



**HAL**  
open science

# Les paysages du Nefzaoua , une interaction entre l'eau, le vent et les hommes.

Afef Raddadi

► **To cite this version:**

Afef Raddadi. Les paysages du Nefzaoua , une interaction entre l'eau, le vent et les hommes.. Géographie. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE2010 . tel-03258106

**HAL Id: tel-03258106**

**<https://theses.hal.science/tel-03258106>**

Submitted on 11 Jun 2021

**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.



N° d'ordre NNT : 2021LYSE2010

## THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

**École Doctorale : ED 483**

**Sciences sociales**

Discipline : Géographie, Aménagement, Urbanisme

Soutenue publiquement le 19 janvier 2021, par :

**Afef RADDADI**

---

# **Les paysages du Nefzaoua, une interaction entre l'eau, le vent et les hommes.**

---

Devant le jury composé de :

Pascal PODWOJEWSKI, Directeur de recherche HDR, Institut de recherche pour le développement, Président

Catherine MERING, Professeure émérite, Université Paris Diderot, Rapporteur

Pierre DERIOZ, Maître de conférences HDR, Université d'Avignon, Rapporteur

Mohamed OUESSAR, Maître de conférences HDR, Institut des Régions Arides-Médenine, Examineur

Yann CALLOT, Professeur émérite, Université Lumière Lyon 2, Directeur de thèse

Dalel OUERCHEFANI, Maître assistante, Institut des Régions Arides-Médenine, Co-Directrice de thèse

# Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Université Lumière Lyon 2  
École Doctorale 483 Sciences Sociales  
UFR Temps et Territoires  
Département de Géographie  
*UMR 5133 Archéorient*

# **Les paysages du Nefzaoua, une interaction entre l'eau, le vent et les hommes**

Thèse

Présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur  
spécialité « Géographie, Aménagement et  
Urbanisme » par

Afef RADDADI

Soutenue le 19.Janvier 2021 devant le jury composé de :

M.Yann Callot	Univ. Lumière Lyon 2	Directeur
Mme. Catherine Mering	Université de Paris	Rapporteure
M.Pierre Dérioz	Univ- Avignon	Rapporteur
M. Mohamed Ouasar	IRA Medenine	Examineur
Mme. Dalel Ouerchefani	IRA. Medenine	Co encadreur
M.Pascal Podwojewski	IRD Bondy	Examineur





# Remerciements

L'aboutissement du travail entrepris, matérialisé par l'achèvement de ce mémoire de thèse, fut un chemin lent et rempli de nombreuses contraintes que je n'aurais pas pu surmonter sans l'aide d'un certain nombre de personnes. Je tiens à remercier ici toutes celles qui d'une manière ou une autre, m'ont aidé dans sa réalisation.

Ma profonde gratitude s'adresse à mon directeur de thèse le Professeur Yann Callot pour avoir accepté de diriger ce travail alors qu'il partait en retraite, pour son intérêt et son soutien et ses nombreux conseils. Il a su être à la fois un guide et un analyste pertinent dans ses remarques, critiques et orientations permettant de maintenir ce travail de recherche sur les rails. Qu'il soit remercié pour la confiance qu'il m'a témoignée.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à tous les membres de l'Institut des Régions Arides (l'IRA) de Médenine Tunisie, à son directeur général Houcine Khatelli, à Dalel Ourchefani pour avoir mis à ma disposition les moyens matériels pour pouvoir mener à bien mes sorties sur le terrain et mes analyses sédimentologiques. Ma reconnaissance va particulièrement à Saïd Fadhli et Ibtissem Lassoued techniciens responsables du Laboratoire d'Analyse des Eaux et des Sols de m'avoir initié aux techniques d'analyse de sol et d'avoir mis à ma disposition leur temps et leur savoir-faire. Merci également à Mohamed Moussa directeur du laboratoire d'Erémologie et lutte contre la désertification (LR16IRA01) d'avoir veillé au bon déroulement de mon travail au laboratoire et d'avoir toujours répondu favorablement à mes demandes de déplacement sur le terrain.

Je veux également témoigner ma gratitude à Pascal Podwojewski, pédologue et directeur de recherche IRD (à Bondy). Merci de m'avoir accueilli dans ce centre IRD d'Ile de France et d'avoir pris en charge mes analyses sur le MEB, d'avoir suivi de près mes travaux au laboratoire de l'IRA Médenine, de m'avoir accompagné sur le terrain et d'avoir répondu à mes nombreuses questions et ainsi de m'avoir fait bénéficier de son savoir dans le domaine de la sédimentologie.

Je tiens à remercier également Richard Escadafal, directeur de recherche IRD (au CESBIO à Toulouse) de m'avoir initiée, à différents outils de cartographie et de télédétection,

pour l'investissement en temps et en énergie qu'il m'a accordé au long de la thèse. Malgré son départ à la retraite, il a continué à me lire, et à me corriger.

Merci aux professeurs qui se sont intéressés à ce travail et ont accepté de participer au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier tous ceux et celles qui ont m'accompagné sur le terrain : Dalel Ourechefani, Imed Jarray, Maël Crepy, Nicola Jacob, Ninon Blond, Pascal Podwojewski et Yann Callot. Mes remerciements vont également aux chauffeurs notamment Mouldi Mhdaoui pour l'aide qu'il m'a donnée sur le terrain lorsque les prélèvements des coupes devenaient difficiles. Un remerciement spécial aux oasiens du Nefzaoua qui nous ont bien accueillis, particulièrement Ridha Elbaldaoui, un des propriétaires d'Aïn Chardiouss, qui nous a autorisés à échantillonner sur ses terres et qui est même intervenu pour faciliter l'intervention d'une nacelle.

Je tiens à remercier le laboratoire Archéorient (UMR 5133) particulièrement ses deux directeurs successifs, Emmanuelle Vila et Christophe Benech, pour tous les moyens qu'ils m'ont accordés, mais aussi de m'avoir soutenu dans mes travaux et mes démarches durant mes six années de thèse.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont accepté de relire quelques pages ou/et l'ensemble de la thèse, Olivier Barge, Pascal Podwojewski, Pierre Dério, Richard Escadafal et Yann Callot. Un remerciement très spécial à Madame Danielle Stordeur pour ses corrections et suggestions sur tout le manuscrit.

L'élaboration d'une thèse est un travail à la fois long et stressant, surtout dans les conditions spéciales que le monde vit en cette année 2020. Durant la crise sanitaire Covid-19 je me suis retrouvé confinée en France chez ma sœur Jihen que je remercie énormément pour son accueil, d'avoir supporté mon stress difficilement gérable et d'avoir fait tout pour me créer les conditions favorables pour bien avancer dans mon travail de rédaction. Après le confinement j'ai été accueillie à l'antenne d'Archéorient à la commanderie de Jalès en Ardèche, pour la dernière phase de la rédaction de la thèse. Un remerciement spécial pour Emmanuelle Régagnon et Olivier Barge pour leur accueil, conseils et leurs encouragements, merci à Maureen Le Doaré, Stoil Chapkanski, Kristi Anastasi et Cecil Vittori mes amis de Jalés, votre compagnie a rendu moins difficiles ces derniers mois de rédaction.

Je tiens à remercier aussi mes ami(e)s pour leur accompagnement et leur soutien, merci beaucoup, merci énormément Hajer Sabri et Chiraz Belhadj Khedher. Je remercie également mon ami Ali Zaidi pour son aide inestimable et l'accueil chaleureux et convivial que sa famille m'a réservé tout au long de mes séjours à Médenine.

Je ne peux pas conclure ces remerciements sans remercier ma famille et mes proches dont la présence et les encouragements ont été un véritable réconfort lors des moments difficiles, mon père Mohamed Mouldi Raddadi et ma mère Najet Gazoumi, mes sœurs Aida, Jihen et Basma, mon frère Tarek, mon beau-frère Achref Ayadi et à mon oncle Abedelfatkeh Raddadi pour les compétences informatiques qui m'ont préservé tout au long de la thèse.



# Sommaire

Remerciements .....	4
Sommaire .....	8
Introduction générale.....	10
Première partie : Un milieu aride et anthropisé .....	16
Introduction de la première partie.....	18
Chapitre 1 : Le Nefzaoua : vue d'ensemble .....	20
Chapitre 2 : Les tertres du Nefzaoua : origine, formation, intérêt .....	51
Conclusion de la première partie .....	69
Deuxième partie : Les tertres artésiens du Nefzaoua : les outils d'étude d'un paysage en pleine transformation .....	71
Introduction de la deuxième partie.....	73
Chapitre 3 : L'utilisation de la cartographie et des images de télédétection pour l'étude de l'évolution du paysage des tertres au Nefzaoua. Étude diachronique récente .....	74
Chapitre 4 : Étude sédimentologique des tertres artésiens du Nefzaoua ...	126
Conclusion de la deuxième partie .....	189
Troisième Partie : les tertres de sources : une entité géomorphologique en voie de disparition .....	192
Introduction de la troisième partie .....	194
Chapitre 5 : Typologie des tertres du Nefzaoua .....	196
Chapitre 6 : Les tertres du Nefzaoua : un patrimoine paysager à identifier ? .....	229
Conclusion de la troisième partie.....	255
Conclusion générale .....	256
Bibliographie.....	264
Liste des figures .....	278
Liste des tableaux .....	284
Table des matières .....	285
Annexe.....	292



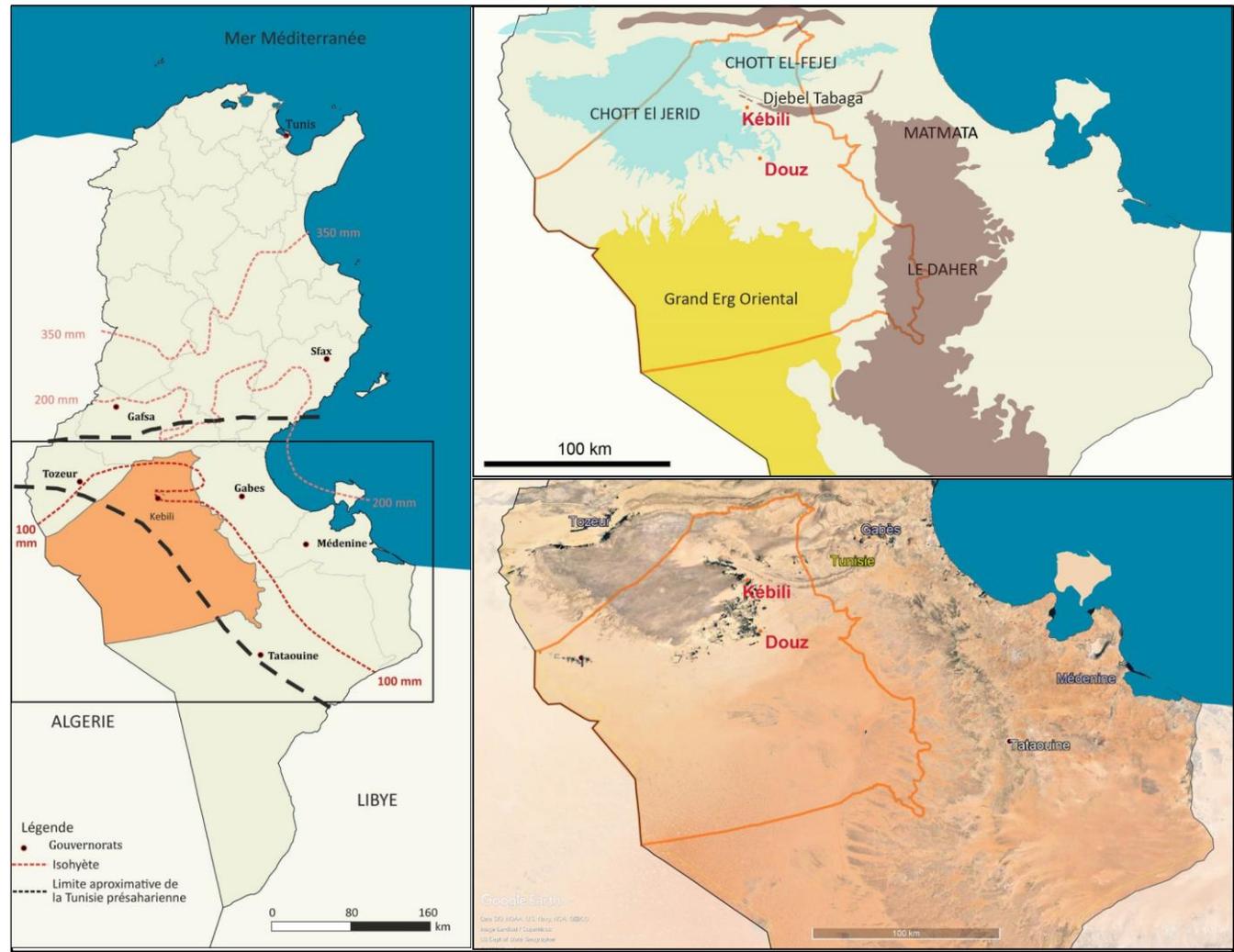
# Introduction générale

D'une superficie de 163 610 km<sup>2</sup>, La Tunisie est un pays d'Afrique du Nord situé sur la côte méditerranéenne et en bordure du désert du Sahara. C'est le plus petit pays du Maghreb ; il est limité à l'ouest et au sud-ouest par l'Algérie (965 kilomètres de frontière commune), au sud-est par la Libye (459 kilomètres) et au nord et à l'est par la mer Méditerranée (1 148 kilomètres de côtes).

Le climat dominant est méditerranéen avec une aridité prononcée en été et une forte variabilité intermensuelle et interannuelle des pluies, qui diminuent du nord vers le sud du pays où le climat devient désertique (Figure 1A). Cette limite climatique correspond également à une limite géomorphologique. En effet, la région est sur une zone de transition, mettant en contact d'une part la plate-forme saharienne comportant le monoclinale du Djebel Dahar qui descend en pente douce vers l'ouest et d'autre part l'extrémité orientale du massif de l'Atlas saharien lié au plissement alpin. Entre ces deux unités, existe une succession de dépressions endoréiques salines orientées est-ouest, de très faible altitude qui coupent la Tunisie en deux parties d'égale dimension au niveau du golfe de Gabes en se prolongeant jusqu'en Algérie. Ces dépressions correspondent à une limite d'aridité séparant un climat semi-aride au nord et un climat subdésertique au sud.

Au confins du Grand Erg oriental, le Nefzaoua (Gouvernorat de Kebili), région aride du sud-ouest tunisien occupe une position géomorphologique toute particulière en Tunisie, à la convergence de 4 ensembles géomorphologiques distincts (figure : 1.B) :

- i) La grande dépression plane du bassin endoréique du Chott el Jérid à l'Ouest ;
- ii) Au Nord, le monoclinale jurassique orienté est-ouest du Djebel Tébaga ;
- iii) Le glacis des Matmata et du Djebel Dahar en pente douce s'accroissant vers l'Est ;
- iv) Au SSW, le grand massif de dunes du Grand Erg oriental. Sur ce point de convergence s'est installée toute une série d'oasis (figure : 1.C), aujourd'hui transformées en palmeraies qui constituent autant de points de fixation tant d'une végétation pérenne que d'une population sédentaire.



**Figure 1 : carte de situation : A : la Tunisie avec ses limites climatiques approximatives de la Tunisie présaharienne (d'après le Houerou 1959) B : Croquis du Nefzaoua (Gouvernorat de Kébili) et ses environs montrant sa position à la convergence de 4 ensembles géomorphologiques distincts C : Agrandissement en image satellite Google Earth du Nefzaoua situ dans le Sud tunisien**

Jusqu'à une période récente, le Nefzaoua, présentait des paysages oasiens originaux. Depuis l'Antiquité, son système hydroagricole était organisé autour de sources affleurantes. Plus de 400 de ces sources ont été répertoriées par les cartographes militaires au début du XXe siècle. Elles étaient artésiennes, douces et alimentaient un réseau de canaux d'irrigation pour alimenter une production agricole répartie sur trois étages de végétation (palmiers - arbres fruitiers - légumes et céréales ou plantes fourragères).

Ces sources provenaient d'édifices géomorphologiques singuliers apparentés à des buttes-témoins, dénommés tertres. Ces sources étaient à une altitude supérieure au niveau de base entourant ces tertres. Ils étaient comme autant de points essentiels dans l'organisation hydrologique de systèmes d'irrigation de surface par simple gravité. Ces tertres seront l'objet principal de cette thèse.

Jusqu'à il y a peu de temps ces tertres n'ont jamais été l'objet d'études spécifique, ni comme structure géomorphologique, ni comme structure pédologique. En effet malgré la présence d'encroûtements gypseux qui coiffent le sommet des tertres, dédiées aux sols et encroûtements gypseux de Pontannier (1968) ou Watson (1985, 1988) ne mentionnent pas la présence de tertres. Coque (1962) dans son études géomorphologique sur la Tunisie pésaharienne et Pouget (1968) dans son étude des sols à encroûtements gypseux mentionnent simplement la présence de sources artésiennes (aïn) localisées aux abords Est du Chott El Jerid mais toutefois sans les rattacher à la structure érigée des tertres liée à ces sources.

En Tunisie, il a fallu attendre une étude détaillée de Roberts et Mitchell en 1988 pour rapprocher ces structures des tertres visibles en Australie et déjà décrits par Watts en 1975, et les relier à l'émergence de sources artésiennes. Depuis de nombreuses études ont porté sur l'occurrence de tertres en particulier autour du grand bassin artésien en Australie (Harris, 1981 ; Ponder, 1986 ; Clark et al., 2007 ; Powell et al., 2015, en Égypte (Adelsberger and Smith, 2010 ; Brookes, 1993 ; Idris, 1996 ; Powell and Fensham, 2016) ou dans d'autres sites très localisés comme dans les zones arides de l'Ouest des USA (Blinn et al., 1994 ; Neal and Motts, 1967).

Les tertres ont aussi été décrits dans d'autres endroits du monde mais de manière très localisée comme en climat semi-humide d'Afrique du sud (McCarthy et al., 2020) ou dans les environnements hydrothermaux volcaniques comme en Ethiopie (Fontes and Pouchan, 1975) ou en Bolivie (Bougeault et al., 2019). Cependant ces tertres sont plus liés à des émergences de sources artésiennes isolées plutôt qu'à un environnement aride relativement plat dans lequel émerge une multiplicité de ces structures qui caractérisent les paysages des oasis du

Nefzaoua tunisien.

Pour cette étude des tertres du Nefzaoua, nous chercherons à répondre à trois questions principales

1. Dans quel environnement naturel et culturel ces tertres se sont formés ?  
Combien reste-t-il de tertres ? Nous avons décrit par quelle méthode nous avons pu suivre leur extension, leur état et leur évolution anthropique récente
2. Comment les tertres se sont formés et développés.
3. Quel est l'état actuel de ces tertres en relation avec la progression de la frontière agricole des oasis. Comment peut-on les sauvegarder ?

L'environnement et l'évolution des tertres ont été fort bien décrits par de nombreuses études australiennes comme celles de Harris (1981), Ponder (1986) ou Clark et al (2007), mais aucune étude spécifique n'a jamais été menée dans le Nefzaoua pour confirmer le mode de construction de ces édifices, pour décrire l'état de ces structures, et leur évolution pédologique naturelle. Le démantèlement mécanique massif qu'elles subissent nous a permis de pénétrer au cœur de ces structures et de confirmer et de préciser leur mode de formation local et leur singularité à l'échelle mondiale.

L'existence et le fonctionnement des tertres nécessite toute une série de conditions assez exceptionnelles géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et climatiques selon un ordre bien bien précis, en l'occurrence :

- Une zone de collecte d'eau (en forme d'impluvium) ;
- Une zone de stockage d'eau sous pression dans des couches imperméables ;
- Une néotectonique avec fracturation et remontées artésiennes ;
- L'installation de végétation autour des sources ;
- Un piégeage de sédiments éoliens par cette végétation ;
- Et enfin la formation d'une structure tridimensionnelle capable de conserver cette eau de surface au-dessus du niveau géomorphologique de base aux alentours et pouvant alors servir de point d'irrigation aux populations qui s'y sont installées. Sans cette succession de paramètres le système devient inopérant.

Quelle est l'évolution actuelle des tertres ?

Les tertres de sources, premiers maillons de l'occupation de l'espace, représentent donc l'ancien système hydroagricole oasien en place depuis des millénaires. Ce furent les points

centraux de l'identité régionale dans le sud tunisien façonné au fil des siècles par les activités humaines. L'apparition de forages profonds à partir du début du 20<sup>e</sup> siècle a tari les sources artésiennes naturelles et de ce fait a bouleversé cette organisation. Les oasis anciennes ont été entourées de périmètres irrigués modernes et ont commencé à perdre leurs spécificités.

Aujourd'hui les tertres sont menacés par tout un ensemble de facteurs biophysiques et socio-économiques parmi lesquels on dénombre : la surexploitation des nappes phréatiques, le tarissement des sources, l'extension des terres agricoles, le morcellement des terres, les prélèvements de matériau des tertres à des fins agricoles ou pour la construction, le surpâturage des terres de parcours, l'ensablement, et de manière plus générale la dégradation de l'environnement. Les pompages ont provoqué le rabattement de la nappe. L'excavation des sédiments constituant ces tertres pour combler les dépressions salines et augmenter les surfaces de terres cultivables a dévoilé leur structure interne et leur fonctionnement tout à fait particulier. Cela pourrait conférer à ces formes singulières un statut de patrimoine géomorphologique presque unique dans toute cette région subsaharienne.

En résumé, cette thèse cherchera à démontrer que les tertres de la région du Nefzaoua relatent l'histoire de la naissance, de la vie et de la mort d'un paysage subdésertique ; une mort due essentiellement à des actions anthropiques.

Pour cela nous avons choisi une approche originale, transversale. Elle est pluridisciplinaire, car elle combine trois perspectives : une perspective géomorphologique et pédologique, une perspective spatiale (inventaire complet multi-dates), et une perspective sociale (évolution dans les usages et dans le regard social posé sur ces tertres, envisagés en tant que géo-patrimoine ou patrimoine paysager susceptibles de faire d'objet d'actions de conservation). Ainsi ce travail s'organise en trois parties, regroupant six chapitres.

La 1<sup>ère</sup> partie sera consacrée à l'étude du milieu.

Le premier chapitre aura pour objectif principal de délimiter et présenter la zone de l'étude en cherchant à l'intégrer dans son contexte géographique, géologique, topographique, climatique et hydrologique, mais aussi dans son environnement démographique. Le chapitre 2 étudiera la naissance, la vie et la mort du système hydroagricole naturel des tertres ; il retracera les grandes tendances de l'évolution environnementale et paysagère des tertres du Nefzaoua, étudiera leur morphologie, leur utilisation à travers l'histoire, les interactions entre les aménagements des sources et les contraintes du milieu et débouchera sur la « mort » des

tertres, leur changement d'usage et l'extension des oasis.

La 2ème partie sera consacrée aux outils d'étude d'un paysage en pleine transformation.

Le chapitre 3 a pour objectif de faire l'analyse diachronique de l'évolution du paysage oasien du Nefzaoua en utilisant les différentes méthodes disponibles de la télédétection et de la cartographie en vue d'évaluer et de mesurer l'ampleur des modifications du paysage de la région suite au tarissement des sources artésiennes. Le chapitre 4 portera sur l'histoire des tertres et la reconstitution des étapes successives de leur formation à travers une étude sédimentologique.

La 3ème partie sera consacrée à un état des lieux du paysage des tertres.

Le chapitre 5 présentera l'état de dégradation des tertres. La mise au point d'une typologie évaluera leur état de destruction et précisera ses principales causes qu'elles soient anthropiques ou naturelles.

Le chapitre 6 posera la question de la disparition d'un patrimoine paysager mal identifié. Il traitera de la valeur symbolique des tertres du Nefzaoua. Il mettra en exergue la reconnaissance d'un nouveau patrimoine et permettra d'interroger les rapports de la population avec ce paysage hérité du passé, un rapport dominé par le désintérêt vis-à-vis d'un patrimoine non identifié.

# **Première partie : Un milieu aride et anthropisé**



# Introduction de la première partie

Les oasis du Sud tunisien, situées au Nord du Sahara sont essentiellement des palmeraies à palmier dattier. Leur superficie n'a cessé de s'étendre pour passer de 16 720 ha en 1973 à 41 710 ha en 2010 (Ministère de l'Environnement). Selon leur position géographique, elles sont classées en trois catégories : les oasis côtières, comme à Gabès, les oasis de montagnes autour de Gafsa et les oasis continentales du Djerid au nord du Chott el Jérid et du Nefzaoua au sud.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à la présentation du contexte géographique et physique du milieu naturel et humain de la région du Nefzaoua. Nous insisterons sur les aspects climatiques, notamment sur le vent qui se présente comme un facteur prépondérant dans la région, engendrant une érosion éolienne à l'origine d'une grande partie du façonnement du paysage actuel du Nefzaoua. La partie géologique, notamment hydrogéologique, vise à expliciter le contexte dans lequel les tertres du Nefzaoua se sont formés, ainsi que le rôle prédominant de l'homme dans la modification et l'évolution du paysage.

Le chapitre 1 sera consacré au milieu physique et aux éléments du paysage permettant de cerner le cadre général de la région d'étude, des points de vue de la géosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. Nous évoquerons aussi quelques éléments d'histoire et de démographie en lien avec l'évolution récente de la région.

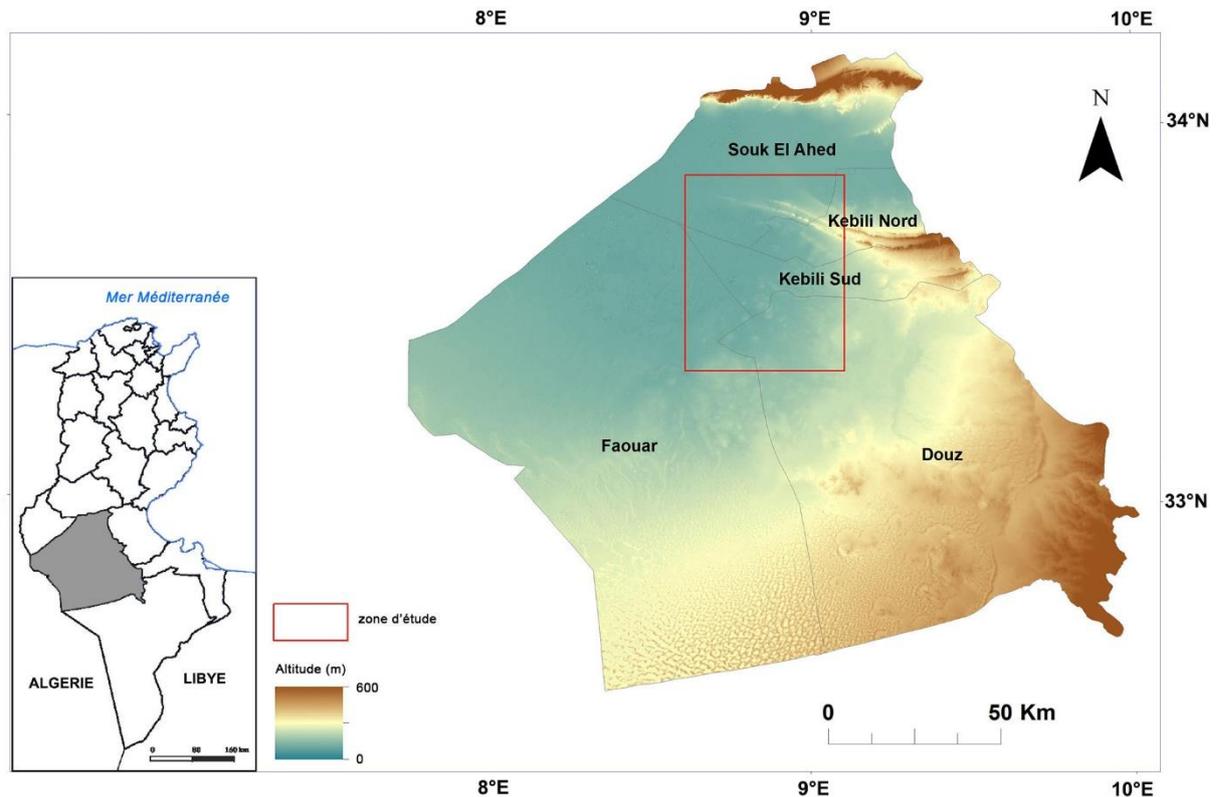
Le chapitre 2 donnera une présentation générale des tertres de source, composante remarquable des paysages du Nefzaoua, et objet principal d'étude du présent travail. Leur origine artésienne et leur mode de formation démontrent l'intérêt qu'ils présentent, et la nécessité de les étudier pour mieux les connaître.



# **Chapitre 1 : Le Nefzaoua : vue d'ensemble**

# Introduction

La région du Nefzaoua, située dans le sud-ouest de la Tunisie dans le gouvernorat de Kébili, est une terre d'oasis, en bordure du désert du Sahara. Elle est grossièrement délimitée par les coordonnées 33.30° et 34.15° de latitude nord et 8.30° et 9.10° de longitude est. Le gouvernorat de Kébili se divise en cinq délégations (Souk el Ahed, Kébili nord, Kébili sud, Faouar et Douz) (Figure 1.1).



**Figure 1.1 : Le gouvernorat de Kébili avec localisation de la zone d'étude : Altitude d'après SRTM 30 m.**

Les oasis du Nefzaoua (Figure 1.2) couvrent 48 % de la superficie totale de toutes les oasis tunisiennes avec près de 15 300 ha d'oasis traditionnelles et modernes de palmiers dattiers (CRDA Kébili, 1998). Les oasis traditionnelles sont caractérisées par une densité élevée de plantations de palmiers, l'existence d'un système productif à trois étages : les palmiers, l'arboriculture fruitière et les cultures maraîchères. Les oasis modernes sont de type industriel monospécifique. Elles sont orientées principalement vers la production de dattes (*Phoenix dactylifera*) de type *Deglet Ennour* à forte valeur ajoutée destinées à l'exportation.

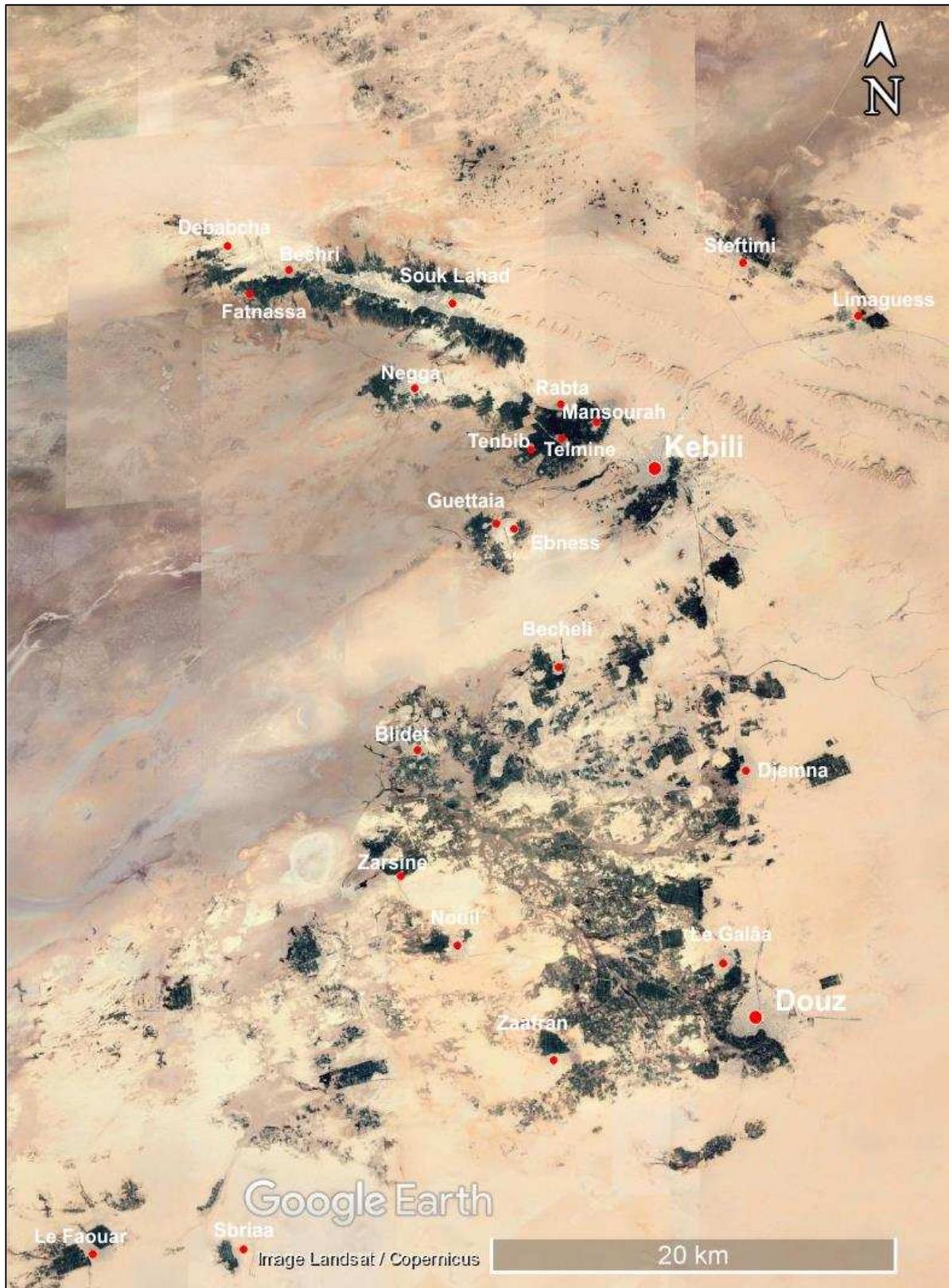


Figure 1.2 : Extrait Google Earth de la zone d'étude : en vert sombre les oasis

# 1.1 La géologie

## 1.1.1 Les grands ensembles géologiques

Le Nefzaoua est constitué de séries sédimentaires allant du Crétacé au Quaternaire, où dominent les séries de calcaires, marnes, argiles, sables ; ces trois dernières sont souvent gypseuses (Figure 1.3). Le Nefzaoua dont les terrains reposent sur une vaste formation mio-pliocène, est limité vers le nord et le nord-est par le Djebel Tébaga qui marque sa limite septentrionale. Il représente le versant méridional du dôme du Fejej et s'étend sur une centaine de kilomètres depuis le Djebel El Aziza (région d'EL Hamma de Gabès) jusqu'à l'extrémité de la presqu'île de Kébili, où il s'ennoie dans le chott el Jérid. Il est constitué de deux barres de cuestas calcaires.

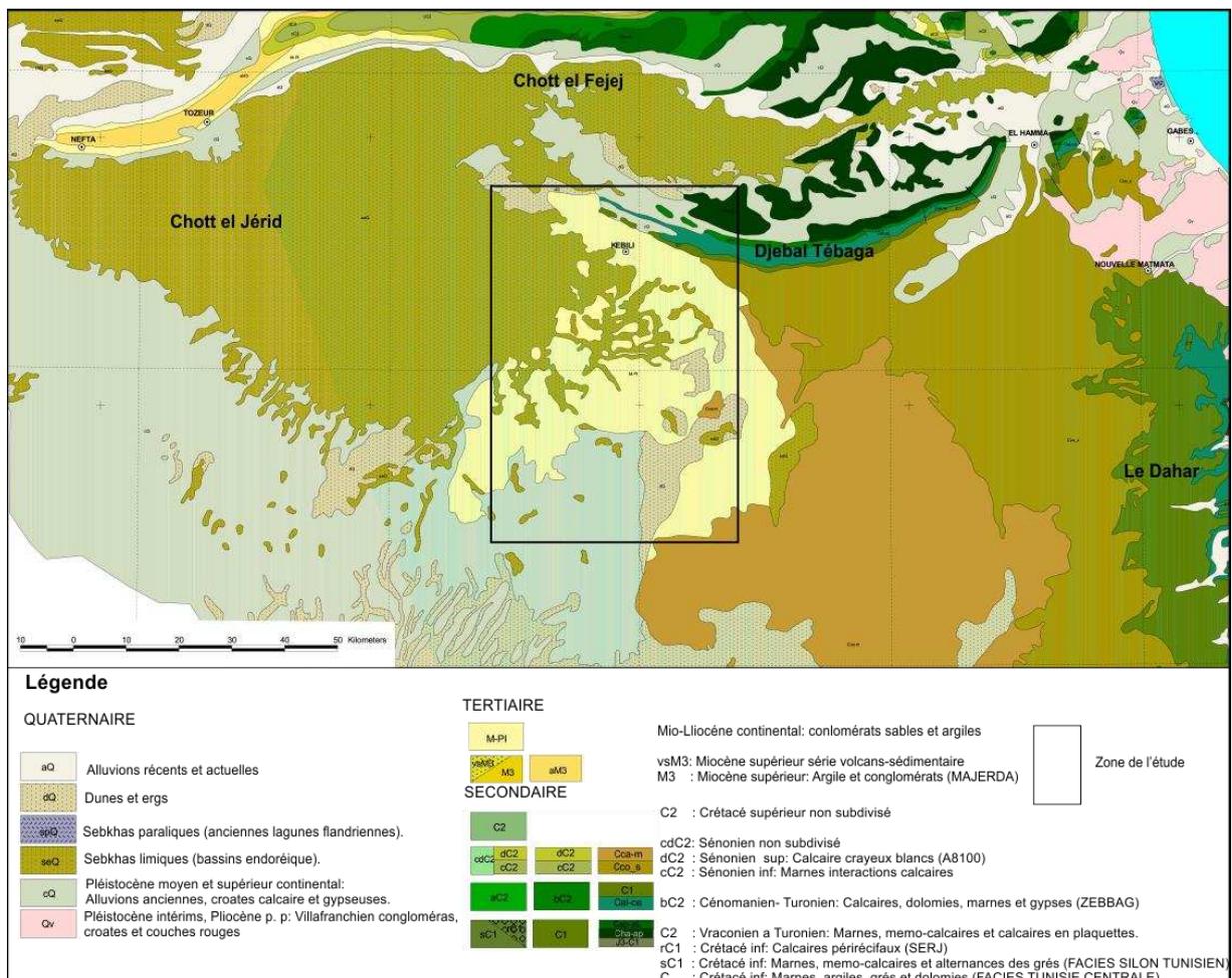


Figure 1.3 : Extrait de la carte géologique 1/500 000 du Service Géologique de Tunisie, 1985.

À l'est, les monts de Matmata-Dahar culminent à 715 m. Ils ont une structure monoclinale en cuesta composée de calcaires et de dolomies turoniennes sur des sédiments plus meubles du Cénomaniens, eux-mêmes discordants sur le Jurassique, le Trias ou le Permien, avec un profil transversal qui oppose un front à un revers (Ballais, 1996).

Le sud et le sud-est du Nefzaoua sont limités par l'Erg oriental, vaste surface sableuse qui s'étend sur 192.000 km<sup>2</sup> en Algérie et en partie en Tunisie (Mainguet et Jacqueminet, 1984). L'Erg est composé aux deux tiers de dunes dont les plus élevées peuvent atteindre 250 m de hauteur.

## **1.1.2 L'artésianisme dans la région du Nefzaoua**

### ***1.1.2.1 Géologie et hydrogéologie régionales***

Le Nefzaoua a l'avantage de pouvoir bénéficier de réserves hydrauliques abondantes qui appartiennent à deux nappes captives, celle du Complexe Terminal (CT) et celle du Continental Intercalaire (CI) (Bisson, 2003).

Rappelons les traits géologiquement importants pour comprendre l'artésianisme dans le Nefzaoua. L'extrait de la carte géologique de la Tunisie en situe les grandes formations (Figure 1.3). Il comporte deux grandes structures car il est situé à la jointure de deux dômes anticlinaux (Le dôme du Fejej et le flanc SW du dôme des Matmata-Daher) sur la bordure d'une cuvette synclinale subsidente. Le Nefzaoua est soumis à une tectonique cassante d'effondrement des deux dômes (Serept, 1951, Coque, 1962, Domergue et al 1952, Rouatbi, 1967). La tectonique s'y présente sous forme d'accidents ou de fractures. Ces fractures constituent des voies privilégiées pour l'écoulement des nappes (Coque, 1962 ; Mamou, 1976). Le Chott el Fejej se trouve dans un anticlinal effondré et faillé, délimité au sud par le Djebel Tébaga constitué d'une double cuesta abrupte coiffée de dolomie, qui se termine au sud par une faille de décrochement (Roberts et Mitchell, 1987). Le Chott el Fejej reçoit des écoulements du CI crétacé. Les exutoires naturels sont représentés par les sources situées sur le flanc Nord de la chaîne de Tébaga.

Le Chott el el Jérid se trouve au sud de la faille ; il est recouvert par les dépôts presque horizontaux du Mio-Pliocène. Le Chott el Jérid, dans le synclinal superficiel sous-jacent, est l'une des principales zones de déversement du CT. L'eau émerge localement par des Aïouns à travers un aquiclude argileux d'âge quaternaire (Roberts et Mitchell, 1987). Les Aïouns sont

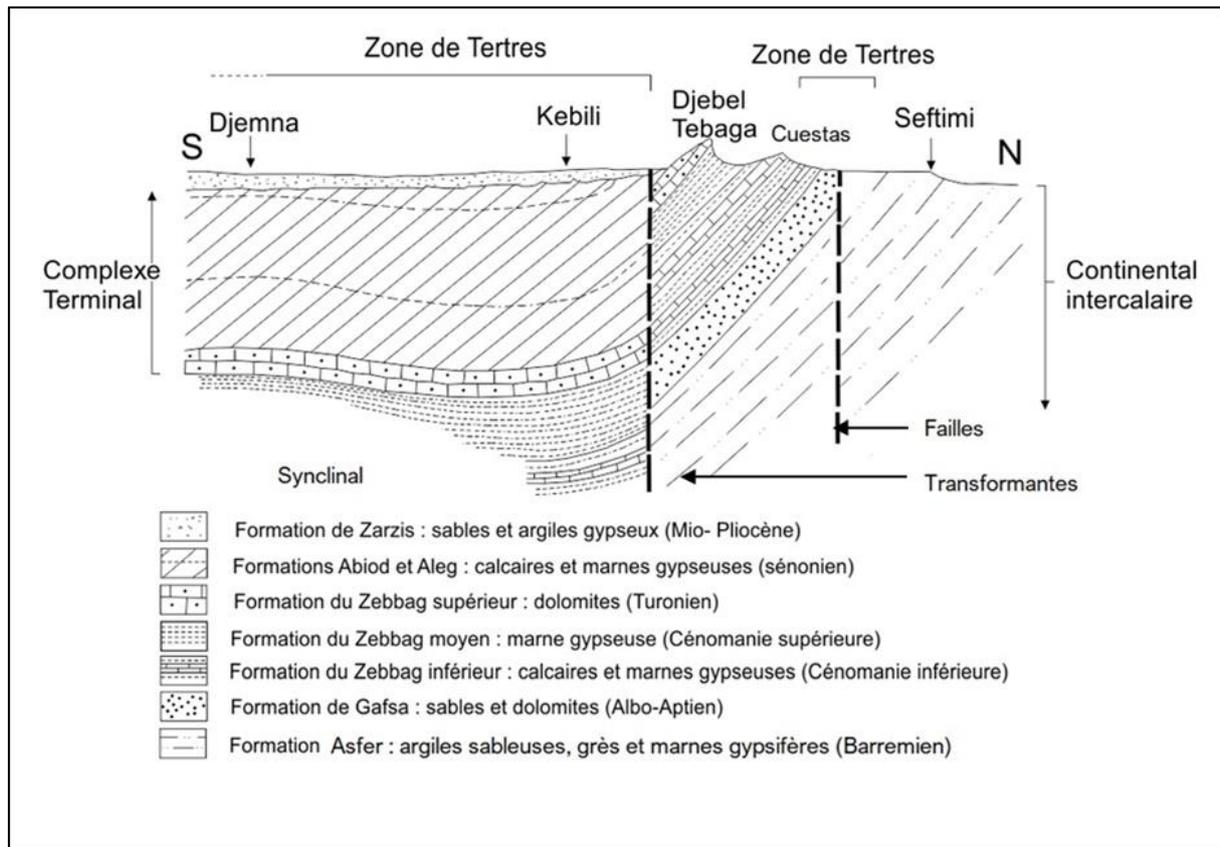
des sources artésiennes de l'aquifère terminal qui émergent dans la partie la plus basse des deux chotts.

### **1.1.2.2 Caractéristiques et extension des aquifères**

La répartition géographique des sources dans le Nefzaoua n'est pas quelconque. Elles se localisent dans les zones d'artésianisme, elles sont donc qualifiées de « sources artésiennes » (Schoeller, 1962 ; Pouget, 1968).

Une source artésienne est une source dont l'eau sort sous pression, généralement par une fissure ou une autre ouverture de la formation géologique imperméable qui recouvre la formation aquifère. C'est donc une émergence d'un aquifère captif. Les sources artésiennes du Nefzaoua se présentent sous la forme de légères éminences chapeautées d'un bouquet de palmiers qui se détachent au-dessus de la platitude du reg sablonneux (Bisson 2003). Elles sont rattachées par leur hydrochimie, leur débit et leur condition d'émergence aux aquifères CT et aux aquifères du CI (Mamou, 1978). Le Nefzaoua tient son originalité à l'artésianisme des sources qui y jaillissent. Il ne se comprend que par l'étude des formations et des structures géologiques sous-jacentes qui ont permis le blocage des aquifères et leur remontée vers la surface.

Dans le Nefzaoua, les nappes sont captives parce que l'eau est contenue dans des roches-réservoirs avec un pendage vers le NW et qui sont alimentées au SE en amont du Chott. Ces niveaux sont situés entre deux strates peu perméables constituant le toit et le mur de la nappe. Les sources du Nefzaoua sont issues de deux ensembles aquifères peu renouvelables (Figure 1.4) qui ont une extension à l'échelle du Sahara septentrional : le CI et le CT. Chacun de ces deux ensembles englobe plusieurs niveaux aquifères qui sont en communication et qui présentent une certaine parenté hydrogéologique et hydro-chimique (Mamou, 1978). L'ensemble inférieur : Continental intercalaire (CI), constitué par le Crétacé inférieur continental englobe les étages Néocomien (Valanginien et Hauterivien), Barrémien, Aptien et Albien L'ensemble supérieur : Complexe terminal (CT), englobe le Cénomanién supérieur, le Turonien, le Sénonien inférieur et supérieur et une partie du Mio-Plio-Quaternaire continental.

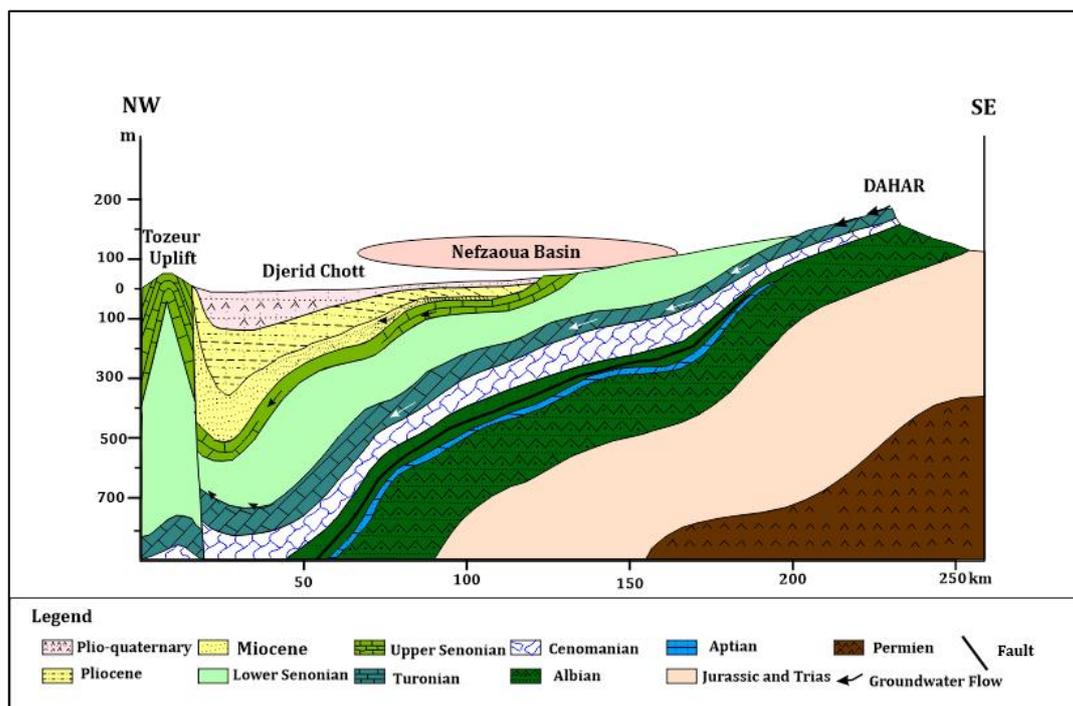


**Figure 1.4 : Coupe géologique de Seftimi à Djemna (Mamou, 1976).**

Les aquifères CT et CI sont séparés par les formations de la fin de l'Albien-Cénomaniennes constituées par des marnes, des argiles et calcaires dolomitiques (Figure 1.4). Le CT est contenu dans des formations carbonatées sénoniennes et turoniennes.

Le CT d'une profondeur variant de 300 à 600 m, est alimenté par les précipitations sur les affleurements du Dahar. En effet une recharge moyenne sur la période 2003-2010 de  $1,40 \pm 0,90 \text{ km}^3 \text{ an}$  correspond à environ 2 mm an, et représente 2,5 % de la pluviosité moyenne (88 mm an) (Gonçalvès et al 2013). L'essentiel de son eau provient des immenses réserves fossiles des périodes pluvieuses du Quaternaire. Le CI a une profondeur de 1000 à 2200 m et se caractérise par des eaux généralement chaudes, artésiennes et légèrement salées (2 à 3 g/l) (Lasram, 1990 ; Khassah, 1996 ; Mamou et Khassah, 2002).

