yardangs, on observe la formation d'une ravine qui recoupe les secteurs d'écoulement diffus. Prise de vue : novembre 2012. 93
Figure 55 - Grande ravine formée dans les dépôts de sédiment fin en limite nord de la colline de Tell-Douch. Sa profondeur maximale était de 60 cm et sa largeur maximale de 50 cm. Prise de vue : novembre 2012. 94
Figure 56 - Traces d'écoulements en filets et dépôts liés aux mares temporaires formées au sein de micro-dépressions, au bord de la grande dépression fermée située au nord de Tell-Douch. Les dépôts résultant des mares temporaires suivent une stratification due à la décantation et sont recouverts par une couche d'argile extrêmement fine qui s'est craquelée et rétractée en se desséchant. L'évaporation de l'eau a entraîné la précipitation de sel, repérable par des efflorescences blanches (dans la petite mare située au tout premier plan) et par des croûtes épaisses (visibles au second plan). Ces dernières, épaisses et bien développées, sont le résultat d'apports d'eau répétés au fond de la dépression. Elles sont probablement liées au drainage d'anciennes parcelles agricoles situées en amont. Les processus actuels ne permettent plus la formation de telles croûtes dans ce secteur. Prise de vue : novembre 2012. 95
Figure 57 - Germination et pousse de rares plantes éphémères sur le fond d'une mare temporaire (versant nord de KS060 - Tell-Douch). Les précipitations de sel n'ont pas été suffisantes pour former des efflorescences visibles, probablement parce que cette mare, située dans la partie médiane du bassin versant, a connu des phénomènes d'évaporation limitée, l'eau continuant ensuite son chemin vers l'aval. Prise de vue : novembre 2012..... 96
Figure 58 - Carte des sites présentant des traces de la pluie du 6 au 7 novembre 2012 et des effets morphogénétiques constatés. Les limites indiquées sont approximatives et correspondent aux observations effectuées lors des prospections. 97
Figure 59 - Ravinement dans un secteur avec dépôts de sédiments fins en pente forte, dans la partie nord de KS060 -Tell-Douch le 13 novembre 2012. Le personnage à droite donne l'échelle. 99
Figure 60 - Photographie du même lieu le 10 novembre 2014. On devine tout juste les ravines situées à gauche de la photographie, partiellement rabotées par la déflation et comblées par du sable. À droite, la ravine est mieux conservée, bien qu'entièrement comblée par les apports éoliens..... 99
Figure 61 - Yardangs du site KS088 - Aïn Ziyada contenant une strate rubéfiée, vestige d'un incendie durant un hiatus dans la sédimentation. Prise de vue : novembre 2010. 101
Figure 62 - Vue de la colline de KS060 - Tell-Douch. L'ensemble du versant est constitué de sédiments fins plaqués sur les strates relevées des grès de la formation de Taref. Des yardangs formés par la corrasion éolienne se trouvent sur la colline, jusqu'à son sommet. Prise de vue : décembre 2011. 101

Figure 63 - Carte générale des emplacements des coupes traitées, toutes situées dans la moitié sud de la dépression de Kharga. Les cadres d'emprises numérotés renvoient aux cartes suivantes. 110
Figure 64 - Carte générale des emplacements de prélèvements des échantillons isolés, tous situés dans la moitié sud de la dépression de Kharga. Les cadres d'emprises numérotés renvoient aux cartes suivantes. 110
Figure 65 - Carte des emplacements des coupes et échantillons isolés du secteur de KS060 - Tell-Douch. Les prélèvements s'étendent de KS098 - Aïn Boreq, à l'est, à KS089 - Aïn Manawir, à l'ouest. 111
Figure 66 - Carte des emplacements des coupes et échantillons isolés du secteur prospecté le plus méridional, à proximité des sites KS052, KS097 et KS192. 111
Figure 67 - Carte des emplacements des coupes du site KS161 - Aïn el-Zabiba. 112
Figure 68 - Carte des emplacements des coupes et des échantillons isolés du site KS209 - Aïn el-Mansouriya. 112
Figure 69 - Carte de l'emplacement de l'échantillon isolé 118 à KS241 - Aïn Gaga. 113
Figure 70 - Photographie de la coupe X sur le site KS097, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2011. 118
Figure 71 - Log synthétique de la coupe X. 118
Figure 72 - Photographie de la couche de prélèvement de l'échantillon 118 sur le site KS241 - Aïn Gaga. Prise de vue : décembre 2011 120
Figure 73 - Photographie de la coupe U au sud du site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. L'échantillon U3 n'apparaît pas dans les tableaux et logs car il s'agit d'un prélèvement de vestiges de stipe de palmiers (malheureusement insuffisant pour une datation radiocarbone). Prise de vue : décembre 2011. 121
Figure 74 - Log synthétique de la coupe U. 123
Figure 75 - Vestiges de canal sur le site KS161 - Aïn Zabiba. Prise de vue : décembre 2011 123
Figure 76 - Photographie des vestiges de canal au sein desquels l'échantillon 105 a été prélevé, avec l'emplacement de l'échantillon. Prise de vue : novembre 2011 124
Figure 77 - Canal en fonctionnement dans l'oasis actuelle de Douch. Les canaux non maçonnés distribuent l'eau vers différents réseaux d'irrigation. Une simple levée de terre sépare le canal actuellement en eau du canal à sec à gauche. Son déplacement pour ouvrir le canal situé à gauche et boucher le canal de droite permet d'alimenter une autre partie du réseau d'irrigation. Prise de vue : novembre 2011 124
Figure 78 - Photographie de la méga-ride où ont été prélevés les échantillons 116 et 117, sur le site KS192, avec la localisation des prélèvements. Prise de vue : décembre 2011 125
Figure 79 - Sommet de la barkhane où a été prélevé l'échantillon 110, sur le site KS089 - Aïn Manawir. Le personnage assis donne l'échelle. Prise de vue : décembre 2011 126
Figure 80 - Photographie du *rebdou* dans lequel a été prélevé l'échantillon 127, sur le site KS052, avec la localisation du prélèvement. Prise de vue : décembre 2011 127
Figure 81 - Photographie de l'emplacement de prélèvement de l'échantillon 123 (sous la pellicule superficielle de sable, juste à côté du sac à échantillons) sur le site KS097. Prise de vue : décembre 2011. 128
Figure 82 - Photographie du sondage dans lequel ont été prélevés les échantillons 114 et 115, avec la localisation des prélèvement, sur le site KS192. Seule la couche superficielle correspond à une ancienne playa reconnaissable aux polygones de dessiccation. Prise de vue : décembre 2011. 129
Figure 83 - Photographie de la coupe A sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010 130