Dans le bassin de Nefzaoua, les eaux souterraines s'écoulent largement le long d'une nappe phréatique unique orientée SE à NW, des hautes terres du Dahar vers l'est, en direction de l'ouest vers la dépression du Chott el Jérid (Figure 1.5). Ces chotts (el Jérid et Rharsa) constituent avec les sources limitrophes les deux principaux exutoires naturels de cette nappe (Mamou, 1976).



**Figure 1.5 : Coupe hydrogéologique des aquifères du Continental Terminal, (Hadj Ammar, 2014 modifié).**

Le Nefzaoua se localise approximativement dans les limites de la Tunisie présaharienne (Figure 1A d'après le Houerou 1959). Il reçoit une moyenne annuelle de précipitations inférieure à 100 mm/ an. Aussi, malgré un réseau hydrographique bien visible sur les versants du djebel Tébaga, les oueds ne coulent pas plus d'une ou deux fois par an lors des rares fortes pluies. L'hydrogéologie constitue donc la source principale pour l'alimentation hydrique dans la région. La région du Nefzaoua qui repose sur un terrain sableux entouré de sebkhas<sup>1</sup> doit donc son existence aux sources artésiennes, occupées par l'Homme depuis les temps historiques.

<sup>1</sup> La « sebkha » ou « sebkhet » est une appellation très fréquente en langue arabe des zones humides en Afrique du Nord. Il s'agit normalement d'un bassin, généralement endoréique (c'est-à-dire fermé et sans issue), qui reçoit l'eau de crue ou de ruissellement du bassin versant où il est situé ; les eaux sont plus profondes en hiver, mais ont tendance à s'évaporer en été, de sorte que le sol devient très salé, parfois recouverte d'une couche de sel ; les sebkhetes en zone désertique peuvent rester à sec pendant de longues années. (Quelquefois, généralement dans le cas de lacs de très grandes dimensions, on utilise également le mot arabe « chott » pour désigner des zones humides de ce type). Source DGF : **Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR)**

### 1.1.3 Les chotts

Éléments géologiques et géomorphologiques majeurs de la région, les Chotts (ou playas) sont de vastes dépressions planes fermées constituant le fond plat de bassins endoréiques, soumises à une forte évaporation et souvent salées localisées dans la région du Nefzaoua, mais cette notion ne peut s'appliquer avec rigueur qu'autour de Chott el Jérid *lato sensu*. Ils sont composés de formations évaporitiques qui se déposent dans l'ordre suivant : carbonates, sulfates (gypse) et chlorures. L'halite (sel gemme NaCl) précipite en dernier en surface après des sécheresses plus ou moins prolongées. Les autres dépressions fermées plus fréquentes sont de taille bien plus modeste, on parle de sebkhas ou de gaaraet (dépression inondable peu ou pas salée). Caractérisé par ses vastes dimensions (plusieurs centaines de km<sup>2</sup>), par sa surface plane, par la croûte de sel et l'absence de végétation à sa surface, le chott constitue le point le plus bas du paysage avec une altitude minimale de 20 m au-dessus du niveau de la mer, et apparaît en fort contraste avec les reliefs du Tébaga, culminant à 469 m.

Le plus important est le Chott el Jérid situé dans la partie continentale du sud-ouest de la Tunisie (Coque, 1962 ; Ben Oueddou, 1998). Il couvre une superficie d'environ 5 400 km<sup>2</sup> (Zammouri et al 2007). C'est un système de playa dans un bassin d'affaissement situé entre le flanc sud de la chaîne de montagnes du Djebel Tebaga et la partie nord de la plate-forme saharienne. Dans des conditions naturelles, le Chott était la zone de décharge pour l'eau du TC et des aquifères phréatiques. Les eaux souterraines du Chott sont fortement salinisées et contiennent souvent plus de 100 g/l de sels dissous (Gueddari 1980). L'hydrogéologie de l'aquifère du Chott n'est pas bien comprise et il n'existe pas de puits ou de piézomètres à l'intérieur de celui-ci (Zammouri et al 2007). Il est bordé au Nord par la chaîne de montagnes du Cherb (Djebel Mhrila 1378 m, Djebel Selloum 1373m, Djebel Majoura 874m, chaînes de Gafsa...). Cette chaîne est constituée d'une série d'anticlinaux d'extension est-ouest de séries carbonatées du Crétacé supérieur au Tertiaire inférieur. Au sud il est bordé par le Grand Erg Oriental, formé de dunes sableuses. Le Chott el Jérid est la plus vaste étendue parmi le chapelet de dépressions situé au Bas-Sahara à la bordure sud des chaînes de l'Atlas saharien. Long de près d'une centaine de kilomètres d'est en ouest, il se prolonge à sa pointe orientale par le Chott el Fejej. Cet ensemble couvre pratiquement toute la largeur du Sud tunisien, entre le golfe de Gabès et la frontière algérienne, respectivement distants du chott d'une vingtaine de kilomètres. Allongé sur quelque deux cents kilomètres depuis la frontière algéro-tunisienne jusqu'à la proximité de la mer, l'alignement des grands chotts forme l'ensemble de dépressions

fermées le plus étendu de toute l'Afrique du nord. Le Jérid en constitue l'élément majeur enfoncé vers le sud jusqu'à la bordure de l'Erg. Greffé à sa pointe orientale, le Fejej n'est guère qu'un mince appendice de 95 kilomètres de long.

Le Chott el Jérid dispose d'un climat particulier : il est relativement humide en hiver, avec une pluviométrie assez importante pour un environnement désertique. Bien qu'irrégulière, la pluviosité d'hiver crée une sorte de lac alimenté temporairement par des eaux de ruissellement, tandis que la sécheresse en été avec des siroccos, vents chauds provenant du sud et de l'ouest, fait précipiter les sels en surface et crée un fort gradient thermique à l'origine de mirages.

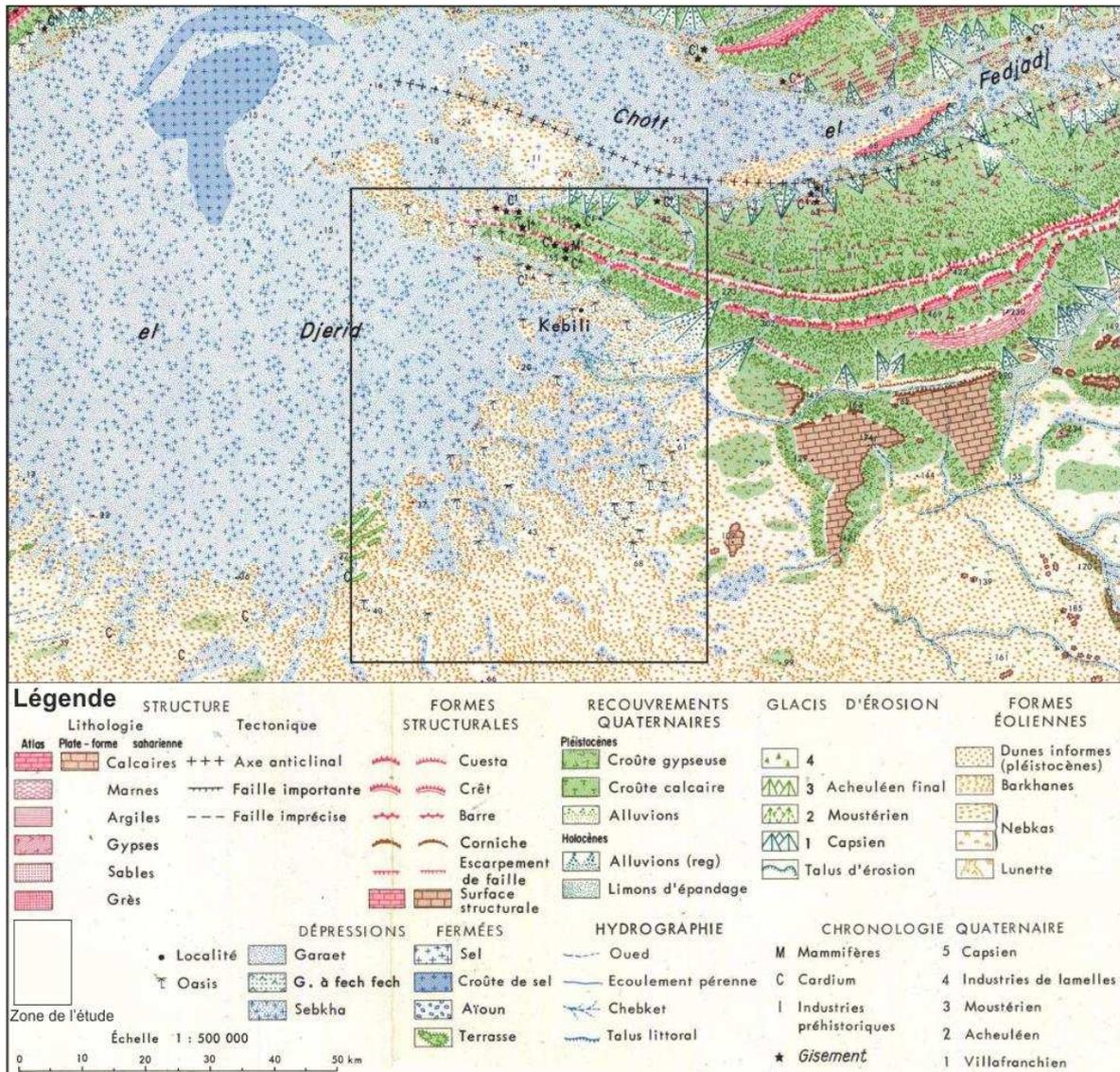
## **1.2 Géomorphologie et formation superficielles**

### **1.2.1 Aperçu de la géomorphologie du Nefzaoua**

Quatre principales unités géomorphologiques sont observées dans le Nefzaoua :

- Les chaînes plissées du Secondaire, orientées est-ouest, formées de roches sédimentaires du Crétacé à dominante carbonatée avec des formations marneuses et gypseuses. Le Djebel Chemsî est le plus au nord et le plus allongé vers l'est. Il constitue l'impluvium principal des Chotts el Jérid et el Fejej.
- Le glacis des séries de cuestas du Jurassique – Crétacé des monts des Matmata, à l'Est du Chott el Jérid.
- Au sud les systèmes dunaires du Grand Erg oriental avec une extension entre le Chott el Jérid et les glacis des Matmata.
- Au centre, les dépressions planes du système de Sebkhâs, avec principalement le Chott el Jérid et dans sa partie nord-est, le Chott el Fejej, plus petit.

L'extrait de la carte géomorphologique de la Tunisie Présaharienne, dressée par R. Coque (1965) (Figure : 1.6) distingue les principales formations superficielles du Nefzaoua, d'âge Quaternaire : des formations dunaires (dunes informes du Pléistocène), des barkhanes, des nebkas et des lunettes. On y remarque l'importance des formes éoliennes.



**Figure 1.6 : Extrait de la carte géomorphologique de la Tunisie Présaharienne, (Coque, 1965, modifié).**

Les processus et les formes éoliens font partie de la géomorphologie. Mais leur étude nécessite la connaissance du vent donc du climat. Ils seront donc traités en 1.4 après l'étude du climat.

## 1.3 Le Climat

### 1.3.1 Les précipitations

Selon Dubief (1963) et le Houerou (1959) le Nefzaoua, dont les précipitations sont rares et inégalement réparties sur l'année et d'une année à une autre, se situe dans l'étage aride

saharien à hiver frais, caractérisé par une pluviosité moyenne annuelle faible inférieure à 100 mm (Figure :1.8).

Pour préciser les informations quant au climat de notre zone d'étude, les données pluviométriques de la station de Kebili ont été acquises sous forme d'une base de données des enregistrements quotidiens. Elles sont les seules disponibles, aucune autre station météorologique n'existant dans le Nefzaoua.

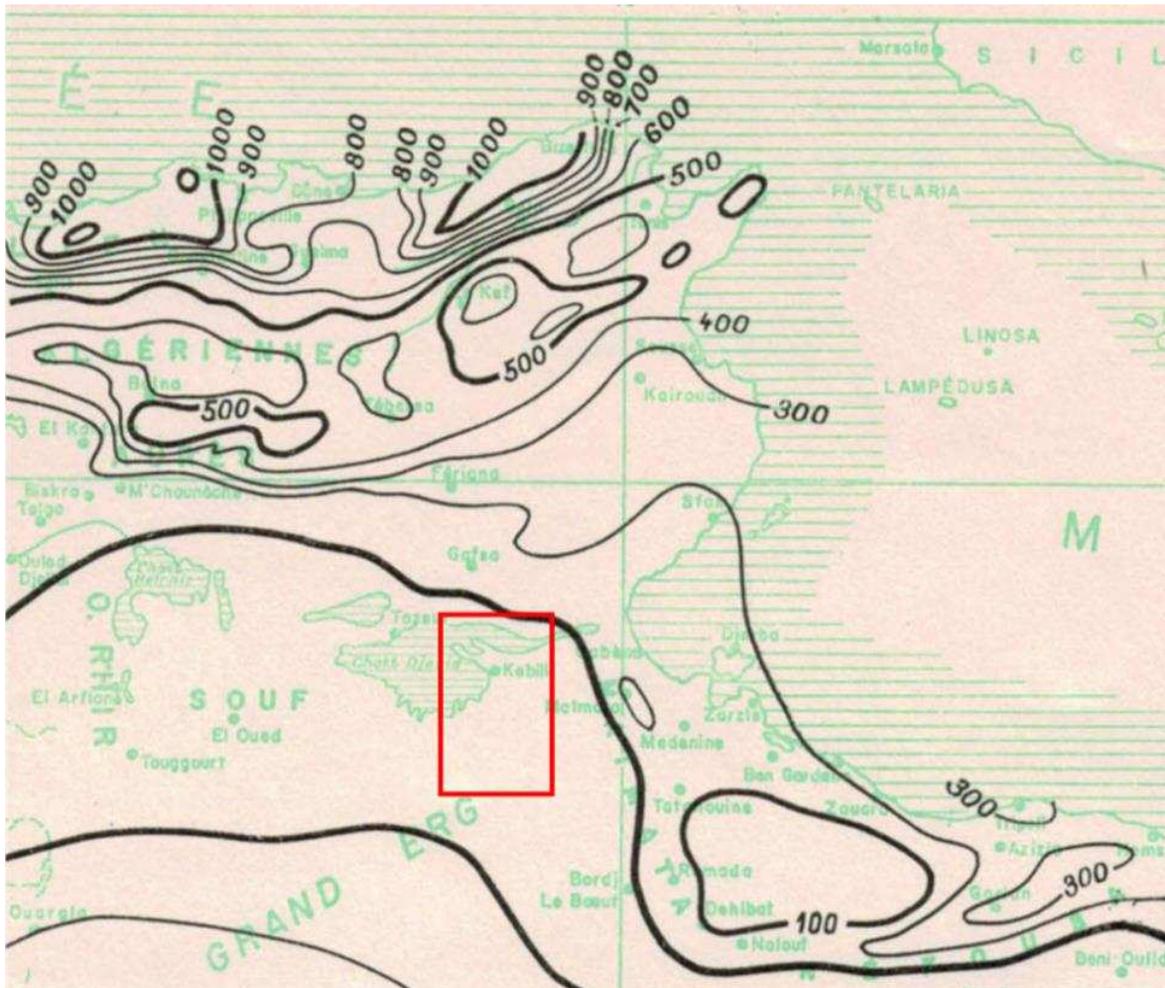


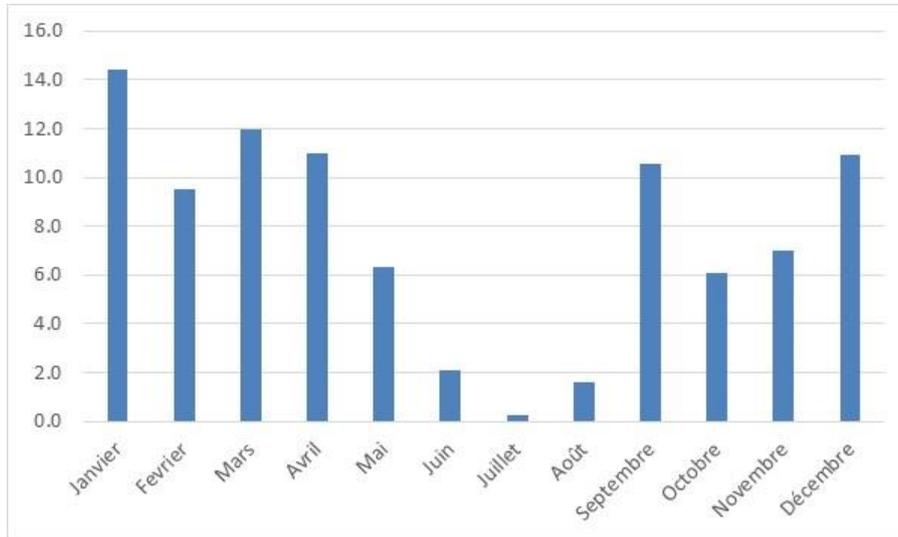
Figure 1.7 : Extrait de la carte pluviométrique (Dubief, 1963)

**Tableau 1.1 : Valeurs mensuelles des précipitations en mm (1996-2016) calculées pour la station de Kébili d'après les données du CRDA**

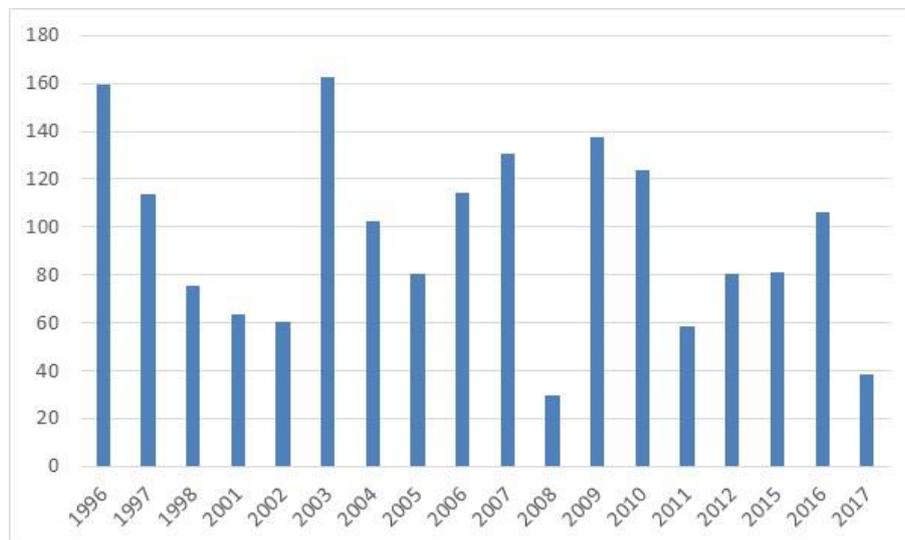
Année/mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1995									44	14.7	8.3	8.3
1996	18.3	49.3	23.4	8.1	19.1	7	3	0	17.4	3.5	5	5.2
1997	44.8	4.2	16	15.4	7.2	4	1	5.4	0	0	2.1	13.7
1998	0	18	5.3	5.5	6.1	5	0	0	13.2	13.2	7	2
1999	38.5	9.1	8.6	0	4.1	1	0	6				
2000									0	8.1	0	1
2001	1.1	6.2	14	5.1	4.8	0	0	0	3.6	0	2.5	26
2002	0	0	2.6	3.3	31	0	0	1.8	1.4	6.1	9.8	4.1
2003	18.1	16.2	5.5	40.2	4	0	0	0	13.4	0	9.5	55.9
2004	29.5	8	7.5	12	5	7	0	1	4.7	4	16.8	6.8
2005	0	7	1	1.4	0	11.1	0	2	26.9	0	19.5	11.5
2006	29.5	3.7	0	0.5	18.2	1.6	0	5.8	1.5	30.5	11	12.3
2007	0	6.7	39.6	43.6	0	0.1	0	0.7	1.3	1.8	0	36.6
2008	3.1	0	1.5	1.5	5.2	0	0	0.6	3	1	3.4	10.4
2009	79.4	0.2	21.5	20	3.5	0	0	0.1	12.3	0.5	0	0.2
2010	19.7	0.1	2.8	19.2	6.8	2.1	0	0	3.8	31.3	33	5
2011	5.2	4.2	15.6	8	7.9	0	1	0	0.5	15.8	0	0
2012	14.4	1	49.4	15.2	0	0	0	0.3	0.2	0.1	0.1	0
2013	0.7	1.9	1.5	3.6	3.2	4.5	0	7.5	49			
2014										3.4	11.9	4.3
2015	0.7	55.1	17.6	0	1.2	0	0	2.6	3.9	0	0	0
2016	0.2	0	0.4	21.9	0	0	0	0	32	0	14.3	37.2
2017	0	9.3	17.8	6	5.1	0	0	0				
Total	303.2	200.2	251.6	230.5	132.4	43.4	5	33.8	232.1	134	154.2	240.5
Nbre années	21	21	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22
<b>Moyenne</b>	<b>14.4</b>	<b>9.5</b>	<b>12.0</b>	<b>11.0</b>	<b>6.3</b>	<b>2.1</b>	<b>0.2</b>	<b>1.6</b>	<b>10.5</b>	<b>6.1</b>	<b>7.0</b>	<b>10.9</b>
Maximum	79.4	55.1	49.4	43.6	31	11.1	3	7.5	49	31.3	33	55.9
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

À partir de ces données de précipitations fournies par le CRDA (Commissariat Régional au Développement Agricole) il a été possible de calculer les moyennes mensuelles des précipitations sur la période 1996-2016. A noter que l'année hydrologique débute au mois de septembre. Il faut mentionner que les données des 2 années hydrologiques 9/1999-8/2000 et 9/2013-8/2014 sont manquantes. Les moyennes mensuelles ont donc été calculées en tenant compte du nombre de données disponibles pour chaque mois. Dans le tableau 1.1 on remarque que le maximum mensuel a été observé en janvier 2009, avec 79,4 mm, chiffre à comparer avec la moyenne annuelle qui ressort de ce tableau à 91.3.

Les précipitations donc très faibles et très irrégulières puisque n'importe quel mois de l'année peut être sec (minimas à zéro). Les pluies dans la région du Nefzaoua se répartissent de l'automne jusqu'au printemps, avec un maximum en janvier. La saison sèche se déploie en été entre juin et août. Notons la variation importante des pluies d'une année à une autre (Figure 1.10)



**Figure 1.8 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1999 et 2000 manquants).**



**Figure 1.9 : Précipitations annuelles observées entre 1996 et 2016 (certaines années sont manquantes).**

### 1.3.2 Les températures

Ne disposant pas de données récentes et fiables sur la région du Nefzaoua, nous avons utilisé les résultats issus des publications.

Le Nefzaoua est notablement cité comme une région à forte amplitude thermique, journalière, mensuelle et saisonnière avec des températures élevées en été. Avec un maximum absolu de 55 °C et un minimum absolu de - 7 °C à Kébili (Sghaier, 1999), la température moyenne annuelle est de 20,9 °C. Le régime thermique est caractérisé par des différences significatives entre les températures extrêmes qui dépassent 48 °C pendant le mois de juillet et les températures minimales qui peuvent atteindre -3° C pendant le mois de janvier.

L'évaporation annuelle des eaux libres est d'environ 2500 mm (Mamou 1990) et atteint en moyenne 1700 mm/an dans l'oasis entraînant un déficit hydrique aigu et quasi-permanent.

### **1.3.3 Le vent**

Un élément déterminant du climat du Nefzaoua est le vent. Il engendre l'érosion éolienne. L'érosion éolienne est active surtout quand la végétation qui recouvre le sol est absente ou réduite et quand les états de surface de la couverture pédologique sont secs et peu structurés. Elle est donc active dans les régions arides ou sur les surfaces salées.

Dans le Nefzaoua le vent est un agent morphogénétique important. Il se manifeste par sa fréquence et sa violence. Il constitue donc l'agent principal d'ablation, de transport et de dépôt dans la formation du paysage dans la région. Une analyse statistique des vents en vitesse et direction à partir des données trihoraires de l'INM Tunis (Institut National de la Météorologie) acquise sous forme de base de données Excel nous a permis le calcul de la rose des vents de la station de Kebili (2001/2010), Ces données ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle du déplacement de sable dans le sud tunisien (Raddadi & al 2014). Dans le cadre du présent travail nous avons obtenu de la station de l'INM à Kebili les relevés de mesures pour 5 années supplémentaires (2011 - 2015).

Sur ces données plus récentes, il y a malheureusement deux années (2011 et 2012) qui ne sont pas exploitables, car elles comportent de nombreuses lacunes. Nous avons choisi d'utiliser la partie exploitable de ces données récentes (2013 à 2015) pour estimer la fréquence des vents sahariens pendant cette période (voir plus loin).

### 1.3.3.1 Analyse fréquentielle et déplacement de sable dans le Nefzaoua

Si on se réfère à Khatelli (1996) qui considère que les vents sont efficaces à partir de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  en raison de la turbulence au niveau du sol, on calcule les fréquences selon 4 catégories :

- i) les vents nuls ou calmes :  $V < 1 \text{ m s}^{-1}$ ,
- ii) Les vents faibles :  $1 \text{ m. s}^{-1} < V < 3 \text{ m s}^{-1}$ ,
- iii) Les vents moyens :  $3 \text{ m s}^{-1} < V < 6 \text{ m s}^{-1}$
- iv) Les vents forts et très forts :  $V > 6 \text{ m s}^{-1}$ ) selon les directions du vent.

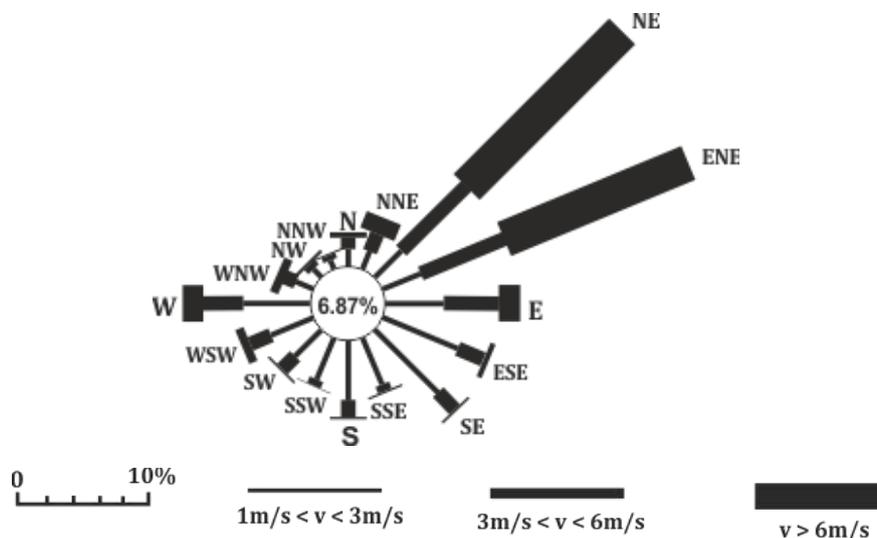


Figure 1.10 : Rose des vents de la Station de Kebili 2001-2010 (Raddadi, 2014)

Les résultats obtenus sur les fréquences annuelles des vents illustrés par la figure 1.11 ont permis de déterminer l'importance de l'activité éolienne pour chacune des 16 directions de la rose des vents de Kébili ainsi que l'importance des vents actifs malgré leurs faibles fréquences par rapport aux vents inactifs inférieurs à  $3 \text{ m.s}^{-1}$ .

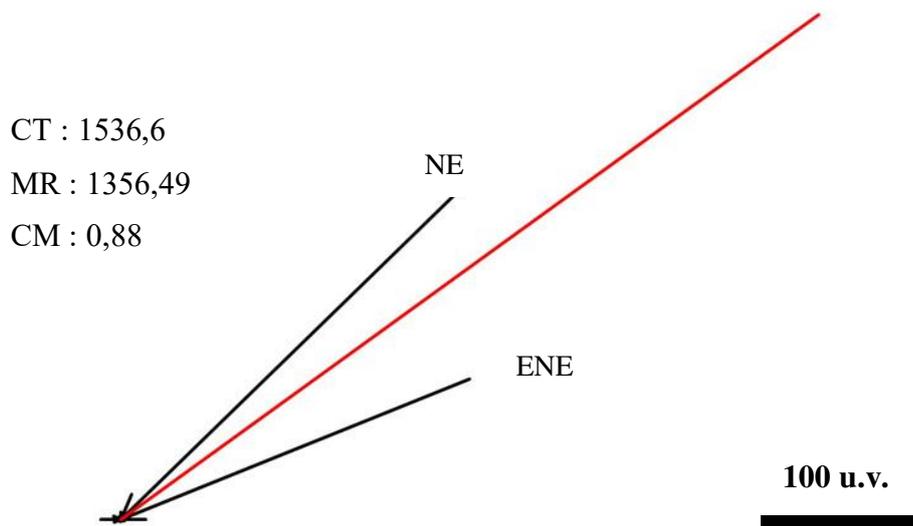
40% des observations du vent à Kebili indiquent des vents actifs de plus de  $3 \text{ m/s}$ . Les fréquences brutes individualisent un vent dominant de secteur NNE à E ( $39,41$ ), et caractérisent les mois d'avril, mai, juin et juillet (printemps et été) (Raddadi et al 2014).

Nous nous sommes basés sur la méthodologie de calcul du déplacement potentiel utilisée par Venard (2012), qui est fondé sur la formule de Fryberger modifiée par Callot et

Oulehri (Callot 1987, Callot et Oulehri, 1996). Les auteurs retiennent la valeur de  $4\text{m.s}^{-1}$  comme vitesse seuil de mobilisation et  $6\text{m.s}^{-1}$ , valeur à partir de laquelle la mobilisation est suffisante pour avoir un effet morphologique. Nous avons donc calculé la capacité de transport éolien pour chaque vitesse et chaque direction. Les calculs ont permis d'obtenir les résultats suivants :

Les résultats contiennent trois valeurs :

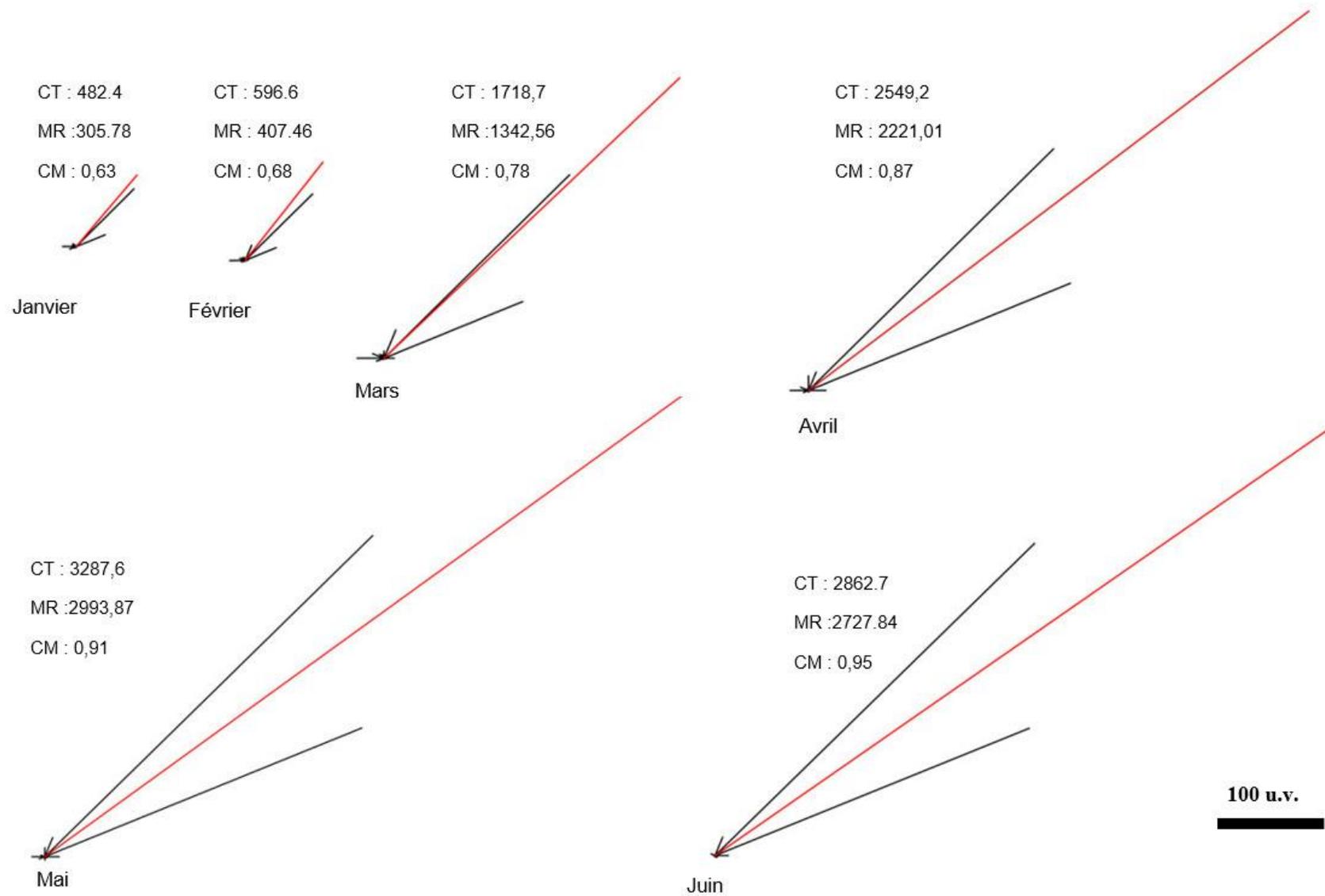
1. La Capacité de transport (CT) totale qui représente la somme des capacités de transport des 16 directions ;
2. La Migration Résultante (MR) qui est la somme vectorielle des 16 capacités de transport à laquelle est associée une direction Résultante (DR) ;
3. Le Coefficient de Migration (CM) ( $= \text{MR}/\text{CT}$ ) (Venard, 2012).

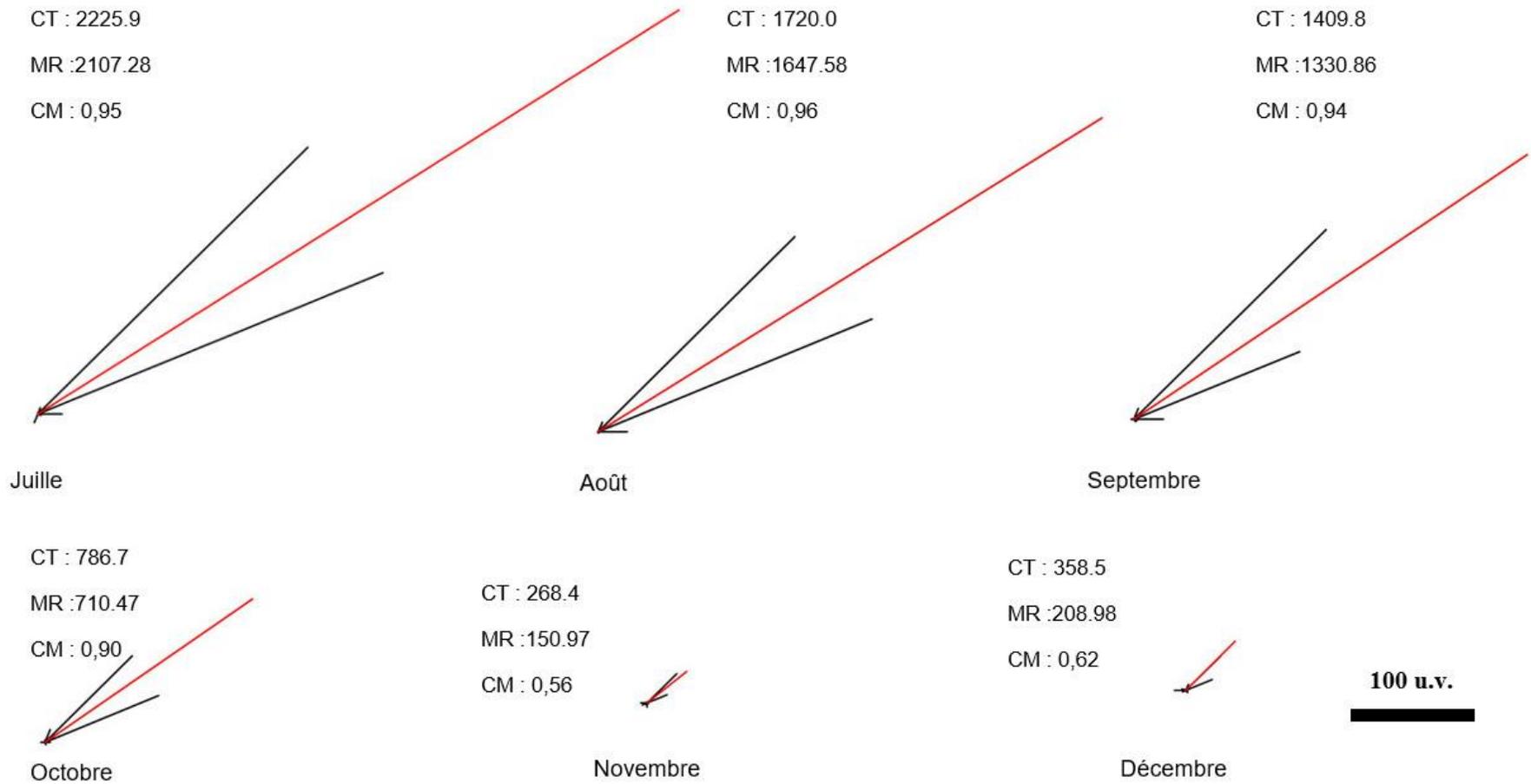


**Figure 1.11 : Rose moyenne annuelle des déplacements potentiels sableux à Kebili de 2001 à 2010.**

Les traits noirs de la figure représentent le déplacement potentiel dans chacune des 16 directions de la rose des vents. Leur valeur est proportionnelle à la valeur de ce déplacement, exprimé en unités vectorielles. Le trait rouge correspond à la résultante vectorielle de toutes les directions.

La figure 1-12 montre que le coefficient migratoire annuel est élevé (CM 0,88). Cela met aussi en évidence la dominance du vent provenant du secteur NE et ENE.





**Figure 1.12 : Roses mensuelles des déplacements potentiels sableux à Kébili 2001-2010.**

L'analyse des roses mensuelles du déplacement potentiel sableux dans la région de Kébili exprime deux directions dominantes. Les vents du secteur NNE à NE dominent en hiver (durant les mois de décembre, janvier et février). À partir du mois de mars la résultante dominante prend toujours une direction entre le NE à ENE ce qui correspond parfaitement avec la direction résultante annuelle.

Cette analyse mensuelle nous a permis l'identification de valeurs assez élevées du coefficient de migration, il est supérieur à 0,9 de mai à septembre. Ces vents sont à l'origine du transport des particules participant au développement des tertres et ensuite à l'ensablement des points d'eau. L'évolution mensuelle de la capacité du transport est au-dessous de 1000 du mois de mars au mois de septembre. C'est le mois de mai qui présente la valeur la plus élevée. Le Nefzaoua subit un régime éolien actif marqué par des forts vents de sable au printemps.

Les vents de sable, fréquents en automne et au printemps prédominent du secteur NE à ENE. En observant l'orientation des *barkhanes* du Nefzaoua, il se confirme que leur édification s'effectue pendant les saisons où les vents de ce secteur dominent.

### **1.3.3.2 Fréquence des vents sahariens**

Pour estimer leur importance dans la région étudiée, nous avons étudié leur fréquence mensuelle sur notre jeu de données le plus récent (2013-2015). Nous avons calculé pour chaque mois, le nombre de jours où un vent violent (9m/s et plus) a été observé dans les directions comprises entre S et W. Les résultats de la figure 1.14 montrent que ces vents sont surtout actifs de décembre à mai, avec un maximum en mars.

Les vents sahariens forts sont ceux qui peuvent transporter des poussières, ce sont les "vents de sable" (certains peuvent être chauds, et alors également qualifiés de sirocco). D'après Dahesh et al. (2007) «Le sirocco, appelé aussi « *Chili* » ou « *Chihili* » localement, est un vent très chaud et très sec soufflant sur les marges nord du Sahara. Il correspond à un déplacement de l'air saharien vers le nord à travers un champ de basses pressions. Ces vents soufflent à une vitesse faible à modérée. Ils soufflent un air très chaud et sec, très dommageable à la plupart des êtres vivants, que ce soient les plantes, dont les cultures, ou même les animaux et les habitants de ces régions (Sarfatti, 1988).

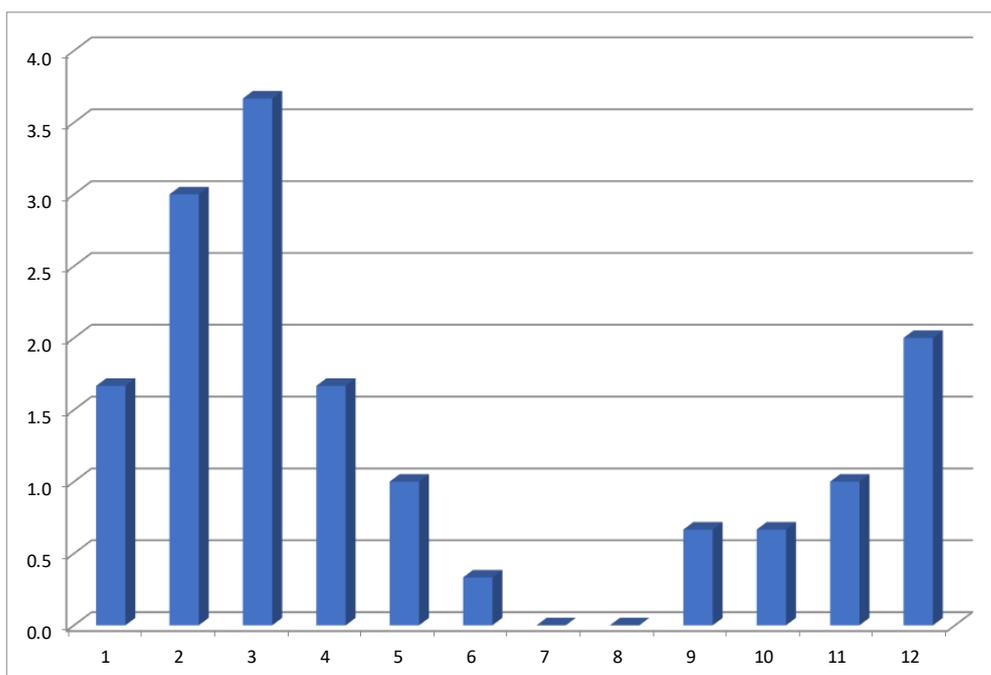


Figure 1.13 : Nombre moyen mensuel de jours de vent saharien (2013 à 2015).

## 1.4 Les Processus éoliens dans le Nefzaoua

Dans le Nefzaoua, l'érosion éolienne est un processus géomorphologique souvent considéré comme un risque en raison des dégâts qu'il peut causer (ensablement des villages, des infrastructures, des cultures, des oasis, pertes de fertilité du sol). Durant les épisodes paléoclimatiques secs, elle a été à l'origine d'une grande partie du façonnement de son paysage actuel. De nos jours, l'action éolienne continue et constitue le facteur climatique le plus actif de l'évolution géomorphologique (dunes actives, sols dénudés, sols salés suite à une forte évaporation), principalement en raison de la capacité de transport du matériel par le vent. La dynamique éolienne se produit en effet lorsque certaines conditions sont favorables : un vent fort, un sol meuble, dénudé, déstructuré et sec, une couverture végétale discontinue (de type herbacé ou à forte production racinaire), ni obstacle naturel, dont les éléments fins peuvent être pris en charge et déplacés par le vent, ce qui est le cas dans le Nefzaoua. Les recouvrements de surface comme les pierres et les encroûtements <sup>2</sup> (Valentin et Bresson, 1992) limitent l'érosion éolienne.

<sup>2</sup> **Les encroûtements** sont issus d'un processus de réorganisation de la surface. Il existe des croûtes structurales, de dépôt, d'érosion ou biologiques. Elles limitent l'érosion éolienne et favorisent le ruissellement

### 1.4.1 Les processus d'ablation

Le vent exerce une action sous deux formes d'ablation (Callot, 2008) :

- Par déflation, prélèvement de particules par tri en surface des éléments transportables d'un matériel soit meuble initialement, soit cohérent mais dont la surface a subi une altération due à l'eau ainsi qu'à la thermoclastie<sup>3</sup> ou l'haloclastie<sup>4</sup>
- Par corrasion<sup>5</sup> d'une roche cohérente. Elle ne s'exerce que sur une faible hauteur et est en général peu efficace, sauf sur des roches très tendres.

### 1.4.2 Les processus de transport

La mise en mouvement des particules par le vent s'effectue de différentes manières en fonction de sa vitesse, de la granulométrie, de la forme et de la densité des particules (Callot, 2008 ; Shao, 2008) :

- La reptation est le déplacement par roulement des particules de grande dimension (500 à 2000  $\mu\text{m}$ ). Cela peut être provoqué par la contrainte de cisaillement due au vent et également par l'impact des autres particules en mouvement (Ballais, 1998 ; Callot, 2008)
- Le phénomène de saltation affecte surtout les grains de dimensions comprises selon la vitesse du vent entre 60 à 100  $\mu\text{m}$  et 200 à 350  $\mu\text{m}$ . Les grains se déplacent par sauts successifs.
- La distance de transport par suspension est beaucoup plus importante, elle est due à un vent violent et la taille des particules qui sont plus fines. La suspension s'effectue sous deux formes :
  - La suspension discontinue pour les particules de dimension inférieure à environ 125  $\mu\text{m}$  ;
  - La suspension permanente dans l'air des particules de dimension inférieure à 10  $\mu\text{m}$ .

Les particules transportées se fragmentent par chocs et frictions répétées durant les processus de saltation et de reptation.

---

<sup>3</sup> La thermoclastie est un processus de désagrégation mécanique des roches sous l'effet des variations de température

<sup>4</sup> L'**haloclastie** est un processus de désagrégation de la roche lié à la cristallisation de solutions salines. Ce processus de météorisation est particulièrement efficace dans les zones côtières ainsi que dans les déserts (milieux parfois riches en sels).

<sup>5</sup> Corrasion : Phénomène d'abrasion des roches par les particules sableuses transportées par le vent.

### **1.4.3 Processus et formes d'accumulation**

Lorsque la vitesse du vent faiblit, il perd sa force d'entraînement des particules, et ces dernières se déposent sous forme de dunes ou de placages. Au final, les accumulations de dépôts d'origine éolienne ont subi un tri granulométrique. Les particules de la taille des sables fins (et plus précisément entre 80 et 120  $\mu\text{m}$ ) sont les plus enclines à s'accumuler en grandes quantités (les particules plus fines vont se déplacer sur de très grandes distances et se disperser, les particules les plus grosses ne voyageant pas loin ne pourront pas s'accumuler). Les différentes formes de dépôt éolien sont largement étudiées par plusieurs auteurs (Aufrère, 1931 ; Callot, 1987 ; Oulehri, 1992 ; Khatteli, 1996 ; Mainguet et al., 2001 ; Callot, 2008). Les formes éoliennes constituent un moyen de caractérisation et d'identification de la dynamique sédimentaire du milieu et de l'évolution de son état de surface. Chaque forme avec ses propres caractéristiques renseigne sur le régime du vent et sa direction dominante, la quantité du sable transporté, la présence ou non d'un obstacle. Ne seront rappelées ici que les formes présentes dans la région et qui sont en rapport direct avec la formation des tertres sujet principale de notre étude. Ces formations ont été observées sur le terrain lors des missions ou sur les images satellitaires disponibles sur *Google Earth*.

### **1.4.4 Morphologie dunaire du Nefzaoua**

Au Nefzaoua, les dunes, formes éoliennes d'accumulation et parfois d'érosion sont en liaison directe avec la direction du vent qui sera étudiée ensuite. Elles y recouvrent les formations géologiques. La présence d'obstacles sur leurs trajets a joué un rôle primordial dans l'édification du paysage de la région, en particulier autour du Chott el Jérid et sur les différents îlots qui se forment autour des sources.

Les alignements de dunes dans le Nefzaoua ont une direction NE-SW qui est en concordance avec la résultante dynamique du transport éolien déjà calculée. La géomorphologie principale du Nefzaoua est celle de dunes mobiles (barkhanes) et de dunes d'obstacle (nebkas et rebdou) :

#### **La barkhane**

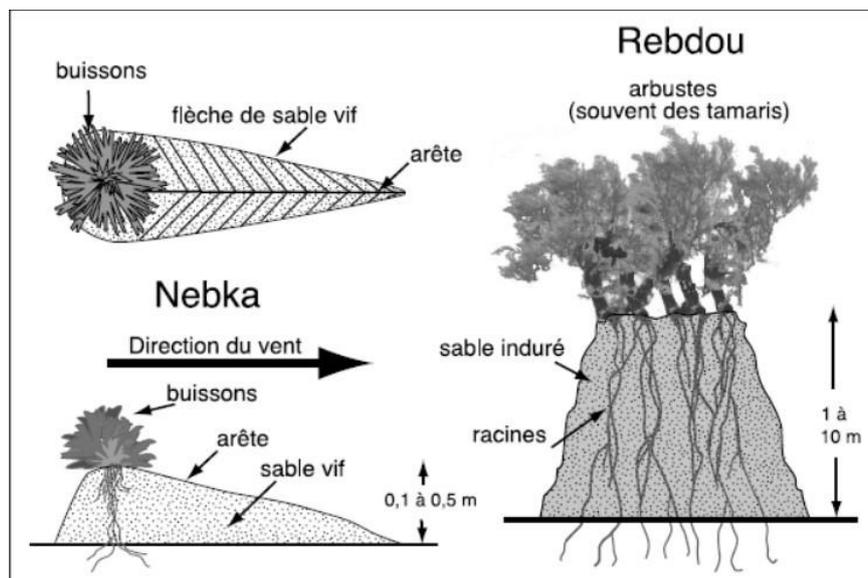
La barkhane est définie comme un édifice éolien ayant la forme d'un croissant, à concavité sous le vent possédant un versant raide d'éboulement suivi d'une aire de déflation. C'est une forme d'accumulation sableuse mobile liée à un régime de vent à direction

dominante. La barkhane constitue un excellent stock mobile de transport de sable qui migre dans sa totalité suivant la direction du vent (Figure 1.14).



**Figure 1.14 : barkhane à l'Est de l'oasis de Jemna (extrait de Google Earth le 25-03-2019).**

### La nebka



**Figure 1.15 : Nebkas et Rebdou (extrait de Callot, 2008).**

La nebka est une forme d'accumulation éolienne allongée dans la direction du dernier vent efficace, formée autour et sous le vent d'un obstacle, qui peut être une touffe de

végétation (Figure 1.15). Dans certains secteurs où la fourniture en sable est importante et la végétation assez dense, il se forme des champs de nebkas presque jointives, pouvant s'épaissir par rétroaction positive : l'accumulation favorise le piégeage de l'eau dans le sable, qui favorise la croissance végétale, qui favorise l'accumulation (Callot, 2008).

### **Le rebdou**

Nous reprenons ici la description de Callot (2008) Le rebdou se forme autour d'une végétation plus importante que celle qui engendre la nebka, souvent des arbustes comme le tamaris (Figure 1.15). Le tamaris est considéré comme un bio-indicateur de la présence d'eau dans le sol. Dans le Nefzaoua il est souvent localisé autour des points d'eau. Le sable est piégé dans les branches et dans les racines. Il étouffe l'arbre qui croît vers le haut pour émerger du sable. Celui-ci, induré autour de la racine, devient cohérent et le rebdou acquiert une pente plus forte que celle des sables vifs. Sa hauteur peut approcher la dizaine de mètres. Lorsque l'arbre meurt, l'édifice est alors attaqué par l'érosion et prend parfois une forme aérodynamique de type *yardang*. Au Nefzaoua le rebdou à tamaris peut évoluer jusqu'à la formation d'un tertre de source.

La variété et l'efficacité du vent dans le temps et dans l'espace a donc contribué à l'évolution d'un paysage typique dans la région du chott très salée qui a bénéficié de conditions favorables (l'artésianisme, un vent fort et une source de sable)

La compréhension des phénomènes éoliens dans le Nefzaoua nous a apporté un complément d'information indispensable à la restitution précise du paysage géomorphologique

## **1.5 Les sols du Nefzaoua**

Dans le Nefzaoua, les sols s'organisent en fonction de quatre principales unités géomorphologiques décrites plus haut dans la partie géomorphologique.

Sur chacune de ces structures, on observe des associations de grands types de sols caractéristiques des zones arides. La présence de ces sols n'est pas uniforme, mais souvent associée avec une variabilité spatiale pouvant être très grande. Ainsi nous ne présentons que les principaux grands groupes de sols tels que référencés dans Base de Référence Mondiale (*WRB - World Reference Base*), système international de classification des sols, où l'on trouvera les définitions des termes utilisés (International Union of Soil Sciences, IUSS, 2014).

D'une façon générale les sols de la région ne présentent que très peu de différenciations verticales dans les zones en relief à cause de la faible vitesse de pédogenèse (Hirche et al., 2017).

- Sur le système de chaînes sédimentaires plissées jurassiques et crétacées :

En raison des faibles précipitations, du faible couvert végétal pouvant protéger ces sols de l'érosion, les sols ont un faible développement. On observe des séquences de sols allant des **Régosols** (sol bruts) sur une roche mère pouvant être calcaire, marneuse ou gypsique, ou des sols formés sur des fragments et éboulis de ces roches dans des glacis au pied des structures massives en place. Lorsque les horizons meubles font moins de 20 cm d'épaisseur ou constituent moins de 20% en volume sur 70 cm d'épaisseur, on parlera de **Leptosols**. Souvent ces sols ont des propriétés aridiques (comme les traits d'accumulation éolienne) ou yermiques (pavements) typiques des zones désertiques.

- Sur les étendues sableuses dunaires meubles au Sud de la région :

Nous avons ici des **Arénosols**. Ces sols sableux ne présentent pas d'accumulations meubles, indurées de gypse ou de carbonates. Ils peuvent également présenter des caractères aridiques et yermiques en surface.

Associés à ces sols peu évolués, lorsqu'il y a des précipitations de carbonates (horizons calciques) parfois indurés (petrocalciques) et de gypse secondaire (horizon gypsique) parfois induré (petrogypsique) à moins de 1,0 m de profondeur, nous aurons des **Calcisols** et des Gypsisols.

- Dans les zones de sebkhas en dépression endoréiques et soumises à forte évaporation :

Les sols se forment sur un matériau d'accumulation sédimentaire de type fluviatile mais sont soumis à l'influence à faible profondeur d'une nappe salée ; nous avons donc des sols halomorphes de type **Solontchaks** avec un horizon salique (conductivité de l'extrait saturé supérieur à celui du gypse  $8000 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) sur plus de 25 cm. La salure des sols est modifiable à tout moment, car dans un contexte géochimique riche en gypse et magnésium et pauvre en argile, il n'y a pas de risque d'alcalinisation irréversible, donc pas de Solonetz.

En revanche dans les milieux irrigués avec des eaux à charge ionique modérée générant des nappes perchées fluctuantes reposant sur de fins niveaux argileux, nous

pouvons avoir des sols **Gleyiques** et des sols **Stagniques** (conditions réductiques provenant de la surface) avec des taches oxymorphiques sur plus de 50% de la surface.

Lorsque les traits d'hydromorphie ne sont pas présents, que la salure est modérée, les sols sont de type Arénosols, Gypsisols et Calcisols.

Ce sont les sols des oasis qui ont particulièrement été étudiés puisque ce sont les seuls véritables sols agricoles de la région. Or, suite au développement et à l'extension des surfaces irriguées, la surexploitation des nappes profondes dans ces régions, plus particulièrement au niveau du Complexe Terminal, s'est traduite par une salinisation continue de l'eau d'irrigation en même temps qu'une baisse du niveau piézométrique et l'intrusion de l'eau salée du Chott.

De plus, situées sur le pourtour du Chott el Jérid avec une faible pente, se trouvant parfois dans des dépressions et irriguées avec une eau salée, la plupart des oasis du Nefzaoua (Gouvernorat de Kébili) souffrent d'une dégradation continue du sol arrivant parfois à la situation d'une fatigue du sol, notamment dans les anciennes oasis (Hachicha et al, 1995). En effet, l'utilisation de cette eau salée en irrigation a entraîné de sérieux problèmes de dégradation et de salinisation des sols, aggravés par la présence d'un réseau de drainage insuffisant et mal entretenu (Montoroi 2018).

## 1.6 La végétation

Les conditions naturelles décrites ci-dessus ne permettent pas une végétation abondante en dehors des oasis. Du point de vue de la classification bioclimatique, le Nefzaoua fait partie de l'étage de végétation méditerranéen saharien, sous étage supérieur, variante à hiver frais (Le Houérou, 1959).

L'étude de ses groupements végétaux est très complexe et demande de nombreuses observations si l'on veut entrer dans les détails. Nous évoquerons seulement ceux qui entrent en corrélation directe avec le gypse, la salure et les formations sableuses, en rapport direct avec notre étude sur les tertres. De ce fait nous retenons les groupements suivants que nous avons pu identifier sur le terrain.

La végétation des sols salés se localise en bordure des chotts. On note *Tamarix Pauctovulata*, *Tamarix Boveana.*, *Limoniastrum Guyonianum* (Zita).

La végétation des sables gypseux se développe sur des sables profonds là où la nappe phréatique est profonde. On note *Traganum Nudatum*, *Obtusatum*, *Retama Raetum* (*Rtem*) etc... Le Houérou (1959).

La végétation dans les oasis est bien sûr composée de plantes cultivées, et dominée par le palmier dattier. Dans les oasis modernes il est cultivé seul, alors que les oasis traditionnelles sont connues pour leurs trois étages de cultures : au sol, luzerne, fèves, carottes et légumes divers, puis un étage intermédiaire d'arbres fruitiers (grenadiers, agrumes, figuiers, etc.) et enfin les palmiers.

## **1.7 L'occupation humaine**

### **1.7.1 Éléments d'histoire du peuplement**

Les éléments définis ci-dessus (l'artésianisme, la géomorphologie et le climat) ont été favorables à l'installation des hommes dans le Nefzaoua.

Nous retiendrons pour la période préhistorique, la découverte archéologique d'Arambourg et R. Coque (1958, cité par Fournet, 1971), à Ain Brimba à Kébili, où ils ont trouvé des restes de faune tropicale (éléphants géants, tigres à dents de sabre, hippopotames...), quelques traces d'ossements humains, des éclats et lames de silex taillés, outils utilisés par des hommes du Paléolithique inférieur. On a daté ce site de deux millions d'années.

Le nom de Nefzaoua est évoqué pour la première fois sous le règne de l'empereur romain Tibère (37-41 ap. J.C). Elle est citée sous le nom *Nybgenorum Civitas*. En ce qui concerne l'origine ethnique de ses habitants, on peut remonter à l'Antiquité. Pendant la période romaine le Nefzaoua resta longtemps hors de portée, mais au cours de la révolte de Tacfarinas située entre 14 et 27 ap. JC, les Romains avaient fait de la région un lieu de sécurité, de refuge et de surveillance, vu son emplacement (bordée par les montagnes au nord et à l'est, par le Grand Erg oriental au sud et le Chott el Jérid à l'ouest). Ainsi le Nefzaoua devint, un des points forts du Limes Tripolitanus. L'actuelle Telmine (à côté de Kébili) fut la capitale de la région, elle s'appelait *Turris-Tamellani*. Toutefois l'influence romaine sur les habitants de Nefzaoua ne put être que minime : les Berbères avaient refusé le Christianisme et restaient attachés à leur langue, leurs traditions et croyances, même si les Romains avaient bâti une église à *Turris Tamellani*.

En 647 arrivèrent les arabes musulmans. Avant de fonder Kairouan en 670 Okba Ibn Nafaa était passé par le Nefzaoua. Il avait islamisé Torra puis Telmine (Turrus Tamellani) où il fonda une mosquée en l'an 49 de l'Hégire (entre 669 et 670 ap. J.C.). Cette mosquée était bâtie juste à la place de l'église romaine. Elle prit le nom de « Okba » qu'elle a conservé jusqu'à aujourd'hui.

Au 14<sup>ème</sup> siècle, l'historien Ibn Khaldoun évoque une origine berbère de la population. Il apparente l'origine du peuple de Nefzaoua au nom de Nefzao, un fils de Loua, père d'une des branches berbères de la famille des Botr (Moreau, 1947). Les plus anciens chroniqueurs de la conquête arabe Afrique du Nord ont perçu la population berbère comme répartie en deux catégories : les Botr et les Beranès. D'après Gautier, les Botr étaient des nomades chameliers les Beranès des montagnards installés dans des villages (Bulliet et Desaipe, 1981).

Les habitants du Nefzaoua se sont progressivement sédentarisés autour des points d'eau grâce à une petite économie de palmeraie. Ces points d'eau connus sous le nom de Aïoun étaient assez abondants pour irriguer des oasis allant jusqu'à quelques hectares. Peu avant la colonisation française, on ne dénombrait pas moins de 300 sources artésiennes alimentant ces nombreuses petites oasis.

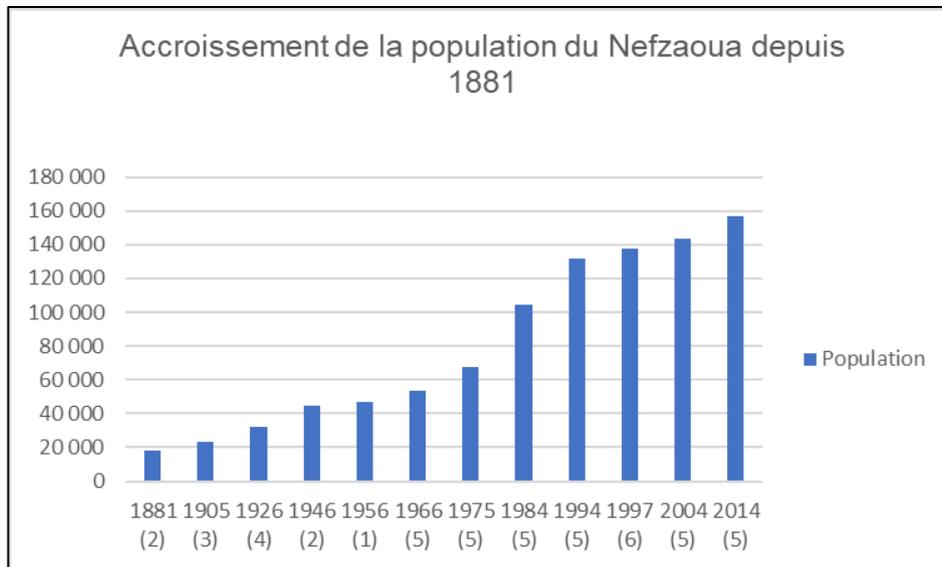
### **1.7.2 La démographie récente**

La croissance démographique de la population depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle explique l'évolution récente de la région.

D'après Idoux (1902) au début du 20<sup>ème</sup> siècle la population du Nefzaoua se divisait en sédentaires et en nomades. Les sédentaires habitaient les grandes oasis, leur nombre était d'environ 12 000. Les nomades se divisaient en nomades de plaine (les Ouled Yacoub) et nomades du Sahara (les Mrezig, les Adara et les Gherib).

- Les Ouled Yacoub étaient rassemblés autour de Kebili avec 1200 individus environ ;
- Le Mrazig, descendants d'un marabout tripolitain Sidi Merzoug ben Abdallah, se localisaient à Douz et comptaient 3600 individus ;
- Les Adara, originaires de Ghadames, comptaient 800 individus et se localisaient à Zafrane, Ghelita et Sennen ;
- Les Gherib au nombre de 1500 et d'origine Tripolitaine circulaient dans la région de Sbria, Zerzine et Aouinet Radjah.

Après l'indépendance (1956) l'État tunisien a mis en place une politique pour sédentariser la population nomade et semi nomade. Cette politique était basée sur la privatisation des terres, la réhabilitation des oasis traditionnelles et la création de nouvelles oasis modernes.



**Figure 1.16 : Accroissement de la population du Nefzaoua depuis 1881. Sources (1) Kassah, 1980, p. 33., (2) Moreau 1947., (3) Kearney, 1910., (4) Bureau des affaires indigènes, 1931, p. 16, (5) I.N.S 66-75-84- 94-2004, 2014 ; (6) ODS, 1999.**

La population du Nefzaoua n'a cessé de croître (Figure 1.16). Elle s'est multipliée par 8,7, passant de 18 000 habitants en 1881 à 156 961 habitants en 2014. Notons qu'en 1881 une partie importante de la population était nomade, ce qui n'est plus le cas actuellement.

Sghaier (1999) estime que cet accroissement continu est lié d'une part à l'amélioration de l'hygiène et à la chute de la mortalité et d'autre part à une amélioration sensible du niveau de vie faisant accroître l'espérance de vie.

## Conclusion

Le Nefzaoua est dans un contexte climatique rude dominé par une forte aridité caractérisée par une longue saison sèche, une faible pluviométrie inférieure à 100 mm/an, des températures élevées avec une forte amplitude thermique et un régime des vents assez intense. Les sols sont pauvres, dominés par une forte salinité liée à la présence du Chott.

Le Nefzaoua présente pourtant des paysages typiques, ponctués de nombreuses palmeraies. Grâce à la présence des sources, des tertres se sont formés sous l'action combinée de l'artésianisme et des phénomènes éoliens. Malgré un climat à contraintes multiples, ces

sources ont permis l'installation autour des tertres d'un système hydro-agricole d'abord essentiellement naturel, puis de plus en plus anthropisé. Ces tertres seront le fil directeur de cette thèse. Le chapitre suivant aborde leur description et leur mode de formation.

**Chapitre 2 : Les tertres du  
Nefzaoua : origine, formation,  
intérêt**

# Introduction

Les travaux sur les interactions homme-environnement en milieu aride mettent en avant la capacité d'adaptation de l'homme à son milieu (Pontanier et al 1995, Picouët et al 1998, Pontanier, 2004). D'une manière générale la vie dans les communautés est marquée par une relation dynamique entre l'homme et son environnement. En effet l'homme consomme, utilise, transforme les éléments composant son environnement immédiat pour assurer sa survie. Grâce à l'abondance des points d'eau ainsi qu'à la domestication et l'introduction d'espèces végétales et animales, les populations oasiennes ont su, à travers le temps, créer en milieu oasien des lieux de vie et de production assez prospères malgré les péripéties de l'histoire humaine et la fragilité du contexte écologique. Dans le Nefzaoua qui est un milieu aride et hostile entouré de chotts (aux sols pauvres et salés), l'homme a tiré profit de l'abondance des sources artésiennes qui ont généré des tertres. Il a occupé ces tertres en utilisant leurs sources pour créer un système d'irrigation qu'il a perfectionné à travers les siècles. Ce système hydro-agricole a permis le développement d'un écosystème oasien traditionnel de trois étages basés sur la culture du palmier dattier associé à des arbres fruitiers et aux cultures vivrières.

Centré sur les tertres de sources artésiennes du Nefzaoua, connus dans la région sous le nom de *Aïoun*<sup>6</sup> ce chapitre étudiera leur morphologie, leur utilisation à travers l'histoire, leur transformation en un système hydro-agricole. Il mettra en valeur l'interaction de l'eau (le Nefzaoua qui repose sur des nappes fossiles dont l'artésianisme était abondant), du vent (la dynamique éolienne en rapport avec la formation du tertre suite à leur ensablement) et de l'Homme dans l'évolution de ce système hydro-agricole original, utilisé depuis longtemps. Nous terminons ce chapitre par l'étude de l'évolution anthropique récente qu'a connu le Nefzaoua et qui entraîne à la fois la mort des tertres et l'extension des oasis. Le Nefzaoua traditionnel est aujourd'hui un paysage menacé de disparition par tarissement des sources naturelles suite à la modernisation des réseaux hydrauliques et des pratiques agricoles.

---

<sup>6</sup> Mot arabe au pluriel, singulier : *Aïn* : designant une source d'eau.

## **2.1 Les tertres : un système hydro-agricole d'origine hydrogéologique et éolienne**

### **2.1.1 Qu'est-ce qu'un tertre du Nefzaoua ?**

« À l'Antiquité le paysage d'ensemble du Nefzaoua se présentait comme une vaste plaine de sel et de sable, parsemée de nombreux bouquets de palmiers tous situés sur des dunes. Presque chaque dune abritait une source jaillissante occupant le centre de la structure dunaire surélevée » (Pontanier, 1968). « Ces bouquets de palmiers émergeant parmi les dunes qui s'étalent à perte de vue dans la plaine sableuse donnaient à cette partie du Nefzaoua un aspect tout à fait typique » (Moureau 1947).

Dans ces deux citations Pontanier et Moureau identifient les tertres de sources du Nefzaoua comme des dunes ce qui, nous le verrons, prête à discussion. Les Nefzaouis appellent les tertres *zira* et/ou *Dajzira* ce qui veut dire « île » et désigne des monticules hydro-éoliens élevés à la faveur d'un jaillissement artésien. Ils sont formés par l'accumulation de matériel éolien piégé par la végétation et développé grâce à l'apport d'eau artésienne. Ils ne sont pas des dunes à proprement parler.

Ces phénomènes ne sont pas propres à la région du Nefzaoua, il existe d'autres endroits du monde où l'on rencontre des formations géomorphologiques de nature comparable, appelée *spring mounds* en anglais dans la littérature scientifique. On trouve ainsi des paléo tertres de sources dans les oasis de Dakhla et de Kharga, dans le désert occidental d'Égypte (Idris 1996 ; Torab 2013, Crépy 2016) mais ces vestiges très anciens, sont restés fonctionnels jusqu'à une date récente, certains jusqu'aux années 1960. Ces dépôts des sources fossiles sont datés du Pléistocène par l'industrie lithique (Adelsberger et Smith 2010 ; Crépy 2016). Ils ont un intérêt paléo stratigraphique. Ceux décrits en Syrie ont servi de zone de captage à l'époque byzantine, mais sont taris et affaissés depuis longtemps (Besançon & al, 2000). En Australie, par contre existent des *spring mounds* fonctionnels. Les sources qui les ont formés coulent toujours, mais dans un environnement naturel, sans mise en valeur, il n'y a pas d'oasis associée (Watts, 1975 ; Harris,1981 ; Ponder,1986 ; Bourke et al, 2007).

### **2.1.2 Formations des tertres (rôle du vent et de l'eau)**

Dans l'évolution géomorphologique des tertres, le vent associé à l'eau a joué un rôle primordial dans le façonnement du paysage du Nefzaoua.

D'après les éléments réunis dans les paragraphes précédents et la bibliographie consultée, un schéma de synthèse de la formation et de l'évolution d'un tertre du Nefzaoua peut être proposé (Figure 2.1).

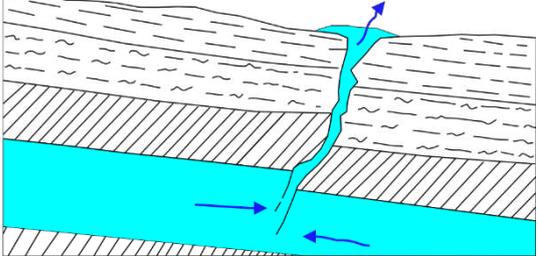
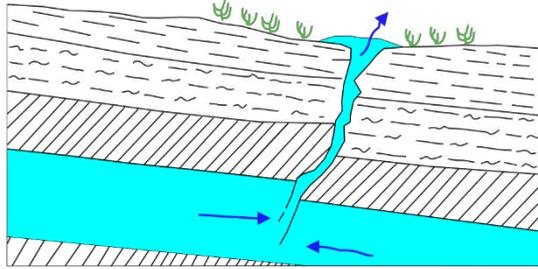
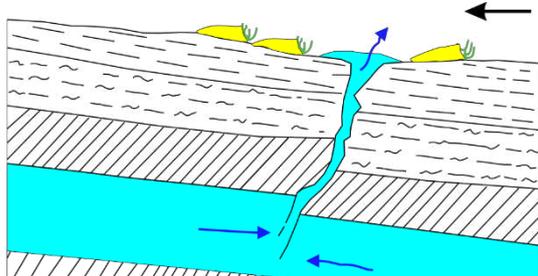
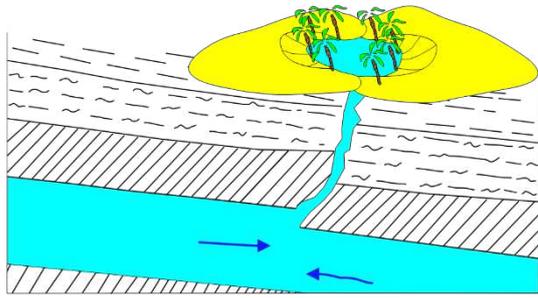
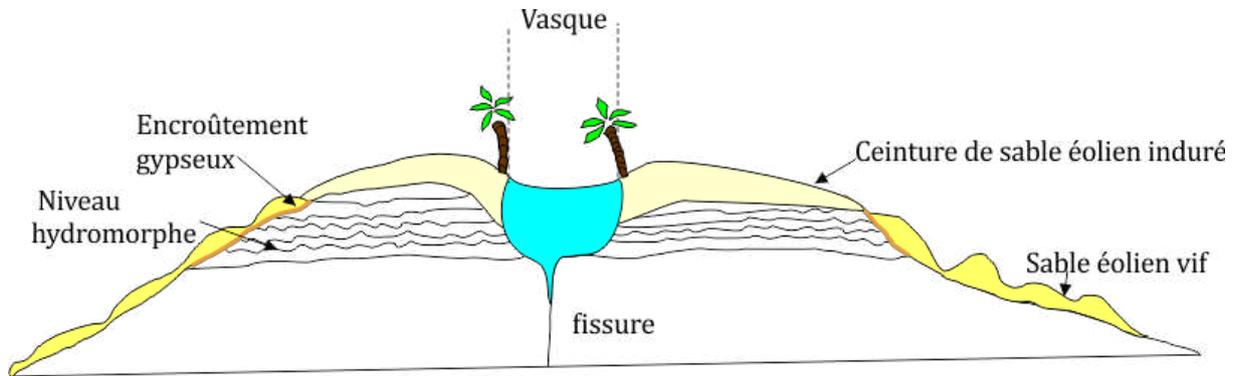
Étapes du rôle du vent et de l'eau	Schéma
<p>Artésianisme : Une discontinuité dans le toit de la roche supérieure imperméable bloquant la nappe captive permet la remontée jusqu'à la surface de l'eau minéralisée contenue dans la nappe. Cette source est alors qualifiée d'artésienne par son jaillissement naturel au-dessus de la surface du sol.</p>	 <p>Source artésienne d'après Forkasiewicz et al., 1976 modifié.</p>
<p>Dans un environnement aride, installation d'une végétation naturelle à dominante herbacée autour de la source.</p>	
<p>Formation de nebkas, piégeage des particules transportées par l'érosion éolienne autour de la végétation par accumulations successives au ras du sol.</p>	
<p>Formation d'un tertre autour de la source artésienne à partir de nebkas ou rebdou. Cette structure tridimensionnelle composée d'une accumulation de sédiments d'origine éolienne stratifiés est excentrée en fonction des vents dominants. Sa hauteur atteint l'émergence artésienne (entre 2 et 30 m dans la région). Une végétation (palmeraie) naturelle peut s'installer.</p>	

Figure 2.1 : Schéma de synthèse d'un cycle de vie d'un tertre de sources artésienne

### 2.1.3 Morphologie des tertres de sources



**Figure 2.2 : Morphologie d'un tertre de source artésienne du Nefzaoua (d'après Pontanier, 1968, modifié).**

Les tertres de sources du Nefzaoua sont des édifices souvent circulaires, à sommet gypseux ou calcaire et évidé au centre. Cela leur donne un aspect assez semblable à celui d'un petit cône volcanique. Ils ont été alimentés par des sources artésiennes provenant des aquifères continentaux intercalaires et des aquifères du complexe terminal (Cf §1) qui jaillissent au centre du tertre.

La hauteur des tertres varie de moins de 1 m à plus de 30 m. Ils peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de diamètre. La plupart sont composés de particules de sable éolien et de limon cimentées par des quantités variables de tuf ou de gypse. *Le tuf est une roche sédimentaire carbonatée appelée encore travertin lorsqu'elle est d'origine hydrothermale avec de l'eau chaude. Il est très léger car il se forme par précipitation de carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) autour de mousses, mycéliums, algues, lichens à l'émergence de certaines sources en laissant beaucoup de vide entre les encroûtements* (Limondin-Lozouet & al, 2012). Certains tertres en Egypte, (Torab, 2013) ; en Australie, (Ponder, 1986) ; en USA, (Blinn et al 1994) contiennent des tufs mais nous n'en n'avons pas observé car probablement les apports éoliens masquent toute bioconstruction dans le Nefzaoua.

La source à l'origine du tertre peut former un bassin au sommet du tertre ou s'écouler de côté. La superficie du bassin varie suivant le débit de la source et l'entretien qu'on lui accorde (Mamou 1978). La structure de nombre de ces tertres montre des signes d'évolution des conditions environnementales au cours de leur formation.

En se basant sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) TandemX avec une altitude de 10 m (cf chap. 3) une variation morphologique des tertres du Nefzaoua a été observée : par

taille : largeur/hauteur ; par forme : plat, rond et allongé ; par complexité : simple, double ou complexe (plusieurs sources et/ou par coalescence).

## 2.2 Les tertres des sources artésiennes : une occupation à travers les âges

Des silex taillés par l'homme observés lors des prospections de terrain à la surface de plusieurs tertres, parfois accompagnés de morceaux de coquilles d'œufs d'autruche, sont indicateurs d'une occupation de certaines de ces sources dès la Préhistoire. La rareté des pièces et leur position en surface n'ont pas permis d'aller plus avant dans leur interprétation.



**Figure 2.3 : Eclats de silex taillés collectés en surface des tertres du Nefzaoua, photo A. Raddadi.**

Cependant, le Lieutenant Pezard (1908) a signalé que lors de sa prospection aux Aïoun Bou Rdaf (Trt 118<sup>7</sup>) et Tefguia (Trt 119) (Figure 5.2) à l'extrémité sud du chott, quelques silex ont été recueillis. Il mentionne des outils ou des armes appartenant aux périodes robenhausienne et tardenoisienne, quelques lames et couteaux des échantillons de pointes de

<sup>7</sup> Les codes et la numérotation attribués aux tertres (exp : Trt 33) ont été réalisés sans ordre géographique au fur et à mesure de leurs géolocalisations sur Google Earth.

flèches de formes très différentes : les unes longues à pédoncules peu marqués, d'autres courtes à grands pédoncules ; il remarque des formes allongées et des formes trapues, quelques-unes même sans pédoncule, ainsi que des fragments de coquilles d'œufs d'autruches découpés en rondelles.

Moreau (1947) explique la présence fréquente de ces silex taillés en surface : elle fait suite au déplacement de la dune qui les abritait, en se déplaçant, la dune enfouit ces silex en fer de lance ou en lames. Elle les garde des siècles sous sa couverture. Une tempête plus violente finit un jour par chasser ce sable, la dune se déplace, le sol, balayé jusqu'à l'assise dure, livre au monde ses silex. Par cette hypothèse, il confirme la présence préhistorique de l'homme au sud du Chott et attribue la cause de la présence en surface de ces outils néolithiques à l'érosion éolienne. Il est possible d'interpréter plus simplement leur présence par leur maintien sur place depuis le Néolithique, comme cela est souvent le cas dans les milieux désertiques. Il se demande si on peut rattacher ces hommes à ceux qui plus tard furent appelés Berbères, ou s'il s'agissait de populations préhistoriques disparues. Tous les doutes subsistent.

En effet, d'après Carton (1914) cité par Sghaier (1999), à « *l'époque berbère* » (époque non déterminée historiquement mais qui débute certainement avant l'époque romaine), des tribus berbères sédentaires vivaient autour des sources abondantes principalement la source de Taouergha et d'El Gharig et formaient une société oasienne prospère au centre du domaine des autres tribus berbères nomades qui jalonnaient les alentours.

Le long des montagnes au nord du Chott el Jérid on trouve des traces du *Limes*, muraille en pierre conçue par les romains comme ligne défensive fortifiée contre les tribus berbères du sud. Les vestiges romains de la région décrits par plusieurs auteurs (Baraban, 1887 ; Idoux, 1902 ; Moreau, 1947 ; Pouget, 1968 ; Troussset, 1974/1986 ; Ellefi, 2014) permettent de confirmer également l'utilisation dans l'Antiquité de ce système hydro-agricole oasien perfectionné par les Romains. L'aménagement de sources d'El Mansoura lors de l'occupation romaine est attesté à Aïn el Relig et étudié au chapitre 5.1. En revanche, les Romains n'ont aménagé le réseau hydro-agricole que de quelques sources artésiennes, sans chercher à toutes les utiliser car à cette époque, elles étaient nombreuses et abondantes. Leur présence dans le Nefzaoua était avant tout militaire, leur objectif principal étant la protection de leurs frontières.

Même si, après le départ des Romains, l'histoire de la région a connu plusieurs invasions, il ne semble pas que cela ait provoqué de grands changements dans l'utilisation des

sources artésiennes. En revanche, lors de l'époque coloniale récente, pour tirer bénéfice de l'abondance des ressources en eau, les responsables ont compris que le développement agricole (particulièrement la culture des dattes) reposait sur la mobilisation de volumes d'eau considérables dans la région du Nefzaoua, en recourant aux forages. Et c'est au début du 20<sup>ème</sup> siècle que les premiers forages ont été créés.

## **2.3 Les tertres : des sources artésiennes transformées en un système d'irrigation complexe**

Les sources d'eau douce associées aux tertres ont très tôt été exploitées par les hommes, leur permettant de créer des oasis cultivées en plein désert. L'ancien système hydrologique naturel d'origine géologique dans le Nefzaoua était le système de tertres et d'oasis de palmiers dattiers organisés avec une disposition radiale autour d'une source artésienne. Étant donné que les sources artésiennes étaient en hauteur par rapport aux oasis installées dans les parties basses, le système d'irrigation était basé sur la gravité (El Fekih et al, 1966 ; Baduel et Baduel, 1984). L'eau s'écoulait jusqu'à l'oasis dans des séguias en terre curées périodiquement.

Sans pouvoir remonter dans le temps (par manque de données bibliographiques) jusqu'aux premières techniques utilisées par les oasiens nous supposons que l'ancien système agricole était très simple au départ. D'après Belhedi (1995), la source appartenait à celui ou ceux qui l'avaient aménagée ou creusée et ceux qui la partageaient étaient peu nombreux et surtout appartenaient à la même famille ou lignage. La propriété de l'eau se faisait de père en fils et en fonction du processus des ventes de la part en eau. Le partage de l'eau se faisait au début de manière égalitaire mais le processus de l'héritage et celui des ventes ont contribué à une distribution de plus en plus inégalitaire. Elle devint ensuite de plus en plus complexe : plusieurs communautés (tribus nomades) s'installèrent, les oasis s'étendirent, l'organisation de la distribution de l'eau se compliqua.

Étant donné que l'eau est l'élément le plus déterminant dans l'existence des oasis, elle était souvent source de conflits entre les communautés oasiennes partageant l'eau d'une même source artésienne. Le système de gestion des eaux a été perfectionné à travers les

siècles pour les éviter et mieux satisfaire les besoins de l'ensemble des communautés (chaque village dans le Nefzaoua est bâti au départ sur un tertre où une source artésienne sourd à ses pieds), mais il resta quand même irrationnel et provoqua souvent des déséquilibres sociaux et des rapports de forces entre les communautés. Il a été rapporté par Tissot (1884) qu'il y avait plus de cent tertres exploités dans le Nefzaoua sur un territoire d'environ 70 lieues de circonférence (soit environ 100 km de diamètre). « *Mais les guerres acharnées que se livrent, de village à village, les deux partis entre lesquels se partagent les populations du Nefzâoua en ont réduit le nombre de près de moitié* » (Tissot 1884).

Dans le Nefzaoua, les sources artésiennes étaient aménagées en bassins pour deux raisons :

- pour emmagasiner l'eau lorsque le débit de la source était faible. Les sources alimentaient un bassin dans lequel les eaux étaient accumulées la nuit (ou pendant plusieurs jours : dès que c'était plein en arrosait) pour être ensuite restituées aux irrigations ;

- pour la régularisation du débit lorsqu'il était élevé.

D'après la bibliographie (Moreau, 1947, Bédoucha, 1976) le partage des eaux s'effectuait au début du 20<sup>ème</sup> siècle à tour de rôle (système cyclique). Les parts d'eau étaient mesurées en temps d'écoulement, mais aussi sous forme d'alternances des tours d'irrigation. Les parts d'eau étaient alors mesurées en intervalles d'heures de prière. Les eaux du bassin étaient acheminées vers les parties basses du tertre pour l'irrigation des oasis soit par des conduites de surface : « *sâgya* » canal, soit par des galeries creusées dans la partie centrale du tertre (ou sourdait la source) appelées localement « *khargia* » et semblables à des foggaras.

Une étude particulièrement importante pour comprendre le fonctionnement des grands tertres avant leur tarissement est celle de Bédoucha (1976). Elle porte sur le système hydraulique de l'oasis d'El Anad, un système complexe révélant les modes de répartition, les modalités de mesure, la distribution et l'appropriation de l'eau dans une communauté oasisienne. Cette oasis était alimentée par la source de Aïn Er Rellig ou d'El Gharig (Trt 14). Son importance, son aménagement et son utilisation en ont fait une des sources les plus anciennement attestés au Nefzaoua. L'oasis regroupe quatre villages : Mansourah, Rabta, Ejdaïda et Telmine. Anciennement, toute l'eau de la source coulait alternativement pour chacun des villages pendant un temps déterminé. Le système d'irrigation était le système de répartition (rotation) des eaux par tour. À l'époque des observations de l'auteur le débit de la

source était en baisse, passé de 130 l/s en 1970 à 76 l/s en 1976. Bédoucha (1976) fait une description minutieuse du mode de fonctionnement. L'eau de la source sourdait dans un bassin dont le niveau restait constant en toute saison, un barrage artificiel en terre étayé sur sa face interne par un mur constitué de larges pierres de taille datant de l'époque romaine. Un déversoir aménagé dans la partie supérieure et dans l'épaisseur même du barrage permettait un écoulement régulier de l'eau.

*Le bassin de la Gharig « aux fausses allures d'étang naturel est en fait le premier maillon du système technique d'irrigation. Sa fonction n'est pas d'accumuler, car le débit naturel de la source est plus que suffisant à un déversement permanent. [...] L'eau est dirigée vers les différentes zones de l'oasis à irriguer par des canaux et rigoles plus ou moins importants, tous en terre qui par embranchement et ramification successive arrivent à chaque jardin. La déclivité des canalisations permet un écoulement par gravité naturelle. [...] Les rigoles sont ouvertes alternativement pendant un laps de temps donné : la totalité du flot s'engage successivement dans chaque maçraf. Une brèche est faite à la houe dans le simple barrage en terre qui ferme à son départ la sâgya. [...] Lorsque les temps d'irrigation dont bénéficient les oasis irriguées par une sâgya sont écoulés, on détourne l'eau de celle-ci au profit d'une autre en construisant à la houe un nouveau barrage de terre au départ de la première sâgya et en ouvrant une brèche dans la levée de terre qui empêchait l'écoulement dans la suivante.*

*Au début du 19e siècle, plusieurs oasis ont abandonné le système de rotation par tour pour un nouveau le système des gadous [...], un récipient en cuivre dont le fond est troué considéré comme une unité de temps mesurée à l'aide d'une sorte de clepsydre. Le terme désigne aussi bien l'instrument lui-même que la durée d'écoulement du contenu. L'orifice est assez étroit pour que l'eau s'en échappe lentement. Accrochées à un trépied, le gadous se vide en un peu moins de trois minutes et demie (18 gadous en une heure) dans un seau. Il est aussitôt rempli par le goddâs qui comptabilise chaque gadûs écoulé par un nœud fait sur une fibre de palmier, chaque fibre représentant un ayant droit. »*

D'après Belhedi (1995) les premiers forages profonds creusés par l'Etat n'ont pas pour autant réglé le problème et l'eau. D'héritaire, transmise de père en fils, elle est devenue à la fois un bien rare et une marchandise. Le prix de l'eau était à l'heure d'irrigation, soit 1.2 D. Le tour d'eau a varié selon les périodes, allant de dix jours à plus d'un mois selon les besoins et les saisons. Ce passage de la source au sondage a permis en fait un autre passage, celui entre

une structure héréditaire de l'eau assurant la reproduction d'un ordre de l'eau acquis au fil des années, que ce soit par l'héritage ou par achat-vente, à un ordre socio-agraire différent basé exclusivement sur le marché : seuls ceux qui peuvent payer l'heure d'eau peuvent irriguer.

Pour ce qui concerne les modes des cultures, Baraban (1887) décrit l'oasis traditionnelle d'El Mansourah : *« les palmiers, en général courts et gros sont plantés par touffes de trois jusqu'à six, de nombreux figuiers et grenadiers croissent en ménage avec les palmiers et abritent de leur couvert de belles cultures d'orge et de luzerne. »*

L'agrosystème des palmeraies de dattiers du Nefzaoua était donc composé des trois étages classiquement décrits dans les oasis (Fusillier & al 2009 ; Benaoun et al 2014) : étage supérieur palmier dattier, étage médian arbres fruitiers (agrumes, grenades...) et étage inférieur potager et autres cultures fourragères. Battesti (2002) précise que : *« Ce système est propre à créer un microclimat particulier et favorable à l'agriculture en milieu désertique, intégrant le poids des contraintes naturelles : diminution de l'exposition au soleil, réduction du vent, augmentation de l'hygrométrie... C'est ce que l'on nomme couramment « l'effet oasis » qui crée une sorte de parenthèse efficace sur l'environnement immédiat. »*

## **2.4 Les interactions entre les aménagements de sources et les contraintes du milieu**

Dans les conditions climatiques (aridité, vent violent), hydrologiques (artésianisme), pédologiques (sols pauvre et salé) typiques du Nefzaoua, l'homme a aménagé ces ressources naturelles. Il a créé alors un système hydro-agricole qui a permis le développement de cette région du Chott.

En se basant sur ce que la nature lui a offert, l'homme l'a mis en valeur et a développé plusieurs techniques d'irrigation en s'adaptant à son milieu et en protégeant ce système contre l'érosion éolienne. Même si cette dernière était à l'origine de la création du système hydrologique, elle participe de manière importante à sa modification. Son impact le plus important dans le Nefzaoua est l'ensablement des oasis et des sources artésiennes. Le processus de formation des tertres est commandé par le vent qui déclenche le transport des sédiments qui seront ensuite piégés par la végétation qui s'est installée autour des sources. Le débit de la source ne décroît que parce que le bassin dans lequel elle est emmagasinée s'ensable. Si l'on ne remédie pas à l'ensablement, l'eau cesse de jaillir à la surface et va se perdre sans profit

dans les couches inférieures du sol. Pour éviter l'ensablement, un curage périodique des canalisations (swâgis, sing. *sâgya*) et surtout de la source centrale est souvent nécessaire. L'entretien a lieu une fois par an et de préférence à la fin de l'été ou au début de l'automne en rehaussant les bords du tertre avec les déblais de curage. L'oasis est défendue contre l'érosion éolienne par de petits terrains en culture, clos de branches de palmiers et disposés tout autour.

L'intervention de l'homme contre l'ensablement des sources a permis la durabilité de leur fonctionnement jusqu'à l'apparition des forages profonds. Pour maîtriser l'ensablement et pour la protection des cultures, des habitats et des infrastructures dans l'oasis contre l'envahissement des sables éoliens, l'homme a mis en place plusieurs techniques de protection : au départ il protégeait ses cultures en clôturant ses jardins avec des branches de palmier et en plantant des tamaris. Ensuite il a perfectionné ses techniques en développant la technique de fixation des dunes mobiles.

- **La technique de la palissade** ou une dune *afreg* : édification d'un obstacle linéaire au vent

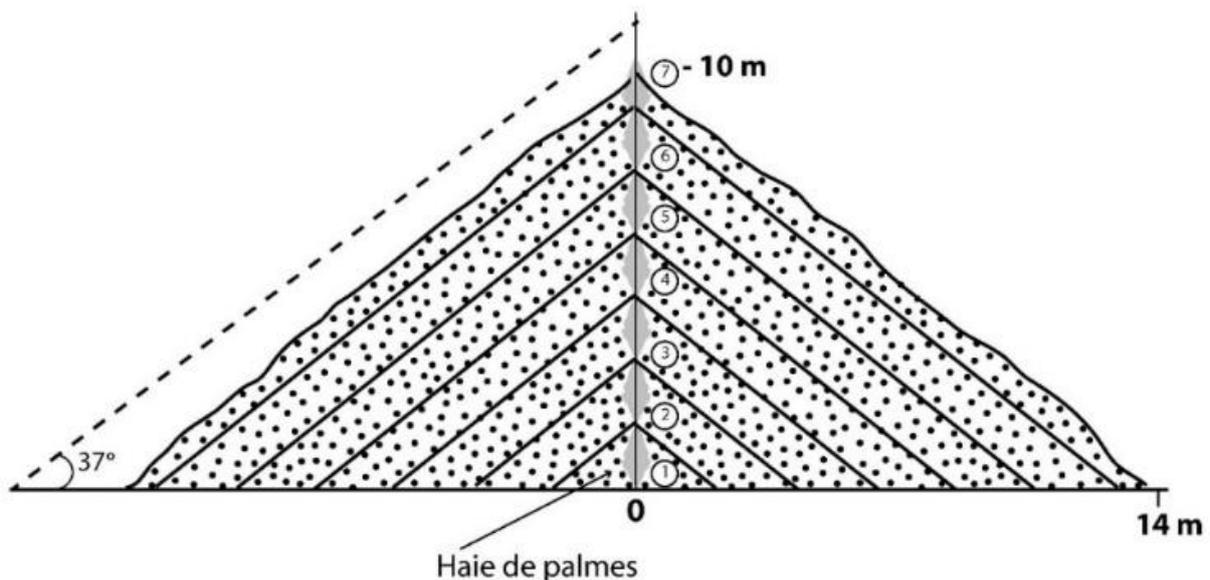


Figure 2.4 : Schéma explicatif d'une dune afreg d'après Callot (à paraître).



**Figure 2.5 : Technique de palissade pour la protection contre l'ensablement dans la région de Zarzine, au sud-ouest de Kébili.**

Cette technique des palissades (barrières de palmes) dressées perpendiculairement au vent dominant diminue sa vitesse et provoque l'accumulation du sable (Figures 2.4 et 2.5). Cette accumulation aboutit à la formation d'une dune artificielle qui constitue la première phase de la lutte contre l'ensablement. Lorsque le sable a ennoyé la haie, on en construit une nouvelle par-dessus. Cette technique est omniprésente dans le Nefzaoua et elle se localise tout au long de l'axe NE -SW.

#### **- Le Quadrillage :**



**Figure 2.6 : Technique de quadrillage pour la protection contre l'ensablement dans la région de Zarzine, au sud-ouest de Kébili.**

Les palissades peuvent être complétées par un quadrillage, réseau de lignes de palmes délimitant entre elles des carrés ou des losanges (Figure 2.6). Chaque élément de quadrillage fonctionne comme une palissade dans laquelle se dépose le sable. Le système est presque indispensable lorsque le vent n'a pas de direction dominante.

## 2.5 L'évolution anthropique récente : « mort » des tertres et extension des oasis

Ce système agricole des tertres était encore en vigueur jusqu'aux débuts du 20<sup>ème</sup> siècle, soit jusqu'à l'apparition des forages profonds. Les premiers furent faits à Souk el Biaz et à Bazma en 1908 (Moreau, 1947). Ce système engendra la baisse de la nappe artésienne. Le tarissement progressif des sources commença à se faire sentir dès le début des années 1960. Aucune des sources signalées au début du XX<sup>e</sup> siècle ne fonctionne encore actuellement. Les tertres, cet ancien système hydro-agricole oasien d'origine hydrogéologique, est mort suite aux tarissements des source, en raison de la modernisation des réseaux hydrauliques.

L'introduction de la technique du forage a permis la création de nouveaux périmètres irrigués axés principalement sur la production de dattes à haute valeur marchande de la variété Deglet-Ennour. Mais ce n'est qu'à partir du début des années 1980, dans le cadre du projet PDES (Plan Directeur des Eaux du Sud), que l'extension de l'irrigation a connu une grande ampleur (Kassah, 2002). D'après Baduel (1979), le nombre de palmiers dattiers est passé de 160 000 pieds en 1882 à 772 000 pieds en 1975.

**Tableau 2.1 : Superficie des oasis et alimentation en eau dans la Nefzaoua à partir de 1920 d'après Sahnoun et al 1995<sup>8</sup>**

Décennies	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
<b>Superficie cumulée (ha)</b>	348	1605	1898	2835	3557	5308	8408
<b>Nb de forages cumulés</b>	11	28	35	54	73	93	110
<b>Débits cumulés<sup>8</sup></b>	300		550	1100			3600
<b>Nombre de sources</b>				300	200	30	10

La superficie des oasis a passé de 348 en 1920 à 8408 en 1980 (Tableau 2.1). Selon Mamou, 1995 l'exploitation des ressources en eau a augmenté de 90,5 Mm<sup>3</sup> /an en 1980 à 277,9 Mm<sup>3</sup> en 1990.

<sup>8</sup>La publication utilisée ne fournit pas l'unité, mais le contexte permet de supposer le litre par seconde.

**Tableau 2.2 : Extension de la superficie des oasis du Nefzaoua a palmiers dattiers en (ha) entre 1976 et 1999**

Année/ gouvernorat	1976	1999	Evolution
Kébili (Le Nefzaoua)	5240	16000	+205%

**Source : ministère de l’agriculture : enquêtes oasis 1976 et 1999, cité par Kassah, 2002.**

Le PDES établi par le ministère de l’Agriculture est un schéma directeur d’utilisation des ressources en eau et en sol du sud. Il a été créé, pour satisfaire les besoins en eau des activités socio-économiques du sud Tunisien jusqu’à l’horizon 2000. Parmi les actions identifiées figuraient la sauvegarde de 20 000 ha d’oasis traditionnelles souffrant d’un déficit important en eau et la création de 8 000 ha de nouvelles oasis dans les régions du Djérid et Nefzaoua. (Gharbi, 2009). Dans le Nefzaoua ce plan comprenait la sauvegarde de 50 oasis existantes (4 300 ha) et la création de six nouvelles oasis (500 ha). Il a permis de mobiliser 1 600 l/s (soit 48 millions de m<sup>3</sup> /an) par 27 forages dont 12 forages profonds captant la nappe du continental intercalaire où le rendement dans la zone de Nefzaoua s’était révélé excellent.

Les programmes de réhabilitation des oasis mis en œuvre par l’État ont été rapidement relayés et dépassés par des initiatives privées. En effet les forages privés, illicites et informels tolérés par les pouvoirs publics sont devenus la principale source d’eau pour la production des dattes dans le Nefzaoua. En 1987, 350 puits illicites ont été enregistrés. En 2009 leur nombre est de l’ordre de 3 500 puits. Ces prélèvements perturbent une planification raisonnable et équitable des possibilités en eau de la région et aboutissent à une surexploitation de la nappe d’eau, à un rabattement rapide de son niveau et à une augmentation sensible de la salinité de l’eau (Gharbi, 2009).

Le pompage excessif dans la nappe a engendré la baisse du niveau piézométrique. Une augmentation de la salinité de l’eau souterraine a été considérée comme la conséquence de l’augmentation des prélèvements dans l’aquifère au cours des dernières décades (Zammouri et al. 2007). L’irrigation dans les oasis du Nefzaoua se fait selon la méthode de submersion où un certain niveau d’eau est fourni au champ à irriguer jusqu’à ce que le sol soit saturé et complètement recouvert (Kraiem et al., 2014). Ce niveau d’eau est supérieur à la quantité requise par les cultures et induit un excès d’eau qui doit être drainé. L’eau d’irrigation est prélevée dans deux aquifères profonds.