Figure 84 - Photographie du parcellaire où les échantillons 125 et 126 ont été prélevés, sur le site KS060 - Tell-Douch. Prise de vue : novembre 2011. 131
Figure 85 - Photographie de la coupe C sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 132
Figure 86 - Photographie de la coupe Y sur le site KS209 - Aïn el-Mansouriya, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2011. 133
Figure 87 - Logs synthétiques des coupes A, C et Y. 133
Figure 88 - Photographie du dépôt au sein duquel a été prélevé l'échantillon 119. Prise de vue : décembre 2011. 135
Figure 89 - Photographie du yardang au sein duquel a été prélevé l'échantillon 124 sur le site KS209 - Aïn el-Mansouriya. Prise de vue : décembre 2011. 136
Figure 90 - Contexte local de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch. Source : *Google Earth pro*. Image satellitaire de mars 2004. 138
Figure 91 - Photographie de la partie est de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 139
Figure 92 - Photographie de la partie sud de la coupe E, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 139
Figure 93 - *Melanoides tuberculata* prélevés au sein de la coupe E. 140
Figure 94 -*Bulinus globosus* prélevés au sein de la coupe E. 140
Figure 95 -Photographie de la coupe G, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Le foyer est signalé par la ligne rouge. Prise de vue : novembre 2010. 141
Figure 96 - Logs synthétiques des coupes G et E. 142
Figure 97 - Photographie de la coupe N, sur le site KS088 - Aïn Ziyada, avec emplacement des échantillons.). Photographie : Yann Callot, novembre 2010. 143
Figure 98 - Logs synthétiques des coupes N, V et W. 144
Figure 99 - Photographie de la coupe V, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2012. 145
Figure 100 - Photographie de la coupe W, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : décembre 2012. 147
Figure 101 - Photographie de la coupe O, sur le site KS088 - Aïn Ziyada, avec emplacement des échantillons. Photographie : Yann Callot, novembre 2010. 148
Figure 102 - Photographie de la coupe ZB, sur le site KS161 - Aïn Zabiba, avec emplacement des échantillons. Date: décembre 2011. 150
Figure 103 - Traces de passage de barkhanes (lignes signalées par les pointillés) sur un parcellaire d'époque romaine, site KS161 - Aïn Zabiba. Prise de vue : décembre 2011. 151
Figure 104 - Logs synthétiques des coupes O, T et ZB. 152
Figure 105 - Photographie de la coupe T, sur le site KS098 - Aïn Boreq, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 153
Figure 106 - Photographie de la coupe Q, sur le site KS089 - Aïn Manawir, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 154
Figure 107 - Log synthétique de la coupe Q. 155
Figure 108 - Photographies des différents secteurs de la coupe F, sur le site KS60 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. Prise de vue : novembre 2010. 157
Figure 109 - Contexte local de la coupe F, sur le site KS060 - Tell-Douch. Image satellitaire de mars 2004. 157
Figure 110 - Logs synthétique de la coupe F. 158
Figure 111 - Photographie de la coupe ZA, sur le site KS161 - Aïn Zabiba, avec emplacement des échantillons. Date: décembre 2011. 161

Figure 112 - Détail de la coupe ZA : niveau rubéfié recouvert par une croûte salée plane et épaisse à l'interface entre deux strates, et série de croûtes plus fines suivant les pentes de dépôt (détail ZA2 - 3 et ZA7). Prise de vue : décembre 2011. 162
Figure 113 - Log synthétique de la coupe ZA. 163
Figure 114 - Contexte de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch. Image satellitaire de mars 2004. 164
Figure 115 - Photographie de la partie nord de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons B1 à B4. Prise de vue : novembre 2010. 165
Figure 116 - Photographie de la partie sud de la coupe B, sur le site KS060 - Tell-Douch, avec emplacement des échantillons. B5 à B10. Prise de vue : novembre 2010. 165
Figure 117 - Log synthétique de la coupe B. 166
Figure 118 - Cartes des buttes de sédiments fins étudiées et de quatre buttes repérées sur les images satellitaires ou sur le terrain, dont l'étude n'a pas encore été menée. 171
Figure 119 - Vestiges de palmiers dans un yardang sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. L'empreinte des anciens stipes indiquent que les sédiments ont enseveli le palmier durant sa période de vie, ou peu de temps après sa mort, avant que les stipes ne se dégradent. Prise de vue : novembre 2014. 172
Figure 120 - Vue depuis le sud du tertre artésien et des tas de déblais du puits principal de KS209 - Aïn el-Mansouriya. Les vestiges au premier plan ont été recouverts par les dépôts constituant la butte associée au puits. Prise de vue : novembre 2012. 173
Figure 121 - Stratification à l'intérieur de la cuve du puits principal du site KS161 - Aïn Zabiba. Des argilites apportées depuis le sous-sol et mises en place par les écoulements du puits, sont surmontées par une couche contenant de nombreux manchons racinaires. Au sommet, les blocs de sédiments sont liés aux déblais de la cuve. Prise de vue : novembre 2012. 174
Figure 122 - Parcellaires agricoles abandonnés dans les années 1960 sur le site KS260 - Aïn Birqis. Image satellitaire de mars 2010. 175
Figure 123 - Vestiges de brise-vents et de parcellaire datés des années 1960 sur le site KS260 - Aïn Birqis. Prise de vue : novembre 2014. 175
Figure 124 - Détail de la stratigraphie d'un dépôt de sédiment éolien remanié et supportant une parcelle agricole sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Prise de vue : novembre 2014. 176
Figure 125 - Parcellaire agricole étagé le long d'une flèche sableuse sous le vent de KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Le site a été abandonné dans les années 1960. Prise de vue : novembre 2014. 177
Figure 126 - Tertres artésiens à proximité de Carrizozo, dans la région de Tularosa au Nouveau-Mexique (États Unis d'Amérique). Image satellitaire d'octobre 2013. 178
Figure 127 - Tertre artésien dont la dépression centrale est occupée par une mare, dans le *Great Artesian Basin*, en Australie. Image satellitaire de septembre 2013. 179
Figure 128 - Tertres artésiens dans l'oasis de Blidet, dans la région du Nefzaoua (Tunisie). Comme dans la dépression de Kharga, les puits et les sources à l'origine de leur formation sont désormais taris. Image satellitaire de février 2016. 180
Figure 129 - Tertres artésiens dans l'oasis de Siwa. Chacune des îles et presqu'îles visibles sur le lac correspond à un tertre. Image satellitaire de janvier 2016. 181
Figure 130 - Carte au 1:10 000e réalisée par le *Survey of Egypt* en 1931 (*Village Bârîs - Sheet 220/570*). 184
Figure 131 - Carte au 1:10 000e réalisée par le *Survey of Egypt* en 1931 (*Village Bârîs - Sheet 224/570*). 185
Figure 132 - Flèches sableuses stabilisées par d'anciens champs, sous le vent de la butte KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Image satellitaire de mars 2010. 187

Figure 133 - Coupe ouverte suite à un prélèvement de sédiment à la pelle mécanique au sein du versant sud de la colline d'Aïn el-Matrahiyya. Les faciès correspondent à une flèche sableuse sous le vent pour la partie inférieure. Le sommet a été remanié par l'agriculture. Photographie : Yann Callot, novembre 2014. 188
Figure 134 - Carte des buttes de sédiments fins selon leur typologie. 190
Figure 135 - Exemple de buttes de types 1 et 2. Butte de KS177 - Shams el-Din (type 1 - butte basse très érodée) dont le degré d'ablation éolienne interdit de déterminer le type d'organisation. Butte de KS093 - Aïn Foq (type 1D - butte basse très érodée à tertres multiples). Butte de KS209 - Aïn el-Mansouriya (type 2A - butte disséquée circulaire à tertre unique). Butte de KS161 - Aïn Zabiba (type 2C - butte disséquée allongée à tertre unique avec chenal principal vers l'est ou vers l'ouest). Images satellitaires de mars 2010. 191
Figure 136 - Exemple de buttes de type 3. Butte d'Ezbet Gaga (type 3A - butte peu érodée circulaire à tertre unique). Butte de KS260 - Aïn Birqis (type 3B - butte peu érodée allongée à tertre unique avec chenal principal vers le sud). Butte de KS178 - Aïn el-Matrahiyya (type 3C - butte allongée peu érodée à tertre unique avec un chenal principal vers l'est ou l'ouest). Butte de KS207 - Aïn Fila (type 3D - butte allongée peu érodée à tertres multiples) Images satellitaires de mars 2010. 192
Figure 137 - Comparaison entre l'état de la butte de KS178 - Aïn el-Matrahiyya en mars 2010 (en haut) et en 2013 (en bas, image tirée de *Bing maps*). La flèche sableuse sous le vent est peu à peu détruite par les prélèvements de sédiments. D'autres buttes de la région ont d'ores et déjà été quasiment réduites à néant par de telles opérations, en particulier à proximité des routes. 193
Figure 138 - Front de carrière récent mesurant une centaine de mètres de long et grignotant progressivement la butte KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Photographie : Yann Callot, novembre 2014. 194
Figure 139 - Sites archéologiques de l'erg et de l'extrême sud de la dépression de Kharga, uniquement occupés à l'époque romaine. Trois discrétisations différentes ont été adoptées pour le modèle *GDEM ASTER* afin de mettre en évidence des groupes de sites, en fonction de leur altitude et des points de remontées artésiennes connues. L'état 1 met en évidence en rouge tous les espaces situés au-dessus de l'altitude des plus hauts puits et sorties de qanâts connus. L'état 2 indique en rouge les espaces situés au-dessus de l'altitude des exutoires de qanâts les plus bas à Aïn Manawir. L'état 3 indique en rouge les espaces situés au-dessus de l'altitude des puits de plaine en fonctionnement lors de l'abandon de certains sites à la fin de l'époque romaine. 269
Figure 140 - Concrétions ferrugineuses au sommet d'une butte sur le site KS221, au cœur de l'erg. Prise de vue : novembre 2010. 270
Figure 141 - Emplacement des 5 sites exploitant encore un puits artésien sans pompage et sans forage profond dans les années 1950, en comparaison avec les altitudes (*GDEM ASTER*). Ils se trouvent tous en dessous de 50 m d'altitude. 270
Figure 142 - Méga-rides de petite taille (5 à 40 cm de haut) formées sur la surface de dépôts de playas préhistoriques sur le site KS097. On observe une forme générale s'approchant d'un croissant. Prise de vue : décembre 2011. 277
Figure 143 - Grandes méga-rides dans l'extrême sud de la dépression de Kharga. Leur forme est quasi-rectiligne. L'échelle mesure environ 15 cm. Prise de vue : décembre 2011. 278
Figure 144 - Images satellitaires de barkhanes sur le site KS089 - Aïn Manawir. En comparant l'image du haut, datée de mars 2004 et l'image du bas, datée d'octobre 2011, on observe une petite barkhane (signalée par le cercle noir) se formant à partir du front de la grande barkhane située au centre. 279
Figure 145 - Yardangs sur le site KS088 - Aïn Ziyada. Le vent vient de la gauche. On observe plusieurs formes de yardangs, en fonction de différences initiales dans la topographie

et l'induration des dépôts. Le yardang au premier plan est ainsi très court et étroit, alors que les yardangs à l'arrière plan sont plus longs et massifs. Prise de vue : novembre 2010. 281
Figure 146 - Yardang situé à proximité du site KS512 - Aïn Sour Matla' el-Shams. Le vent vient de la droite. La crête située à l'extrémité opposée du yardang et perpendiculaire à son axe est liée à des vestiges de canaux : l'induration liée à la circulation de l'eau a protégé les dépôts de l'érosion. Prise de vue : novembre 2012. 282
Figure 147 - Dépôts limono-sableux indurés sous le vent de galets d'épandage de paléo-oued sur le site KS097, dans un thalweg. Le vent vient de l'angle en haut à droite de la photographie. A proximité, se trouvent un secteur couvert de nombreuses nebkas et les dépôts d'avancée de barkhanes de la figure 148. Prise de vue : décembre 2011. 284
Figure 148 - Dépôts formés par le passage d'une barkhane en milieu humide à proximité de KS097. Prise de vue : décembre 2011. 285
Figure 149 - Dune-afregs au nord d'un hameau situé à proximité d'Aïn Dakhakhin. 287
Figure 150 - Barkhane stabilisée et stoppée dans son avancée à l'est de la route de Baris à Kharga. Prise de vue : novembre 2012. 288
Figure 151 - Vestiges de canal d'époque romaine sur le site KS161 - Aïn Zabiba. La déflation et l'érosion différentielle l'ont mis en relief. Prise de vue : décembre 2011. 289
Figure 152 - Dépôt de lœss sableux constitué sur d'anciens champs étagés sur le site KS178 - Aïn el-Matrahiyya. Photographie : Yann Callot, novembre 2014. 291
Figure 153 - Tertre du puits artésien du site KS209 - Aïn el-Mansouriya, dont la forme circulaire est perturbée par les vestiges archéologiques et les déblais de curage. Prise de vue : novembre 2012. 292
Figure 154 - Cuve et chenal de déversement du puits artésien du site KS178 - Aïn el-Matrahiyya, vus depuis l'aval. Date: novembre 2014. 292
Figure 155 - Modèle d'évolution environnementale et paysagère développé pour la période allant de l'installation des oasis à l'époque perse (Ve s. avant notre ère) jusqu'à la fin de la période romaine marquée par la brusque réduction de l'emprise spatiale des oasis (Ve s. de notre ère). 1. Facteurs mésologiques ; 2. Facteurs anthropo-mésologiques ; 3. Facteurs anthropiques ; 4. Relations entre deux facteurs ; 5. Relations entre deux facteurs impliquant un déséquilibre et nuisant à la durabilité du système ; 6. Dans l'encadré en pointillé : modèle d'évolution environnementale et paysagère pour la période allant de l'aridification de la région (5 800 BP environ) au hiatus dans son occupation humaine (4 500 BP environ). Ce modèle peut s'appliquer de manière asynchrone sur des sites voisins. Figure tirée de Crépy et Callot (2016). 297
Figure 156 - Reconstitution de l'évolution géomorphologique du site KS88 - Aïn Ziyada. A. Schéma synthétique de la topographie il y a environ 5 000 ans. B. Schéma synthétique de la topographie il y a environ 2 000 ans C. Schéma synthétique de la topographie actuelle. 1. Formation de Taref : grès et schistes argileux ; 2. Ejectas artésiens, fragments de grès et de schistes argileux de la formation de Taref, remaniés et épandus autour des sources ; 3. Dépôts éoliens limoneux et sablo-limoneux liés à l'humidité et la végétation entretenues par les sources : secteurs d'installation privilégiés par les camps temporaires ; 4. Dépôts éoliens limoneux liés aux cultures et activités anthropiques, d'extension plus large ; 5. Niveau maximal supposé des dépôts éoliens liés aux activités humaines ; 6. Exhaussement progressif lié au dépôt éolien sur les champs ; 7. Remontées artésiennes et recharges des aquifères superficiels ; 8. Remontées artésiennes et recharges des aquifères superficiels affaiblies : le processus est devenu insuffisant pour permettre l'exploitation de la plupart des nappes superficielles entre le Ier et le Ve s. de notre ère. Figure tirée de Crépy et Callot (2016). 299
Figure 157 - Distribution des cultures sur le versant nord de la colline de KS060 - Tell-Douch. Le prolongement et le surcreusement des qanats au fil du temps a entraîné un déplacement des parcellaires du haut vers le bas du versant. On trouve ainsi un secteur de parcellaire très érodé,

d'époques perse et ptolémaïque, à proximité immédiate de l'agglomération antique. Plus bas, au pied d'une ligne de yardangs suivant un axe est-ouest se trouve un grand parcellaire ptolémaïque. Enfin, les parcellaires romains sont situés au pied de coupes abruptes de plus de 3 m d'épaisseur dans le dépôt exploité à l'époque ptolémaïque. Les grandes ruptures chronologiques coïncident donc avec les principales ruptures dans la topographie des lieux (axe de yardangs séparant le vert sombre du vert pâle, rupture de pente séparant le vert pâle du jaune). 304
Figure 158 - Distribution des parcellaires à KS178 - Aïn el-Matrahiyya. En plaine, on observe un parcellaire romain très érodé à l'ouest et un parcellaire moderne à l'est (réemploi probable d'un ancien parcellaire romain). Les niveaux les plus bas de la colline présentent des traces d'occupation médiévale. Le sommet, en dehors du tertre artésien, et à l'exception notable d'un puits et de parcelles médiévaux, est occupé par un parcellaire moderne recouvrant probablement des vestiges médiévaux (une telle superposition a été observée sur le nord ouest de la butte). La délimitation entre les parcellaires médiévaux et les parcellaires modernes est abrupte, haute de plusieurs mètres, rappelant en apparence une terrasse de culture, mais non maçonnée. 306
Figure 159 - Image satellite d'une partie du site de KS026 - Aïn Khalil. Le cercle signale un puits, la ligne noire longe la délimitation entre le parcellaire romain non remanié et le parcellaire réemployé à l'époque moderne, reconnaissable à ses parcelles plus petites et moins régulières. 307
Figure 160 - Image satellite de la zone de Douch. Les lignes bleues représentent des vestiges de canaux. Le polygone vert délimite le parcellaire préservé du site de KS026 Les punaises jaunes indiquent les puits taris, la rouge correspond à Aïn Johar (puits qui alimentait l'oasis de Douch à la fin du XIXe. s. - Beadnell 1909), la bleue signale le pompage actuel et la verte signale un forage abandonné. 308