Le CT se trouve sous les aquifères peu profonds du Plio-Quaternaire et est caractérisé par une salinité moyenne de 3 g/l. Le CI, plus profond, est moins utilisé et a une salinité moyenne de 4 g/l. Une partie des eaux d'irrigation excédentaires sont stockées dans les dépôts mio-plio quaternaires et constituent ainsi des aquifères oasiens peu profonds, ce qui augmente les risques d'hydromorphie et d'asphyxie pour les palmiers dattiers (Kraiem et al., 2014). Les solutions d'assainissement consistent en des systèmes de drainage qui ont été implantés pour drainer ces eaux le long d'un réseau de drainage vers un bassin de stockage d'eau ouvert à l'extérieur de l'oasis (Kraiem et al., 2014). Cependant la forte évapo-transpiration associée à la charge de plus en plus importante en sels des eaux d'irrigation font craindre un plus grand risque par salinisation que l'altération du drainage (Marlet et al., 2009).

La salinisation des sols au même titre que la désertification est un des facteurs de dégradation des terres comme signalés par les expertises de la FAO sur l'état des ressources en sols du monde (FAO 2015, rapport technique) ou de la plate-forme internationale pour la biodiversité (IPBES ; Prince et al. 2018). Pour que les sols soient considérés comme salés avec des sels solubles, et classés comme Solontchaks (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015), ils doivent avoir un horizon salique ce qui implique une conductivité électrique en pâte saturée  $>4\text{dS/m}^{-1}$  ce qui est équivalent à  $4000\mu\text{S cm}^{-1}$ . Comme l'extrait en pâte saturée est compliqué à réaliser en routine en particulier pour les sols sableux, la limite de salinité pour les cultures mesurée par la conductivité de l'extrait au 1/10 peut être considérée comme étant de  $2000\mu\text{S cm}^{-1}$  pour les sédiments sableux des tertres. (Lebrusq et Loyer, 1982). A partir de cette conductivité électrique supérieure à celle du gypse en saturation dans la zone de prospection racinaire, les plantes commencent à subir un stress hydrique conduisant à une sécheresse physiologique et à la mort. Le processus de salinisation du sol consiste en une accumulation de sels dans la zone racinaire productive du sol. Elle est causée par l'augmentation de la salinité des aquifères phréatiques suite à l'évapotranspiration intense et aux très faibles pluies, ainsi que la hausse du niveau des eaux souterraines qui en résulte, en raison de l'excès d'eau d'irrigation et du drainage insuffisant des sols (OMS-ENEP 1989). Selon Marlet et al., 2009 ou Haj-Amor *et al.* (2016, 2017) l'irrigation des palmeraies serait possible si elle était limitée à de faibles apports d'eau mais assez fréquents pour créer une balance positive entre drainage et évapotranspiration par remontées capillaires.

Les eaux des aquifères de surface se chargent en sels en migrant à travers des niveaux géologiques évaporitiques chargés en chlorures corrélés avec Na<sup>+</sup> et sulfates, depuis le piedmont du Dahar, où les eaux sont peu chargées, vers le Nefzaoua à l'Ouest ou à partir du Sud-Ouest de Douz (grand Erg) vers le Nord (Kraiem et al., 2014). Le Nefzaoua est caractérisé par une importante couche supérieure d'accumulation de sable d'une épaisseur supérieure à 80 cm. Ces sols sableux à argilo-sableux ont une perméabilité et une porosité élevées et une pente de plus de 5 %. En raison de la lixiviation continue des sols, leur percolation vers les aquifères peu profonds des oasis sous-jacentes constitue une menace d'intrusion d'eau hypersalines dans les nappes profondes (Zammouri et al., 2007 ; Hadj Ammar, 2014) et renforce la vulnérabilité des ressources en eau dans la région.

Les nouvelles extensions d'oasis modernes ont été bonifiées, soit par des amendements organiques pour rentabiliser immédiatement la strate au sol, soit en rehaussant les sols à l'aide de sable à faible teneur en sels quand il s'agit d'assurer le développement des racines du palmier dans un sol sain. Les agriculteurs mettent en œuvre ces pratiques anciennes de leur propre initiative (Sahnoun et al., 1995).

Le tarissement des sources artésiennes a conduit donc à l'abandon des tertres et à leur démantèlement pour récupérer du matériel sableux très favorable à la culture que l'on va étaler sur les parties basses proches du Chott (plus salées) pour conquérir de nouveaux terrains et créer de nouveaux champs à la périphérie des anciennes oasis. En effet, aujourd'hui le palmier dattier occupe une place stratégique dans la stabilité socio-économique de l'agrosystème oasien. Il constitue l'axe principal de l'agriculture dans la région du Nefzaoua assurant la principale ressource financière. Les oasis du Nefzaoua ont été réorganisées pour satisfaire une demande sans cesse croissante en dattes de qualité supérieure « Deglet-Ennour » (Ghazouani et al., 2009). Cette réorganisation a fait que la phoeniciculture est passée d'un système de culture traditionnelle riche et diversifiée à un système industriel axé sur une culture monovariétale (Rhouma, 1993 ; Mekki et al., 2009).

## **Conclusion**

Le cycle de vie d'un tertre, résultat d'accumulations longues, se caractérise donc ici par une lente édification naturelle, avec l'apparition de quelques palmiers sauvages, puis une mise en culture exploitant les eaux de sa source pour permettre une production agricole. Si celle-ci a traversé les siècles grâce à une forme traditionnelle durable, l'extension récente spectaculaire

laire des surfaces agricoles irriguées, l'exploitation des nappes grâce aux forages profonds (nappes fossiles peu renouvelables) a dépassé les ressources potentielles en provoquant des problèmes majeurs traduits par la baisse piézométrique des nappes et la disparition de l'artésianisme. Cela a entraîné un tarissement des sources, la mort du système d'irrigation des tertres, l'augmentation de la salinité de l'eau, l'hydromorphie et la dégradation des sols. Les tertres du Nefzaoua sont alors apparus comme nous le verrons plus loin comme des carrières de sable faciles à exploiter, conduisant à leur arasement et à leur disparition qui paraît inéluctable.

# Conclusion de la première partie

Cette première partie nous a permis, en passant en revue les grands éléments du contexte physique et humain de la région du Nefzaoua, de faire émerger les principales caractéristiques de la formation des tertres de sources artésiennes et de leur environnement. Située dans le sud-ouest de la Tunisie dans un milieu aride avec des précipitations moyennes annuelles inférieures à 100 mm, cette région a un régime de vents soutenus et subit une forte évapotranspiration. Du point de vue géologique, le Nefzaoua repose sur une vaste formation sédimentaire mio-pliocène, et les principales formations d'âge Quaternaire sont essentiellement d'origine éolienne. Il est bordé au nord et à l'ouest par deux chotts, formations évaporitiques qui forment de vastes dépressions salées. Malgré ces conditions hostiles, l'émergence de sources artésiennes en provenance d'aquifères à faible potentiel de recharge (le Continental intercalaire et le Complexe Terminal) a permis le développement naturel du système agricole des tertres. Chaque tertre est constitué d'une ceinture de matériel sédimentaire redistribué par les eaux artésiennes et du matériel éolien piégé par la végétation.

Depuis l'Antiquité l'Homme a exploité les sources artésiennes de ces tertres autour desquels il a organisé un système hydro-agricole original. C'est l'interaction entre l'eau, le vent et l'Homme qui a progressivement modelé un espace oasien dans le Nefzaoua. Ce système a été perfectionné à travers des siècles et est resté en équilibre avec son milieu jusqu'à l'apparition des forages.

L'implantation de forages profonds à partir du début du 20<sup>ème</sup> siècle pour intensifier l'irrigation a tari les sources artésiennes naturelles et de ce fait a bouleversé cette organisation. L'artésianisme s'est interrompu dans les années 1980 suite au démarrage des travaux du Plan directeur des eaux du sud (PDES) pour la sauvegarde et la rénovation des oasis anciennes, et la création de nouvelles oasis. L'extension des oasis modernes a entraîné une surexploitation des nappes phréatiques générant le tarissement des sources naturelles et conduit à la dégradation du système hydro-agricole naturel qui s'est progressivement trouvé remplacé par un système plus mécanisé. Actuellement les tertres, qui ont perdu toute fonction hydraulique, sont détruits progressivement : les matériaux qui les composent, sédiments riches en fines et peu salés, sont prélevés par les agriculteurs pour amender les nouvelles parcelles cultivées conquises sur les terres salées du chott.

Les tertres du Nefzaoua forment donc un paysage unique, mais en voie de disparition. Par leur origine, ils constituent une archive riche en informations paléo environnementales et historiques. Cette archive est fortement menacée par les démantèlements accélérés en cours. Nous avons donc entrepris dans les chapitres suivants de cartographier l'ensemble des tertres en utilisant la télédétection et de les étudier sur des coupes de terrain, en appliquant des approches sédimentologiques détaillées pour comprendre les étapes de leur formation.

**Deuxième partie : Les tertres  
artésiens du Nefzaoua : les outils  
d'étude d'un paysage en pleine  
transformation**



# Introduction de la deuxième partie

*« Le Nefzaoua serait une région au paysage très monotone si 300 résurgences environ, de la nappe campanienne n'entretenaient une végétation très pittoresque. Ces sources émergent dans de petits bassins circulaires de 10 à 50 m de diamètre fixant une ceinture de dunes, par l'intermédiaire d'une végétation très importante. A l'intérieur se développent des populations de palmiers » (Pontanier, 1968)*

Les paysages actuels du Nefzaoua semblent très différents de ceux décrits par Pontanier en 1968. Les transformations qu'ont subi les oasis après l'introduction des forages profonds et le tarissement définitif des sources artésiennes ont produit un changement remarquable affectant les tertres. Il est lié à une augmentation importante de la production de dattes, tout spécialement la variété « Deglet Ennour » destinée à l'exportation, principale source de développement économique dans la région.

Cette deuxième partie est consacrée à la l'étude des tertres dans leur paysage, puis dans le contexte de l'évolution récente de ce paysage du Nefzaoua. Nous chercherons ensuite à comprendre l'origine et la formation des tertres ; elle est ainsi divisée en deux chapitres.

Le chapitre 3 est consacré à une étude par télédétection. Son but est la description de la région des tertres de sources du Nefzaoua, de leur situation dans le paysage. Nous chercherons notamment à observer et comprendre leurs relations avec les oasis qui les entourent. Pour cela des cartes disponibles couvrant notre zone d'étude ainsi que des séries d'images satellites et un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 10 m) seront nos outils de base pour une analyse cartographique suivie d'une étude diachronique récente. Cette analyse permettra de préciser l'évolution des paysages et de l'environnement des tertres.

Le chapitre 4 sera consacré à la caractérisation des tertres de sources à travers l'observation de coupes remarquables, complétées par des analyses en laboratoire pour déterminer de quoi ils sont constitués. Des analyses sédimentologiques, des observations et micro-analyses au Microscope électronique à Balayage (MEB) et des datations de  $^{14}\text{C}$  permettront de formuler des hypothèses sur la mise en place des différents matériaux composant les tertres.

**Chapitre 3 : L'utilisation de la  
cartographie et des images de  
télédétection pour l'étude de  
l'évolution du paysage des tertres  
au Nefzaoua. Étude diachronique  
récente**

## **Introduction**

L'étude du milieu naturel et particulièrement la cartographie de ses composantes, bénéficient de l'apport considérable des données de télédétection depuis les débuts de cette technologie. Prise dans un sens large, elle comprend les photographies aériennes, les photos et images acquises par satellite, et plus récemment les photos et vidéos acquises par des drones. La gamme de cette imagerie s'est étendue au fil des années. Un grand choix de types d'images est actuellement disponible, variant en résolution, mais aussi en domaine spectral (visible, infrarouge, radar). Ces notions sont largement expliquées dans de nombreux traités et manuels (Bonn et Rochon, 1998 ; Caloz et al., 2002 ; Provencher et Dubois, 2007 ; Girard et Girard, 2010 ;). Les principales sont résumées dans une courte synthèse récente sur l'utilisation de la télédétection pour l'étude des régions arides, qui comprend une annexe bibliographique détaillée (Escadafal et Begni, 2016).

Pour notre travail, la télédétection a été utilisée principalement pour la localisation et la cartographie des tertres, et pour l'analyse diachronique des paysages du Nefzaoua.

### **3.1 La localisation et la cartographie des tertres**

L'utilisation première des cartes topographiques et des images de télédétection est le repérage des tertres, leur identification, leur localisation et leur cartographie.

Classiquement l'étude du milieu naturel, que ce soit en géologie, géomorphologie, pédologie, botanique, phytoécologie, etc., recourait aux photographies aériennes, qui ont l'avantage d'être très détaillées. Depuis quelques décennies on dispose également d'images satellite dont le niveau de détails devient comparable, voire supérieur à celui des photographies aériennes, et qui de ce fait sont davantage utilisées à présent.

Le niveau de détail que permettent ces images dépend de leur résolution spatiale, qui peut être définie comme la taille du plus petit élément de terrain représenté par un point dans l'image. La résolution spatiale est la dimension du pixel au sol. Elle a une dimension géographique qui conditionne la taille du plus petit élément discernable à la surface du sol. Elle peut être assimilée à la distance qui doit séparer deux objets au sol pour que l'on puisse les distinguer. Elle est le paramètre fondamental pour reconnaître les objets par leur forme. (Bonn

et Rochon, 1998). En simplifiant, dans une image à résolution de 10 m, à chaque point de l'image (pixel) correspond une valeur moyenne donnée pour un carré au sol de 10 m de côté. La valeur représentée peut être par exemple le niveau de clarté dans une image noir et blanc, où le sable qui est clair aura des valeurs élevées et au contraire la végétation qui est sombre, des valeurs faibles. La valeur représentée peut aussi être un indice de végétation ou une altitude, comme nous le verrons plus loin, et tout autre paramètre mesuré par le capteur du satellite utilisé (température, etc., voir les manuels cités).

Pour le suivi de l'évolution des paysages artésiens du Nefzaoua, une étude diachronique à travers l'utilisation de la télédétection et la cartographie était nécessaire pour comprendre le changement radical et menaçant qu'a vécu et vit le paysage jusqu'à nos jours. Cette étude diachronique permettra de retracer l'histoire des conséquences des éléments déclencheurs du tarissement des sources artésiennes et de l'abandon du système hydrogéologique des tertres.

### **3.1.1 Les photographies aériennes**

Le glossaire de cartographie précise : « *une photographie aérienne est une image aérienne en noir et blanc, couleurs ou fausses couleurs, le système imageur étant une chambre photographique classique* »<sup>9</sup>. Définie de façon très générale, elle est l'enregistrement de l'image d'une certaine partie de la terre. Avec le recul donné par l'altitude, elle offre, comparativement à une photo prise du sol, une vision plus globale du sujet. Il s'agit donc de photographies prises par avion, généralement le long de transects selon un plan de vol qui permet de couvrir une région donnée. Dans le cas des photographies d'archives que nous avons pu obtenir sur la zone d'étude, ce sont des photographies argentiques en noir et blanc.

Pour pouvoir être utilisées pour l'étude de l'évolution du paysage, les photographies aériennes doivent être projetées dans un repère géographique commun à l'ensemble des documents cartographiques ; cette opération s'appelle le géoréférencement. L'utilisation des photographies aériennes anciennes pour une étude diachronique nécessite de les orthorectifier et de les géoréférencer. Cela est nécessaire pour remédier aux déformations dues aux défauts des prises de vues optiques anciennes. Elles visent à rendre la photo superposable aux cartes et aux images satellitales récentes. L'opération consiste à repérer des points équivalents appelés "points de contrôle" sur deux documents dont l'un est déjà géoréférencé.

---

<sup>9</sup> Glossaire de cartographie », dans *le Bulletin du Comité Français de Cartographie*, mars-juin 1990, n<sup>os</sup> 123-124, Paris (2<sup>e</sup> édition)

### **3.1.1.1 Le géoréférencement**

Le géoréférencement est la technique de positionnement spatial d'une aire dans un cadre unique et une situation géographique bien définie dans un système de coordonnées et de références spécifiques. Cette opération courante dans le Système d'Information Géographique (SIG) s'applique à deux catégories d'objets : les objets raster (images agencées sous forme de grille matricielle de format intitulé bitmap pixels) et les objets vectoriels (points, lignes, poly lignes et polygones) qui représentent des objets physiques (<https://www.aquaportail.com/>).

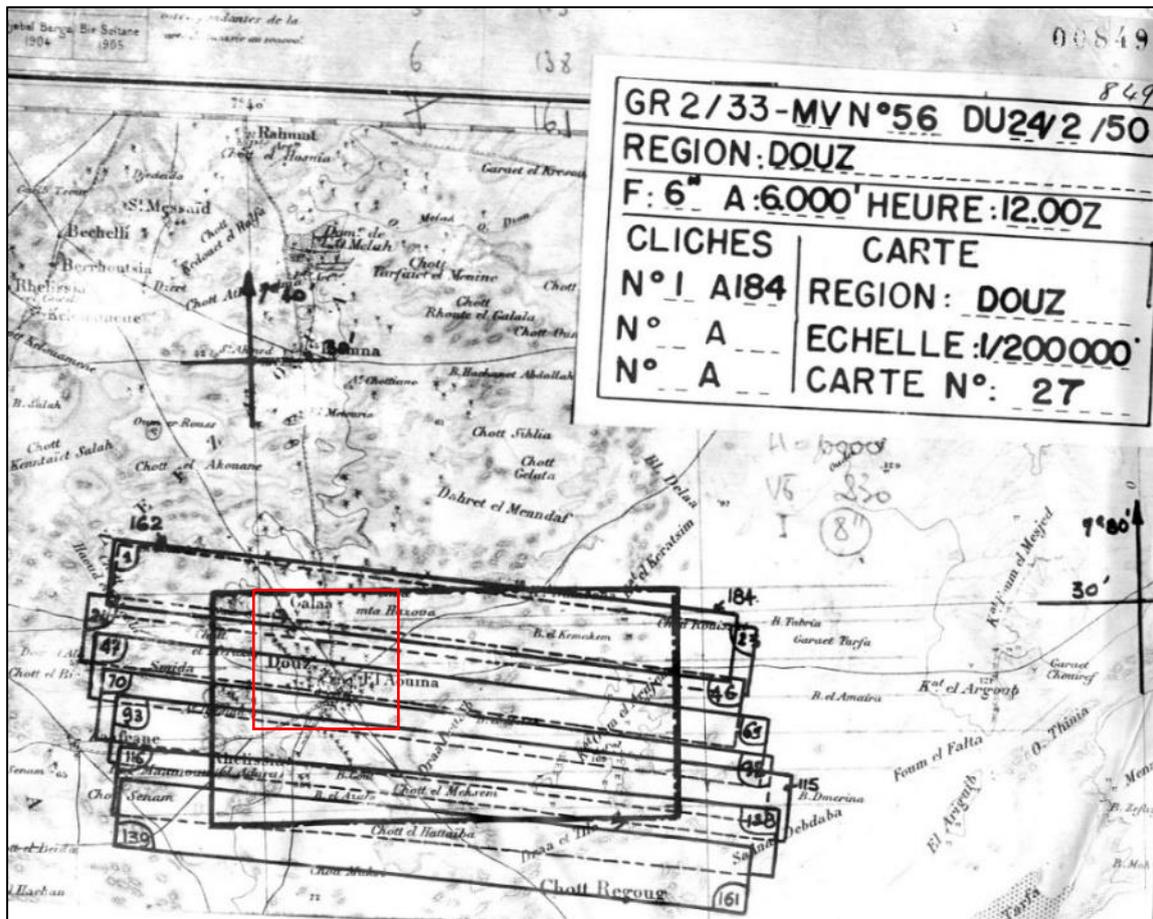
Les processus de géoréférencement et de projection cartographique font appel aux notions de : - coordonnées géographiques - coordonnées projetées - ellipsoïdes / géoïde - datum - référentiel géodésique. Après avoir délimité précisément les coordonnées cartographiques, il est nécessaire de définir le système de projection : c'est l'équation qui permet de représenter à plat la surface courbe de la Terre. Dans notre cas c'est la projection UTM zone 32 qui est utilisée. Le géoréférencement permet de superposer entre elles les images satellites, les photos aériennes numérisées et des cartes numériques. On peut modifier l'ordre de l'empilement des couches et surtout modifier la transparence pour comparer deux couches superposées. On conçoit immédiatement l'intérêt d'une telle possibilité pour toute comparaison de données correspondant à deux dates différentes.

Un des intérêts que cela présente est aussi le mosaïquage, qui consiste à regrouper deux ou plusieurs cartes ou images qui partagent entre elles des limites géographiques. L'ensemble de ces techniques a été mobilisé lors des traitements des images décrits au cours de ce chapitre.

### **3.1.1.2 Utilisation des photos aériennes anciennes : une aire d'étude limitée**

Pour l'étude des tertres, les photographies aériennes disponibles sont relativement anciennes, ce qui sera utile pour l'étude diachronique. Nous avons dû limiter cette étude à un secteur restreint, car ces photos aériennes ne couvrent qu'une faible partie de la zone d'étude. Elles sont une source importante d'informations sur les modifications des paysages au cours du temps, mais, comme nous l'avons évoqué, ne permettent pas la cartographie de l'état actuel. La qualité de ces photos anciennes a rendu nécessaire un traitement d'augmentation du contraste et d'étalement des niveaux de gris, qui améliore l'image sans l'altérer. Ce traitement les a rendues lisibles et a permis de les utiliser et les comparer avec les autres images.

Trois séries ont été utilisées. Les deux plus anciennes ont été consultées et scannées sur place au service historique du Ministère de la Défense à Paris. - Une série de 162 photos aériennes de la mission GR2/33-MV56 du 24/02/1950 (Figure 3.1) couvre la région de Douz et el Golaa. En fait, sur cette série, seules les 30 photographies couvrant effectivement les oasis de Douz et El Golaa ont été exploitées pour observer les changements intervenus. Les autres photographies de cette mission couvrent essentiellement des zones sableuses sans grands changements entre les dates des photographies.



**Figure 3.1: plan de vol de la série de photographies aériennes prises sur la région de Douz le 24 février 1950 (en rouge, les limites de la zone « Douz-El Golaa » retenue pour l'étude diachronique). Source : Service historique du ministère de la Défense à Paris.**

- Une série de 10 photos aériennes de la mission AV103 du 11/04/1959. Cette série ne couvre qu'une partie de l'oasis d'El Golâa (Figure 3.2). Elle ne sera donc pas utilisée dans cette partie diachronique consacrée à la l'étude de l'évolution et de la modification du paysage oasien des deux oasis (El Golâa et Douz) mais complétera le suivi de l'évolution du tertre de Selamia (Trt 98) dans le chapitre 5 dédié à la typologie.



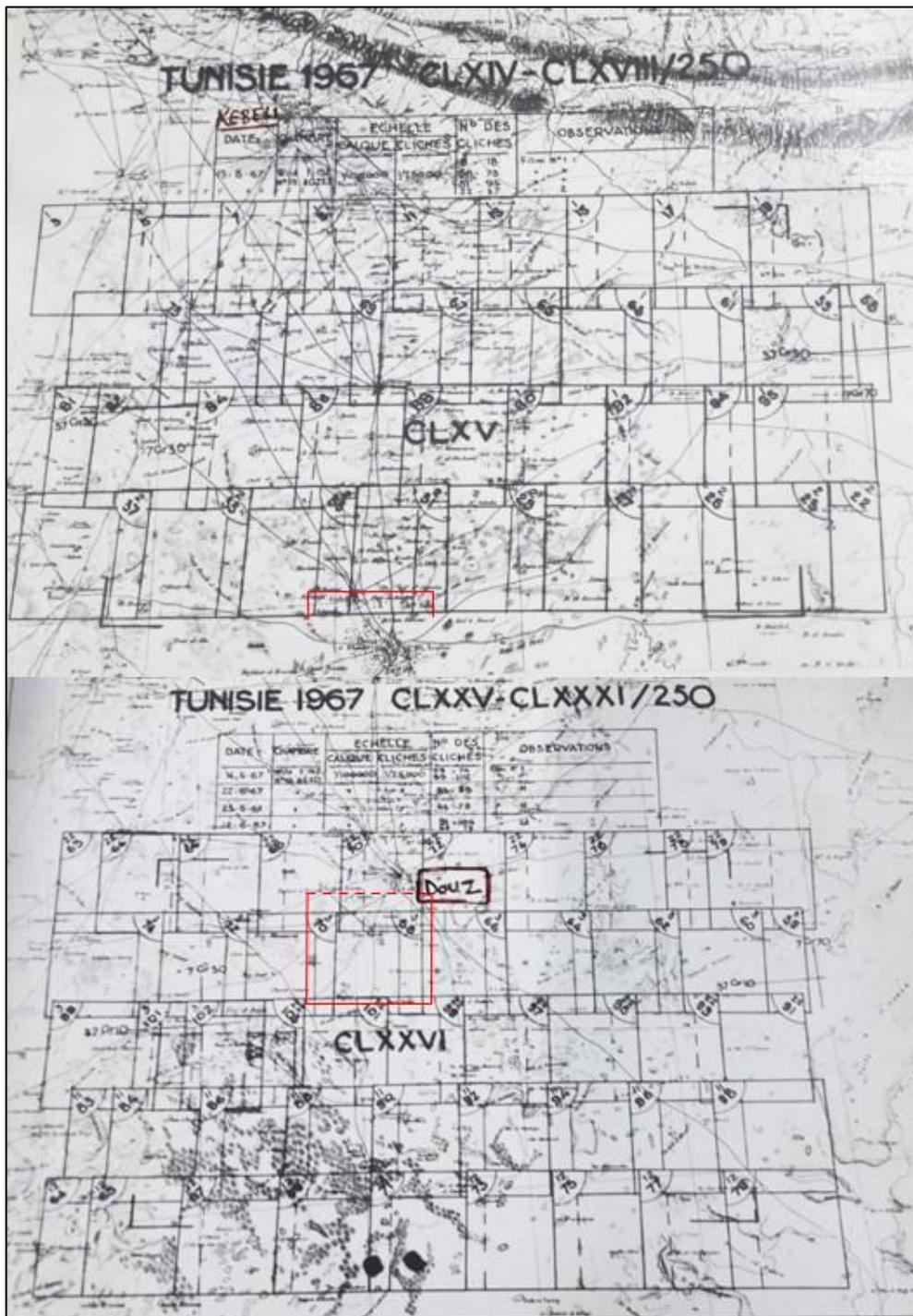


Figure 3.3 : plan de vol de la série de photographies aériennes prises sur la région de Douz en 1967. Source Centre National de la Cartographie et de la Télédétection de Tunisie.

### 3.1.1.3 Interprétation des photos aériennes

#### 3.1.1.3.1 L'apport de la carte topographique

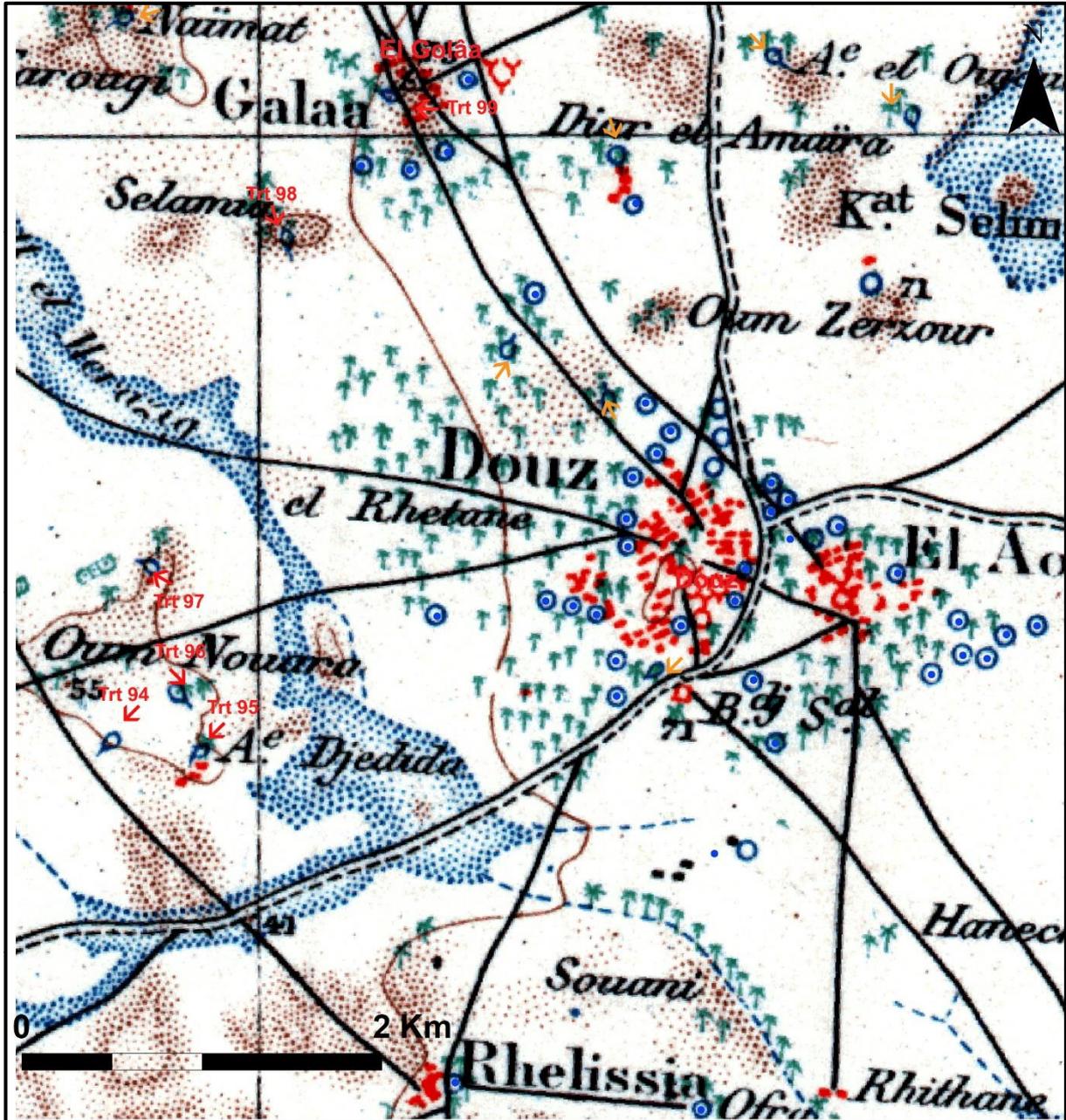


Figure 3.4 : Extrait de la carte topographique feuille de Douz au 1/100 000e de 1904: source service géographique de l'armée. (La légende complète avec les signes conventionnels est présentée en Annexe).

Le géoréférencement de la carte topographique de la feuille de Douz (Figure 3.4) nous a permis d'utiliser certaines informations mentionnées sur la carte et non visibles sur les mosaïques des photos aériennes, pour compléter leur interprétation.

En plus de son utilisation pour le géoréférencement, la carte a apporté des informations intéressantes sur la distribution des sources et des puits, et l'implantation des deux villages de Douz et Golâa. On remarque les puits, indiqués par les ronds bleus, et les sources figurées avec la direction de leurs exutoires. Les aires couvertes par des oasis sont indiquées par le symbole « palmiers », cependant sans information sur leur densité. On retient donc qu'en 1904, les villages étaient présents, il y avait de nombreux puits, peu de sources, et des palmiers à proximité des puits. On remarque aussi la mention en pointillé bleu, d'un bras de chott du NO au Sud (Chott el Merzig).

### **3.1.1.3.2 La mosaïque des photos aériennes de 1950**

L'extrait de la mosaïque de photos aériennes de la figure 3.5 met en avant l'aspect de l'oasis de Douz et d'El Golâa en 1950. Elle nous a permis d'étudier ce secteur qui est restreint, mais qui comprend assez de données pour une interprétation du paysage. Une observation générale nous montre la présence de deux oasis au milieu d'une zone désertique, et un « bras » de chott qui relie les deux oasis. On observe aussi un erg de dunes au sud et sud-ouest (délimité sur la figure par des pointillés jaunes).

Trois types d'oasis sont observés :

- L'oasis traditionnelle (l'ancien écosystème oasien à plusieurs étages dans lequel la variété de dattes « Deglet Ennour » est presque inexistante) basée sur un tertre de source artésienne et utilisant le système d'irrigation hydrogéologique du tertre ;
- L'oasis moderne<sup>10</sup> utilisant le système d'irrigation à partir de l'eau des forages ;
- Les petites palmeraies moins importantes composées de quelques bouquets de palmiers parfois entourés de sable. Elles sont dispersées entre les deux grandes oasis de Douz et El Golâa.

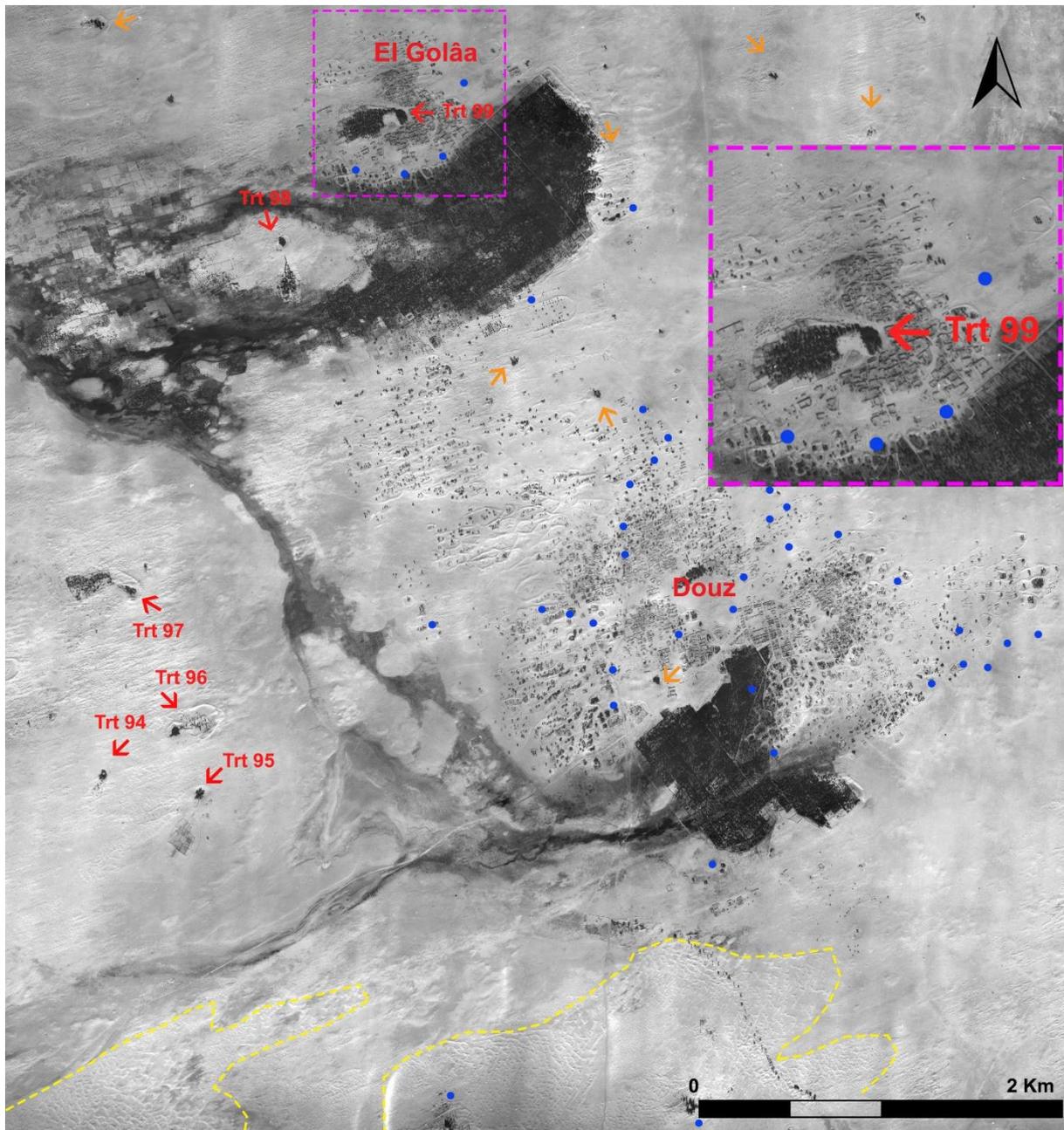
On observe aussi la présence de tertres de sources qu'on peut classer en deux types selon leur densité.

- Les tertres de sources les plus importants, indiqués avec les flèches rouges.

---

<sup>10</sup> Rappelons ici que l'utilisation du concept oasis moderne ne veut pas dire récent, mais désigne plutôt une oasis fondée sur un seul étage (le palmier dattier) et avec alignement régulier entre les palmiers. Cela la différencie de l'oasis traditionnelle connue sous sa forme de trois étages et caractérisée par une densité élevée des plantations de palmiers.

Le tertre le plus important que nous observons dans ce secteur est le Trt 99 de l'oasis d'El Golâa : au sommet du tertre on repère le village, la source au milieu et l'oasis au pied indiquant un système d'irrigation par gravité.



**Figure 3.5 : Oasis de Douz et d'El Golâa : mosaïque de photographie aérienne de 1950.**

- ➔ Les flèches rouges indiquent des tertres de sources artésiens avec une extension de l'oasis (l'orientation des flèches indiquent la direction de l'écoulement de l'eau)
- ➔ Les flèches orange indiquent des tertres de sources artésiens sans extension de l'oasis
- Les points bleus indiquent les *Bir* (puits) (donnés de la carte topographique feuille de Douz de 1904)
- Les tirets jaunes indiquent des formations sableuses
- Zoom sur le Trt 99

Ensuite, les tertres Trt 98, 97, 96 et 95 ont une situation qui ressemble à celle du Trt 99 sauf qu'ils ne présentent pas un village au sommet. La densité de l'oasis est un peu moins importante. Cela peut permettre de lancer deux hypothèses : 1- ce sont des sources de tertres dont l'exploitation est récente. 2- ce sont des sources de tertres dont le débit de l'artésianisme est faible ne permettant pas une exploitation plus importante. Toute la partie ouest du Trt 98 est occupée par des champs en création sur les sols salés du chott.

- Les tertres indiqués avec les flèches orange sont des tertres de sources moins importantes, car on observe de simples bouquets de palmiers, au lieu d'oasis. Ces tertres sont mentionnés sur la carte topographique. A, à cette époque les sources coulaient encore d'après la figuration de palmiers, mais ils sont en petit nombre, c'est l'indication d'un faible débit.

On observe aussi d'importantes formes sableuses dans ce secteur, un voile sableux couvre la zone des petites palmeraies qui se localise entre les deux grandes oasis, et des dunes localisées au sud du secteur.

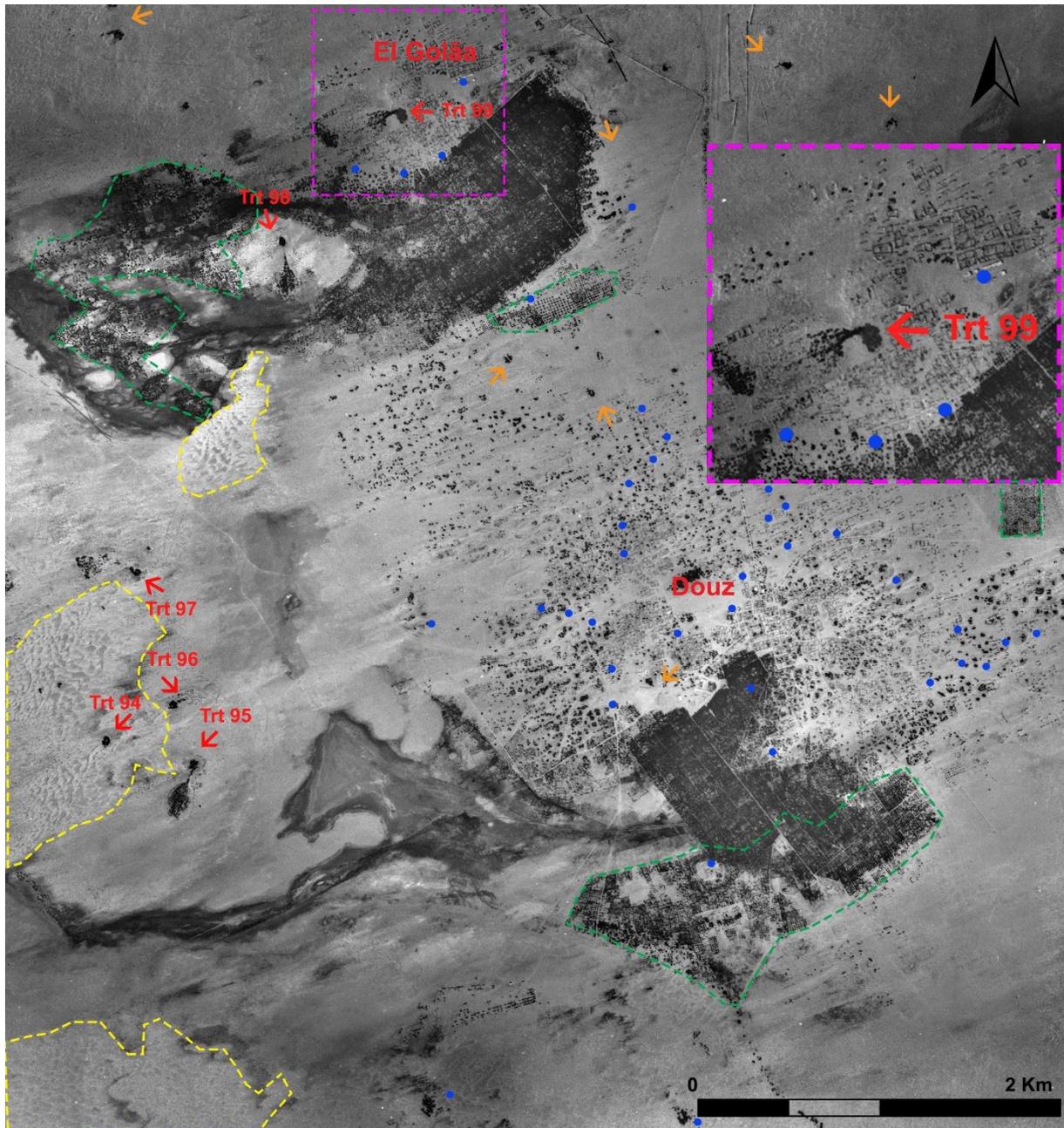
Le changement qui est intervenu par rapport à 1904 est difficile à cerner du fait de la grande différence de nature des deux documents. On peut essentiellement remarquer la présence de 43 puits dans ce secteur. Six puits sont localisés dans l'oasis de El Golâa et les 37 qui restent sont concentrés dans et autour de l'oasis de Douz, à proximité des petites palmeraies.

### **3.1.1.3.3 La mosaïque des photos aériennes de 1967**

La figure 3.6 permet d'observer l'étendue des oasis de Douz et d'El Golâa en 1967. Le changement qui est intervenu depuis 1950 est très visible puisque ces deux images sont de même échelle et très détaillées. On remarque que le paysage présente les modifications suivantes :

- L'ancienne oasis du Trt 99 El Golâa a diminué de taille ainsi que le village du tertre ;
- Le développement d'une nouvelle oasis à l'ouest du Trt 98. En 1950 cette partie était en cours de plantation ;
- Une extension assez importante de l'oasis de Douz vers le sud ;
- Une partie de l'étendue du chott est ensablée ce qui montre un mouvement de sable important dans la région ;
- Le Trt 94 n'a pas changé de forme depuis 1950, en 1967 on l'observe entourée de sable ne laissant paraître que le centre où se trouve la source entourée de palmiers ;

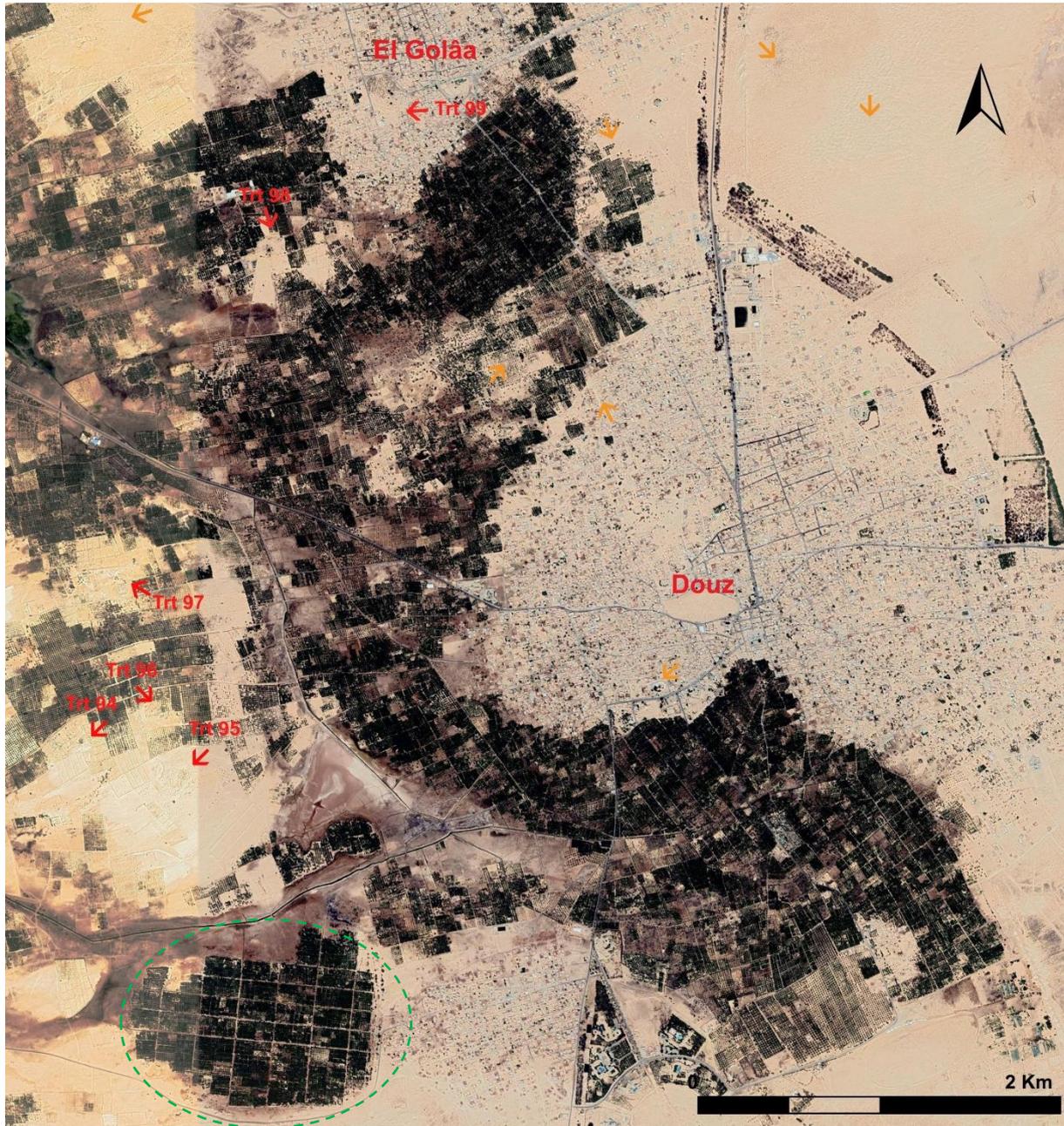
- Le Trt 96 en 1967 a perdu l'extension de sa petite oasis et l'oasis du Trt 97 a diminué de taille. En revanche le Trt 95 voit l'évolution de son oasis, qui en 1950 était en cours de plantation.



**Figure 3.6 : Oasis de Douz et d'El Golâa : mosaïque photographies aériennes de 1967.**

--- Extensions nouvelles des oasis entre 1950 et 1967.

### 3.1.1.3.4 Une image satellite récente à haute résolution



**Figure 3.7 : Oasis de Douz et d'El Golâa : image GoogleEarth de 2019.**

--- Extension d'une oasis non liée à un tertre

La figure 3.7 permet de comparer les photographies aériennes de 1950 et 1967 avec une image satellite très récente. On remarque immédiatement l'énorme extension du village de Douz, devenu une ville importante avec des installations (stade, jardins publics) et une

infrastructure moderne (voirie, réseau routier notamment). Il y a une extension très visible des oasis vers l'Ouest. Le chott qui relie les deux oasis, Douz et El Golâa, est aujourd'hui en grande partie occupé par une extension des palmeraies modernes. Les oasis traditionnelles semblent avoir disparu, tous les tertres sont aujourd'hui taris, leurs vestiges sont encore présents dans le paysage, témoignant d'un ancien système d'irrigation d'origine hydrogéologique.

Dans le Nefzaoua l'évolution générale des nouvelles oasis est souvent en rapport avec les anciennes créées au départ autour d'une source. Cependant, en bas à gauche de la figure 3.7, donc au sud-ouest de la ville et l'oasis de Douz, on observe un bon exemple d'une oasis moderne qui n'est pas en rapport avec une ancienne. Elle a été créée de toutes pièces.

#### **3.1.1.4 Bilan de l'utilisation des photographies aériennes**

Les photos aériennes ont permis une appréhension du paysage au début de la phase d'installation des oasis modernes basées sur l'extension de l'irrigation grâce aux forages. Les zones ensablées ont reculé, certaines ont été conquises par les nouvelles plantations, ce qui suppose des travaux d'aplanissement et de fixation.

D'une façon générale, le système de sources de tertres a été abandonné sur la zone Douz-El Golaa étudiée. Le paysage typique du Nefzaoua formé de petits bouquets de palmiers associés à chaque petite source, bien visible sur les photographies aériennes de 1950 a laissé place à des plantations modernes, qui l'ont presque complètement envahi actuellement. Le cas du tertre 99 et sa petite oasis originelle est bien illustratif de ce phénomène : bien visible en 1950, elle a visiblement régressé en 1967, ce qui indique un tarissement de la source artésienne. Elle a actuellement complètement disparu.