Table des tableaux

Tableau 1 - Formations géologiques de la dépression de Kharga. Les traits discontinus indiquent les lacunes (entre le Précambrien et le Jurassique supérieur, et entre le Turonien et le Campanien). Le rôle hydrologique est indiqué à l'échelle des formations. Au sein de chacune d'entre elles, certaines strates sont aquicludes, d'autres sont aquifères. Par exemple, les grès de la formation de Taref sont aquifères, alors que les schistes argileux sont aquicludes. Les noms des formations et la composition des séries sont tirées de M. Hermina (1990). 35
Tableau 2 - Périodes historiques de l'Holocène, bornes chronologiques et occupation de la dépression de Kharga. Les périodes indiquées en gras sont celles mentionnées dans cette thèse. Pour plus d'informations sur la périodisation de la préhistoire holocène, voir Dachy 2015. La basse époque a été subdivisée en deux pour mettre en évidence la reprise du peuplement du bassin sud à l'époque perse. La période «arabe pré-mamelouke» est une époque pour laquelle l'occupation et le statut exact de la dépression de Kharga sont encore peu connus, et les vestiges découverts rares. 41
Tableau 3 - Tableau récapitulatif du type de site sur butte témoin. 60
Tableau 4 - Récapitulatif des sites de plaine. Certains sites, de par leur situation en plein désert, loin de toute source d'eau et de toute occupation humaine actuelle ou subactuelle, n'ont pas de toponyme. 61

Tableau 5- Récapitulatif des sites de l'erg. De par leur situation en plein désert, loin de toute source d'eau et de toute occupation humaine actuelle ou subactuelle, ils n'ont pas de toponyme. 67
Tableau 6 - Récapitulatif des collines de grès d'origine tectonique. Pour les collines du nord, prospectées et étudiées depuis peu par les archéologues de la mission, les informations demeurent incomplètes : les phases ne sont donc pas précisées. 68
Tableau 7 - Récapitulatif des « buttes de sédiment fin ». La hauteur indiquée correspond à la différence entre l'altitude du point culminant de la colline et celle de la plaine environnante. Les points d'interrogation indiquent que l'occupation durant la ou les phases concernées est incertaine. 73
Tableau 8 - Récapitulatif des « oasis actuelles ». 82
Tableau 9 - Listes des coupes (lettres) et échantillons (nombres) par sites de prélèvement. . 102
Tableau 10 - Liste des coupes (lettres) et échantillons (nombres) par type. 102
Tableau 11 - Récapitulatif de la granulométrie et des âges des principales formations de lœss sahariens étudiés dans le monde. Modifié d'après Crouvi *et al.* 2008 et augmenté (Algérie et Égypte) à partir des sources citées dans le texte. 106
Tableau 12 - Récapitulatif des catégories créées pour la réalisation des logs en fonction des fractions granulométriques des échantillons. 116
Tableau 13 - Sédimentologie des dépôts de playas et de semi-playas (coupe X et de l'échantillon 118). 121
Tableau 14 - Sédimentologie des dépôts de canaux et de puits (coupe U et échantillon 105). 122
Tableau 15 - Sédimentologie des dépôts éoliens d'origine naturelle (échantillons 108, 109, 110, 114, 115,116, 117, 123, 127). 126
Tableau 16 - Sédimentologie des dépôts de parcellaires (coupes A, C et Y, échantillons 125 et 126). 134
Tableau 17 - Sédimentologie des dépôts de lœss sahariens (coupes E, G et N, échantillons 119 et 124). 137
Tableau 18 - Sédimentologie des dépôts de lœss sahariens (coupes V et W). 146
Tableau 19 - Sédimentologie des dépôts de lœss sableux (coupe O, Q, T et ZB.) 149
Tableau 20 - Sédimentologie des dépôts de lœss sableux (coupe F). 156
Tableau 21 - Récapitulatif de la sédimentologie des coupes complexes (coupe ZA). 160
Tableau 22 - Sédimentologie des coupes complexes (coupe B). 167
Tableau 23 - Buttes de sédiments fins étudiées et périodes d'occupations connues. 172
Tableau 24 - Dimensions généralement observées pour les tertres de la région de Tularosa, au Nouveau-Mexique (États Unis d'Amérique) d'après Meinzer et Hare (1915). 179
Tableau 25 - Typologie des buttes de sédiments fins étudiées et de quelques buttes observées sur les images satellitaires ou sur le terrain, dont l'étude n'a pas pu être menée pour le moment. 189
Tableau 26 - Formes éoliennes de la dépression de Kharga déjà décrites dans la typologie de Y. Callot (2008). Les cases grisées indiquent les formations qui ne présentent pas de particularités régionales importantes. Les cases blanches correspondent aux formations dont les particularités régionales seront décrites dans le texte ci-dessous. 275
Tableau 27 - Formes éoliennes mixtes de la dépression de Kharga. Leur description est développée ci-dessous, dans le texte. 283

Table des matières

Remerciements **5**

Sommaire **8**

Introduction **11**

Première partie - La dépression de Kharga entre dynamiques récentes et héritages **15**

Introduction **15**

Chapitre I. L'Égypte, une oasis fluviale cernée par les déserts ? **17**

I.A. Déserts et oasis 18

I.B. L'Égypte entre aridité et hyperaridité 19

I.C. Une ressource allochtone capitale et renouvelable : le Nil 23

I.D. Les eaux du dessous : le Système aquifère des Grès de Nubie 24

I.E. « Les îles des bienheureux » 25

Chapitre II. Topographie, climats et hydrogéologie de la dépression de Kharga au Quaternaire **26**

II.A. Une dépression fermée parsemée de collines et traversée par un erg 26

II.B. L'hyperaridité climatique et la prépondérance des phénomènes éoliens 29

II.C. Les grandes pulsations climatiques quaternaires 31

II.D. À l'origine des ressources en eau : géologie, hydrogéologie locale, reliefs et tectonique 34

II.D.1. L'alternance entre aquifères et aquicludes 34

II.D.2. Eaux « fossiles » et artésianisme 37

Chapitre III. Un peuplement holocène centré sur les points d'eau **39**

III.A. Contexte archéologique et historique de peuplement 39

III.B. Peuplement et pratiques agricoles contemporaines 47

III.B.1. La « Nouvelle Vallée », un moteur pour la démographie et les activités humaines 47

III.B.2. Une économie fondée sur l'agriculture et le tourisme 49

III.B.3. Une agriculture en proie à des changements profonds 49

III.B.4. L'exploitation du système aquifère des grès de Nubie en question 53

III.B.5. L'Holocène dans la dépression de Kharga : du vent, de l'eau et des hommes 54