Nos efforts pour rechercher, obtenir et traiter des photographies aériennes, ont donc permis de faire remonter nos observations jusqu'en 1950. Cependant la couverture de notre région d'étude par ces photographies reste bien incomplète, et pour les années récentes il n'y a plus de photographies aériennes disponibles, elles ont été remplacées par des images satellites à haute résolution. Par la suite, notre travail s'est donc attaché à l'exploitation des images satellites, dont le traitement numérique offre en plus des possibilités de quantification. En effet, ici il n'a pas été possible de faire des mesures, à cause de la grande différence de nature des documents comparés, mais dans l'étude par satellite, un essai de quantification sera réalisé (voir § 3.3.2 sur la mesure de l'extension des oasis en se basant sur le NDVI).

### 3.1.2 Les cartes des tertres de source du Nefzaoua

#### 3.1.2.1 Carte de l'état des tertres de sources artésiennes au début du 20<sup>ème</sup> siècle

Afin de montrer l'évolution du paysage des tertres de sources dans le Nefzaoua à travers la cartographie, nous avons cherché les plus anciennes cartes topographiques que nous avons pu trouver pour rassembler un maximum de données. Différentes sources d'information ont été combinées pour la réalisation de la carte de l'état des sources artésiennes au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Figures 3.8 et 3.9).

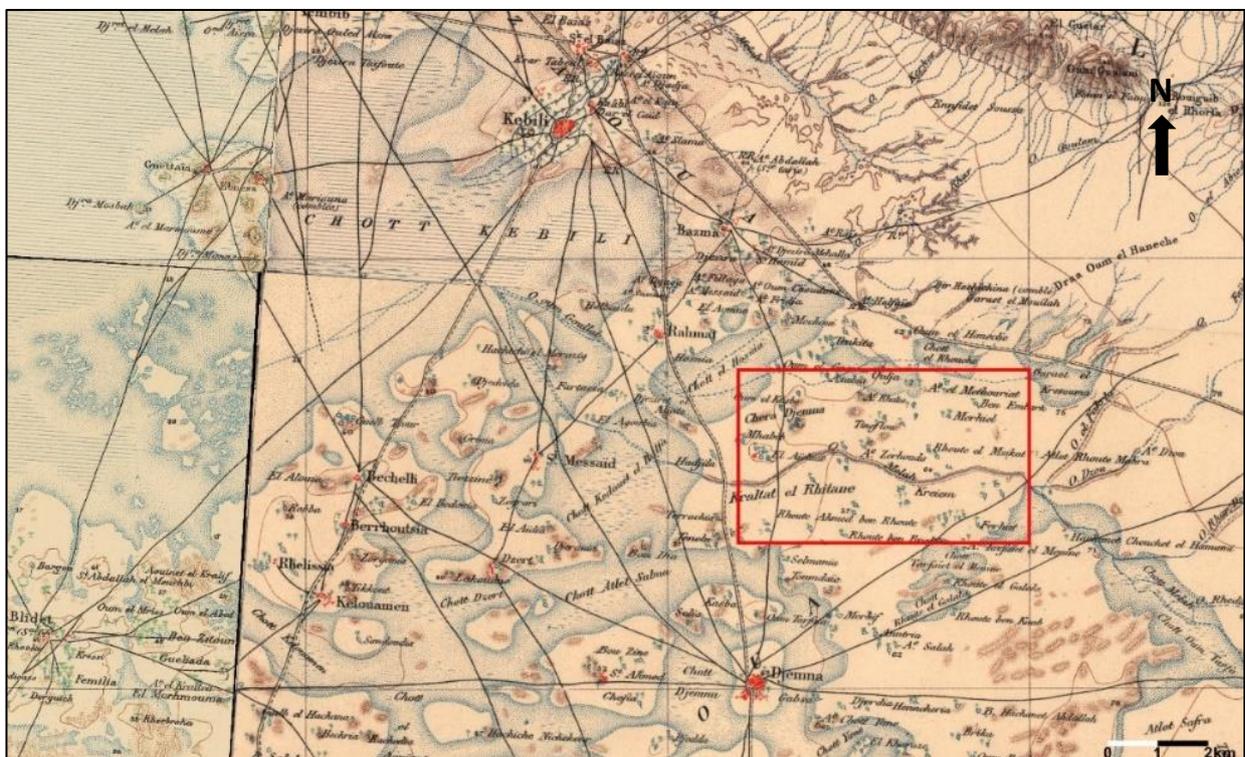


Figure 3.8 : Extrait de la mosaïque des cartes topographiques du début du 20<sup>ème</sup> siècle, assemblées et géoréférencées (le rectangle rouge délimite la zone représentée sur la figure suivante).

Les huit cartes topographiques au 1/100 000<sup>e</sup> du service géographique de l'armée qui couvrent notre zone d'étude ont été collectées sous forme numérique, reprojctées en coordonnées UTM, géoréférencées et mosaïquées.

**Tableau 3.1 : Tableau d'assemblage des des huit cartes topographique qui couvre la Zone étudiée**

Numéro et nom de la feuille	Date des travaux sur le terrain	Numéro et nom de la feuille	Date des travaux sur le terrain
072 Kasr El Asker	1906 : Revisé en 1933	073 Bir Rekeb	Non identifié
080 Mennchia	1904 : Revisé en 1933	081 Kebili	1904
088 Zarsine	1908 : Revisé en 1933	089 Douz	1904
096 Sabria	1908 : Revisé en 1933	097 Djebel Berga	1904



**Figure 3.9 : Extrait de la carte topographique au 1/100 000e (zoom sur la figure précédente, feuille de Douz, 1904) : les nombreuses sources sont figurées avec la direction de leur exutoire.**

En se basant sur ces cartes, on peut dénombrer 399 sources et tertres de sources (Figure 3.10). Deux sources sont décrites comme comblées, une comme tarie et 31 sont localisées sur le Chott El Fjej au pied du flanc Nord du Djebel Tebaga aux alentours des oasis de Limaguess et Seftimi. Il faut noter que ces sources ne sont pas toutes des tertres. Au Nefzaoua, les grands tertres sont le plus souvent isolés et distants de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

Un certain nombre de ces tertres ont complètement disparu aujourd'hui suite à plusieurs facteurs biophysiques et socio-économiques complexes, liés entre autres au développement de forages qui ont abaissé le niveau des nappes phréatiques et de ce fait ont tari les sources

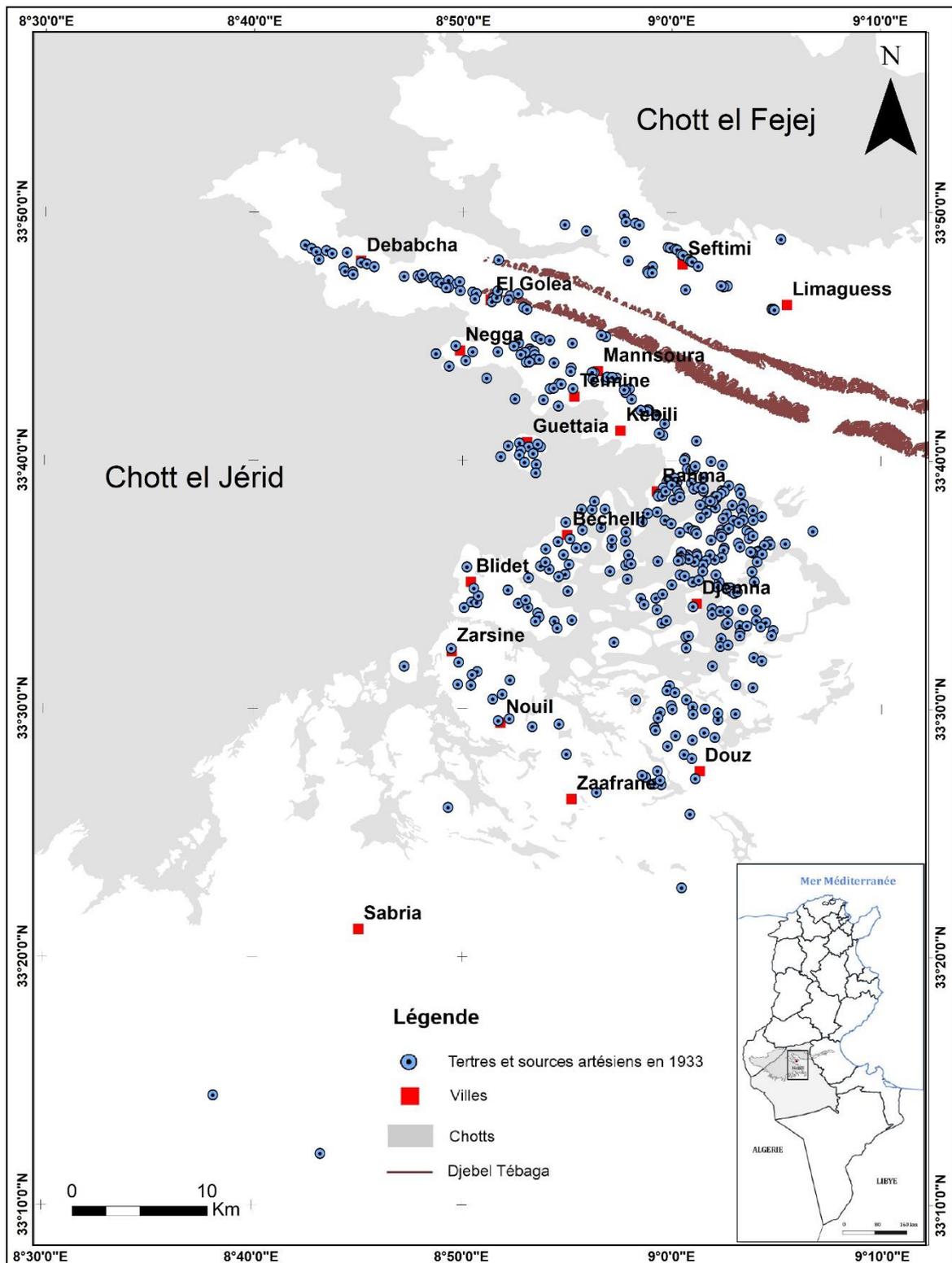


Figure 3.10 : Carte des tertres et sources artésiens du Nefzaoua au début du 20<sup>ème</sup> siècle.

L'élaboration de la carte des sources et tertres de sources artésien (Figure 3.10) nous a fournit une sorte d'état de départ particulièrement important sur l'abondance des sources du Nefzaoua au début du 20<sup>ème</sup> siècle

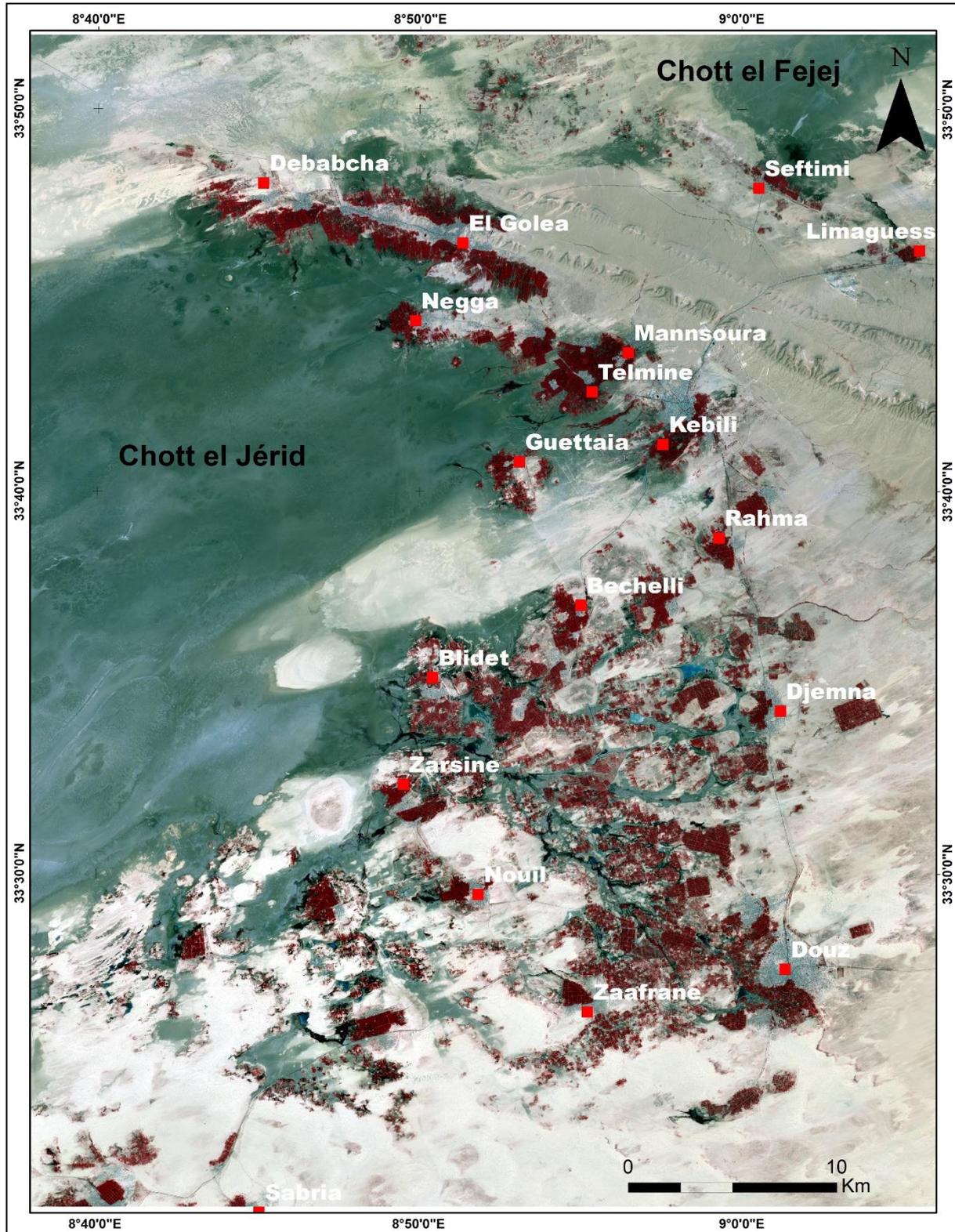
### **3.1.2.2 Les images satellites récentes**

Les images satellites les plus récentes sont les plus riches et les plus détaillées. Elles permettent la cartographie précise des tertres dans leur état récent et actuel.

Une première source est la visualisation directe sur internet des images satellites récentes mises à disposition par Google Earth. Elles sont à haute résolution, et permettent une vue d'ensemble, avec différents niveaux de zoom. On peut dessiner un trajet, ajouter des repères, mesurer une distance, consulter des images d'archive, importer et exporter des points, des lignes et des polygones... En revanche il s'agit d'images déjà traitées pour afficher un rendu « photographique ». Il n'est pas possible d'accéder directement à l'image brute avec ses différents canaux, ni donc d'appliquer des traitements multispectraux comme le calcul de « l'indice de végétation » utilisé plus loin [voir §3.3.2].

Un accès facile à des images multispectrales originales a été récemment rendu possible, notamment grâce à la série de satellites d'observation de la Terre de l'Agence spatiale européenne (ESA) développée dans le cadre du programme Copernicus. Parmi celles-ci, les satellites Sentinel2 fournissent une imagerie optique de haute résolution permettant l'observation des sols, de la végétation, etc. Dans les images du satellite Sentinel 2, plusieurs canaux sont disponibles couvrant l'ensemble des longueurs d'onde du spectre solaire, en particulier le domaine visible à proche infrarouge que nous avons utilisé ici.

Nous avons employé ici la composition colorée classique « en fausses couleurs » qui permet une identification visuelle aisée des éléments du paysage qui nous intéressent : accumulations de sable, sédiments du chott, oasis et végétation verte, villages, plans d'eau, infrastructures (routes, villes...).



**Figure 3.11 : Composition colorée en fausses couleurs sur la région d'étude (Image Sentinel2 du 04/05/2017 résolution 10 m, et nom des agglomérations d'après la carte topographique)**

**Tableau 3.1 : composition colorée utilisée.**

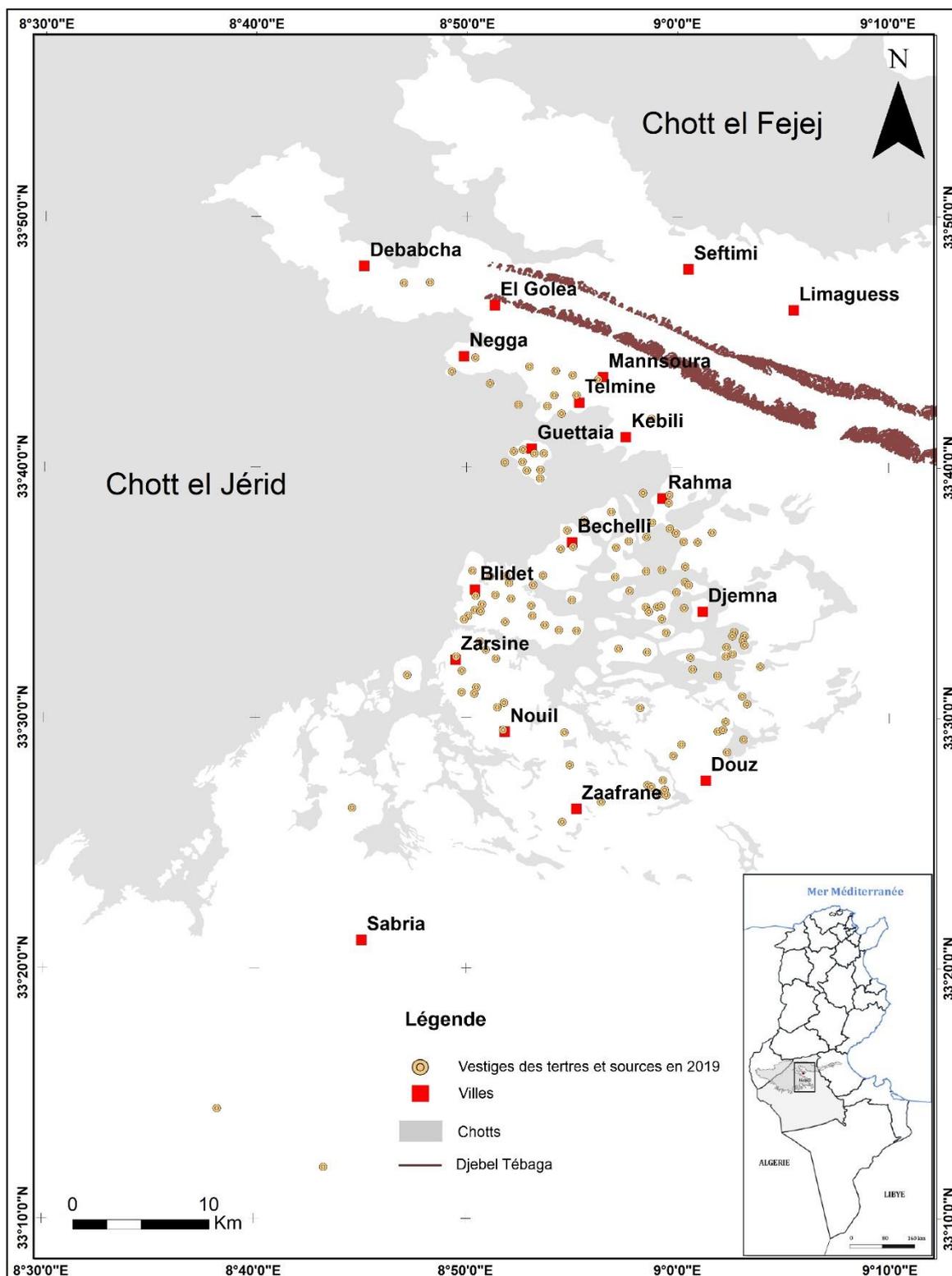
<b>Canaux Sentinel 2</b>	<b>Affichage RGB</b>
B 8 (PIR)	R /
B 4 (Rouge)	G /
B 3 (Vert)	B /

L'image du satellite Sentinel 2 sélectionnée pour l'illustration de la figure 3.11 couvre la région du Nefzaoua. Elle comporte un paysage oasien où il y a de la végétation, du relief, des zones humides (chotts, plans d'eau), des villages et des infrastructures. Sur l'image la végétation verte apparaît en rouge. La couleur rouge ici est associée à la bande proche infrarouge (IR), la couleur verte à la bande rouge et la couleur bleue à la bande verte (Tableau 3.1). Cette combinaison, dite « infrarouge fausses couleurs » est très utilisée en télédétection, car elle est tout à fait adaptée à l'étude de la végétation (Bonn & Rochon, 1998). Elle s'appuie sur les propriétés de la végétation qui réfléchit très fortement le rayonnement proche IR. Dans le cas présent et à l'échelle de cette image, la végétation dominante est constituée par les palmeraies qui se sont développées initialement autour des sources.

### **3.1.2.3 Carte de l'état des sources et des tertres artésiens en 2017**

Les points sur la carte de l'état des sources et tertres artésiens de l'année 2019 représentent les vestiges de tertres localisés sur Google Earth. Cependant ceux-ci ne sont pas toujours identifiables sur les images les plus récentes affichées par défaut sur Google Earth. Pour une meilleure caractérisation de l'état des tertres, on a complété ces images avec l'outil « archive » sur Google Earth, qui permet de visualiser des images un peu plus anciennes. Sur certaines, les tertres apparaissent mieux, notamment lors de prise de vues en hiver, avec un éclairage solaire plus bas. Toutefois, les variations de la qualité des images et de la date de prise de vue rendent l'identification de certains tertres impossible.

La grande majorité de ces observations a été validée par des points GPS sur le terrain ainsi qu'une superposition avec les points extraits des cartes topographiques. On a dénombré 126 vestiges de tertres (Figure 3.12). Certains sont tellement dégradés par les actions anthropiques qu'il ne subsiste plus qu'une plate-forme centrale dépourvue de bordures ou de dunes.



**Figure 3.12 : Carte de vestiges de terres et de sources (Google Earth 2019).**

D'autres sont dégradés par le vent en laissant des sections isolées de rebords, permettant de voir la stratigraphie, tandis que d'autres sont partiellement envahis par des dunes.

Actuellement, il ne reste que quelques tertres encore presque intacts alors qu'ils étaient l'élément structurant de l'ancien paysage. Comprendre les mécanismes et les processus qui ont conduit à l'état de dégradation actuel d'une bonne partie des tertres nous aidera à anticiper leur évolution et à prévenir une aggravation future de cette dégradation.

### **3.1.3 Série temporelle disponible via Google Earth**

#### **3.1.3.1 Diachronie récente à l'échelle de l'oasis sur Time Machine**

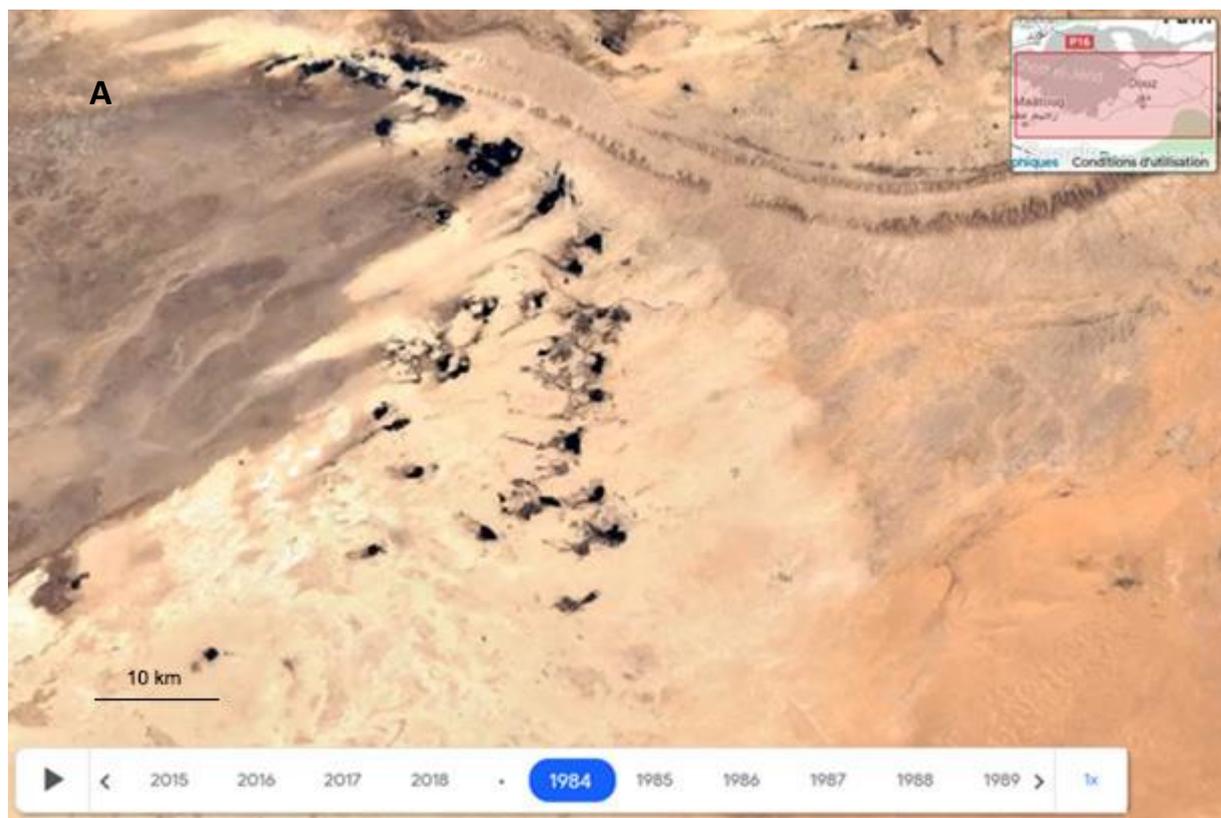
L'étude de l'évolution du paysage artésien dans le temps a d'abord été réalisée par l'exploitation des données multi temporelles disponibles sur le site de la société Google. Cette entreprise a en effet constitué de très vastes archives des données satellites, y compris les données les plus anciennes, au sein de son programme Google Earth qui a pour but d'être une source de référence également pour ces données spatialisées (en sus de toutes les autres qu'elle accumule) et pour en disposer pour ses propres analyses géographiques et historiques.

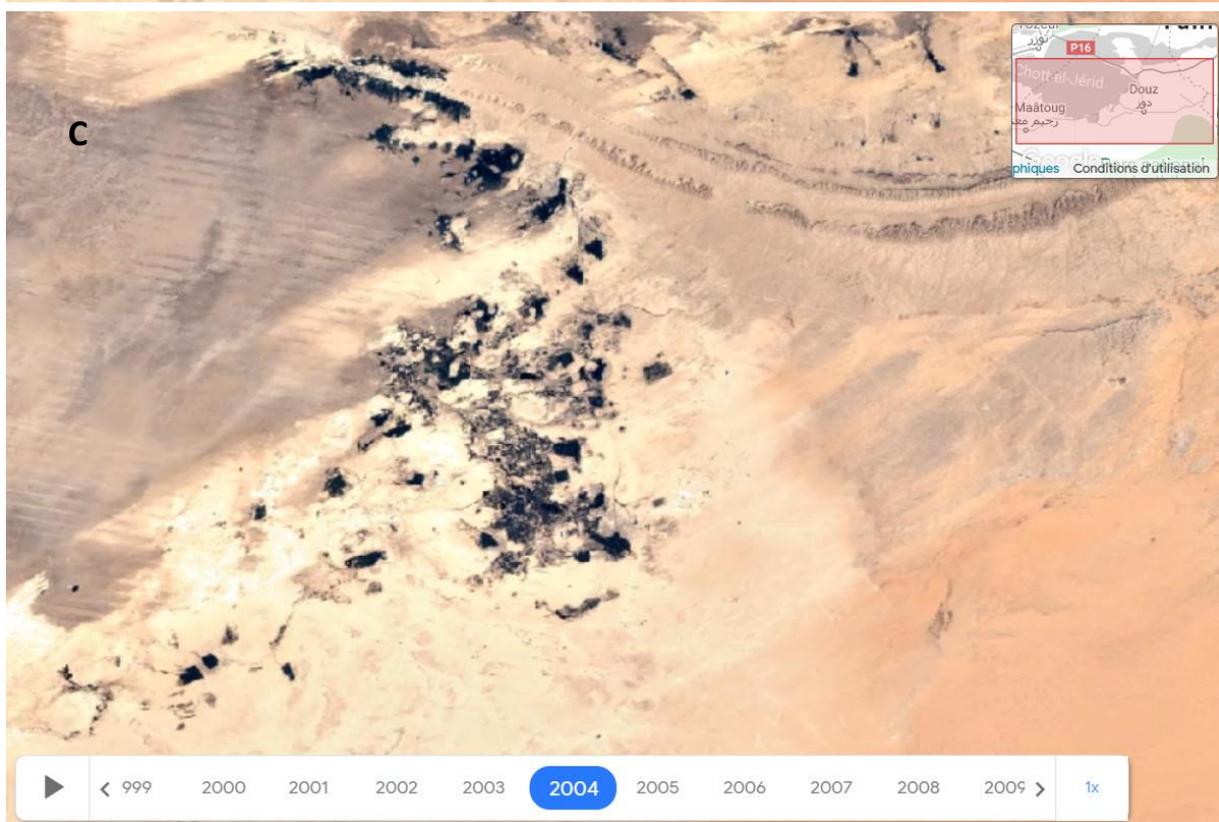
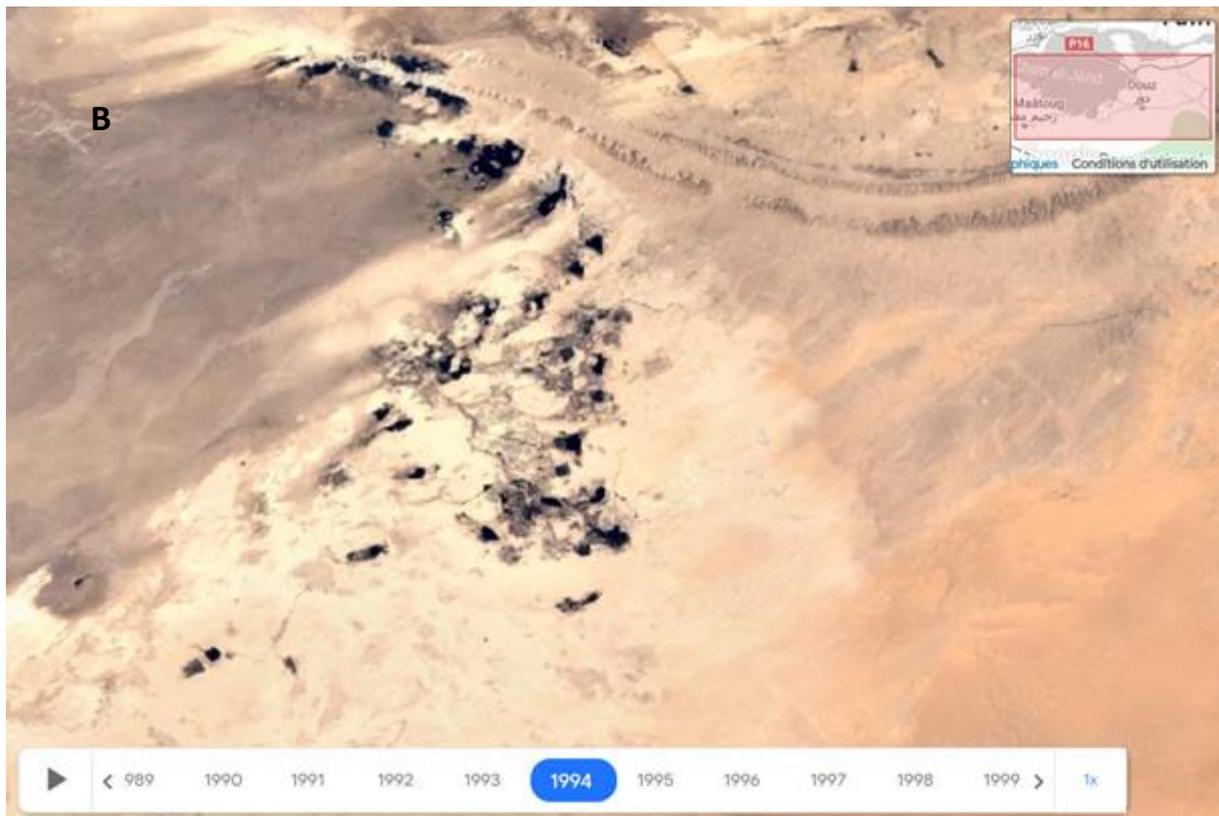
Le site Timelapse est une plateforme permettant de consulter cette très importante collection d'images satellites, couvrant tout le Globe, et sur laquelle il est possible de zoomer. Elle est proposée en ligne et permet de voir comment la Terre a changé au cours des 32 dernières années. Composée de 34 mosaïques annuelles d'images satellites sans nuages, une pour chaque année de 1984 à 2018, elle peut être explorée de façon interactive grâce au logiciel informatique Time Machine du laboratoire CREATE de l'Université Carnegie Mellon (USA). Cela permet de créer et de visualiser des "fenêtres de temps" sur toute la Terre. En revanche, la définition des images est faible et ne permet pas de « zoomer » sur des détails comme les tertres. Plus de 5 millions d'images satellite acquises au cours des trois dernières décennies par 5 satellites différents ont été combinées en utilisant le logiciel Earth Engine de Google pour créer ces mosaïques annuelles. La majorité des images proviennent du programme Landsat de la NASA. À partir de 2016 l'imagerie Landsat 8 a été combinée avec l'imagerie Sentinel-2A,

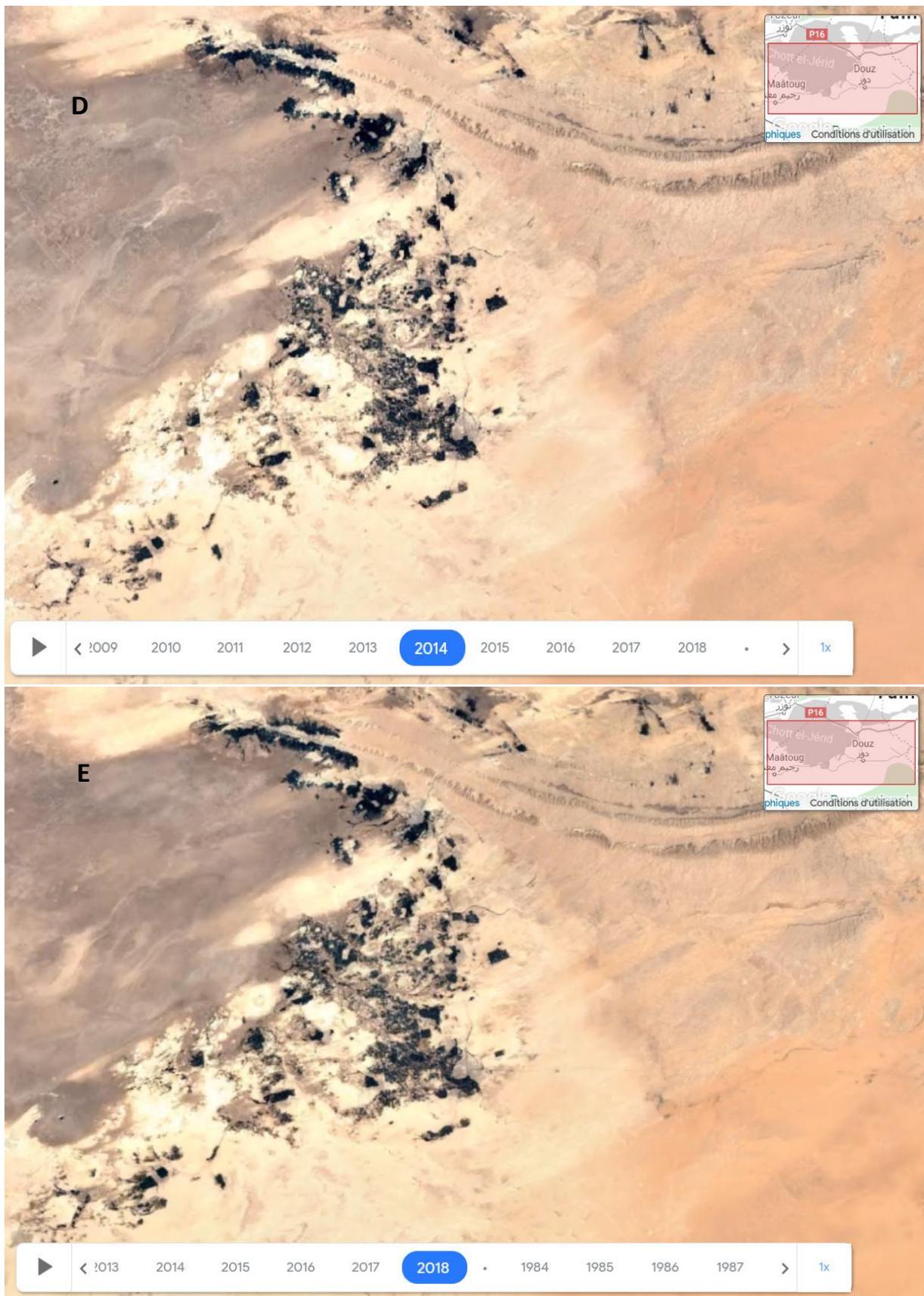
En résumé, d'après Google, son projet Timelapse, qui est fondé sur la puissance de « cloud computing » de son logiciel Earth Engine et sur le logiciel Time machine, permet à des utilisateurs tels que des scientifiques, des chercheurs et des journalistes de détecter les changements, de cartographier les tendances et de quantifier les différences à la surface de la Terre. (<https://earthengine.google.com/timelapse/>).

Sur la région du Nefzaoua la figure 3.13 montre un exemples d'une succession chronologique de 5 images issues de ces archives. Les images ont été saisies en 1984(A), 1994(B), 2004 (C), 2014 (D) et 2018 (E) ; 34 années d'écart sont un laps de temps largement suffisant pour l'observation de l'évolution à l'échelle de l'oasis. On remarque sur cette séquence de cinq images que les oasis (en couleurs sombres) ont vu leur superficie s'accroître fortement, ce qui est un facteur certain de changement du paysage. Pour aller au-delà de cette interprétation qualitative, la recherche et le traitement d'images d'archive nous permettra de quantifier cette extension des zones irriguées.

En revanche si ces données sont facilement accessibles et transformables en animations (vidéo multi dates) elles ne permettent pas d'effectuer facilement les calculs des changements, par exemple il n'est pas possible d'y appliquer des traitements simples comme le calcul de l'indice de végétation.







**Figure 3.13 : Exemples d'images obtenues par 'Time Machine' de Google Engine Tour Editor sur la zone d'étude. A : 1984 ; B : 1994 ; C : 2004 ; D : 2014 ; E : 2018.**

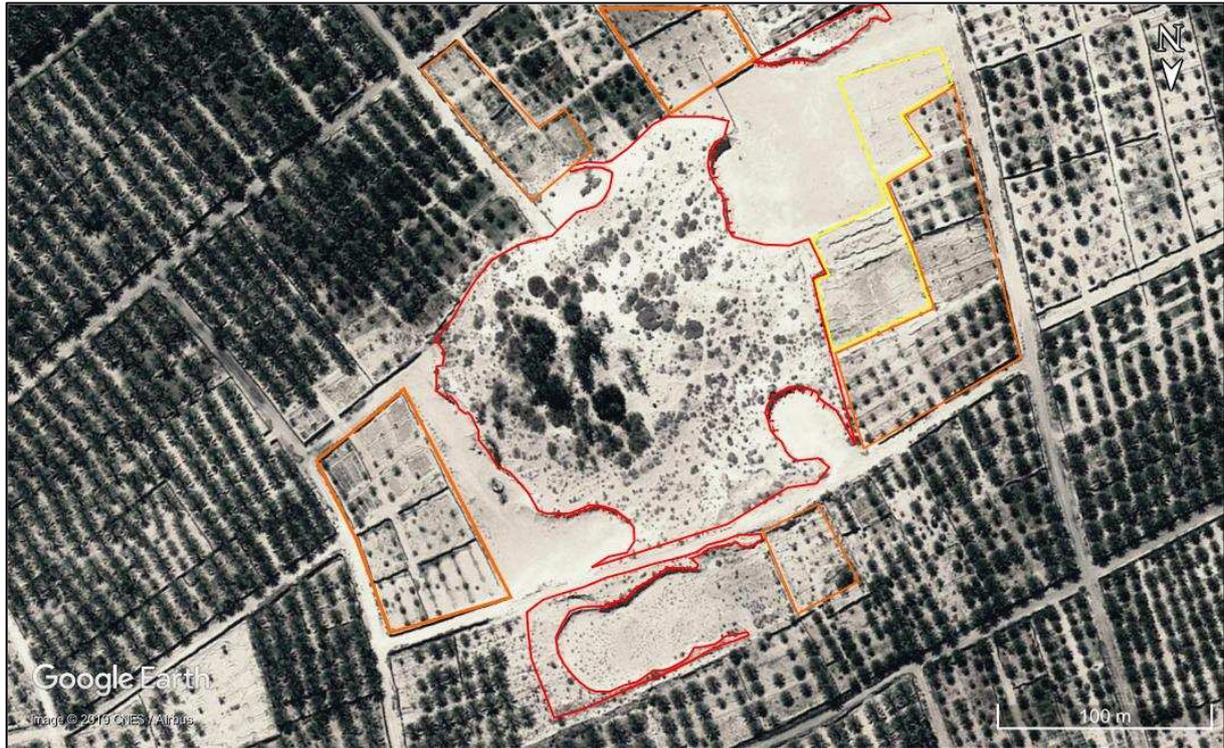
### **3.1.3.2 Étude diachronique récente d'un tertre (2010-2018) sur Google Earth : exemple de Derguich1**

Dans le Nefzaoua l'extension des oasis se fait vers le chott en rehaussant les sols salés pour permettre un meilleur développement des racines des palmiers à l'aide de matériel meuble, pauvre en sels, souvent du sable extrait des tertres. L'extension se fait ainsi au détriment du tertre lui-même après l'avoir arasé et aplati la butte centrale qu'il formait.

Les images récentes visibles avec Google Earth permettent de zoomer pour observer un tertre à une échelle plus fine, mais aussi de retracer son évolution récente en utilisant l'extension « Afficher des images d'archive ». Une simple interprétation visuelle permet alors de détecter les changements majeurs de l'état du tertre. Les archives de Google Earth disponibles sur cette région remontent seulement à 2010 ce qui donne 9 ans d'écart (les images les plus récentes affichées par Google Earth sur le tertre Derguich1 datent du 8/11/2018).

Nous avons pu observer la dégradation de plusieurs tertres sur cette période. Nous avons retenu un exemple jugé très représentatif vu l'ampleur du changement qu'a vécu ce tertre dans le court intervalle de temps. Il s'agit du tertre Trt 44 Derguich1, situé dans la région de Blidet au sud de Kebili (voir figure 5.2 cf5). La source de ce tertre s'est tarie récemment selon un témoignage recueilli sur place. En 2010, sur l'image satellite de la figure 3.14, le tertre conserve encore sa partie centrale. Les limites du tertre résiduel ont été représentées en rouge sur l'image et son diamètre a pu être estimé à 153 m, en utilisant l'extension "Afficher la règle" proposée par Google Earth.

On observe des surfaces aplanies autour du centre. Elles sont le résultat des prélèvements de matériel meuble effectués en vue de l'étaler à l'extérieur de l'oasis sur les sols salés du chott pour la création de nouveaux champs.



**Figure 3.14 : Le tertre Derguich1 le 25-09-2010 (extrait de Google Earth).**

Les plantations récentes, en couleur orange, représentent des petits champs dont nous supposons qu'ils ont été créés peu avant 2010, vu leurs jeunes pousses. Les limites des parcelles en jaune correspondent à des champs créés en 2010.



**Figure 3.15 : Le tertre Derguich1 le 19-01-2013 (extrait de Google Earth).**

En janvier 2013 le diamètre de la partie centrale a diminué (84 m), l'extension de l'oasis s'effectue vers l'intérieur au centre du tertre. On observe que l'espace gagné grâce au prélèvement a été remplacé par de nouveaux champs. L'implantation de palmiers en rangées parallèles est un indice d'extension de l'oasis moderne. Les parcelles représentées en jaune déjà dégagées et préparées en 2010 sont plantées. Les limites des nouvelles parcelles créées à la date du 19-01-2013 sont représentées en vert.



**Figure 3.16 : Le tertre Derguich1 le 14-11-2013 (extrait de Google Earth).**



**Figure 3.17 : Trt 44 Derguich 1 dans l'oasis de Blidet prise de vue mai 2015.**

La même année, au mois de novembre, la partie centrale a encore été attaquée et une nouvelle parcelle préparée pour plantation. Ses limites sont représentées avec un rectangle bleu (Figure 3.16). Les parcelles créées en janvier 2013 (limites vertes) sont plantées.

Les deux photos de terrain illustrent l'état du tertre en 2015 avec deux prises de vue opposées (Figure 3.17). La photo A présente la face NE du résidu central du tertre, et la photo B la face SW. Ces photos montrent les surfaces aplanies au pied du résidu de tertre, en B de jeunes palmiers ont été plantés.



**Figure 3.18 : Le tertre Derguich1 le 11-02-2016 (extrait de Google Earth).**

En 2016 la partie centrale a été presque décapée, sauf une petite butte avec un palmier encore debout témoignant de la hauteur du tertre autrefois (Figure 3.18). On observe également l'extension des nouveaux champs qui ont encore gagné du terrain, représentés avec des limites en couleur mauve. Ils avancent vers le centre du tertre qui en même temps voit une grande partie de sa hauteur réduite.

### Légende

---

 Limites résiduelle de la partie centrale du tertre	 Parcelles créées en 2013
 Plantations récentes en 2010	 Parcelles dégagée dans la partie residuelle centrale le 14/11/2013
 Champs créés en 2010	 Parcelles dégagée au profile du résiduelle centrale en 2016

---



**Figure 3.19 : Le tertre Derguich1 le 08-11-2018 (extrait de Google Earth).**

En 2018 le centre du tertre n'existe presque plus (Figure 3.19). Les limites du tertre résiduel sont réduites à un vestige de terre. Le paysage a changé, l'oasis moderne s'est installée. On observe aussi l'installation de panneaux solaires (indiquée avec la flèche) utilisée dans la région pour produire de l'électricité qui permet le pompage des eaux souterraines.

## **3.2 Constitution d'une série temporelle à partir d'images d'archive**

Après cette première exploration de l'utilisation des images satellites visualisées sur internet grâce à Google Earth, une assez large collection d'images originales des agences spatiales a été constituée pour sélectionner les plus adaptées pour notre étude. L'objectif est de tirer profit à la fois de la large étendue spatiale qu'elles couvrent et de la gamme de temps la plus longue possible.

### **3.2.1 Les catalogues utilisés**

Le téléchargement des images satellites est aujourd'hui accessible grâce à de nombreux fournisseurs qui ont mis à disposition du grand public des plates-formes où beaucoup de données sont gratuites.

Parmi les plates-formes utilisées ici, il y a le portail mis en place par l'agence publique américaine responsable de l'archivage national des données satellites, la *United States Geological Survey* (USGS). En France, la plate-forme *Theia* a mis à disposition gratuitement une collection récente d'images satellites SPOT 6 et 7 ainsi que quelques séries temporelles Sentinel 2. Le programme *Spot World Heritage* met à disposition l'ensemble des images des satellites SPOT1 à 5.

### **3.2.2 Les images satellites utilisées**

Pour avoir une image globale sur les paysages du Nefzaoua et leur évolution, des images acquises par les satellites sur la zone ont été recherchées et utilisées pour constituer une série temporelle. Parmi l'ensemble des images collectées pour cette étude, 5 images ont été choisies pour l'analyse multi temporelle :

- Une image Landsat MSS du 07/02/1973,
- 3 images Spot XS du 27/12/1997 et 22/01/1998 (qui seront mosaïquées).
- Une image Sentinel 2, du 04/05/2017.

Sur la figure 3.20 chacune des trois images apparaît en fausses couleurs pour une première visualisation. Dans ce traitement la végétation apparaît en rouge, il s'agit pour l'essentiel des palmeraies.

En 1973 il y avait très peu d'oasis, elles sont de petite taille et dispersées dans le désert qui domine.

En 1998 on constate une colonisation du paysage par les oasis qui se sont étendues.

En 2017 la région qui était en grande partie vide est devenue une région très occupée.