Chapitre IV. Une grande variété de sites d'étude **56**

IV.A. La butte témoin : KS046 - Gebel Bayyan el-Qibli 59
IV.B. Les sites de plaine 61
IV.B.1. Les sites de playa 61
IV.B.2. Les sites sur puits 62
IV.B.3. Les sites sur puits et canaux exogènes 63
IV.B.4. La nécropole de Douch 65
IV.C. Les sites de l'erg, malgré le sable ? 65
IV.D. Les collines de grès d'origine tectonique : des châteaux d'eau naturels 68
IV.D.1. Les collines d'origine tectonique du nord 68
IV.D.2. Les collines d'origine tectonique du sud 69
IV.E. Les buttes de sédiment fin : une genèse récente ? 73
IV.E.1. Les buttes basses couvertes de sites antiques 74
IV.E.2. Les buttes disséquées, témoin de fortes dynamiques érosives 75
IV.E.3. Les buttes peu érodées, récemment abandonnées 78
IV.F. Les oasis actuelles 81
Conclusion : géomorphologie et activités humaines dans la dépression de Kharga, un jeu d'échelles complexe 85
Deuxième partie - Analyse géomorphologique, géoarchéologique et géohistorique des relations hommes/vent durant l'Holocène ... 87
Introduction 87
Chapitre V. Les pluies actuelles, des épisodes violents à l'impact morphogénétique limité dans le temps 90
V.A Les marques d'un ruissellement intense : ravinement et désorganisation des formations éoliennes 91
V.B. Stagnation et évaporation aux exutoires de petits bassins versants endoréiques 94
V.C. Un impact morphogénétique limité dans l'espace et le temps 96
Chapitre VI. Yardangs et buttes de sédiments fins du bassin sud de la dépression de Kharga : analyse sédimentologique de dépôts inattendus dans un désert hyperaride 100
VI.A. Travaux antérieurs sur les yardangs et les dépôts de la dépression de Kharga 103
VI.A.1 Les yardangs et les dépôts de sédiment fin de la dépression de Kharga, un sujet de recherche ancien 103
VI.A.2. *Loess like deposits* et lœss sahariens 104
VI.A.3. Les dépôts de source des dépressions de Dakhla et de Kharga 107

VI.B. Des dépôts de lœss à Kharga ? Objectifs de l'analyse sédimentologique des dépôts de sédiments fins de la région de Douch et principales hypothèses de travail 108

VI.C. Méthodologie de terrain et de laboratoire 109

VI.C.1 Observations directes et sur images satellites, croisement avec les vestiges archéologiques sur le terrain 109

VI.C.2. Granulométrie, dosage de matière organique, analyses morphoscopiques et étude du contenu des sédiments : une combinaison d'analyses efficace et simple à mettre en œuvre 113

VI.D. Résultats et interprétation 117

VI.D.1. Référentiel sédimentologique 117

VI.D.1.a. Les dépôts de playas ou semi-playas 117

VI.D.1.b. Les canaux et les puits 121

VI.D.1.c. Les dépôts éoliens indépendants des activités anthropiques 125

VI.D.1.d. les dépôts de parcellaires 129

VI.D.2. Analyse sédimentologique des dépôts fins de la région de Douch 135

VI.D.2.a. Les lœss sahariens 135

II.D.2.b. Les lœss sableux 148

II.D.2.c. Les coupes complexes 158

VI.D.3. Synthèse et spatialisation : des lœss nombreux et parfois liés aux activités agricoles, mais sans gradient 168

Chapitre VII. Géomorphologie et stratigraphie des buttes de plaines associées à des puits historiques 170

VII.A. Des buttes d'apparence composite : une morphogenèse découlant de processus distincts ?. 173

VII.B. Un lien avec l'artésianisme ? 177

VII.C. Une mise en valeur agricole ancienne et durable dont témoignent les écrits des voyageurs et des scientifiques de passage 183

VII.D. Une genèse complexe, à la croisée entre facteurs hydrogéologiques, éoliens et anthropiques 187

Chapitre VIII. L'érosion éolienne de l'Antiquité à nos jours : taux de sédimentation et d'ablation dans le bassin sud de la dépression de Kharga 195

VIII.A. Apports de la géoarchéologie à l'étude de l'érosion éolienne dans la dépression de Kharga (Égypte). 195

VIII.B. De nouveaux résultats grâce aux témoignages des voyageurs et des scientifiques (XIXe - XXe s) 221

Chapitre IX. Vivre et cultiver dans la dépression de Kharga : construire les paysages de l'artésianisme et du vent 223

IX.A. Du vent, de l'eau et des hommes. Le bassin sud de l'oasis de Kharga de la XXVIIe dynastie à nos jours 223

IX.B. Un erg moins hostile durant l'Antiquité ? 268

Conclusion : Le vent et l'agriculture, facteurs principaux de la morphogenèse oasienne 271

Troisième partie - Décrire et modéliser les paysages du vent : essais de typologie et de synthèse 272

Introduction 272

Chapitre X. Typologie des formations hydro-éoliennes, anthropo-éoliennes et anthropo-hydro-éoliennes de la dépression de Kharga 274

X.A. Formations éoliennes d'accumulation et formes d'ablation 275

X.A.1. Lœss saharien 276

X.A.2. Les voiles sableux 277

X.A.3. Méga-ride 277

X.A.4. Barkhane 278

X.A.5. Erg 280

X.A.6. Yardang 281

X.B. Formes d'accumulation anthropo-éoliennes et hydro-éoliennes 283

X.B.1. Formes d'accumulation hydro-éolienne 284

X.B.1.a. Dépôt sous le vent de galets 284

X.B.1.b. Vestige d'avancée de barkhane en milieu humide 285

X.B.1.c. Tertres artésiens (*spring mounds)* 286

X.B.1.d. Playa et semi-playa 286

X.B.2 Formes mixtes anthropo-éoliennes 287

X.B.2.a. Dune-afreg 287

X.B.2.b. Dunes stabilisées 287

X.B.3. Formes mixtes hydro-anthropo-éoliennes 288

X.B.3.a. Dépôts de canaux et de chenaux anthropiques 289

X.B.3.b. Playas de drainage 289

X.B.3.c. Lœss sableux et dépôts de champs 290

X.B.3.d. Tertres artésiens de puits 291

Chapitre XI. Morphogenèse anthropo-éolienne, types de sites et modélisation descriptive 294

XI.A. Synthèse de l'évolution morphogénétique régionale : les modèles à l'origine des paysages actuels 295

XI.A.1. De l'aridification aux activités agricoles à l'époque perse (IIIe millénaire avant notre ère - Ve s. avant notre ère) : l'eau et le vent avant les oasis 295

XI.A.2. De l'époque perse à la fin de la période romaine (Ve s. avant notre ère - Ve s. de notre ère) : une colonisation fondée sur l'exploitation intensive des ressources du milieu permise et limitée par les technologies d'extraction de l'eau 296

XI.A.3. De la fin de l'époque romaine à la fin de la période ottomane (Ve s. - XIXe s.) : contraction des sites, mobilités des activités 300

XI.A.4. Du XIXe s. à nos jours : un retour au modèle antique ? 301

XI.B. Une évolution morphogénétique différenciée à l'échelle des sites 302

XI.B.1. Les sites sur qanâts : un déplacement progressif des activités et des lieux de dépôt vers le bas des collines 303

XI.B.2. Les sites de plaine sur puits pérennes : un système à l'origine des buttes de lœss sableux..... 305

XI.B.3. Les sites de plaine sur puits multiples ou sur canaux : des dépôts très étendus, mais d'épaisseur réduite..... 307

XI.C. Raréfaction régionale des ressources sur le temps long et profusion locale liée aux aménagements sur le temps court 308

XI.C.1. Dégradation environnementale et réduction progressive des ressources en eau : des phénomènes régionaux à macro-régionaux 308

XI.C.2. Le système oasien : un accroissement local de la ressource disponible temporairement déconnecté de l'évolution régionale sur le temps long..... 309

XI.C.3. Le poids de l'économie, de la politique et de l'histoire..... 309

Chapitre XII. Perspectives.....311

XII.A. Étendre notre approche dans le désert Libyque 311

XII.A.I. Approfondir et compléter l'étude des buttes et des yardangs de sédiments fins 311

XII.A.2. Enrichir les données concernant les périodes médiévales et ottomanes. 312

XII.A.3. Mettre en place une étude systématique de la répartition diachronique des sites archéologiques..... 313

XII.B. Confronter les typologies et les modèles à d'autres régions du monde 314

XII.B.1. La nécessaire comparaison avec d'autres oasis artésiennes 314

XII.B.2. Les formes anthropo-hydro-éoliennes, spécificités régionales ? 314

Conclusion : un désert durablement marqué par les activités humaines ..316

Conclusion générale.....317

Bibliographie.....322

Table des figures 337

Table des tableaux 347

Table des matières 349

Liste des annexes..... Erreur ! Signet non défini.