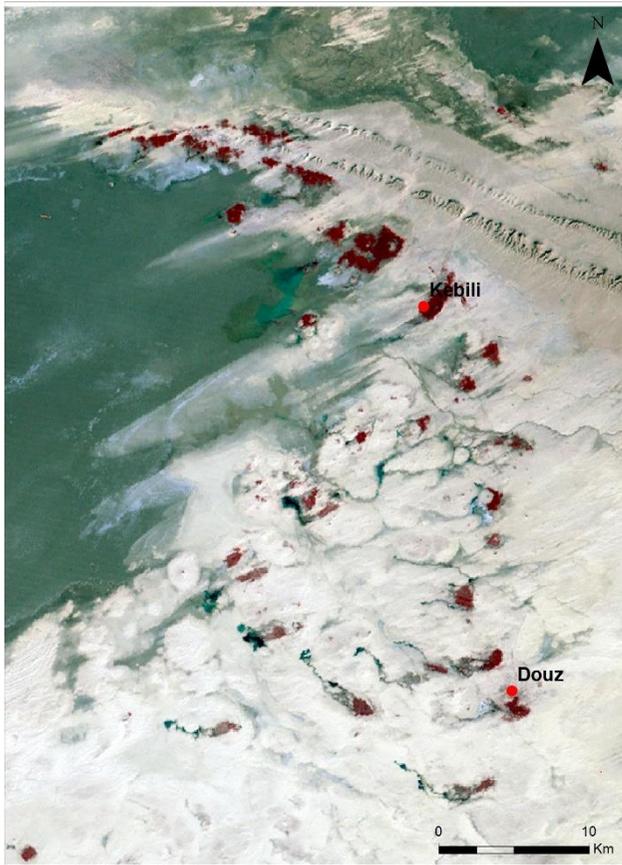
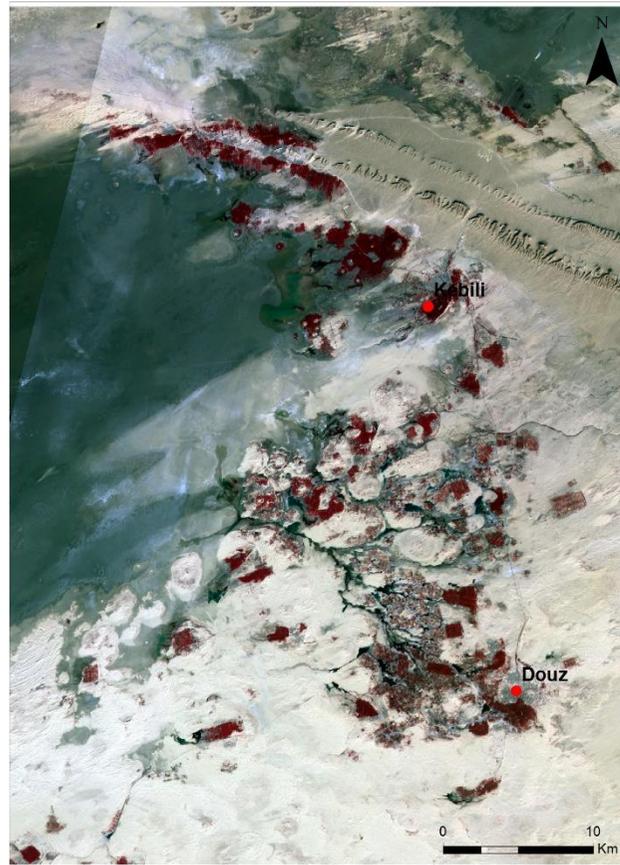


Image Landsat Mss du 07/02/1973



Mosaïque Spot2 du 27/12/1997 et du 22/01/1998

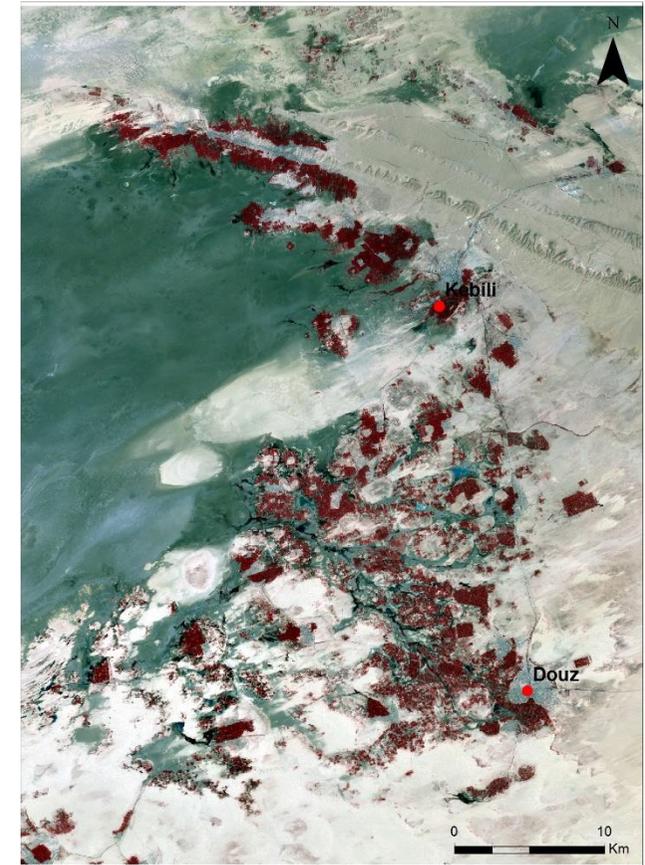


Image Sentinel 2 du 04/05/2017

Figure 3.20. Comparaison à plus de 40 ans d'écart avec 3 images (en 'fausses couleurs').

### 3.2.3 Utilisation de l'indice de végétation

L'évolution de l'ancien système paysager du Nefzaoua a été étudiée à l'aide de l'indice de végétation par différence normalisée, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Cet indice représente l'abondance de la végétation verte, il est calculé de la façon suivante :

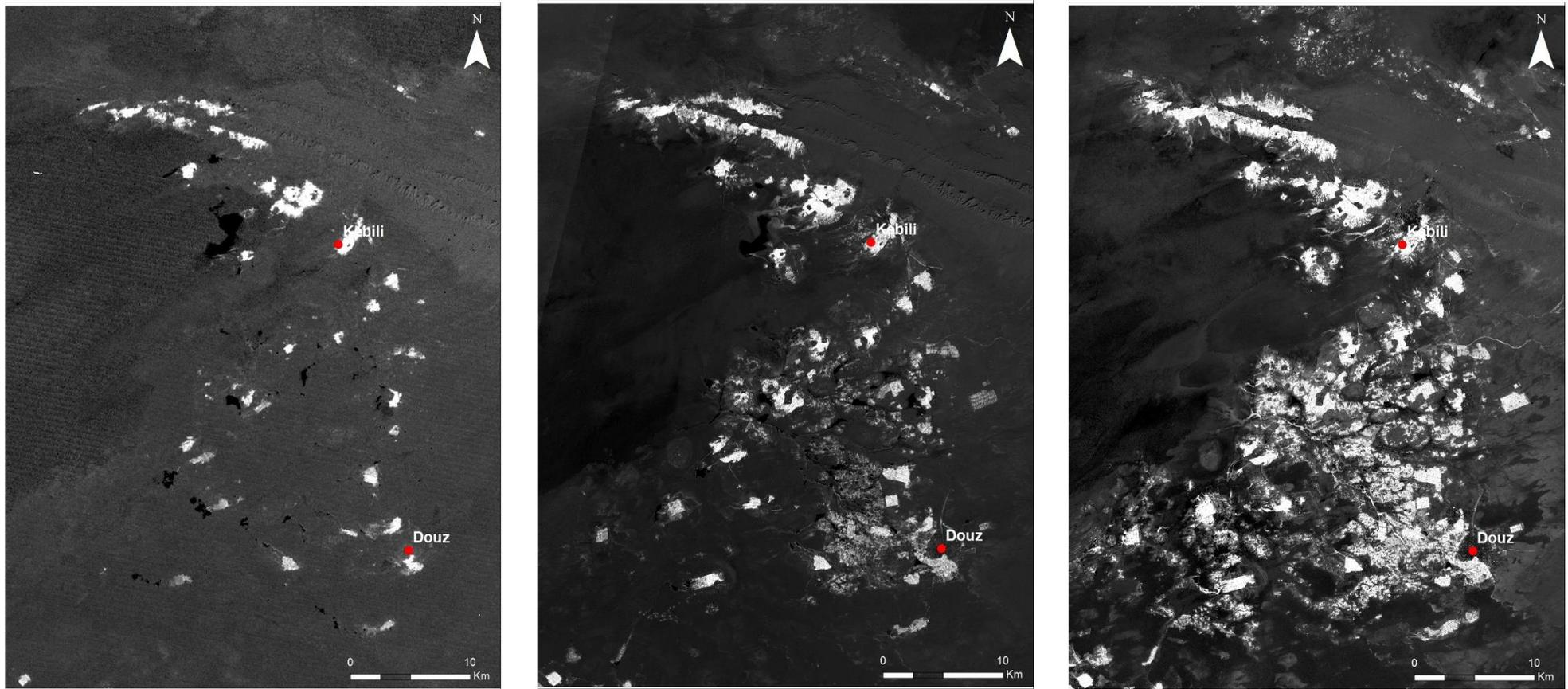
$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \text{ où:}$$

PIR = valeur du canal proche infra-rouge

R = valeur du canal rouge

Largement utilisé (cf. FAO, Earth Observing System), il a l'avantage de permettre de représenter les données à une date précise, par une seule valeur (plutôt que les valeurs des différents canaux) et de pouvoir être calculé pour les capteurs variés des différents types d'images retenus.

L'indice de végétation normalisé (NDVI) a été calculé pour chacune des images des trois dates retenues. Comme l'illustre la figure 3.21, les valeurs les plus élevées (en clair) correspondent aux oasis et plantations les plus denses, les valeurs intermédiaires à une végétation verte moins dense (par ex., plantations plus récentes). Toutes les parties sombres (noires) correspondent aux surfaces où il n'y a pas de végétation verte (sols nus, sables, dunes, chott, steppe clairsemée).



NDVI Images MSS du 07/02/1973

NDVI mosaïque Spot2 du 27/12/1997 et du 22/01/1998

NDVI Images Sentinel2 du 04/05/2017

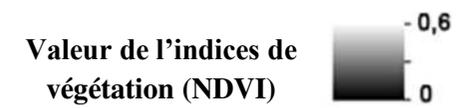
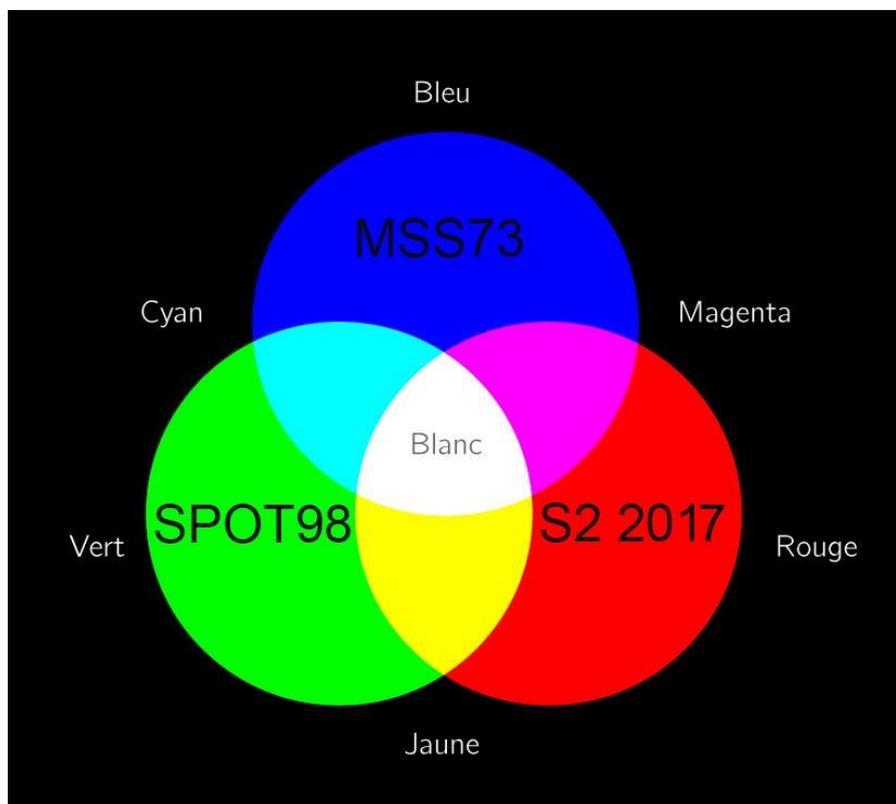


Figure 3.21 : indice de végétation (NDVI) calculé pour les images des trois dates utilisées.

## 3.3 Une analyse multi-dates simple

### 3.3.1 Combinaison des trois dates par codage couleur

Le NDVI permettant de suivre l'évolution des surfaces végétalisées, une analyse multi-dates simple et visuelle a été réalisée en combinant les 3 images NDVI en affectant à chacune une des couleurs de base Rouge, Verte et Bleue (Figure 3.22). Comme indiqué dans la légende, les dates ont été choisies dans l'ensemble de la collection pour couvrir l'ensemble de la période disponible.



**Figure 3.22 : Schéma explicatif de la composition colorée du NDVI des trois dates (1973, 1998, 2017).**

Pour le calcul de ce NDVI multi-date il a fallu commencer par ré-échantillonner la dimension des pixels, lorsque ce fut nécessaire, pour que les 3 images aient toutes des pixels de 10 m. Ainsi, les 3 images spot de 20 m de résolution originale ont été ré-échantillonnées à 10 m et l'image Landsat de 80 m à 10 m également. La résolution de 10 m a été choisie car c'est celle de l'image Sentinel qui présente donc la meilleure résolution des trois images qui vont être combinées. Le passage à une composition colorée avec les 3 NDVI bien superposés exige en effet que les 3 images NDVI aient les mêmes dimensions de taille des pixels.

Ensuite pour chacune des 3 dates on a calculé le NDVI et on a obtenu une bande par date qui contient les valeurs du NDVI, indice élevé dans les lieux où se trouvent les oasis. Une fois cette opération réalisée on affecte une couleur au NDVI de chaque date. Dans notre exemple le bleu pour l'image Landsat MSS de 1973, le vert pour l'image Spot 1998 et le rouge pour l'image Sentinel2 de 2017.

La figure 3.22, résume les différentes façons dont les trois couleurs utilisées peuvent se combiner et leur interprétation. Au centre du schéma, les pixels qui ont des valeurs élevées de NDVI à chacune des trois dates correspondent aux surfaces couvertes de végétation dense à toutes les dates, à savoir les oasis déjà présentes en 1973 et qui le sont encore en 1998 et 2017. Ces pixels à valeurs élevées en R, G et B apparaissent en blanc. Toutes les autres situations intermédiaires (cyan, magenta, et jaune) correspondent aux cas où la végétation n'est présente qu'à deux dates sur trois. La plus fréquente étant bien sûr celle des surfaces couvertes de végétation en 1998 et 2017. Enfin, les couleurs 'pures' représentent les surfaces qui ne sont vertes qu'à une seule des dates. Ici, logiquement le rouge domine, car il représente des surfaces récemment couvertes de végétation (extension de plantations, cultures, p.ex.). Ce schéma permet d'interpréter les couleurs apparaissant sur la figure 3.23.

En 1973 la région était en grande partie vide. Elle est devenue une région très occupée en 2017. On repère quelques petites taches bleues pas très importantes sur l'image qui représentent les rares palmiers encore debout sur des tertres aujourd'hui taris, mais qui témoignent d'un ancien système hydro-agricole oasien d'origine hydrogéologique.

Les oasis représentées par la couleur blanche sont les plus vieilles. Elles étaient là en 1973 et elles existent encore en 2017. Elles ne sont pas très nombreuses, entourent les plus grands et anciens tertres et témoignent de l'occupation de l'espace. Les plus grandes oasis anciennes se situent sur la presqu'île de Kébili. D'autres oasis anciennes avec des superficies moins importante sont dispersées dans tous les villages du Nefzaoua.

La majeure partie des oasis correspond à des couleurs qui sont celles de Spot 1998 et de Sentinel2 2017. La couleur jaune est clairement très dominante au centre de la zone d'étude, ce qui permet de cerner la période où l'exploitation excessive s'est déclenchée. À cette époque-là, les forages sont devenus si nombreux qu'ils ont permis cette colonisation du paysage par les oasis.

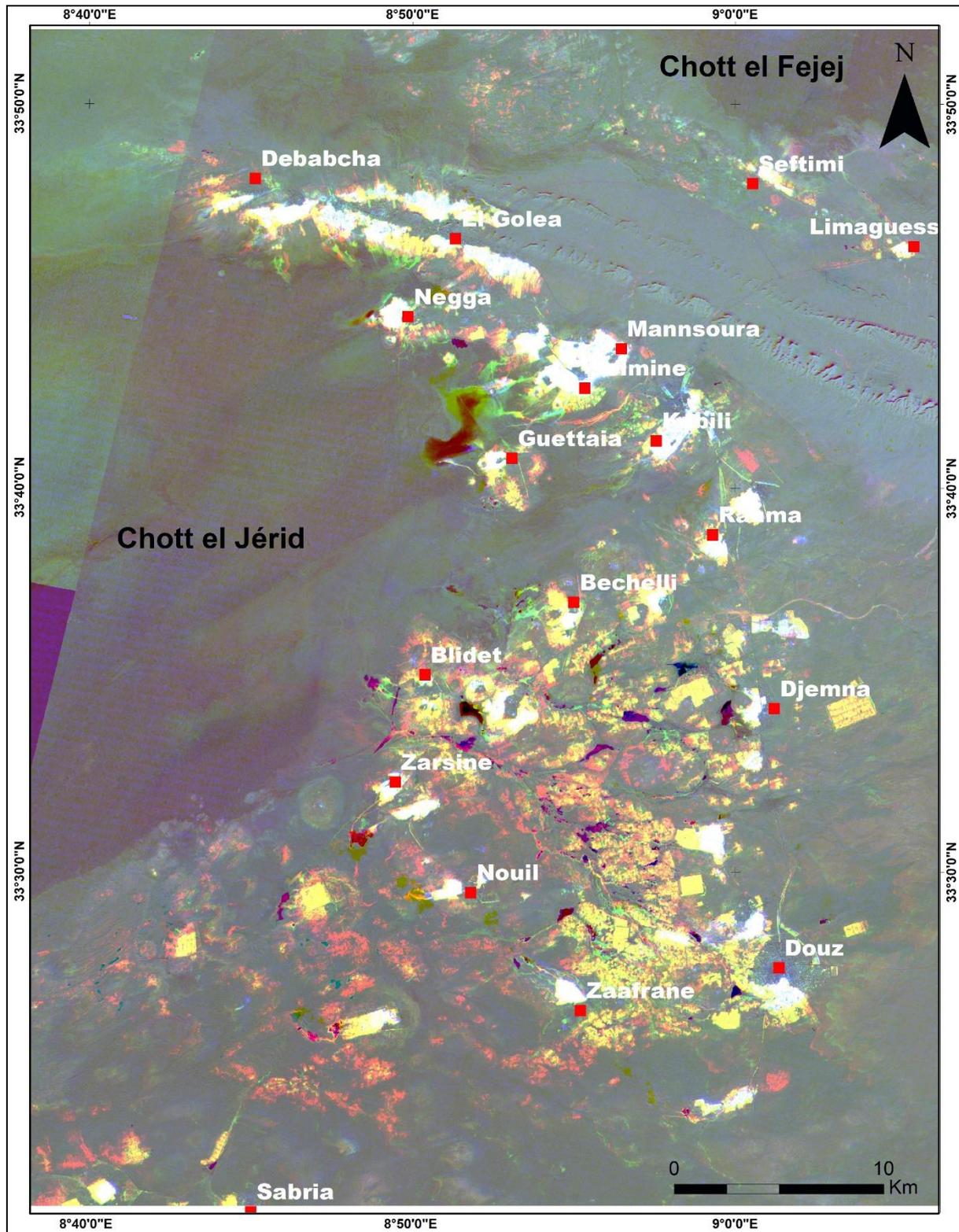


Figure 3.23 : Composition colorée combinant les valeurs de NDVI aux trois dates sélectionnées : 1973 en bleu, 1998 en vert, 2017 en rouge (voir la figure 3.22 pour l'interprétation).

L'implantation de nouvelles oasis a continué et continue encore à nos jours, que ce soit par la régénération des oasis ou vers leur extension. Sur la composition colorée en voit ces nouvelles parcelles représentées par la couleur rouge avec une forte extension dans le sud du chott.

La Composition colorée combinant les valeurs de NDVI nous a donc donné un résultat visuel très net de la modification qu'a subie le territoire du Nefzaoua mais sans nous donner des valeurs chiffrées de cette extension.

### **3.3.2 Utilisation du NDVI pour l'estimation de l'évolution des superficies irriguées**

Au-delà de la composition multidates, les images de NDVI calculées pour 1973, 1998 et 2017 ont été utilisées pour estimer l'évolution des superficies irriguées.

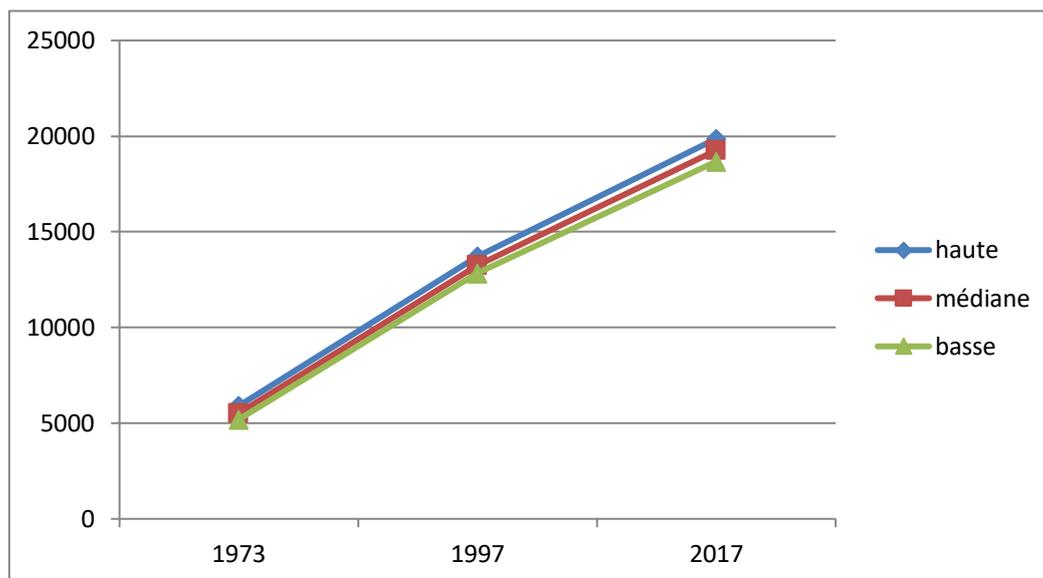
D'après de nombreuses études (voir les manuels de télédétection cités) les valeurs de NDVI supérieures à 0,3 correspondent à des pixels de végétation verte, dense. Dans cette région sèche, il s'agit des cultures irriguées, qui sont ici principalement des palmeraies. Ce seuillage théorique a été affiné interactivement à l'écran, et l'erreur liée a été estimée par le déplacement du seuil aux valeurs immédiatement supérieure et immédiatement inférieure (bornes haute et basse).

Grâce à ce seuillage simple, le pourcentage de pixels 'végétation verte' a pu être calculé. La superficie totale de la zone couverte par l'image étant de 2650 km<sup>2</sup> (265 000 ha), nous avons obtenu au final le tableau des surfaces irriguées estimées pour chacune des trois années (Tableau 3.2).

**Tableau 3.2 : Estimation des superficies irriguées dans la zone d'étude (à partir des indices de végétation calculés pour les 3 images MSS, SPOT et Sentinel).**

<b>Année</b>	<b>1973</b>	<b>1998</b>	<b>2017</b>
<b>Superficie (ha)</b>	5520	13260	19260
<b>Incertitude +/-</b>	350	440	590

Ces valeurs sont représentées sur la figure 3.19, où apparaissent les valeurs hautes et basses utilisées pour estimer l'incertitude.



**Figure 3.24 : Evolution des superficies irriguées estimées à partir des 3 images NDVI (ha).**

Ces valeurs montrent un accroissement moyen des superficies irriguées de 300 ha par an (tableau 3.3). On remarque que les surfaces ont presque quadruplé depuis 1973, passant d'un peu plus de 5000 ha à près de 20 000.

**Tableau 3.3 : Estimation de l'accroissement des superficies irriguées (d'après les valeurs du tableau 3.2).**

Années	1973-1997	1997-2017
<b>Accroissement (ha)</b>	7740	6000
<b>Moyenne par an (ha)</b>	323	300

Cette méthode robuste n'est pas très précise, mais permet de déceler l'ordre de grandeur de l'extension des oasis sur l'ensemble de l'image qui couvre tout le Nefzaoua. À cette ampleur de l'extension des surfaces irriguées correspond un accroissement de la consommation d'eau équivalent, à relier au tarissement des sources naturelles artésiennes, notamment celles à l'origine des tertres.

## **3.4 La troisième dimension : utilisation de modèles numériques de terrain (MNT)**

Le MNT est un ensemble de points 3D comprenant uniquement les éléments du terrain naturel. C'est le référentiel altimétrique de base en géomatique.

### **3.4.1 Le modèle numérique à résolution moyenne (SRTM)**

Des instruments radar ont été embarqués sur des satellites, et certains ont permis de produire, par les techniques d'interférométrie, des relevés numériques de terrain. Le plus largement diffusé et le plus facilement disponible est celui produit à partir des données collectées par la navette spatiale de la NASA en 2000, le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Il est mis gratuitement à la disposition du public sur différents sites officiels de distribution des données (NASA, USGS). La résolution horizontale et verticale du MNT le plus détaillé est ici de 30 m (avec une précision de +/- 20 m en horizontal et +/- 17 m en vertical) (source : <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>).

La figure 3.20 présente un extrait de ce MNT mondial sur la zone d'étude. Le contraste a été augmenté pour les valeurs faibles, de façon à faire apparaître les tertres dont les altitudes sont très modestes (de l'ordre de quelques dizaines de mètres).

Ce modèle (Figure 3.25) permet de reconnaître le principal relief dans la région : le Djebel Tébaga, culminant à 469 m. Les principaux tertres sont illustrés par des formes circulaires dont le centre est plus clair, indication du point culminant du tertre. Ce modèle est trop grossier, il a une résolution insuffisante pour distinguer les détails, comme on le voit sur l'extrait zoomé.

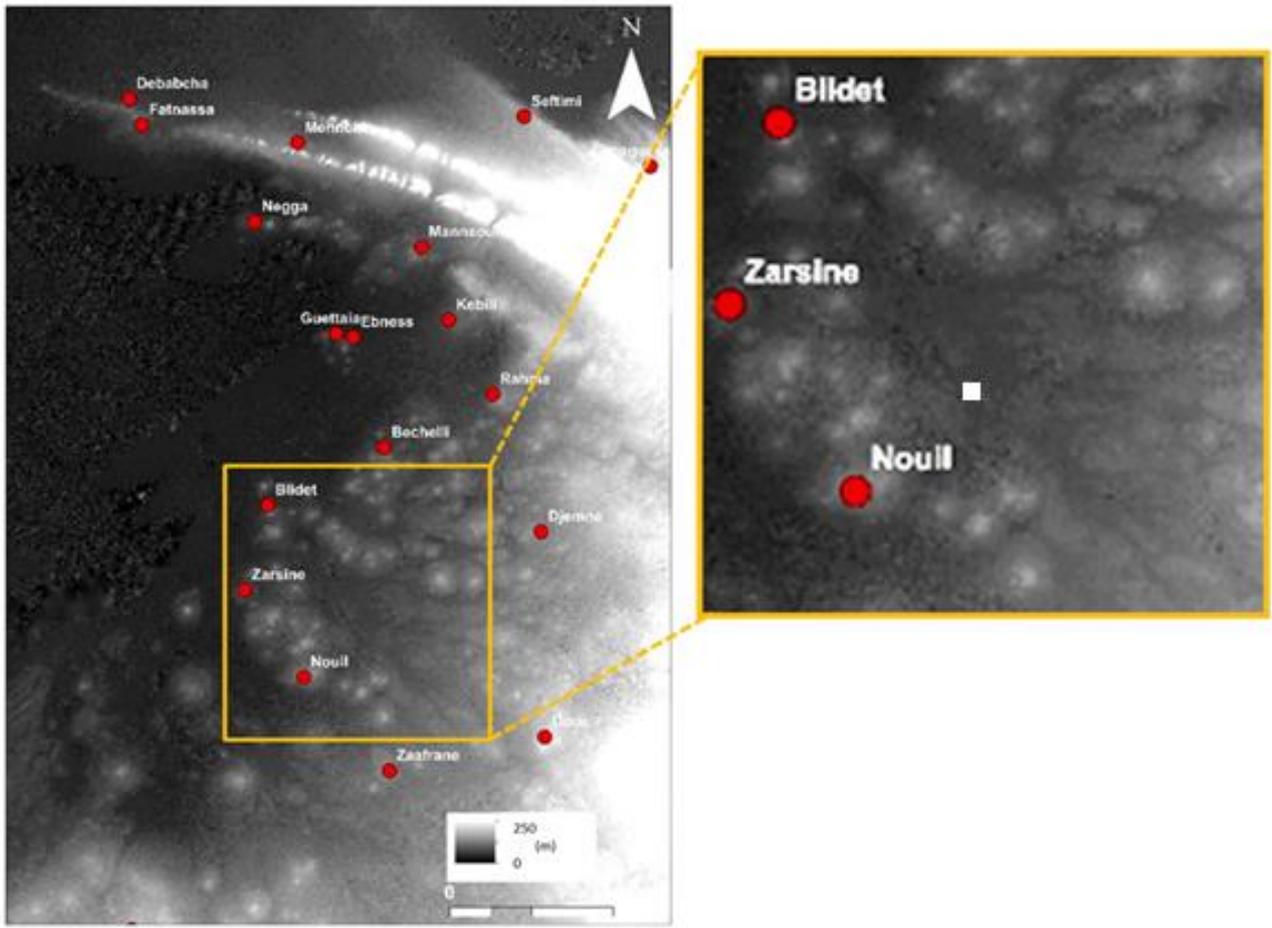
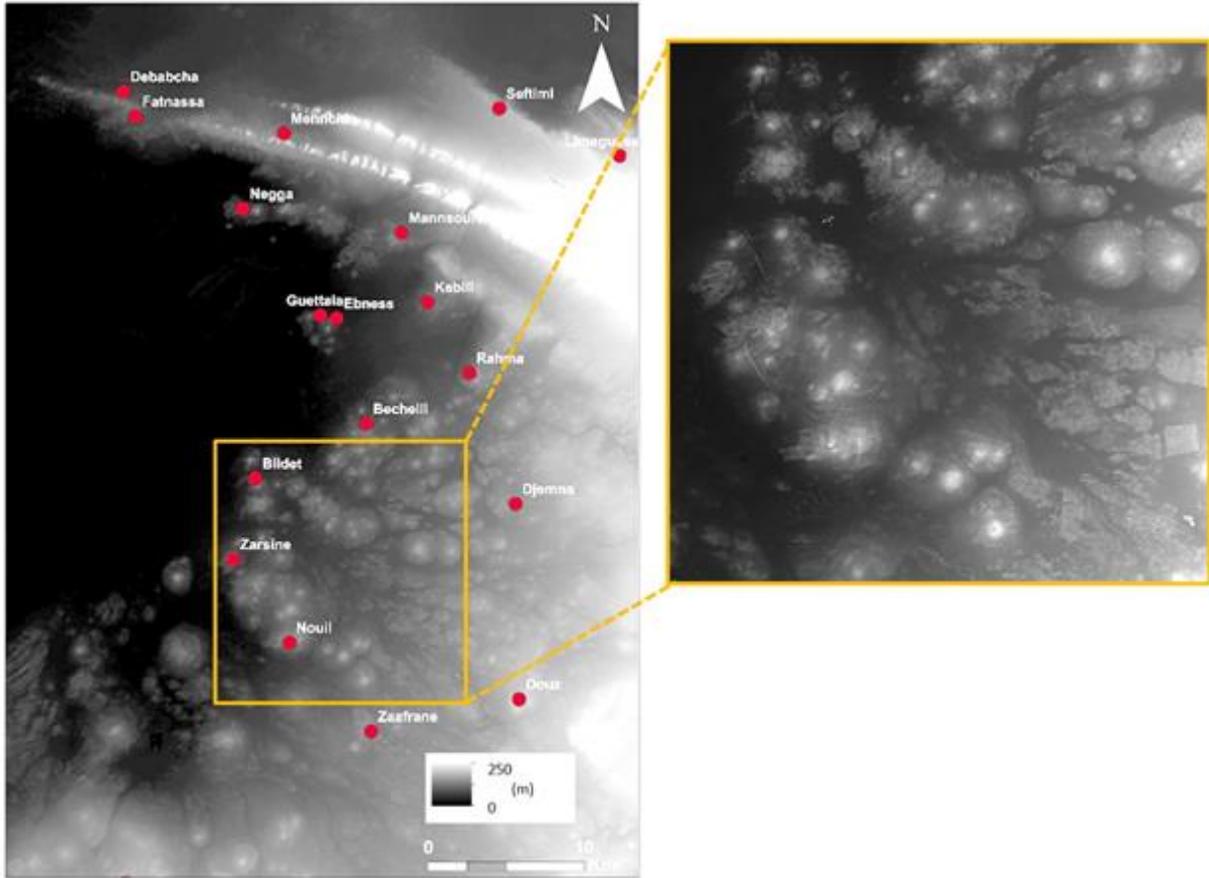


Figure 3.25 : Topographie de la région de Nefzaoua selon le modèle numérique SRTM (NASA, résolution 30m). À droite un extrait zoomé.

### 3.4.2 Le modèle numérique récent à résolution fine (Tandem X)

Plus récemment, l'agence spatiale allemande (DLR), en partenariat avec EADS a lancé en 2010 la mission TanDEM-X comprenant deux satellites jumeaux en formation étroite avec une distance contrôlée entre 250 et 500 m (Zink et al 2014). Son objectif principal est la production par interférométrie du WorldDEM, un Modèle Numérique de Terrain mondial à haute résolution (10 m).

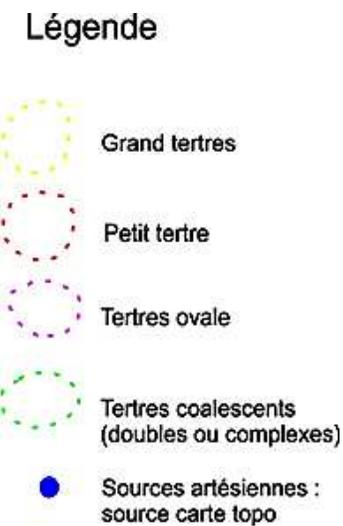
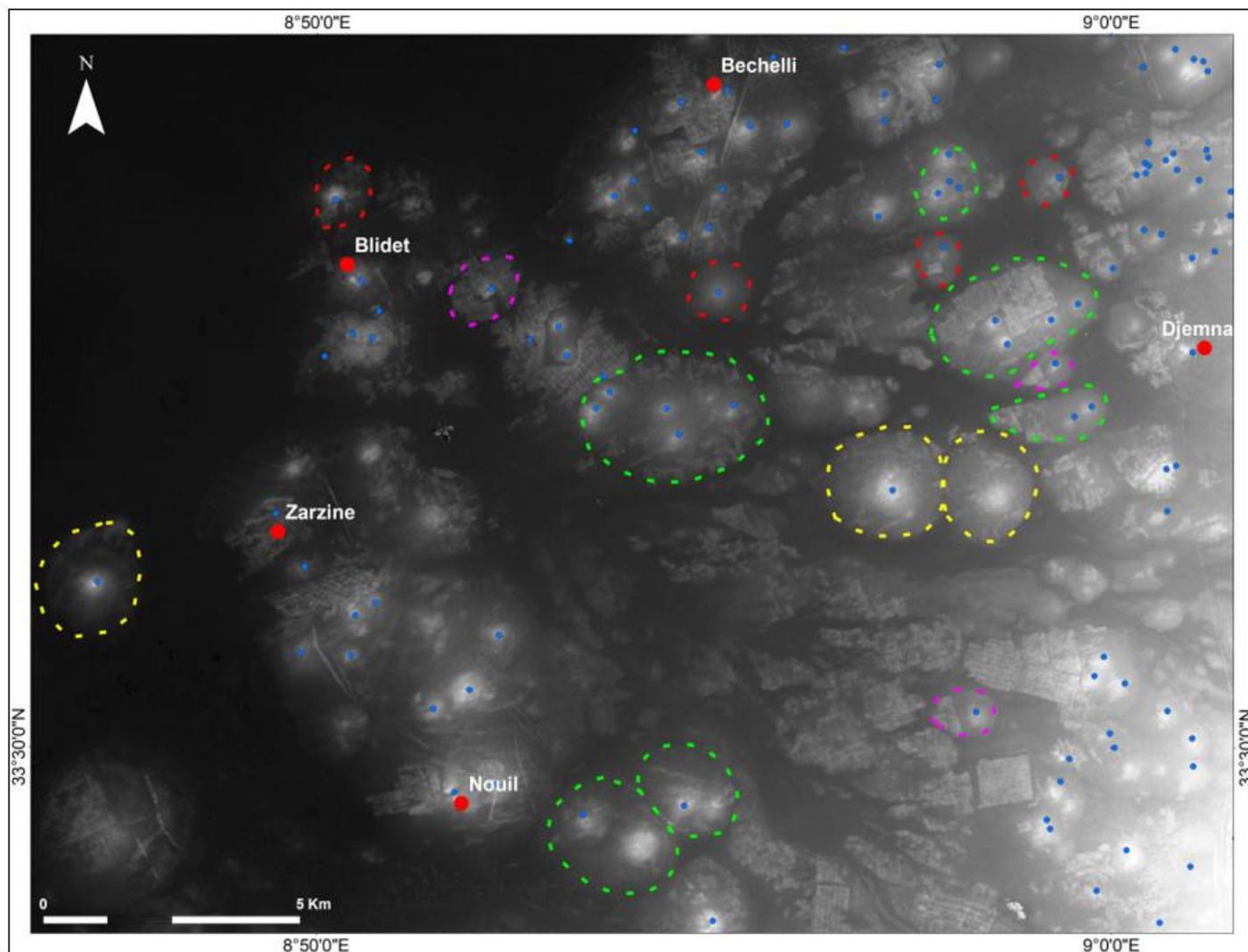
Après un traitement intensif des données, celles-ci sont progressivement commercialisées. Toutefois il nous a été possible de bénéficier d'un échantillon sur la zone de Nefzaoua dans le cadre du programme du DLR de mise à disposition de données pour des tests par les scientifiques.



**Figure 3.26 : Topographie de la région de Nefzaoua selon le modèle numérique TandemX (DLR, résolution 10 m). À droite un extrait zoomé.**

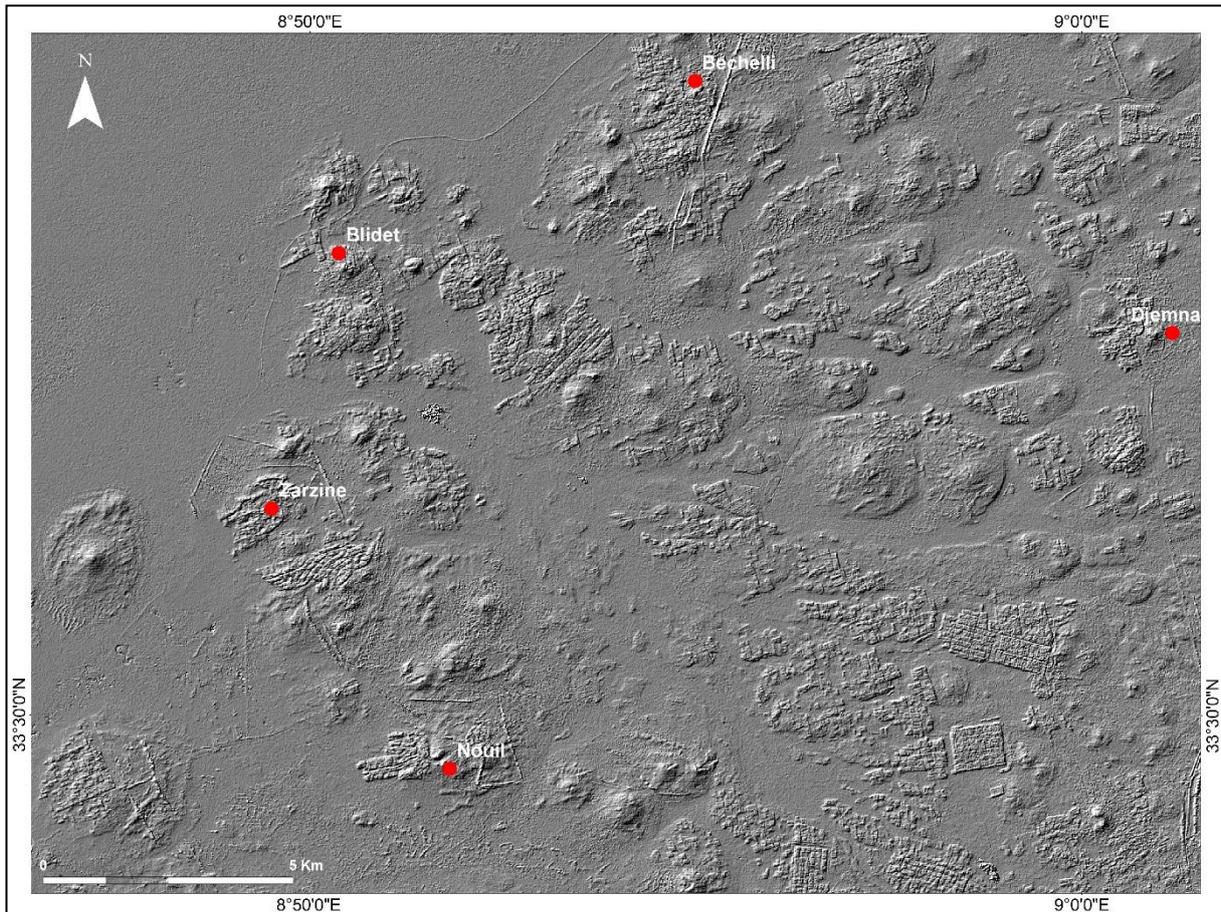
Sur l'extrait de l'image TandemX (fig 3.26) on voit clairement l'amélioration des détails de la topographie que permet la meilleure résolution. Cette caractéristique a été particulièrement mise à profit pour la mesure des dimensions des tertres. Nous avons ainsi utilisé ce MNT pour la mesure de leur diamètre moyen et de leur hauteur (voir §3.6). L'observation détaillée a permis l'identification de différentes formes des tertres : cette morphologie est distinguée par la taille (grand, petit ou plat), par la forme : rond ou allongé (circulaire, ovale, ellipse), par la complexité : simple, double et complexe (par coalescence).

Un tertre double est composé de deux sources, et un tertre complexe est composé par plusieurs sources. Cela peut être expliqué soit par la présence de plusieurs griffons suite au comblement successif du griffon principal, soit par le rapprochement de deux ou plusieurs tertres. La taille du tertre (hauteur, surface) dépend du débit de la source, de la composition chimique de l'eau qui contrôle l'installation de la végétation, de l'activité éolienne qui contrôle l'apport de sédiments et de la durée de fonctionnement de ce système.



**Figure 3.27 : Les principales formes de tertres reconnaissables sur l'extrait de l'image TandemX.**

Pour une meilleure visualisation sur ce modèle numérique de terrain TandemX avec une résolution altitudinale de 10 m, un effet d'ombrage a été ajouté pour mettre en valeur le relief des tertres. Cela met en évidence la position topographique du secteur d'étude qui se présente en pente générale de l'est vers l'ouest (vers le chott). On remarque également très nettement les grands tertres avec leur forme arrondie caractéristique mais aussi les palmeraies anciennes à leur proximité, de forme irrégulière, et les plantations modernes, de forme à dominante rectangulaire.



**Figure 3.28 : Agrandissement du modèle numérique TandemX avec effet ombrage.**

La Figure 3.28 est un agrandissement du MNT TandemX avec effet d'ombrage. Étant donné que la zone est relativement plane, où les tertres les plus hauts atteignent à peine 30 m de hauteur et que notre modèle numérique de terrain a une résolution de 10 m, l'ajout de l'effet ombrage fait ressortir ce faible relief et permet une identification visuelle des tertres plus facile. On remarque même les palmeraies dont les plus récentes ont des formes géométriques.

## 3.5 Mesure des dimensions des tertres

Pour mesurer les dimensions des tertres nous avons cherché à exploiter les deux sources d'information disponible : le MNT Tandem X qui vient d'être évoqué et Google Earth.

### 3.5.1 Méthodologie de mesure sur Google Earth

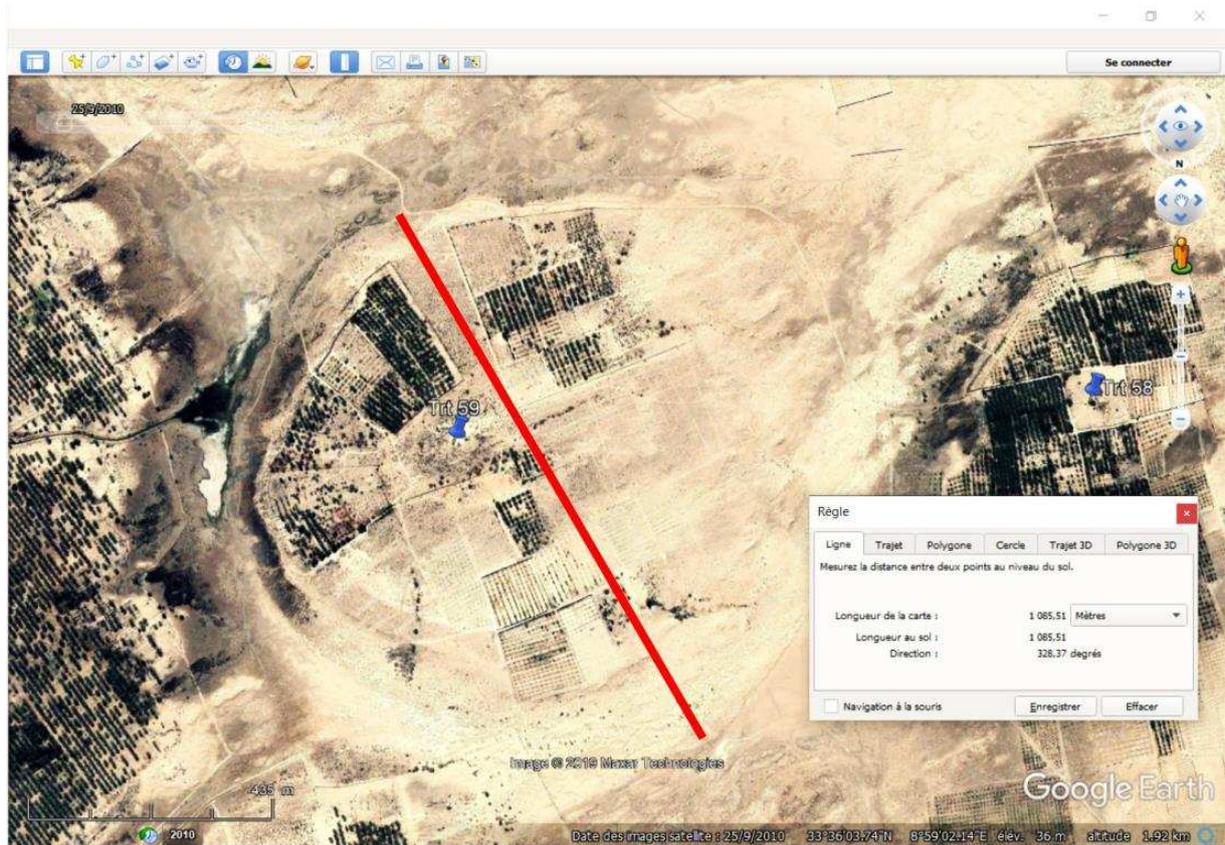
Deux paramètres de dimension des tertres sont facilement accessibles avec Google Earth : la hauteur maximale et le diamètre moyen. Notons que nous avons assimilé les tertres à des monticules réguliers avec le sommet vers le centre, et une forme circulaire. En réalité, ce ne sont pas des structures parfaitement circulaires, plusieurs tertres sont plutôt ovoïdes. Ces mesures restent donc approximatives, d'autant plus que certains tertres sont très rapprochés. Ils sont aussi maintenant souvent couverts de palmiers.

Le calcul des hauteurs est réalisé en 3 étapes en déplaçant le curseur :

1. En cherchant le point le plus haut du tertre qui est généralement la position du griffon ;
2. En cherchant le point le plus bas dans de l'oasis (sur la carte topo les sources sont indiquées avec leur direction d'écoulement) ;
3. En calculant la différence entre le point le plus haut et le plus bas, on obtient ainsi la hauteur approximative du tertre, avec une marge d'erreur que nous avons estimée à +/- 2 m.

À noter que les valeurs d'élévation (hauteur) fournies par Google Earth sont interpolées à partir du modèle numérique de terrain (MNT) global du programme SRTM, dont la résolution originale est de 30 m (voir précédemment, § 3.5.2).

Le calcul du diamètre est effectué à l'aide de l'outil « règle » sur Google Earth. Lorsque l'image satellite est de bonne qualité et que le tertre est dégagé (Figure 3.29) il est facile de mesurer le diamètre.

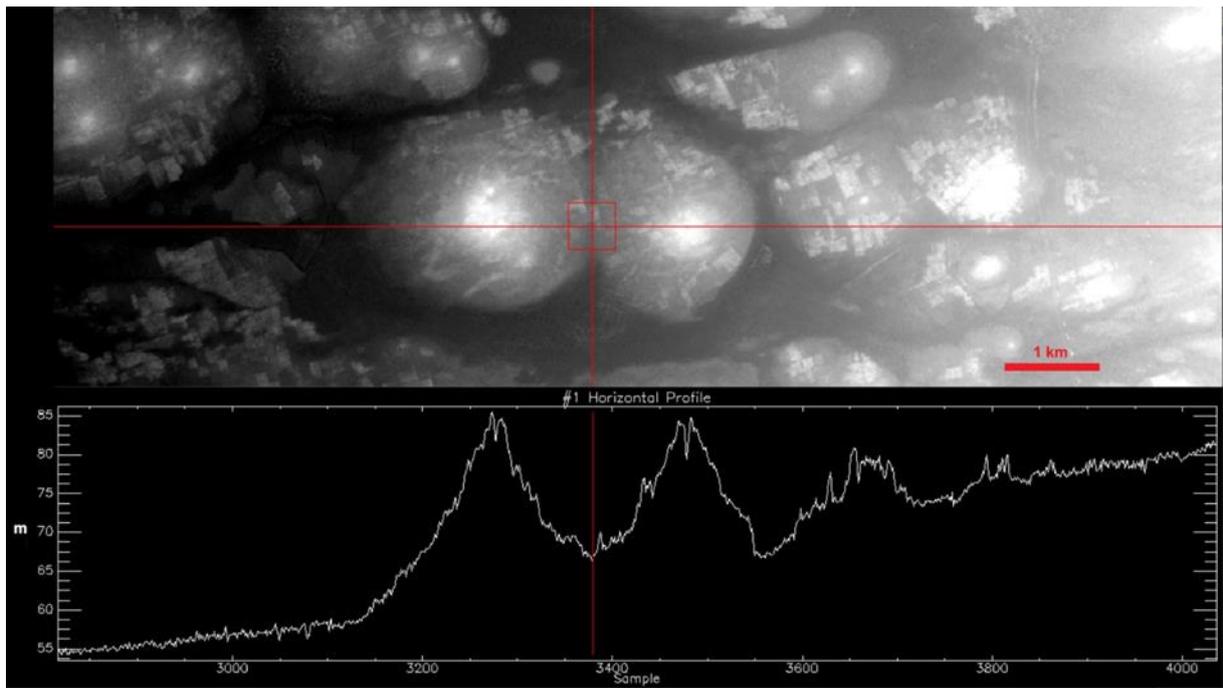


**Figure 3.29 : extraite de Google Earth montrant la méthodologie de mesure du diamètre d'un terre dégagé (Trt59).**

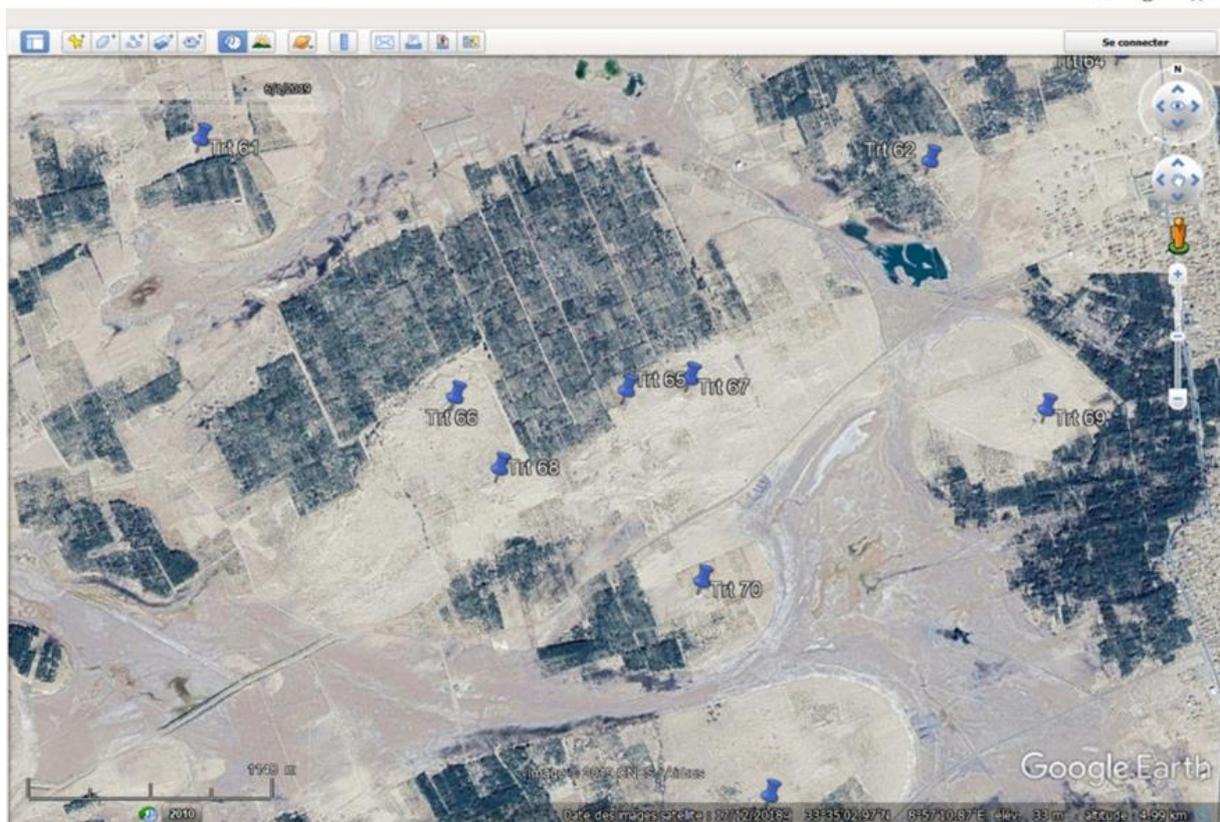
### **3.5.2 Méthodologie de mesure sur le Modèle Numérique de Terrain de TandemX**

Comme décrit plus haut, ce nouveau MNT offre une résolution plus fine de 10 m, permettant une mesure plus précise des dimensions, et particulièrement des hauteurs des terres. Ainsi l'exemple du transect à travers les terres Trt77 et 78 (Oum er Rouss, et Bir El Alouane) de la figure 3.30 illustre comment cette méthode donne une meilleure précision.

Le MNT Tandem-X a été ouvert dans le logiciel ENVI dont l'outil « profil en x » nous a permis d'afficher les hauteurs du terrain, le long d'un transect placé à travers les deux terres sélectionnés. À noter que dans le graphique obtenu la hauteur est graduée en mètres, alors que les distances horizontales sont en décamètres (résolution 10 m), ce qui correspond à un facteur d'exagération de la hauteur de 10.

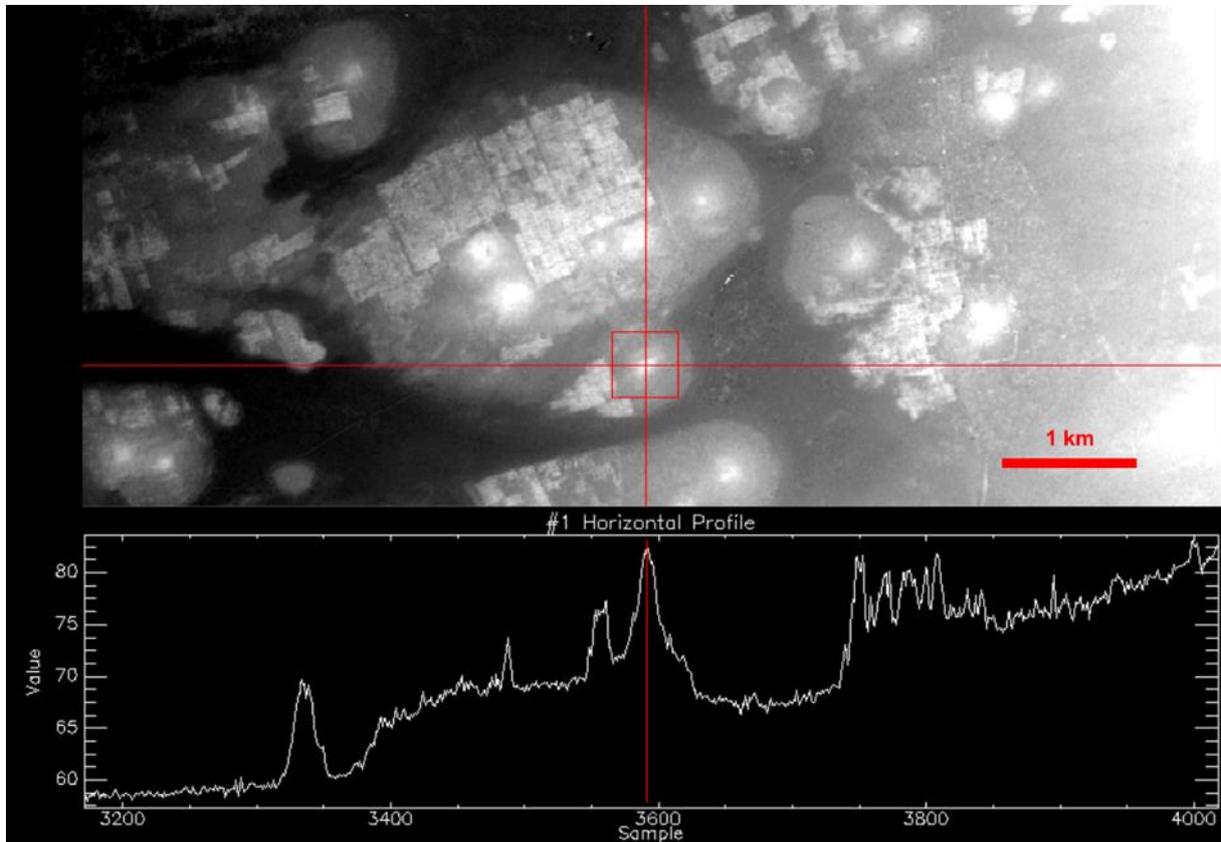


**Figure 3.30 : Elévation (m) le long d'un transect traversant les terres Trt77 et 78 (données TandemX, résolution horizontale 10m, et verticale 1m).**



**Figure 3.31 : exemple de terres très proches (Trt65, 66, 67 et 68) dont le diamètre est difficile à mesurer sur Google Earth.**

Dans les situations illustrées par la figure ci-dessus, où les tertres sont très proches, il est plus difficile de mesurer avec Google Earth le diamètre de chacun des tertres (Figure 3.31), et l'erreur de mesure est donc plus élevée. Dans ces situations nous avons donc recouru aux données Tandem-X, comme l'illustre la figure 3.32 sur la même zone.

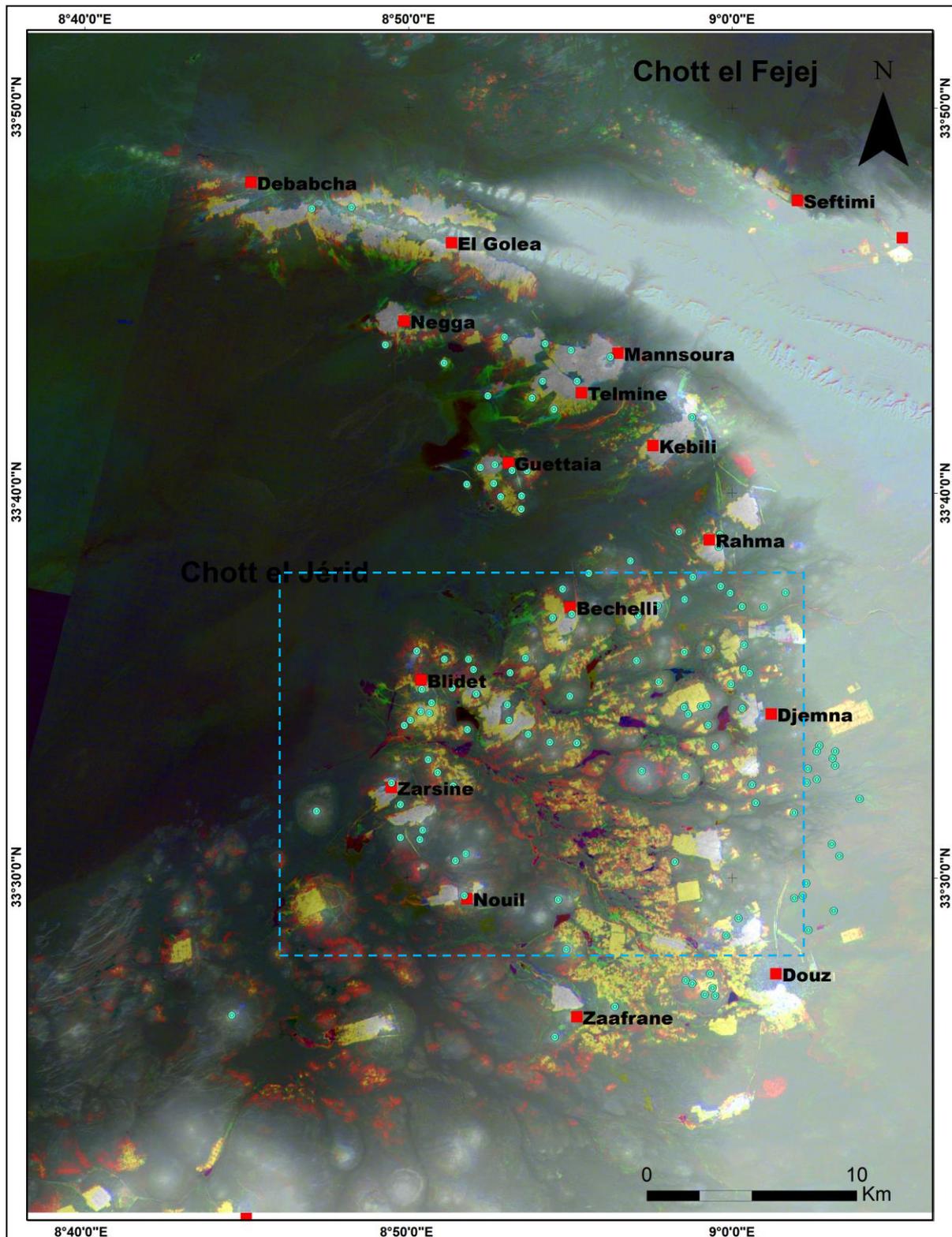


**Figure 3.32 : MNT Tandem-X : transect sur la zone de l'exemple de la figure précédente.**

Grâce à la précision du MNT les limites de chacun des tertres sont beaucoup plus nettes, permettant ainsi d'en mesurer le diamètre. L'ensemble des mesures de diamètre et hauteur faites sur chacun des tertres de la région étudiée est reporté dans le tableau inventaire en Annexe.

### **3.6 Fusion de l'image multidate avec la topographie**

La superposition du MNT TandemX sur la composition colorée des NDVI multi dates a été effectuée dans le but de mettre en valeur la topographie des tertres.

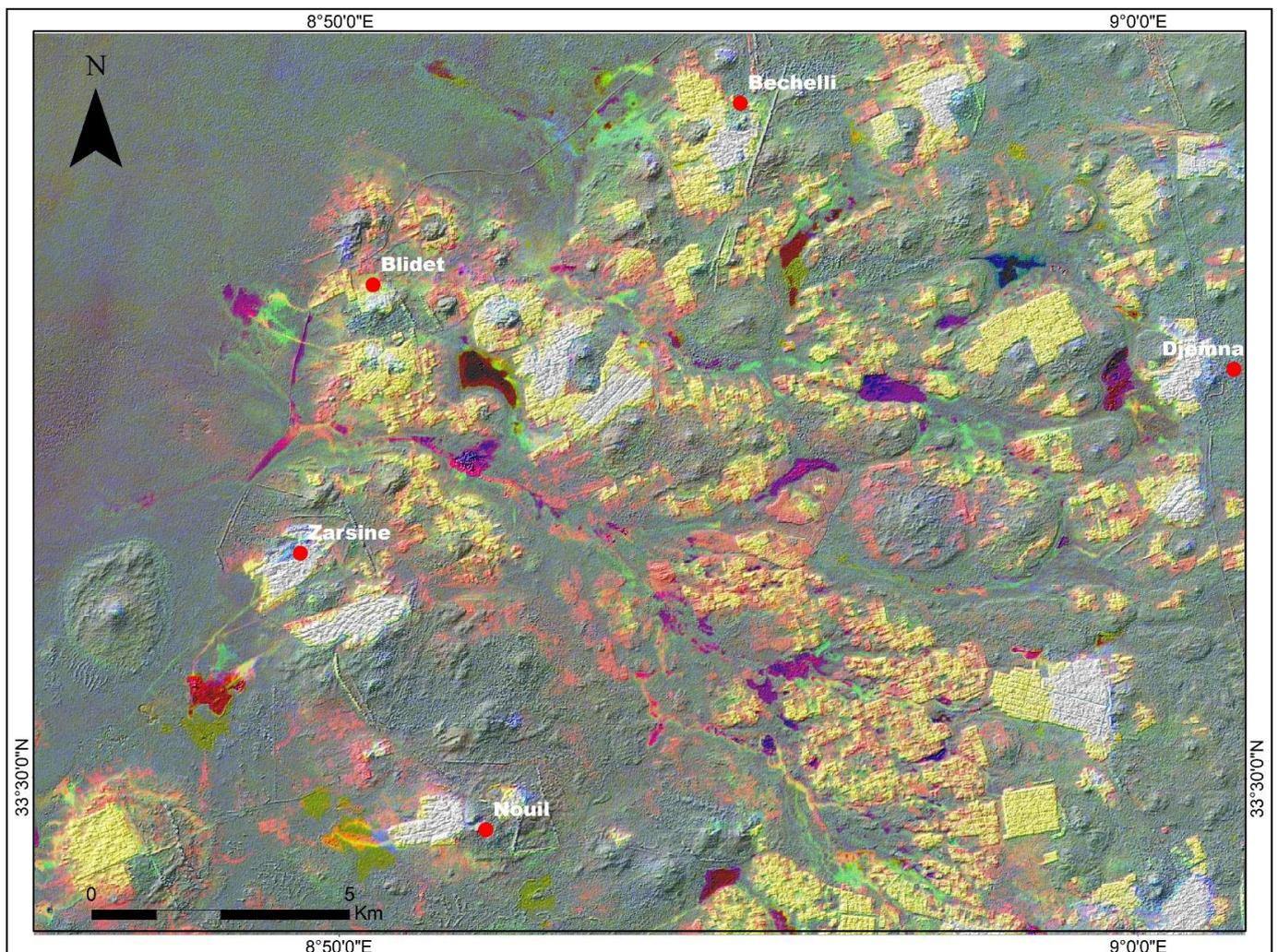


**Figure 3.33 : Synthèse sur l'évolution de la région de Nefzaoua combinant l'image multi date et le modèle numérique de terrain TandemX sans effet d'ombrage.**

Cela nous a permis de mettre en évidence des vestiges de tertres, qui ne sont plus visibles sur les images satellites (dont Google Earth), mais dont la topographie reste encore visible sur le MNT (Figure 3.33). En effet les taches blanches de forme circulaire (disques)

indiquent les vestiges des anciens tertres aujourd'hui taris. Un point bleu au centre de ces disques correspond à un petit bouquet de palmiers qui étaient encore en vie dans les années 1970, mais sont morts ou ont disparu depuis. On remarque aussi que la majorité de ces tertres sont entourés d'oasis modernes plus récentes, apparaissant en couleur jaune et rouge.

Cela met en évidence que les anciennes sources ont souvent été le point de départ de l'extension spectaculaire qu'a vécu la région, par agrandissement de la zone irriguée initiale. D'autres tertres sous forme de taches blanches localisées vers le sud-ouest de Zaafrane et ne portant pas de points bleus au centre peuvent être interprétés comme des tertres plus anciens. En effet ils ne sont pas visibles ou mentionnés comme sources dans la carte topographique de 1933. Hormis ces cas particuliers, la grande majorité des tertres visibles sur cette figure 3.33 a été identifiée à la fois sur le terrain et sur Google Earth.



**Figure 3.34 : Aggrandissement d'une partie de la figure précédente avec effet d'ombrage.**

La figure 3.34: est un agrandissement de la figure 3.33 qui la précède centré sur la région de Blidet avec une combinaison entre l'image multi-date et le modèle numérique de terrain TandemX avec effet ombrage. Sur cet extrait agrandi on voit clairement les variations de couleur de la composition multi-dates qui entourent les tertres. L'identification d'un paysage de terre devient facile, avec le tertre au milieu qui apparaît en gris, l'ancienne oasis (traditionnelle) qui apparaît en blanc, les premières extensions aux formes rectangulaires en jaune et les plus récentes en rouge.

La composition colorée de NDVI des trois dates nous a donc renseigné sur l'évolution du paysage oasien à travers l'extension des parcelles et illustre la rupture radicale avec l'ancien système d'irrigation, qui, comme nous l'avons vu, a été fortement modifié par l'introduction des forages profonds dans la région.

## **Synthèse et Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de passer en revue les différents types d'informations sur la région étudiée, que nous avons pu obtenir à partir des photos aériennes. Elles nous ont permis de faire remonter nos observations jusqu'en 1950 et ensuite, par les images des satellites, jusqu'à nos jours. Celles-ci sont de plus en plus accessibles aux non-spécialistes ; ainsi le site Google Earth, qui est très utilisé, permet d'avoir facilement une première vue actuelle du paysage. Ensuite, grâce au programme 'Time machine' il a été possible d'avoir une vision qualitative des changements que les images annuelles mettent en évidence. Nous avons ainsi observé l'évolution sur la période 1984-2018.

Pour une approche plus quantitative des changements au cours du temps, des images originales intéressantes ont été recherchées dans les archives disponibles. Nous avons retenu trois images enregistrées successivement en 1973, 1998, 2017 couvrant un écart de temps maximum. Elles proviennent cependant de capteurs de résolution et caractéristiques radiométriques nettement différentes. Pour permettre les comparaisons, nous avons calculé l'indice de végétation pour chacune des images après les avoir converties à une même résolution. C'est une façon simple de les rendre plus comparables en première approche. Des corrections radiométriques sophistiquées auraient permis une inter comparabilité plus rigoureuse, mais elles n'ont pas paru nécessaire dans notre cas où les contrastes sont très marqués entre les zones végétalisées (les oasis) et non végétalisées (les surfaces arides essentiellement sableuses).

L'indice de végétation est une bonne estimation de la densité de végétation verte au sol et, dans le cas du Nefzaoua, de l'extension des cultures irriguées, principalement les palmeraies. Pour bien mettre en évidence les changements, les trois images ont été combinées en une image multi-date où chacune est représentée par une couleur, les changements entre dates y apparaissant avec des couleurs spécifiques.

Les tertres sont de petits monticules que les modèles numériques de terrain classiques (résolution 30 m) caractérisent difficilement. Un nouveau MNT dérivé des satellites TandemX (résolution 10 m) a permis de mieux les reconnaître, surtout en le combinant avec l'image multi-date.

La simple observation des séries d'images « Time Machine » montre un changement spectaculaire des paysages du Nefzaoua, principalement une grande extension des cultures qui s'est accélérée dans la dernière décennie. Autour des oasis anciennes, souvent localisées près de tertres (source artésienne à l'origine de l'oasis) apparaissent de nouvelles zones irriguées de forme plus géométriques (rectangles, trapèze triangles). Sur une surface prospectée de 2750 km<sup>2</sup>, les zones irriguées sont passées entre 1976, 1998 et 2017 à respectivement 55, 132 puis à près de 200 km<sup>2</sup> (de 2 à 7,5% de la surface étudiée) avec une augmentation régulière et constante de 300 ha/an. Ces zones irriguées se sont particulièrement étendues dans la partie sud. Elles sont à relier au succès de la production de dattes, culture d'exportation.

Les tertres bien détectés sur l'image composite (multi-date + MNT) sont clairement menacés par cette extension et pour la plupart ont diminué de taille, voire disparu. Il est intéressant de comparer ces données récentes aux données de cartographie des tertres obtenues à partir des cartes anciennes. En se basant sur les données des cartes topographiques du Nefzaoua du début du 20<sup>e</sup> siècle près de 400 tertres ont été dénombrés, dont seulement trois sont cités comme taris et comblés. En 2019 et en se basant sur Google Earth ce nombre est réduit à 126, tous taris et à l'état de vestiges.

Ces tertres maintenant taris par l'exploitation intensive de la nappe souterraine sont en effet pour les habitants actuellement réduits à une source de sédiment meuble, tant pour le remblaiement des nouvelles parcelles conquises sur le chott, que pour la construction.

Or il semble bien que ces monticules de sable soient des structures particulières, qui méritent d'être mieux connues et participent du patrimoine de cette région. L'étude sédimentologique qui suit va permettre de comprendre leurs spécificités, leur origine et leur histoire.

# **Chapitre 4 : Étude sédimentologique des tertres artésiens du Nefzaoua**

## Introduction

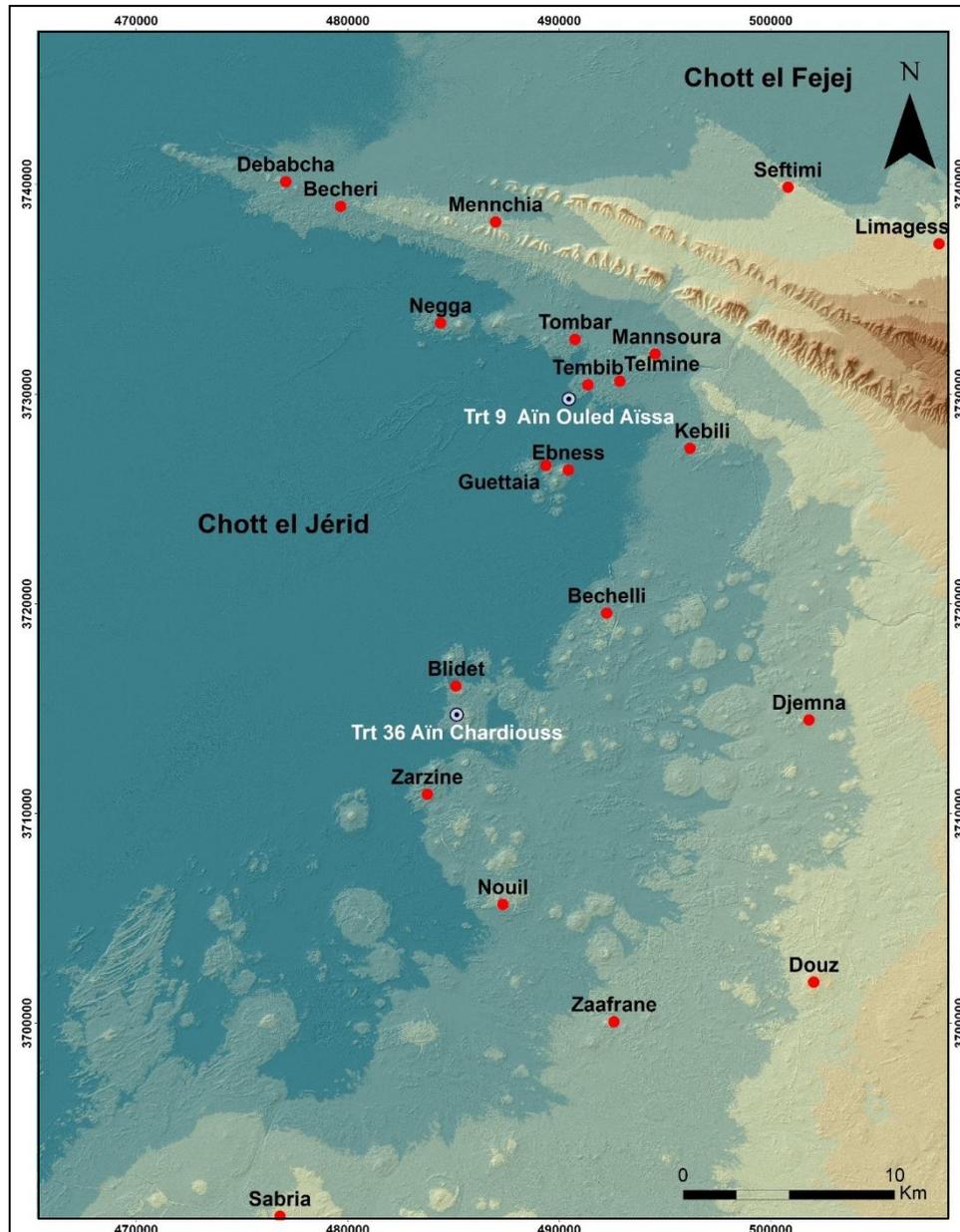
La compréhension de l'histoire des paysages oasiens, en particulierité les tertres de sources artésiennes, le changement évolutif depuis leur origine et leur dégradation destructive et menaçante ont nécessité une étude approfondie de leur mise en place. C'est l'objectif des analyses sédimentologiques étudiées dans ce chapitre. La succession stratigraphique des dépôts des tertres décrit un cycle sédimentaire à temps long, constituant des archives ayant enregistré des changements environnementaux ; ces archives sont d'autant plus importantes à étudier qu'elles sont arasées par les activités modernes comme nous l'avons mis en évidence dans la partie consacrée à la cartographie par télédétection (chapitre 3). C'est le démantèlement mécanique en cours des tertres qui nous a offert l'opportunité d'observer le cœur de leur structure et par la même en déduire leur mode de fonctionnement. Un peu comme un médecin légiste autopsie un corps pour étudier son mode de fonctionnement.

Les missions sur le terrain pour prélever et analyser ces archives sédimentaires ont permis tout d'abord l'observation géomorphologique d'un grand nombre de tertres, puis les descriptions et le prélèvement d'échantillons des coupes naturelles les plus exposées afin d'analyser au laboratoire les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques les plus caractéristiques des sédiments. Le démantèlement en cours des grands tertres sous l'action des pelles mécaniques, pour en prélever les matériaux, nous a permis d'observer des coupes fraîches, non encore érodées et donc faciles à étudier

Parmi tous les tertres repérés nous en avons retenus deux particulièrement intéressants, pour lesquels nous avons pu obtenir l'accord des propriétaires, et qui présentaient des possibilités de prospection, d'accès aux coupes et aux sites de prélèvement. Il s'agit du tertre d'Aïn Chardiouss situé dans le village de Blidet et du tertre d'Aïn Ouled Aissa situé dans la presqu'île de Kébili (respectivement numéros 36 et 9) ; ils seront présentés en détail dans ce chapitre. L'objectif des prélèvements était de caractériser les sédiments constituant les tertres.

## 4.1 Matériel et méthodes

### 4.1.1 Localisation des tertres analysés



**Figure 4.1 : Localisation des tertres où ont été réalisés les descriptions et prélèvements des coupes ainsi que les sondages à la tarière. MNT TandemX 10 m.**

Trois coupes ont été prélevées et échantillonnées dans le tertre d'Aïn Chardiouss et une coupe dans celui d'Aïn Ouled Aïssa.

### 4.1.2 Méthode de description et nomenclature

Les profils de coupe ont été effectués dans des fronts de carrières ouverts par des engins mécaniques. Ils mettent en évidence une surface fraîche sub-verticale de parfois une dizaine de mètres de hauteur où les strates peuvent être décrites de manière fine. Nous avons décrit les coupes depuis la partie la plus ancienne située à la base des coupes vers la plus récente située au sommet.

Pour les prélèvements à la tarière, la description se fera pour raisons de commodité dans l'ordre inverse. Pour la même raison, dans notre description, nous évoquerons plutôt le terme de "strate" et de "niveau" correspondant aux couches stratigraphiques plutôt que de "profil" et "d'horizons" qui sont propres à la pédologie. Les phases pédologiques concernent l'évolution physico-chimique des strates postérieures aux dépôts : l'oxydo-réduction et les redistributions/précipitations de sels (sulfates pour le gypse et carbonates pour le calcaire).

Étant donné que l'environnement sédimentaire est limité à l'espace du tertre en fonction de l'importance de la source, que les strates peuvent avoir des niveaux variables en fonction de leurs pentes de dépôt et sont parfois biseautées, les épaisseurs sont données à titre indicatif à l'endroit de leur description. Les accumulations de carbonates sont souvent discontinues et réparties de manière aléatoire au sein d'une même strate.

Nous avons dû échantillonner la coupe A Trt36, qui a la plus grande hauteur, en deux phases. Comme l'illustre la photo de la figure 4.4, l'échantillonnage du niveau supérieur (III) a été fait en utilisant une nacelle pour des raisons d'accessibilité. Nous avons ensuite été obligés de reprendre l'échantillonnage des niveaux II et I plus loin, en veillant à ce qu'il suive les mêmes stratifications. Au premier emplacement de la coupe, le niveau I était enterré sous une accumulation de sédiments remaniés, ce qui a justifié de se déplacer au deuxième emplacement de la coupe, où par contre le niveau III était incomplet. La numérotation des échantillons prélevés a été faite dans cet ordre. Les trois autres coupes B, C et D ont été échantillonnées à partir du bas et numérotées en sens inverse.

L'étude des coupes a été complétée par trois prélèvements à la tarière d'une profondeur de 1,60 m chacun, deux à Aïn Chardiouss, le troisième dans la source de Aïn Ouled Aïssa.

### 4.1.3 Analyses standard

86 échantillons en tout ont été analysés au Laboratoire des Eaux et des Sols de l'Institut des Régions Aride (IRA) de Médenine, Tunisie, en utilisant les protocoles fournis par ce laboratoire et basés sur le manuel de Pansu *et al.* (1998).

Les analyses standard réalisées au laboratoire de l'IRA sur les 86 échantillons (coupes et tarières) ont compris (le détail des méthodes sera donné en annexe) :

- Teneur en Carbone (C), méthode par oxydation Walkley Black (Walkley, 1947) ;
- Teneur en calcaire actif<sup>11</sup> (CA) ;
- Dosage du calcaire total (% CaCO<sub>3</sub>) par calcimètre de Bernard par mesure du dégazage de CO<sub>2</sub> après attaque avec HCl ;
- Teneur en Gypse (% CaSO<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>), méthode par précipitation au BaCl<sub>2</sub> ;
- Conductivité électrique (CE μS cm<sup>-1</sup>), mesuré par conductimètre ;
- pH, mesuré par pH mètre ;
- Granulométrie par voie humide (méthode de la pipette de Robinson ; Afnor, 2003) ;
- Granulométrie par tamisage à sec (17 tamis à progression logarithmique de 0.05 à 2 mm).

#### **Précision importante pour la détermination de la taille des particules :**

La mesure de la granulométrie à sec permet de mesurer la masse des fractions particulières des matériaux transportés par l'érosion éolienne. Ce tamisage sous-estime les quantités d'argile et de limons qui sont adhérentes aux particules de sable ou agglomérées. L'écart des résultats obtenu entre la méthode de tamisage à sec et la méthode de la pipette de Robinson est attesté par les images prises par microscopie électronique. Cependant la méthodologie utilisée au laboratoire de l'IRA pour la granulométrie en phase humide (méthode de la pipette de Robinson) ne convient pas pour les niveaux gypseux (solubilisation des particules fines, floculation, (Vieillefon, 1979). Les analyses spéciales pour les échantillons gypseux n'ont pas pu être réalisées faute d'équipement spécifique. Certains niveaux n'ont ainsi pas pu être analysés. Pour cette raison, et pour une présentation homogène de la fraction granulométrique, nous n'avons représenté que les trois classes principales de la

---

<sup>11</sup> Le calcaire actif est considéré comme la partie de carbonate de calcium compris dans la fraction granulométrique inférieure à 2 microns, vu son faible diamètre, cette fraction offre une surface spécifique importante et par conséquent sa solubilité et sa vitesse de dissolution sont élevées. Cette fraction correspond au calcaire précipité à froid par l'oxalate d'ammonium.

granulométrie à sec associées aux figures des 4 coupes réalisées : sables grossiers- sables fins - argiles + limons (fractions 2000-200 ; 200-50 et <50  $\mu\text{m}$ ).

De plus 10 échantillons de charbons ont été prélevés pour la datation  $^{14}\text{C}$  au Centre de datation par le radiocarbone de Lyon (UMR 5138, Archéologie et Archéométrie, Lyon) où ils ont été préparés avant d'être envoyés à l'accélérateur ARTEMIS de Saclay (UMS 2572, Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14). Là ils ont été transformés en graphite sur la plate-forme analytique ARTEMIS pour être datés selon la méthode AMS (Accelerator Mass Spectrometer, spectrométrie de masse par accélérateur). Enfin 10 échantillons ont été prélevés séparément pour des analyses au Microscope Électronique à Balayage (MEB).

#### **4.1.4 Méthodologie de l'utilisation du Microscope électronique à balayage (MEB) couplé avec une micro-sonde**

Ces analyses au MEB et au diffractomètre ont été effectuées au sein de la plate-forme analytique *Alysé* du Centre Île de France de l'I.R.D. (Institut de Recherche pour le Développement, Bondy, France).

Les échantillons font jusqu'à 1 cm de long. Ils doivent être si possible aplatis pour offrir un meilleur contact avec les portoirs métalliques. Ils sont collés sur un portoir avec du nitrate d'argent, conducteur d'électrons (figure 4.2) puis recouverts d'un film de carbone . Ainsi est assurée la conductivité électrique, sans interférer avec les pics de spectroscopie, car le recouvrement à l'or offre de meilleures photos mais avec une interférence plus grande pour les spectres de l'analyse chimique.



**Figure 4.2 : Echantillons collés sur un portoir a avec du nitrate d'argent.**

Le grossissement du microscope de marque Zeiss Evo ® (Carl Zeiss Ltd, UK) avec une accélération d'un voltage de 15kV, peut aller jusqu'à 10 000 X (objets de la taille de 1 µm). L'appareil permet de sélectionner sur l'image un point d'intérêt sur lequel la microsonde RX à énergie dispersive (EDX, Oxford Instruments, INCA Energy 350) permet d'identifier la minéralogie des constituants sur la base de leurs spectres de composition élémentaire, principaux éléments chimiques (en général de masse atomique égale ou supérieure à celle du Sodium) présents à cet endroit de l'échantillon.

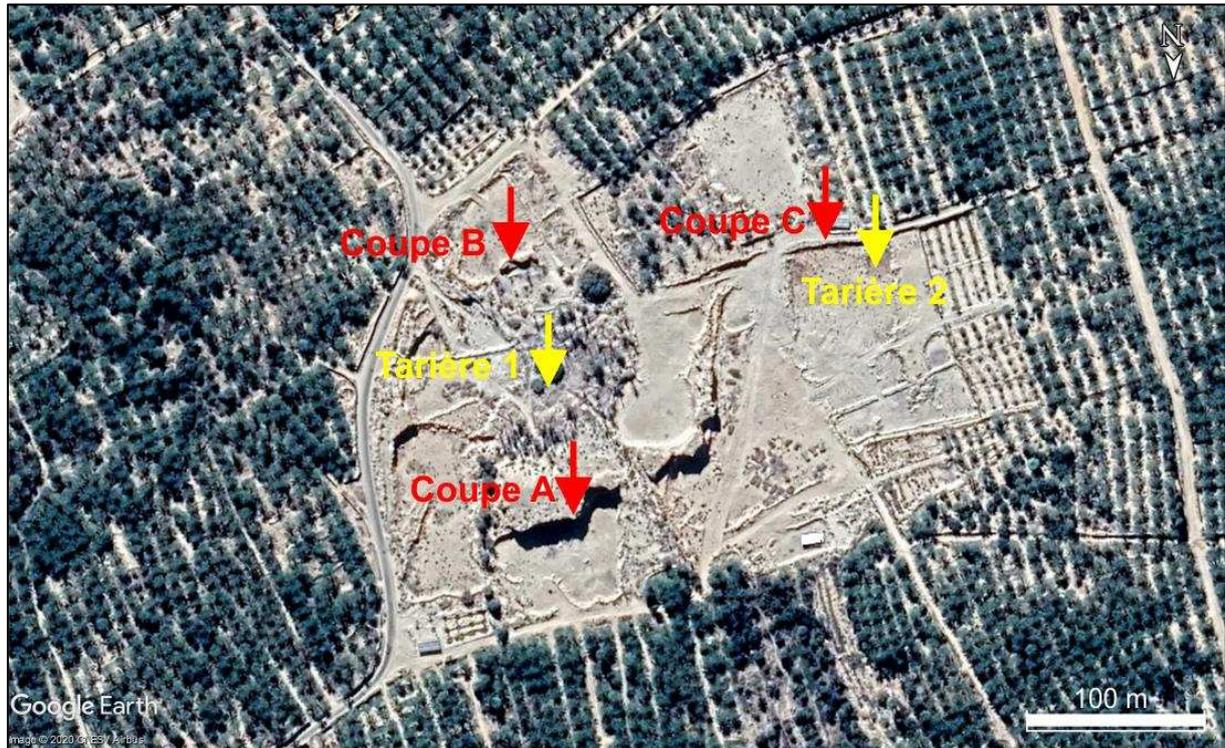
#### **4.1.5 Diffraction Rayons X**

La détermination minéralogique de différentes phases de deux échantillons provenant des coupes C Trt36 (C1/ TRT 36 CA) et D Trt9 (D6) s'est effectuée par diffraction aux rayons X (DRX, mesurée sur un diffractomètre de type Siemens D500 (Cu-Ka, 40kV, 30mA) :

- Sur des diagrammes de poudre (sédiment broyé), puis avec affinage sur la fraction fine ;
- Sur la fraction argileuse extraite après sédimentation de la fraction grossière sur une série de 3 lames orientées, glycolée et chauffée à 500° pendant 3 heures ;

## 4.2 Etude sédimentologique du tertre 36

### 4.2.1 Localisation des coupes du tertre 36



**Figure 4.3 : Emplacement des coupes A, B et C au sein du tertre 36 Ain Chardious (extrait Google Earth, date de prise de vue le 08/11/2018).**

Le tertre Trt36 d'Aïn Chardious se localise dans l'oasis près de Blidet au sud de Kébili (33°34'19.27"N, 8°50'24.39"E). Il fait à peu près 300 m de diamètre mesuré sur Google Earth. La prospection du site a montré la présence de vestiges d'une fondation (mur ?) au sommet du tertre, ainsi qu'un probable abattoir (ou cimetière à bétail) d'après les ossements trouvés. A noter également l'abondance de petits tessons de poterie en place et en surface, ainsi qu'un morceau en place de coquille d'œuf d'autruche. En effet, l'autruche sauvage, *Struthio camelus camelus*, était abondante dans les régions sahariennes et subsahariennes de Tunisie et n'a complètement disparu que vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (Bel-Hadj-Kacem et al. 1994).

Le tertre est très dégradé par le démantèlement de la butte par les bulldozers à sa périphérie (Figure 4.3). Cela a permis la mise à nu des profils des coupes A, B et C. (les coupes B et C ont été prélevées pour comparer leurs stratifications avec celle de la coupe A). Afin d'approfondir la recherche et de croiser les données, les coupes ont été complétées par deux

prélèvements à la tarière d'une profondeur de 1,60 m chacun, un dans la source et un deuxième dans le point le plus bas repéré dans le tertre.

### 4.3.2 La Coupe A Trt 36

La coupe A se situe au nord du tertre Trt 36. Elle mesure environ 13 m de hauteur, suggérant une durée de formation assez longue. La coupe A se décompose en 3 niveaux principaux, repérés à partir du bas de la coupe, le niveau I, le niveau II (subdivisé en inférieur A et supérieur B), et le niveau III (Figures 4.4 et 4.5). La stratification de dépôts éoliens y est nette, ainsi qu'une couche présentant des caractères marqués d'hydromorphie (processus dû à un excès d'eau temporaire ou permanent). Cette coupe présente en effet à la base des caractères gleyiques comme l'indiquent les couleurs pâles (le HUE de la charte de couleur Munsell™ d'un sol humide = 2,5Y ou 5Y et un chroma  $\leq 2$  sont nécessaires selon la World Reference Base, IUSS, 2016). Ces caractères indiquent un phénomène de réduction ou d'absence de fer, signe d'une présence d'eau permanente. Ils sont suivis de plusieurs niveaux oxymorphiques, avec des taches de couleur brun vif à orangé à la surface de certains micro-lits, autour des pores ou en manchons autour d'anciennes racines, suite à des remontées capillaires et à la fluctuation de la nappe.



**Figure 4.4 : Vue d'ensemble du front de la coupe à travers le tertre Trt 36 : prélèvement du niveau supérieur (III) mieux conservé à gauche, en utilisant une nacelle. A droite prélèvement des niveaux moyen (II) et inférieur (I), plus accessibles, en utilisant une simple échelle.**

Les propriétés gleyiques diffèrent des propriétés stagniques. Elles sont causées par la remontée d'un agent réducteur (essentiellement une nappe d'eau) créant une couche inférieure fortement réduite et une couche supérieure à couleurs oxymorphiques au contact des surfaces des agrégats. Dans certains sols, une seule de ces couches est présente.

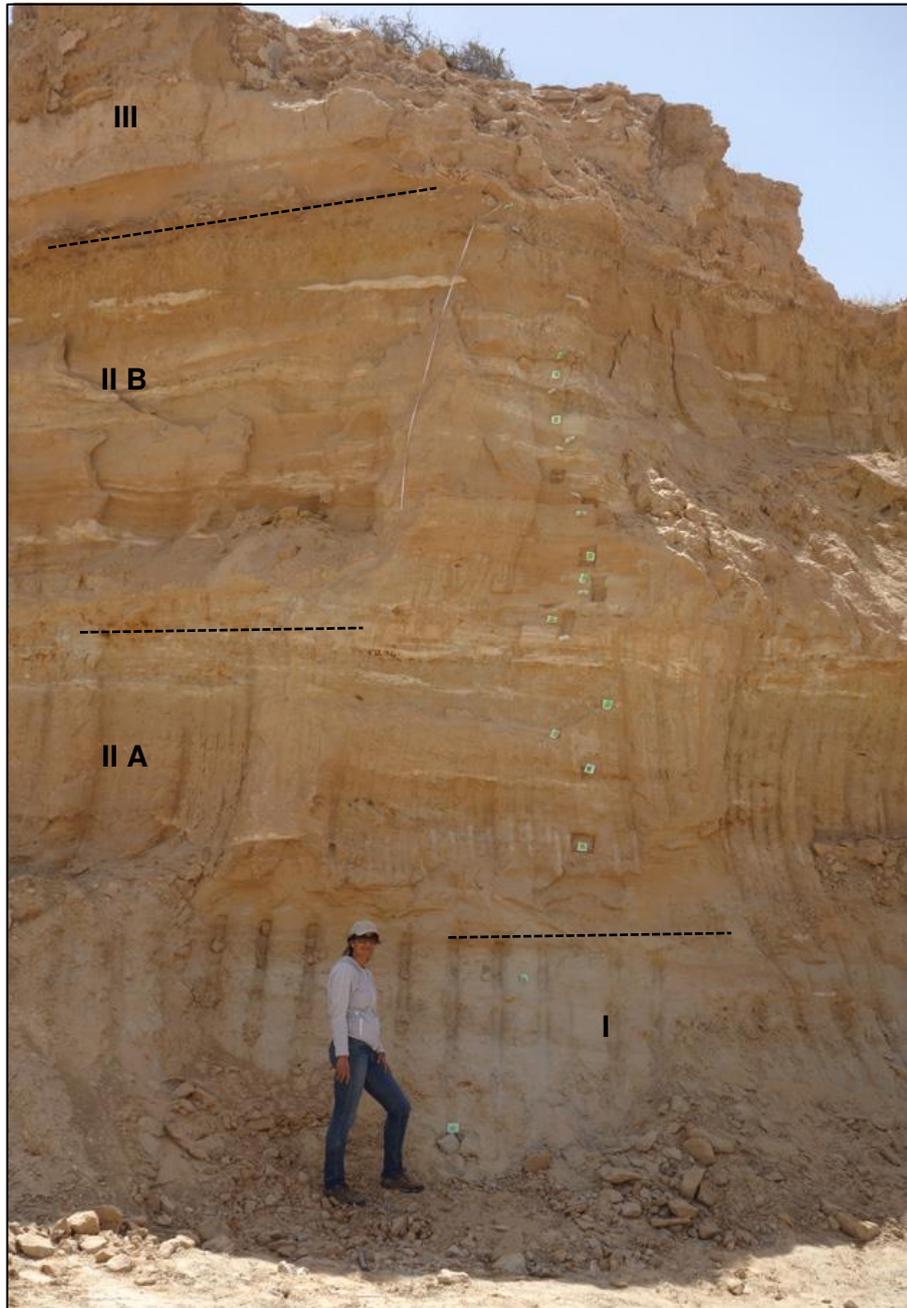


Figure 4.5 : vue d'ensemble de la coupe A.

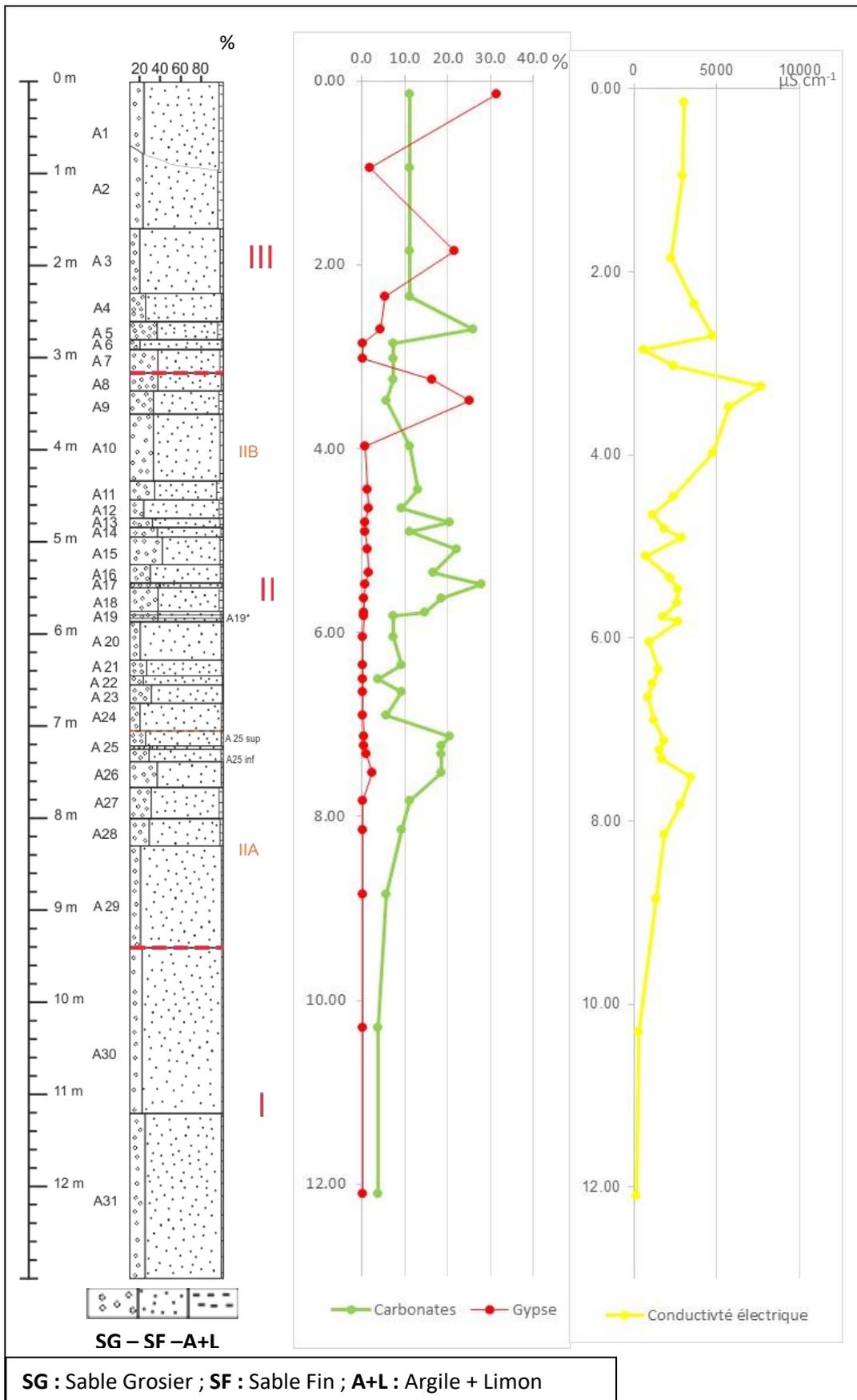


Figure 4.6 : log synthétique de la Coupe A.