Annexe 1 - Cartes des sites de la dépression de Kharga et de sa région méridionale au format A3. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Carte 1 - Carte des sites étudiés : dépression de Kharga.....**Erreur ! Signet non défini.**

Carte 2 - Carte des sites étudiés : région méridionale - Bassin de Baris-Douch **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe 2 - Coordonnées des sites, des coupes, et des lieux de prélèvement d'échantillons isolés. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 1 - Oasis actuelles mentionnées dans le texte.....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2 - Sites "KS" mentionnés dans le texte .....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 3 - Coupes étudiées.....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 4 - Échantillons isolés étudiés .....**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe 3 - Tableau récapitulatif détachable des phases historiques régionales ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des annexes

Annexe 1 - Cartes des sites de la dépression de Kharga et de sa région méridionale au format A3

Carte 1 - Carte des sites étudiés : dépression de Kharga

Carte 2 - Carte des sites étudiés : région méridionale - Bassin de Baris-Douch

Annexe 2 - Coordonnées des sites, des coupes, et des lieux de prélèvement d'échantillons isolés

Tableau 1 - Oasis actuelles mentionnées dans le texte

Tableau 2 - Sites "KS" mentionnés dans le texte

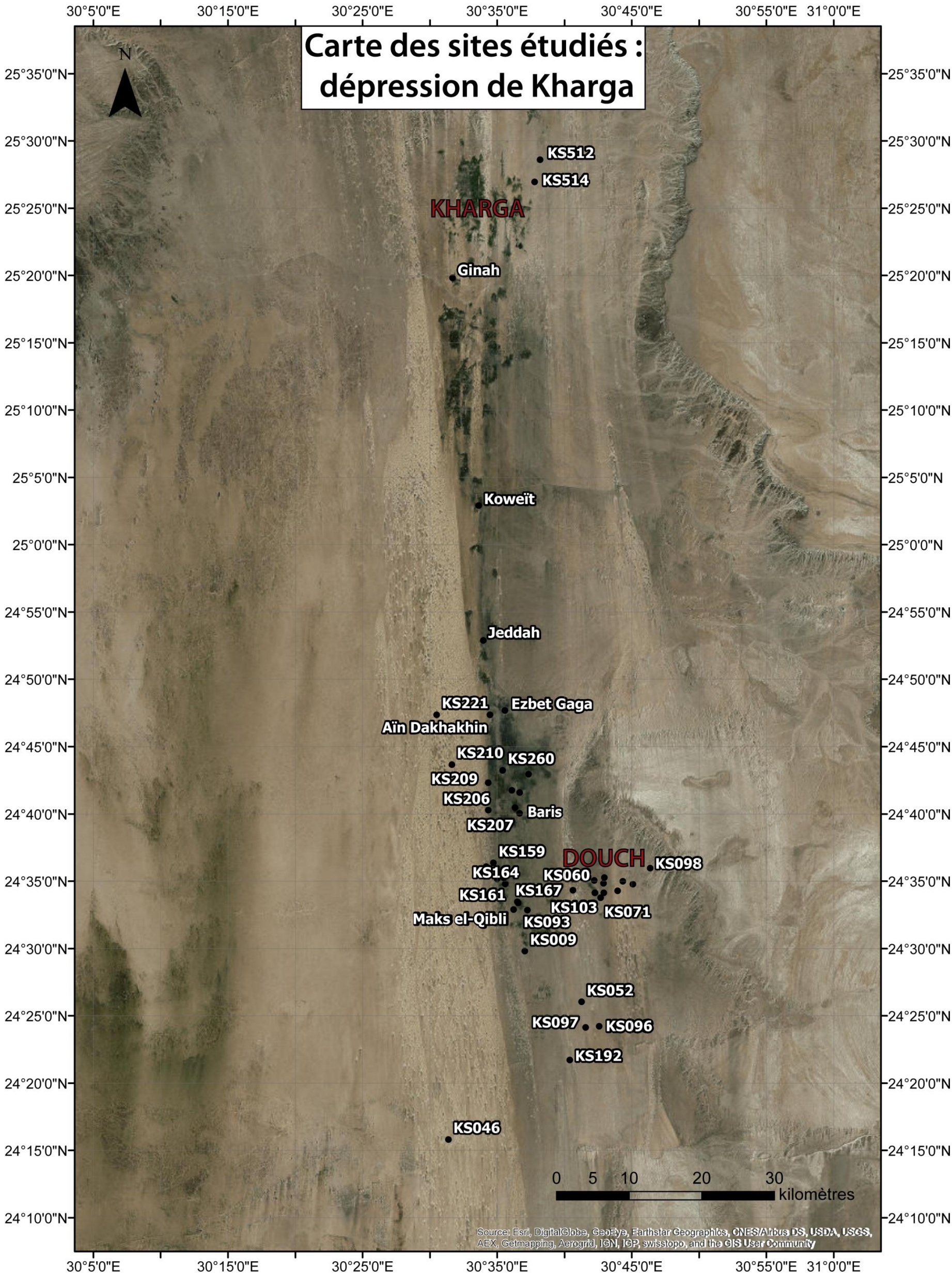
Tableau 3 - Coupes étudiées

Tableau 4 - Échantillons isolés étudiés

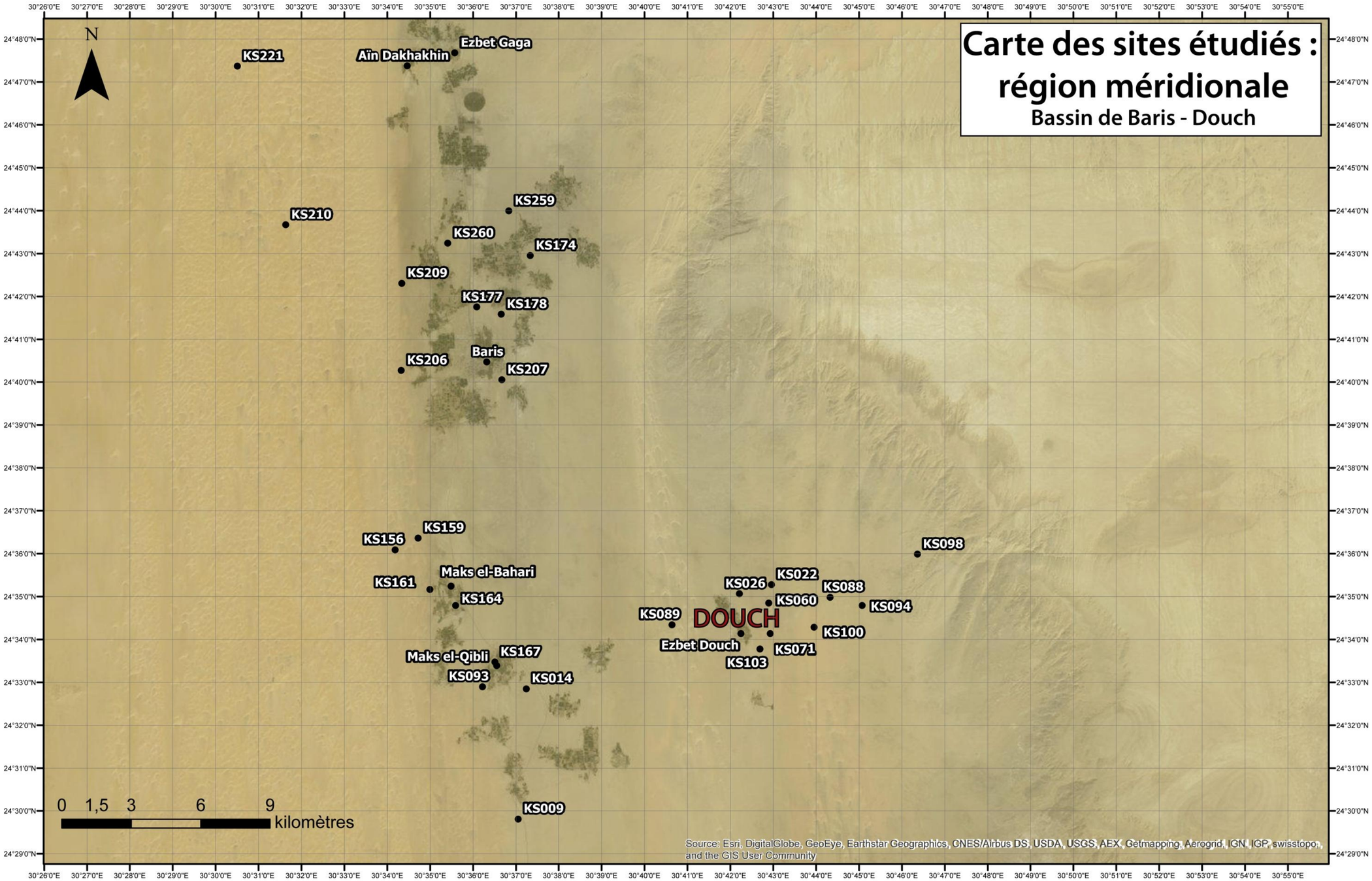
Annexe 3 - Tableau récapitulatif détachable des phases historiques régionales

Annexe 1 - Cartes des sites de la dépression de Kharga et de sa région méridionale au format A3

Carte 1 - Carte des sites étudiés : dépression de Kharga



Carte 2 - Carte des sites étudiés : région méridionale - Bassin de Baris-Douch



Annexe 2 - Coordonnées des sites, des coupes, et des lieux de prélèvement d'échantillons isolés

Tableau 1 - Oasis actuelles mentionnées dans le texte

Coordonnées des oasis actuelles mentionnées		
Oasis	**Coordonnées Y**	**Coordonnées X**
Aden	24° 44' 50,768" N	30° 35' 32,070" E
Aïn Dakhakhin	24° 47' 23,777" N	30° 34' 28,710" E
Aïn Mansur	24° 33' 30,984" N	30° 38' 55,813" E
Algeria	25° 7' 58,464" N	30° 32' 39,953" E
Bagdad	24° 47' 39,097" N	30° 35' 9,443" E
Baris	24° 40' 23,273" N	30° 36' 15,176" E
Birqis	24° 43' 48,548" N	30° 35' 32,215" E
Bulaq	25° 12' 30,683" N	30° 32' 19,327" E
El-Maharik	25° 36' 58,339" N	30° 39' 5,358" E
Ezbet Douch	24° 34' 12,791" N	30° 42' 15,511" E
Ezbet Gaga	24° 47' 39,133" N	30° 35' 33,431" E
Ginah	25° 19' 48,736" N	30° 31' 40,951" E
Gourmashine	24° 50' 2,843" N	30° 33' 47,208" E
Jeddah	24° 52' 50,512" N	30° 33' 53,000" E
Kharga	25° 26' 21,593" N	30° 33' 31,527" E
Koweït	25° 2' 55,476" N	30° 33' 40,408" E
Maks El-Bahari	24° 35' 12,748" N	30° 35' 27,953" E
Maks El-Qibli	24° 33' 21,887" N	30° 36' 38,739" E
Nasser	25° 16' 40,613" N	30° 31' 57,819" E
New Baris	24° 41' 36,788" N	30° 35' 45,700" E
Palestine	24° 59' 25,182" N	30° 33' 48,225" E
Qasr El-Ghueita	25° 17' 11,175" N	30° 33' 56,444" E
Qasr El-Zayyan	25° 15' 3,240" N	30° 34' 16,740" E
Sanaa	25° 5' 18,147" N	30° 32' 41,030" E

Tableau 2 - Sites "KS" mentionnés dans le texte

Coordonnées des sites KS mentionnés		
Site	**Coordonnées Y**	**Coordonnées X**
KS009	24° 29' 48,672" N	30° 37' 3,047" E
KS014	24° 32' 50,935" N	30° 37' 14,477" E
KS022	24° 35' 16,648" N	30° 42' 57,322" E
KS026	24° 35' 4,146" N	30° 42' 12,714" E
KS046	24° 15' 48,659" N	30° 31' 22,197" E
KS052	24° 26' 2,520" N	30° 41' 16,380" E
KS060	24° 34' 50,982" N	30° 42' 53,518" E
KS071	24° 34' 8,158" N	30° 42' 55,710" E
KS088	24° 34' 59,193" N	30° 44' 19,435" E
KS089	24° 34' 20,553" N	30° 40' 38,202" E
KS093	24° 32' 54,096" N	30° 36' 13,163" E
KS094	24° 34' 47,582" N	30° 45' 4,436" E
KS096	24° 24' 14,118" N	30° 42' 34,622" E
KS097	24° 24' 8,545" N	30° 41' 33,716" E
KS098	24° 35' 59,367" N	30° 46' 21,735" E
KS100	24° 34' 17,380" N	30° 43' 56,985" E
KS103	24° 33' 46,698" N	30° 42' 41,471" E
KS156	24° 36' 5,597" N	30° 34' 10,957" E
KS159	24° 36' 21,980" N	30° 34' 43,197" E
KS161	24° 35' 10,268" N	30° 34' 59,619" E
KS164	24° 34' 47,713" N	30° 35' 35,659" E
KS167	24° 33' 28,476" N	30° 36' 30,321" E
KS174	24° 42' 57,242" N	30° 37' 19,830" E
KS177	24° 41' 45,385" N	30° 36' 5,194" E
KS178	24° 41' 35,177" N	30° 36' 39,473" E
KS192	24° 21' 43,185" N	30° 40' 23,768" E
KS206	24° 40' 16,632" N	30° 34' 19,531" E
KS209	24° 42' 18,627" N	30° 34' 20,271" E
KS210	24° 43' 40,441" N	30° 31' 37,660" E
KS207	24° 40' 3,408" N	30° 36' 40,341" E
KS221	24° 47' 22,520" N	30° 30' 30,173" E
KS259	24° 43' 59,981" N	30° 36' 50,126" E
KS260	24° 43' 14,633" N	30° 35' 24,659" E
KS512	25° 28' 37,600" N	30° 38' 10,800" E
KS514	25° 26' 58,100" N	30° 37' 46,800" E

Tableau 3 - Coupes étudiées

Coordonnées des coupes étudiées		
Coupe	**Coordonnées Y**	**Coordonnées X**
A	24° 35' 10,176" N	30° 42' 57,824" E
B	24° 35' 2,436" N	30° 42' 57,606" E
C	24° 34' 57,195" N	30° 43' 0,518" E
E	24° 34' 50,265" N	30° 42' 44,624" E
F	24° 34' 43,008" N	30° 42' 44,312" E
G	24° 34' 43,890" N	30° 42' 45,171" E
N	24° 35' 23,167" N	30° 44' 59,115" E
O	24° 34' 56,221" N	30° 44' 42,945" E
Q	24° 34' 21,391" N	30° 40' 36,428" E
T	24° 36' 2,910" N	30° 46' 22,565" E
U	24° 34' 7,373" N	30° 42' 57,195" E
V	24° 34' 15,205" N	30° 43' 8,729" E
W	24° 34' 28,413" N	30° 43' 25,178" E
X	24° 24' 6,040" N	30° 41' 32,007" E
Y	24° 42' 12,356" N	30° 34' 21,663" E
ZA	24° 35' 49,899" N	30° 34' 48,145" E
ZB	24° 35' 9,756" N	30° 35' 0,596" E

Tableau 4 - Échantillons isolés étudiés

Coordonnées des échantillons étudiés		
Échantillon	**Coordonnées Y**	**Coordonnées X**
105	24° 34' 14,820" N	30° 42' 16,980" E
108	24° 34' 27,489" N	30° 40' 34,281" E
109	24° 34' 27,468" N	30° 40' 34,166" E
110	24° 34' 16,753" N	30° 40' 45,700" E
114	24° 21' 42,135" N	30° 40' 22,269" E
115	24° 21' 42,143" N	30° 40' 22,285" E
116	24° 21' 43,862" N	30° 40' 21,548" E
117	24° 21' 43,878" N	30° 40' 21,581" E
118	24° 46' 47,610" N	30° 36' 38,277" E
119	24° 42' 31,540" N	30° 34' 0,044" E
123	24° 24' 8,379" N	30° 41' 34,354" E
124	24° 42' 31,747" N	30° 33' 59,822" E
125	24° 35' 0,695" N	30° 42' 57,693" E
126	24° 34' 59,788" N	30° 42' 53,570" E
127	24° 26' 2,520" N	30° 41' 16,380" E

Annexe 3 - Tableau récapitulatif détachable des phases historiques régionales

Dénomination des périodes		Bornes chronologiques			Peuplement connu	
Période générale	**Période**	**Calendrier grégorien**	**Millénaires et siècles**	**BP (Correspondance approximative)**	**Dépression de Kharga**	**Bassin sud (Baris et Douch)**
Préhistoire holocène (Épipaléolithique, Néolithique, Prédynastique)		-9 750 à *ca.* -3 100	10e millénaire - 31e siècle	11 700 à *ca.* 5 050	Oui	Oui
Antiquité	Période thinite	*Ca.* 3 100 à *ca.* -2 650	31e - seconde moitié du 27e	*Ca.*5 050 à *ca.*4 600	Oui	Oui
	Ancien Empire	*Ca.* -2 650 à *ca.* -2 200	Seconde moitié du 27e - 22e	*Ca.* 4 600 à *ca.* 4 150	Oui	Oui
	Première période intermédiaire	*Ca.* -2 200 à *ca.* -2 030	22e - deux premiers tiers du 21e	*Ca.* 4 150 à *ca.* 3 980	Oui	Non
	Moyen Empire	*Ca.* -2 030 à *ca.* -1 785	Dernier tiers du 21e - début du 18e	*Ca.* 3 980 à *ca.* 3 735	Oui	Non
	Deuxième période intermédiaire	*Ca.* -1 785 à *ca. -1 550*	18e - première moitié du 16e	*Ca.* 3 735 à *ca.* 3 500	Oui	Non
	Nouvel Empire	*Ca.* -1 550 à *ca. -1 080*	Seconde moitié du 16e - début du 11e	*Ca.* 3 500 à *ca.* 3 030	Oui	Non
	Troisième période intermédiaire	*Ca. -1 080* à *ca. -750*	11e -première moitié du 8e	*Ca.* 3 030 à *ca.* 2 700	Oui	Non
	Basse époque - avant la période perse	*Ca.* -750 à *-475*	Seconde moitié du 8e - premier quart du 5e	*Ca.* 2 700 à 2 425	Oui	Non
	Basse époque - période perse	-475 à - 332	Trois quarts du 5e - deux premiers tiers du 4e	2 425 à 2 282	Oui	Oui
	Période ptolémaïque	-332 à - 30	Dernier tiers du 4e - deux premiers tiers du 1er av.	2 282 à 1 980	Oui	Oui
	Période romaine	-30 à 395	Dernier tiers du 1er av. - fin du 4e ap.	1 980 à 1 555	Oui	Oui
Transition	**Période byzantine**	395 à 642	Fin du 4e - première moitié du 7e	1 555 à 1 308	Oui	Oui
Moyen-Âge	**Période arabe pré-mamelouke**	642 à 1 250	Seconde moitié du 7e - première moitié du 13e	1 308 à 700	Oui	Oui
	Période mamelouke	1 250 à 1 517	Seconde moitié du 13e début du 16e	700 à 433	Oui	Oui
Époque moderne et contemporaine	**Période ottomane**	1 517 à 1 811	Début du 16e - début du 19e	433 à139	Oui	Oui
	Périodes moderne et actuelle	1 811 à nos jours	Début du 19e - début du 21e	139 à nos jours	Oui	Oui

Résumé

Dans le désert Libyque (Égypte), l'un des plus arides du monde, l'action du vent trouvant peu de limites, l'ablation et le transport éoliens sont des éléments prégnants de la morphogenèse. Au cœur de ce désert, les oasis de la dépression de Kharga, nées de l'artésianisme et des activités humaines, constituent au contraire, par la profusion de l'eau et de la végétation, des secteurs où les processus de dépôt sont renforcés. L'imbrication entre une région désertique (zone-source de sédiments) et des sites oasiens (zones de dépôt), où s'appliquent des processus opposés, maximise les dynamiques éoliennes et leur impact morphogénétique. Il en découle la formation des paysages du vent, que cette thèse vise à décrire, comprendre et expliquer.

Mobilisant des méthodes de géomorphologie, de géoarchéologie, de géohistoire et de sédimentologie, ce travail rend compte de l'impact paysager des interactions entre activités humaines et dynamiques éoliennes depuis la création des oasis il y a 2 500 ans. Il présente un bilan des processus naturels et anthropiques, et aborde la question des conditions de vie des oasiens depuis l'Antiquité.

Trois apports principaux résultent de cette recherche :

- une typologie des formations constitutives des paysages du vent
- une modélisation descriptive du système à leur origine, reposant sur des cycles asynchrones de colonisation et de déprises
- un bilan des grandes tendances de l'évolution environnementale et morphogénétique sur le temps long, depuis l'implantation des oasis : les paysages du vent sont nés de la distorsion entre la dégradation environnementale régionale et l'amélioration locale et temporaire des conditions édaphiques résultant des activités humaines.

Mots-clés : Égypte, désert Libyque, Kharga, géographie, géomorphologie, géoarchéologie, géohistoire, Holocène récent, relations hommes/environnements, oasis, érosion éolienne, aquifère artésien, impacts morphogénétiques de l'agriculture

Abstract

The limiting features of the wind dynamics are scarce in the Western desert of Egypt, one of the most arid areas in the world: eolian ablation and transport are the prevailing factors of the morphogenesis. Born from artesian waters and human activities, the oases of Kharga basin form an area where the deposition processes are stronger thanks to the large amount of water and vegetation. Eolian dynamics, and their morphogenetic impacts, are strengthened by the nesting of oasis sites (deposition areas) in a desert region (sediment source-zone). The landscapes of the wind are thus formed by the juxtaposition of these areas where opposed processes occur. This thesis aims to describe, understand and explain their development.

This work based on geomorphology, geoarchaeology, « *géohistoire* » and sedimentology gives an account on the impacts on the landscapes of the interactions between eolian dynamics and human activities since the creation of the oases 2 500 years ago. It consists in an overview of the natural and anthropogenic processes and an assessment of the living conditions in the oasis since the Antiquity.

The three main results of this research are:

- a typology of the elements forming the landscapes of the wind;
- a descriptive modelisation of the system at stake in their formations, which is based on an asynchronous cycle of colonisation and abandonment of the sites;
- an overview of the main patterns of the long-term environmental and morphogenetic evolution since the creation of the oases.

This triple contribution shows that the landscapes of the wind are born from the distortion between the regional environmental trend towards degraded conditions and the local and temporary improvements of the edaphic conditions due to human activities.

Keywords: Egypt, Western Desert, Kharga, geography, geomorphology, geoarchaeology, "*géohistoire*", Late Holocene, Men/environments interactions, oasis, eolian erosion, artesian aquifer, morphogenetic impacts of agriculture,