#### **4.3.2.1 Le niveau inférieur I (échantillons A31-A30)**

Le niveau de base atteint 2,80 m d'épaisseur environ (Figure 4.6). Il apparaît grâce à l'excavation des terres situées aux alentours du centre du tertre. Il se compose de deux strates très peu différenciées. La plus profonde (A31) fait 1,0 m d'épaisseur surmontée par une autre couche (A30) épaisse de 1,80 m environ. La couleur est jaune pâle (5Y8/2). Cette couleur est caractéristique des milieux réduits (à oxydes de fer réduit ou sans fer) dans des conditions à hydromorphie permanente. Les phénomènes de réduction dans les sols sont dus à la disparition de l'oxygène, pour une grande part liée à l'activité des micro-organismes. L'apport d'eau et la matière organique sont nécessaires pour provoquer la réduction du fer, sa solubilisation sous forme de  $Fe^{2+}$  (fer ferreux de couleur vert-bleu) et donc sa mobilisation et son évacuation du milieu. Ce niveau sans matière organique, très sableux, à sables fins ( $\approx 85\%$ ) a une conductivité électrique basse ( $>0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ). Les deux niveaux décrits qui paraissent différents sur le terrain se sont révélés finalement assez semblables après analyses. La transition avec le niveau II est soulignée par un changement de couleur brutal avec des teintes de fer oxydé ( $Fe^{3+}$  ou fer ferrique plus sombre et orangé).

#### **4.3.2.2 Le niveau intermédiaire II**

Le niveau intermédiaire II se subdivise en deux ensembles IIA et IIB qui se différencient par la teneur en carbonates et en sels (Figure 4.7).

##### **4.3.2.2.1 Le niveau inférieur du niveau intermédiaire : II-A (échantillons A29 à A26)**

Ce niveau de 2,0 m environ est composé de 4 strates distinctes selon leur couleur (Figure 4.6). Il est finement stratifié. Il semblerait que la sédimentation se soit faite dans un environnement aqueux sans que le niveau de l'eau permette le développement de sédiments fortement réduits. Les strates de quelques centimètres d'épaisseur ont une couleur brun jaunâtre clair (10YR6/4) mais le niveau supérieur est plus réduit, de couleur jaune pâle (2,5Y7/4) avec des taches réticulées. Ces strates contiennent un peu de matière organique (jusqu'à 2,8 %). La conductivité électrique augmente progressivement depuis la base ( $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ ) vers le sommet ( $3,4 \text{ dS m}^{-1}$ ) de cet ensemble, comme les teneurs en carbonates (de 5,6 à 18,5 %) ainsi que les teneurs en argile plus limons (de 13,5 à 27%.<sup>12</sup>).

---

1 décisiemens/mètre [ $\text{dS m}^{-1}$ ] = 100 millisiemens/mètre [ $\text{mS m}^{-1}$ ] = 1000 microsiemens/centimètre [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ]



**Figure 4.7 : Limite entre les deux sous ensembles du niveau II. Le cercle indique la zone de prélèvement de l'échantillon Trt 36 A-25 pour l'analyse microscopique de l'organisation des matériaux. Ce niveau a un contact brutal rectiligne avec l'ensemble sus-jacent.**



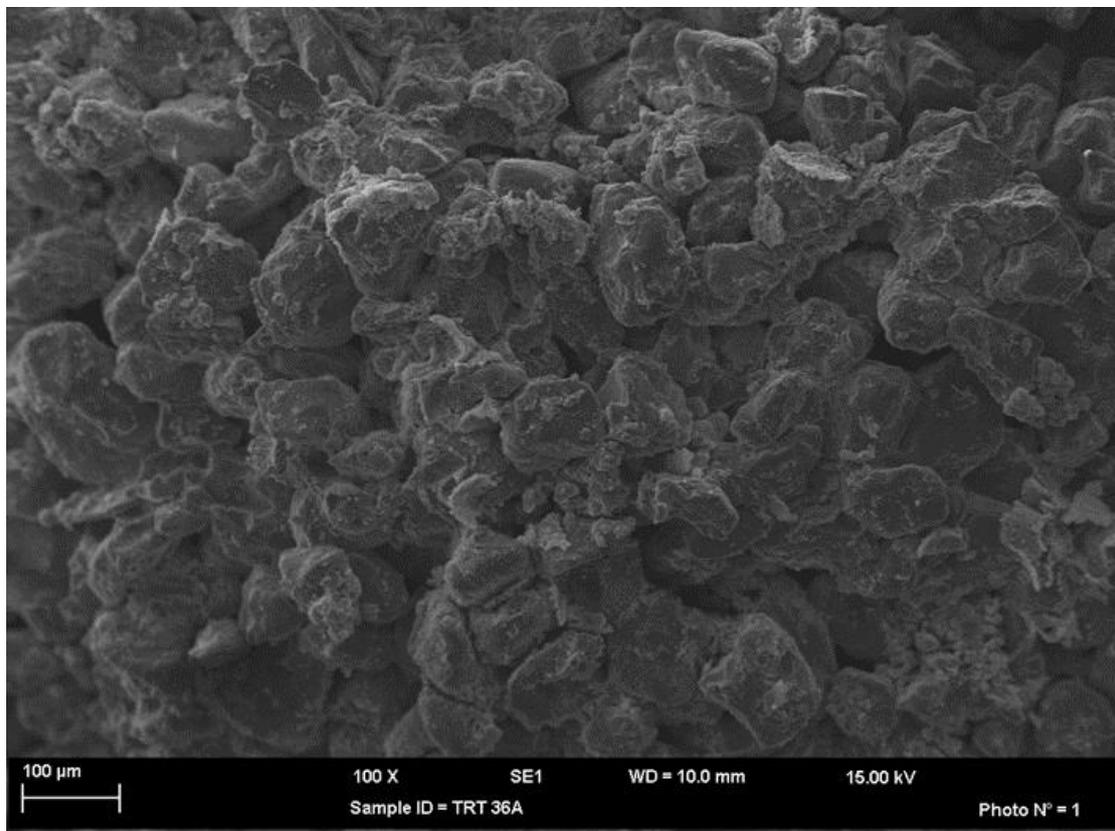
**Figure 4.8 : Détail de l'échantillon Trt 36A-25 (voir cercle figure précédente). Taches d'oxyde de fer (orange-rouille) associées à des taches noires d'oxyde de manganèse. Morphologiquement la réoxydation du fer se traduit par deux effets :**

- un changement de la couleur du sol, lié à l'apparition de composés ferriques de teintes brunes à jaune rouge ;

- une immobilisation des composés du fer dans le sol.

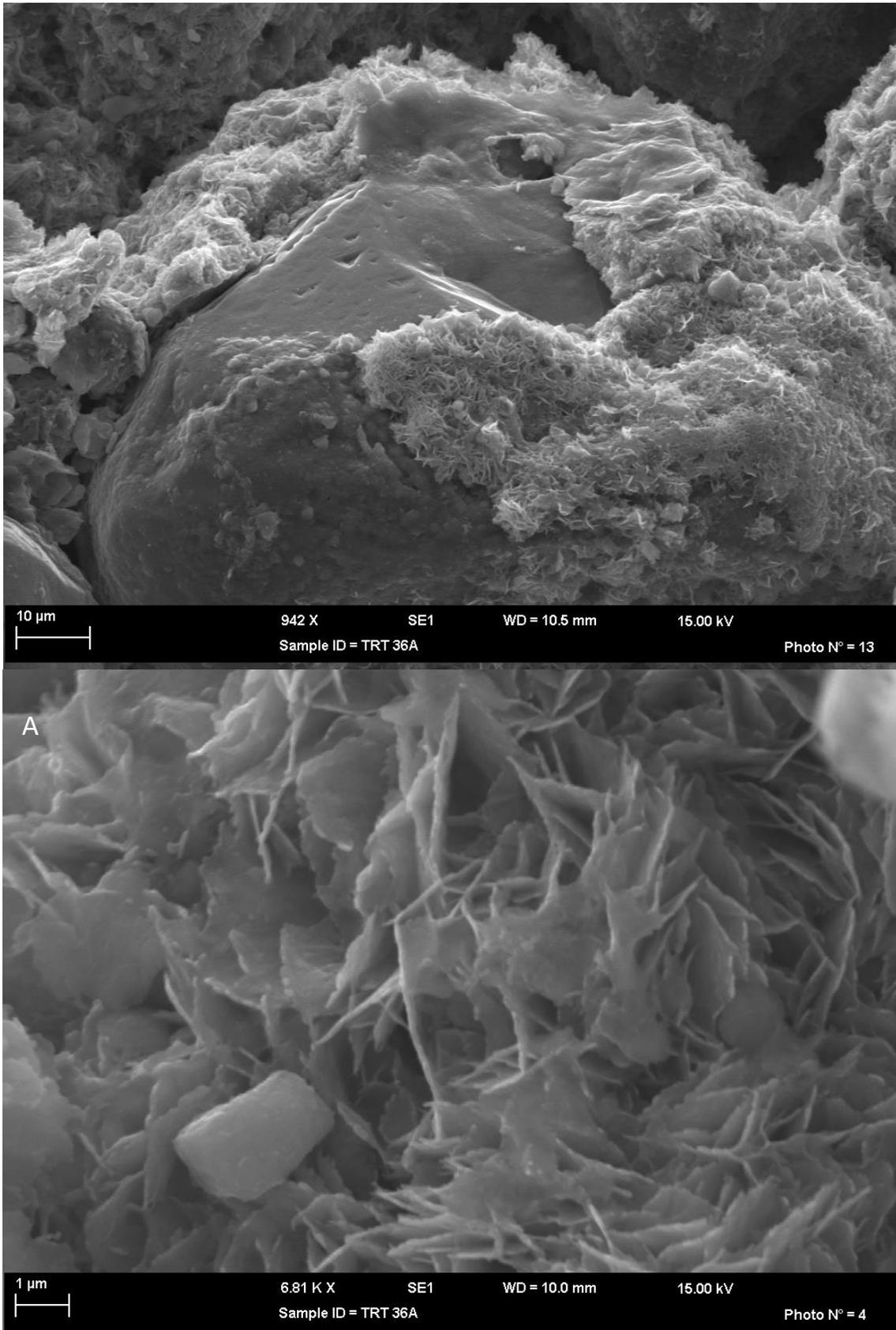
Dans les gleys, les ségrégations de couleur se localisent surtout autour des pores et, dans les horizons de surface, autour des racines (Bloomfield, 1952 ; Blumel, 1962 ; Vizier, 1992). Cela explique la présence de taches d'oxydation dans certains endroits (Figures 4.7 et 4.8). Parfois associées aux taches rouilles, les taches noires sont dues à des précipitations d'oxyde de manganèse ( $MnO_2$ ) qui est encore plus mobile que le fer dans des conditions d'oxydo-réduction.

Notre étude au MEB a donc cherché à identifier des indices de ces phénomènes sur l'échantillon prélevé à cet effet (Trt36A-25), qui a été divisé en deux fractions selon leur couleur dominante (noire et rouge).



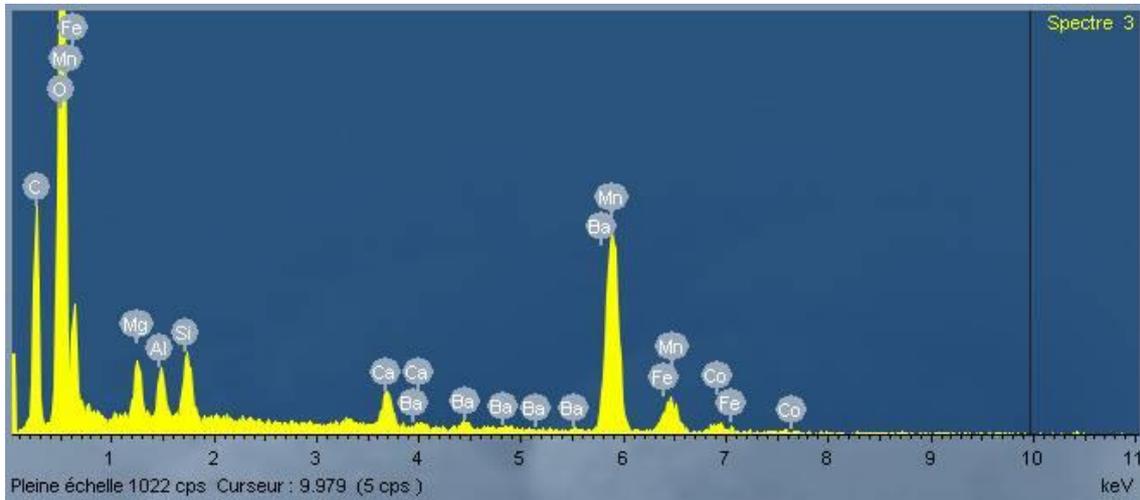
**Figure 4.9 : Vue d'ensemble de la photographie au MEB de l'échantillon Trt 36 A-25 (fraction noire).**

On remarque dans la figure 4.9 essentiellement des grains de quartz de taille relativement homogène de l'ordre de 80  $\mu m$ , typique des sables éoliens. La majorité des grains présente des revêtements étudiés plus en détail sur la figure suivante.



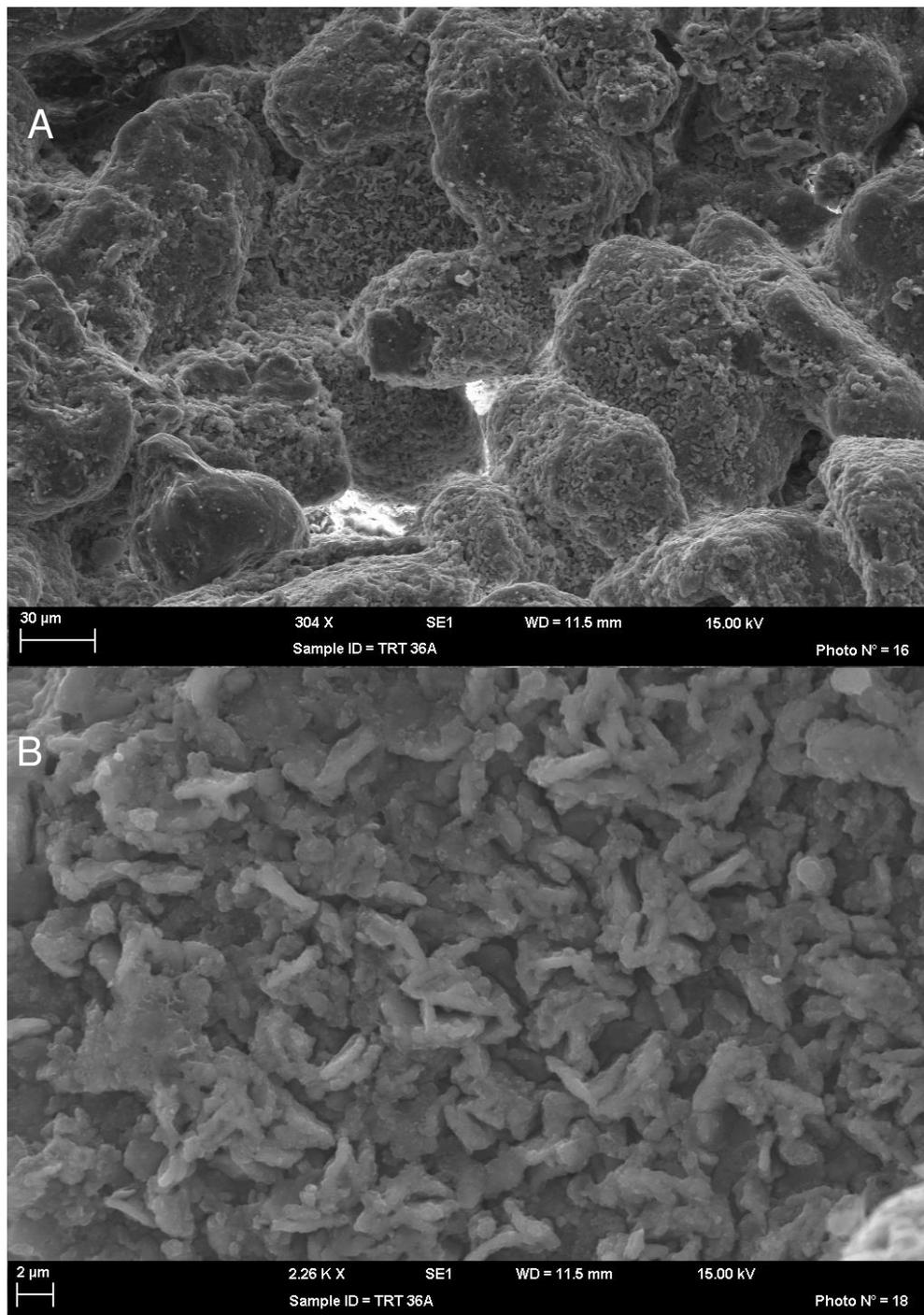
**Figure 4.10 : A échantillon Trt36 A-25 (revêtement noir sur un grain de quartz avec des marques de dissolution triangulaires) ; B Zoom sur un revêtement : cristaux lamellaires de  $\text{MnO}_2$ .**

Sur la figure 4.10 A, les revêtements entourant un grain de quartz avec des marques de dissolution dans un environnement aqueux (Niftah et al., 2005), apparaissent sous la forme d'un enchevêtrement de cristaux aplatis d'oxydes ou d'hydroxydes de manganèse (difficiles à déterminer en diffraction RX) (Figure 4.10 B). En pointant la sonde sur un de ces revêtements nous avons obtenu le spectre suivant (Figure 4.11).



**Figure 4.11 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36A-25 (fraction noire).**

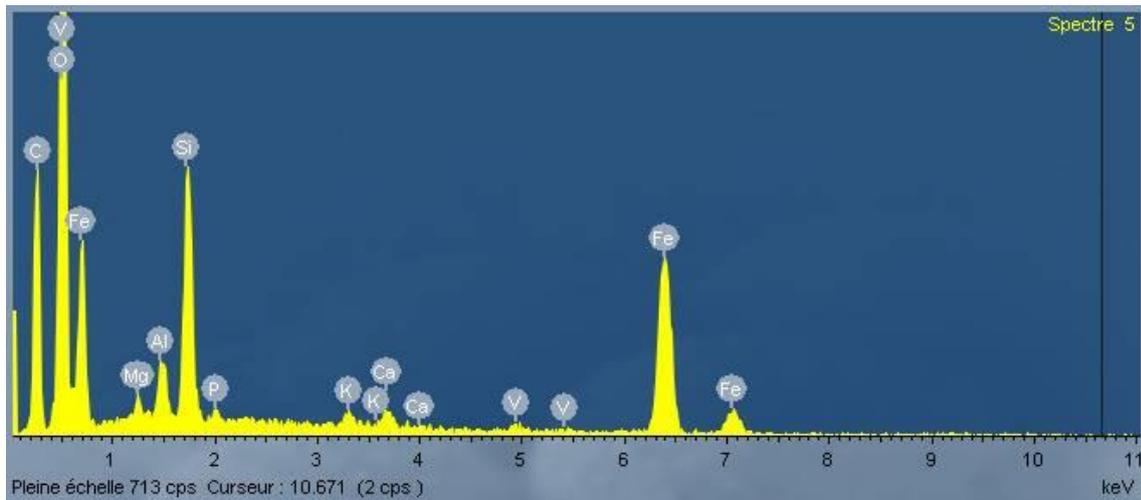
Cette figure 4.11 présente plusieurs pics : des pics importants de manganèse (Mn), et de la présence d'un peu d'argile (pics Al et Mg associés à Si), et des traces de Ba, Co, Ni et Fe. Ces observations confirment que le niveau IIA a subi à sa base (c.-à-d. à la limite entre les niveaux IIA et IIB) des phénomènes d'oxydo-réduction laissant supposer des fluctuations de nappes d'eau confirmées par les figures de dissolution du grain de quartz. Celles-ci se manifestent comme nous venons de le voir par des dépôts d'oxyde de manganèse de couleur noire, mais aussi d'efflorescences centimétriques ferrugineuses rouges (10R 4/8), le long de cette limite, signe d'une discontinuité porale dans la circulation de l'eau.



**Figure 4.12 : Observation au MEB des revêtements d'oxyde de fer sur l'échantillon Trt36 A-25 (fraction rouge) ; B détail de l'image A.**

L'observation au MEB de la fraction rouge du même échantillon Trt36A-25 (Figure 4.12), montre ici clairement des grains de quartz éoliens de taille très homogène de 100 µm de diamètre environ, avec des points d'impacts enserrés dans un ciment (A). Ce ciment en revêtement est composé par endroits d'oxyde de manganèse en micro-lames ou feuillets de 1 µm de large et très fines, mais surtout d'oxydes de fer en bâtonnets aux extrémités arrondies

de 2  $\mu\text{m}$  de long et de 0,2  $\mu\text{m}$  de large (B), comme le montre le spectre de la figure 4.13. Les argiles sont de type kaolinite, illite, avec des traces de smectite et de palygorskite.

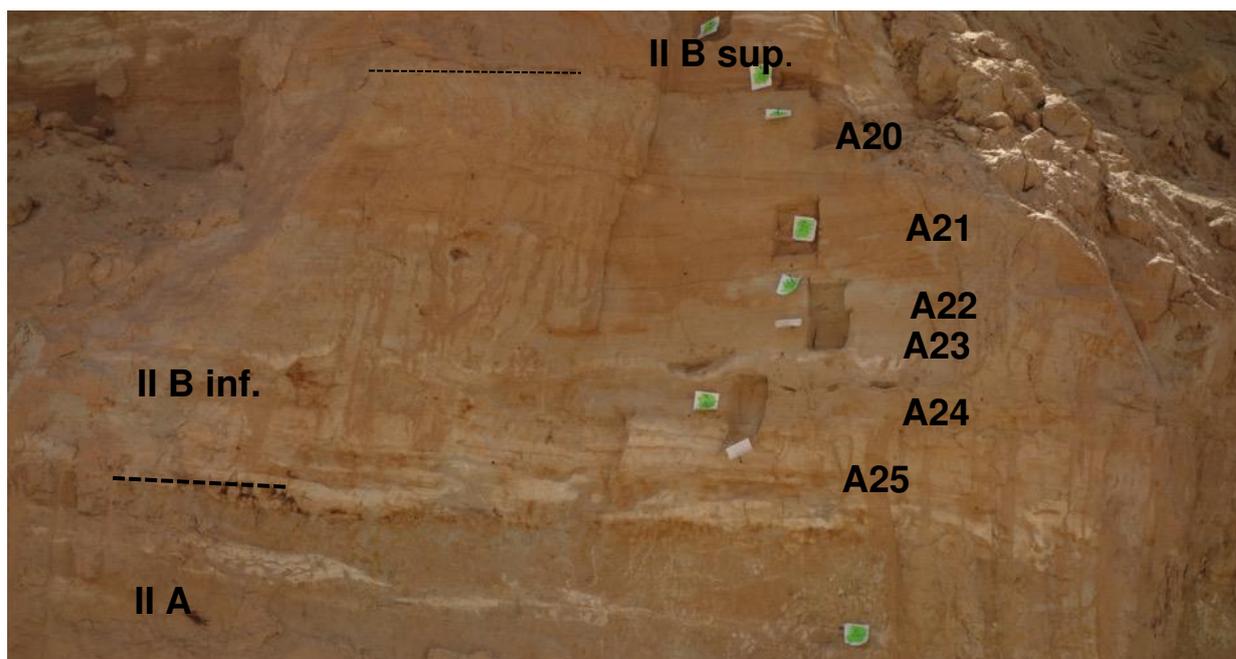


**Figure 4.13 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36A-25 (fraction rouge).**

#### **4.3.2.2.2 Le niveau supérieur du niveau intermédiaire II-B (échantillons A25 à A8)**

L'observation détaillée nous a permis de distinguer deux parties dans le niveau II-B (inférieure et supérieure).

La partie inférieure de la série II B fait environ 1,40 m d'épaisseur, entre A25 et A20. Ce niveau présente une conductivité électrique  $<2$  dS dans son ensemble et se distingue ainsi des niveaux sous-jacents et sus-jacents plus salés (Figure 4.14). Les séries sédimentaires, peu distinctes, débutent par un niveau carbonaté (A25) de 30 cm d'épaisseur environ. Elles sont très sableuses, entre 75 et 85 % de sable fin, et présentent un litage très fin. Les couleurs varient du brun jaunâtre clair au brun pâle et au jaune pâle (10YR 6/4-7/3-2,5Y7/3), les taches d'oxydo-réduction sont très peu visibles et ont des limites très floues. Les niveaux sont peu carbonatés.



**Figure 4.14 : Détails du niveau intermédiaire II : II B inf.**

La partie supérieure de la série IIB (Figure 4.15) entre les niveaux A8 et A19 fait 2,65 m d'épaisseur (entre 3,20 et 5,85 m), présente une conductivité électrique plus élevée que la partie IIB inférieure ; les teneurs en argile sont également supérieures à celles des strates de la partie inférieure. Ce niveau est également associé à une teneur plus importante de sables grossiers. Cette granulométrie ne correspond pas à une granulométrie typique de dépôts éoliens mais plutôt à des dépôts sédimentaires en milieu hydrique soumis à une forte évaporation. Cela se traduit par des concentrations plus importantes en sels (conductivité électrique élevée) concentrés grâce à des remontées capillaires permettant la néoformation de carbonates, parfois sous forme d'amas pulvérulents ou de croûtes discontinues disposées selon les strates. Ces strates constituent des discontinuités dans la connectivité des pores et favorisent les précipitations de sels. Les couleurs vont du brun jaunâtre au jaune brunâtre (10YR 5/6, 6/6) et brun jaunâtre clair (10YR6/4 à 2,5Y6/3) à des couleurs plus pâles, brun pâle à brun très pâle (10YR 6/3, et 7/3). Les teintes les plus pâles correspondent aux niveaux carbonatés. On observe une stratification parfois très fine soulignée par des niveaux de sables plus grossiers. Les niveaux supérieurs de cet ensemble, correspondant aux niveaux A8 et A9, sont gypseux et correspondent aux couches les plus salées (de 5,7 à 7,7 dS cm<sup>-1</sup>).

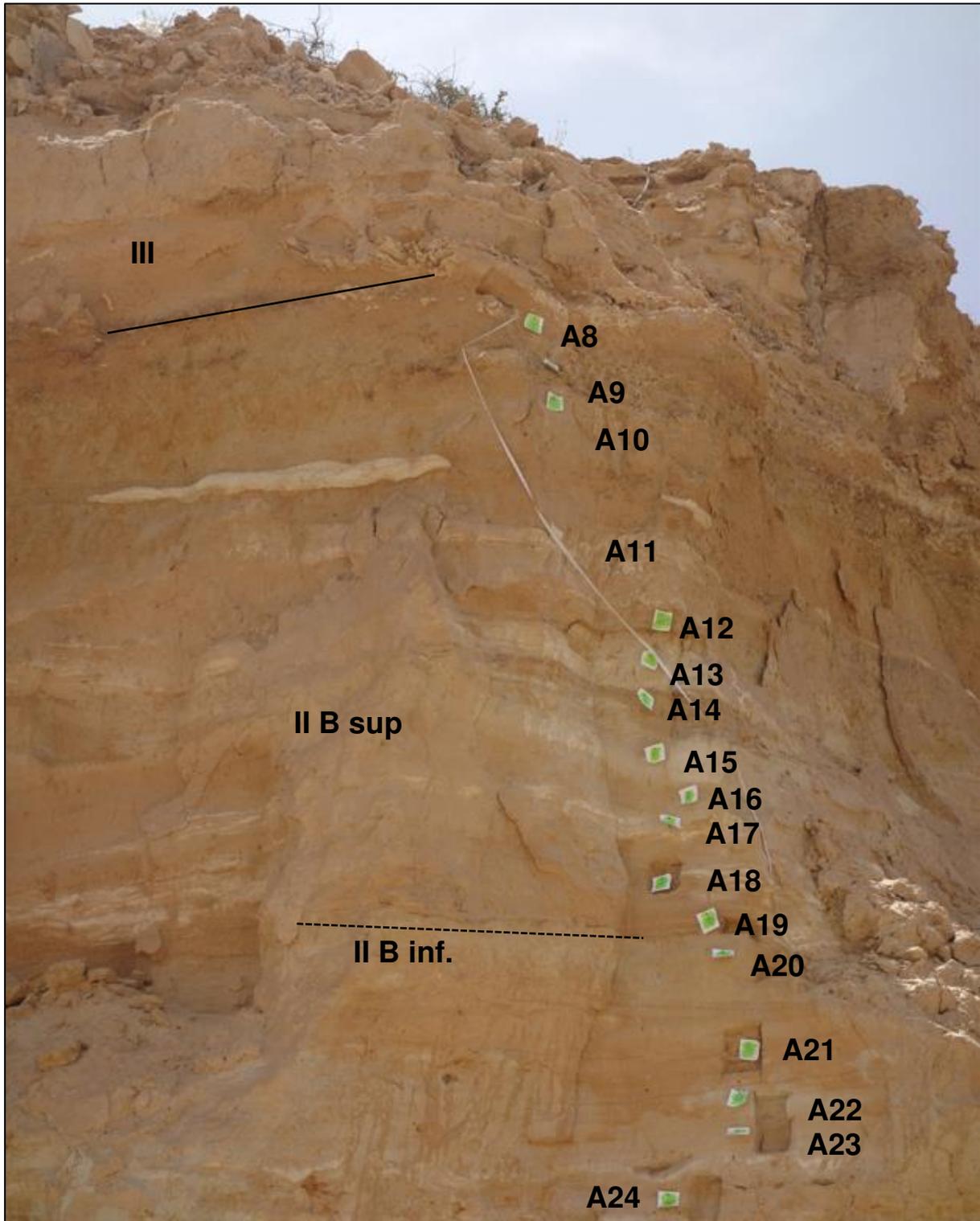
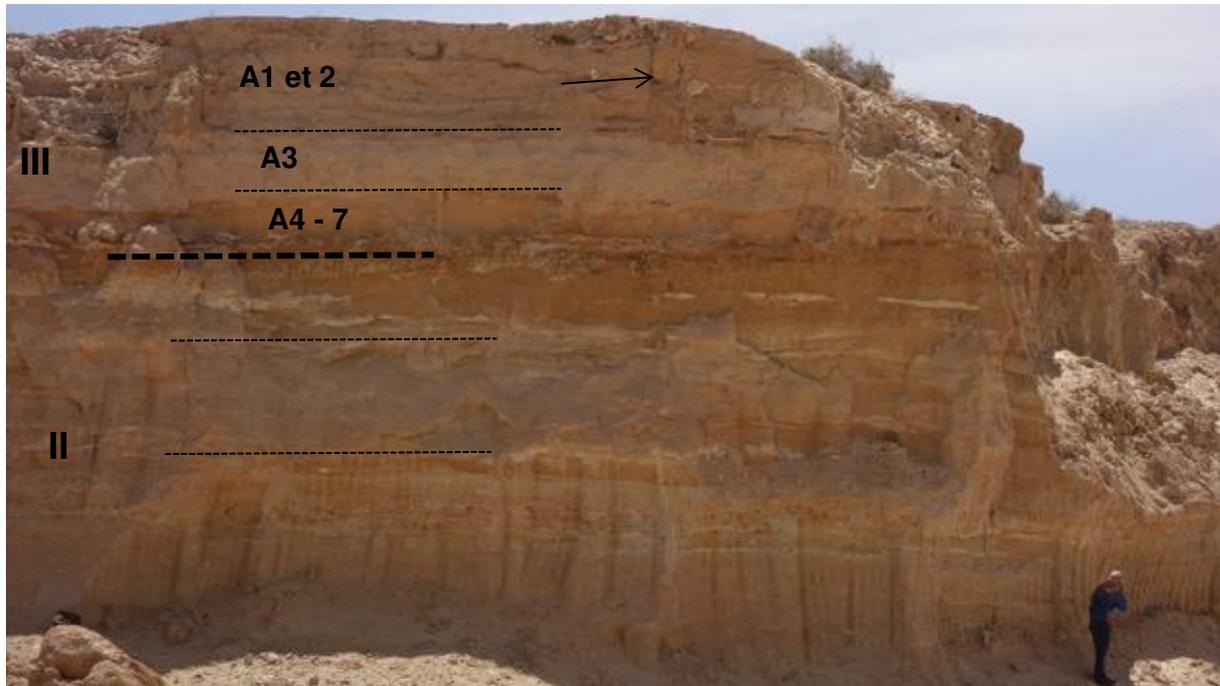


Figure 4.15 : Détails du niveau supérieur II B. Remarquer les concentrations de carbonates blancs allongés dans le sens des strates.

### 4.3.2.3 Le niveau supérieur III (échantillons A1 à A7)



**Figure 4.16 : Vue d'ensemble de la coupe avec les détails du niveau supérieur III. La flèche souligne les traces d'une fondation.**

Les strates A4 à A7 sont situées au-dessus du niveau très salé à gypse (Figure 4.16). Elles ont une couleur brun jaunâtre (10YR 5/6 à 6/6). Les strates ont une conductivité élevée, excepté le niveau A6 peu épais (15 cm), composé de plus de 90 % de sable fin, indiquant une courte modification des conditions environnementales. Le niveau A5 sus-jacent, carbonaté, possède d'importantes teneurs en sables grossiers. Le niveau A4 est plus riche en matière organique.

Le niveau A3 de couleur brun jaunâtre clair (10YR 6/4) correspond à un niveau massif, contenant 22 % de gypse et plus de 80 % de sables fins au tamisage. Les sables indiquent l'origine éolienne de cet encroûtement à ciment gypseux. A noter que l'encroûtement gypseux constitue de par sa rigidité et sa compacité un facteur de stabilité et de conservation de la topographie (Khatteli, 1981).

Les strates A1 et A2 correspondent à un matériau remanié. Le niveau de surface est gypseux, le niveau A2 est constitué de fragments divers qui pourraient correspondre à un tas de déblais issu d'un curage de la source. Dans les strates A1 et A2 nous avons identifié la présence de fondations anciennes qui pourraient correspondre à un mur. Nous ne disposons pas de données archéologiques précises sur la région du Nefzaoua, mais des études dans la

région de Guettaia (Ori et al., 2001) ont donné un âge probable de 700 ans aux murs des maisons d'un village abandonné, situés dans la partie supérieure d'un tertre, ce qui indique un âge probable de l'installation anthropique au sommet de ce tertre.

### **4.3.3 Synthèse de la coupe A**

L'étude de cette coupe A, montre que la base du tertre (niveau I) est construite sur des dépôts éoliens à sables fins, à faible conductivité électrique, hydromorphes et réduits, témoignant de leur ennoyage. Le niveau intermédiaire (II) présente deux cycles sédimentaires distincts (A et B) avec des changements brutaux dans la granulométrie des sédiments et dans leur conductivité électrique. Le niveau supérieur (II B) se subdivise également en deux parties, avec une partie inférieure, à plus faible conductivité électrique, et à dominante de sables fins et un niveau supérieur finement stratifié en bancs très fins, plus riche en sables grossiers, avec de nombreux niveaux carbonatés. Ces niveaux présentent des fluctuations dans l'hydromorphie avec de nombreuses taches montrant des variations du niveau de nappe. Cela suggère une origine paléo-lacustre du dépôt. Les dépôts les plus riches en matière organique sont souvent localisés à la limite entre les différents niveaux. Le sommet du niveau intermédiaire II B est salé et gypseux. L'ensemble supérieur (III) ne présente aucune trace d'hydromorphie. Il débute par un niveau éolien de sables très fins peu salés surmonté par des dépôts de gypse indurés. Ce niveau a été l'objet de perturbations anthropiques récentes (os, fragments de poterie, éléments de fondations, etc...). Les datations des charbons  $^{14}\text{C}$  effectuées dans ce foyer ont donné un âge estimé à 730 ans (elles seront étudiées dans la 5<sup>ème</sup> partie de ce chapitre sur les datations au radiocarbone).

#### 4.3.4 La coupe B Trt 36

La coupe B se situe au SSE du tertre 36 (voir Figure 4.1 situation) et mesure 5 m de hauteur (Figure 4.17).

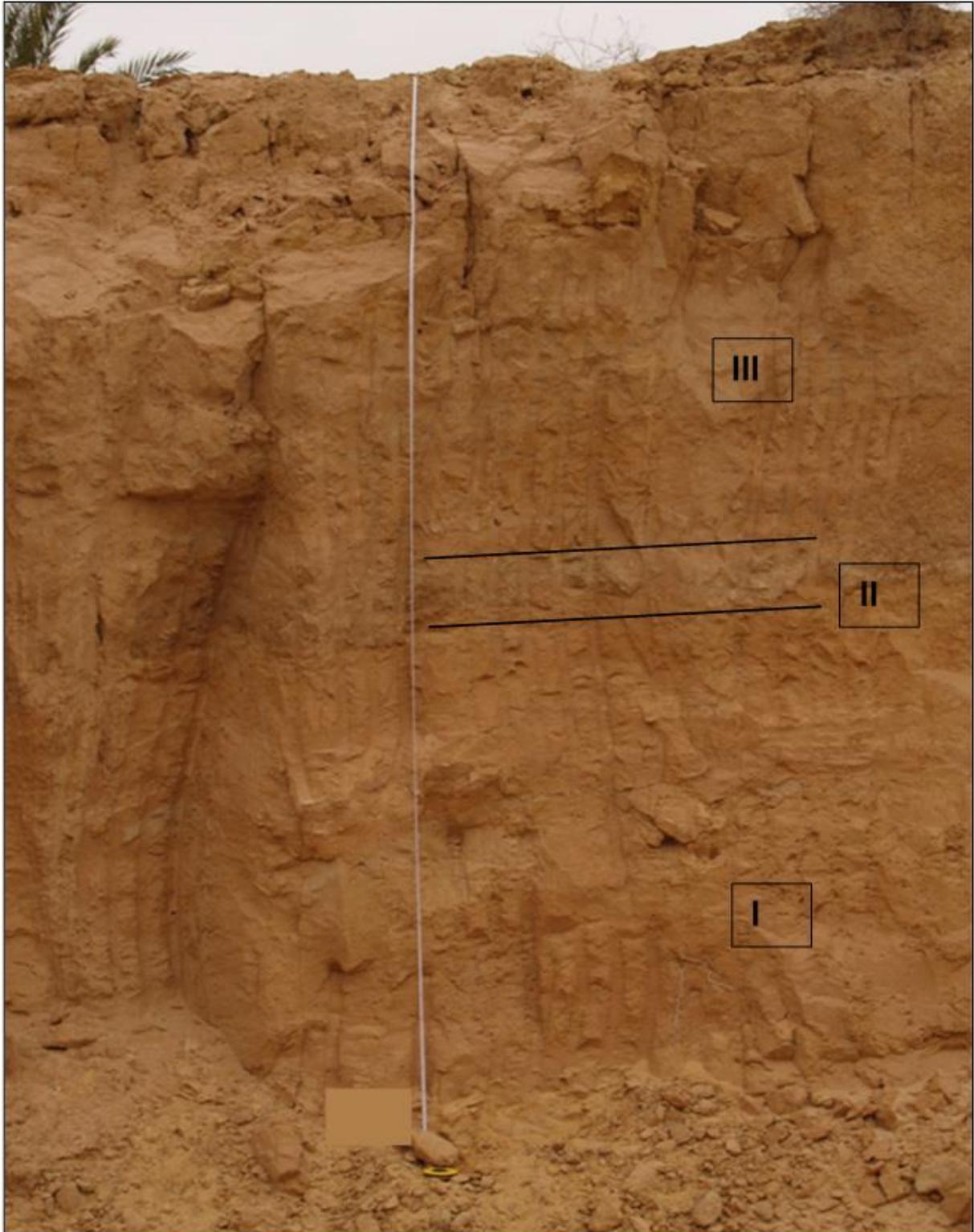


Figure 4.17 : Photographie de la coupe B (vue d'ensemble avant rafraîchissement et prélèvement).

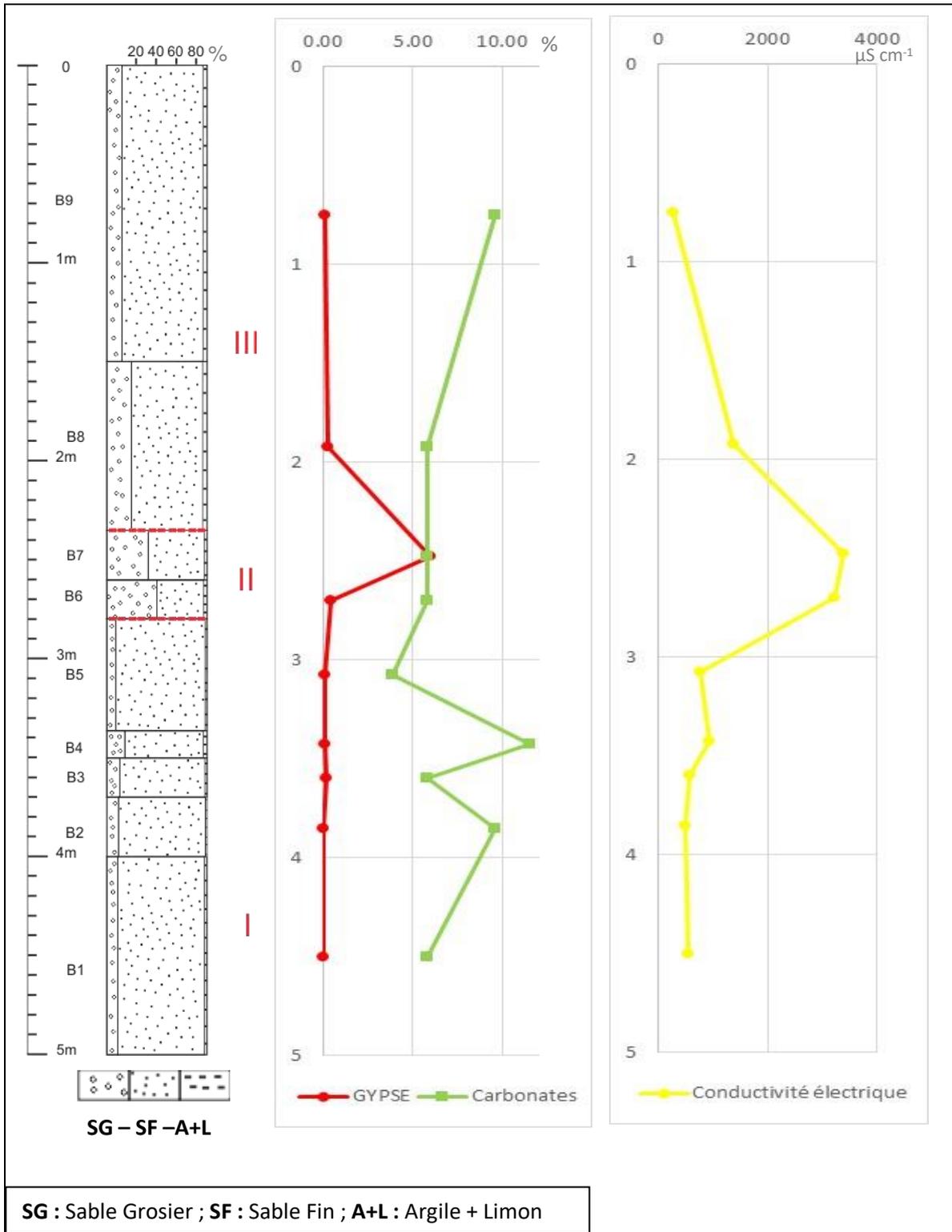


Figure 4.18 : Log synthétique de la Coupe B.

#### 4.3.4.1 Le niveau inférieur I (échantillons B1 à B5)

Le niveau de base, de 2,20 m d'épaisseur environ, a une stratigraphie très peu différenciée (Figure 4.18). Le niveau très sableux, à sables fins ( $\approx 90\%$ ) de couleur 10YR6/6 jaune brunâtre (B1 et B5) à 10YR6/4 brun jaunâtre clair (B2 - B4), présente une conductivité électrique basse ( $>0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ). L'échantillon B1, qui se caractérise par un chevelu micro lité de couleur foncée (Figure 4.19 X), est riche en matière organique (7.2 %). Il a été sujet d'analyses au MEB pour préciser l'origine de cette coloration, qui n'est pas due à la présence d'oxyde.

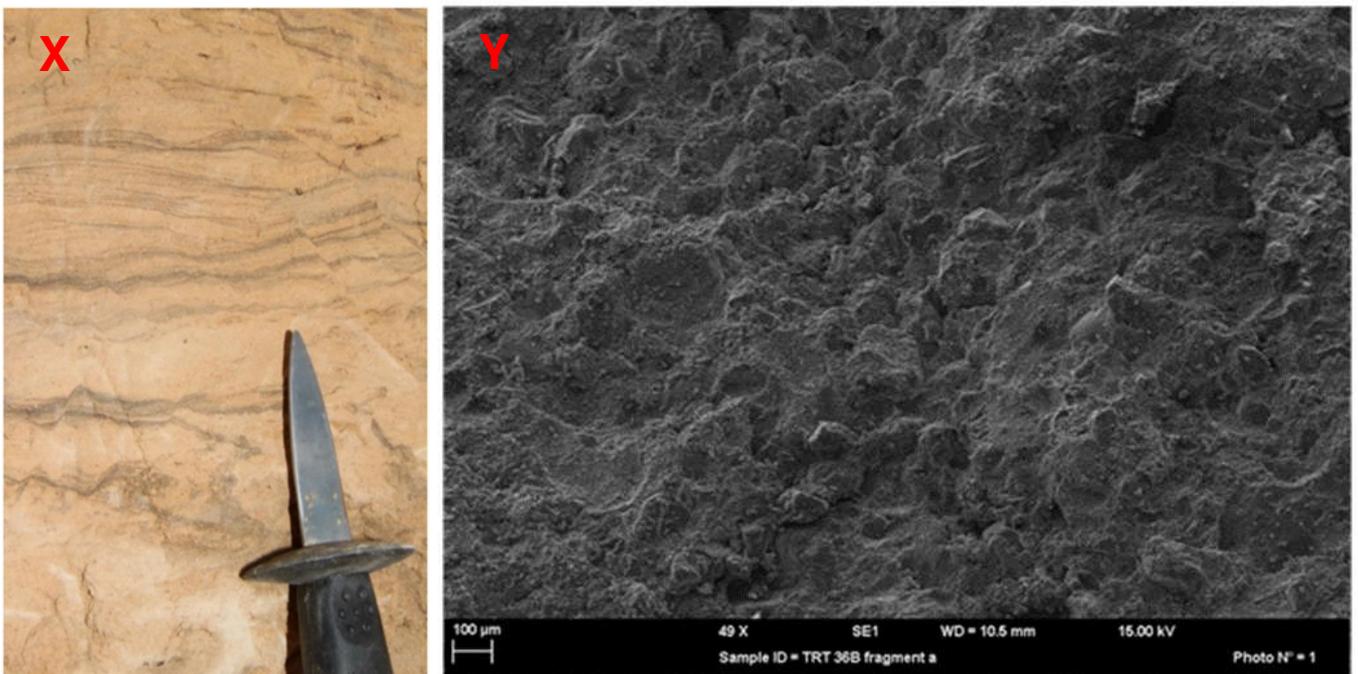


Figure 4.19 : X détail de l'échantillon B1 photo terrain, Y photographie au MEB de l'échantillon B1 vue d'ensemble

L'observation au MEB (figure 4.19 - Y) montre une importante teneur en quartz détritique de type éolien avec des grains homométriques, entre 80 et 100  $\mu\text{m}$  de diamètre, enserrés dans un ciment calcitique. On n'y observe pas de présence d'oxydes, les litages foncés présents sur l'échantillon (image X) sont donc très probablement de nature organique.

#### 4.3.4.2 Le niveau intermédiaire II (échantillons B6 et B7)

Les deux strates font 0,65 m d'épaisseur et ont une couleur 10YR5/4 brun jaunâtre plus pâle que les couches sus-jacentes et sous-jacentes. Ce niveau présente une conductivité électrique bien plus élevée ( $>3,2 \text{ dS m}^{-1}$ ) que les niveaux inférieurs et supérieurs. Le niveau B7 a une teneur en gypse de près de 6 % et une teneur en carbone de 4,4 %, un peu plus élevée que les couches sous-jacentes. Les teneurs en limon sont élevées au détriment d'une teneur

d'argile plus faible avec une granulométrie plus grossière. Ce niveau se distingue ainsi de l'ensemble de la coupe.

#### **4.3.4.3 Le niveau supérieur III (échantillons B8 et B9)**

Le niveau de couleur brun jaunâtre clair à jaune brunâtre (10YR 6/4 à 6/6) fait environ 2,35 m d'épaisseur ; il est caractérisé par une distribution homogène de sables fins indiquant un dépôt éolien. La conductivité électrique est faible ( $<1,4\text{dS m}^{-1}$ ) à très faible pour le niveau supérieur ( $0,26\text{ dS m}^{-1}$ ). On notera l'absence de couches supérieures gypseuses, présentes sur d'autres parties du tertres (voir les autres coupes). Des traces de pelle mécanique suggèrent qu'elles ont été démantelées récemment.

#### **4.3.5 Synthèse de la coupe B**

La coupe B correspond clairement à un dépôt éolien. Elle est tronquée au moins dans sa partie supérieure (absence du niveau gypseux caractéristique du sommet des tertres). On peut néanmoins reconnaître que la partie basale s'est construite sur des dépôts éoliens fins alternant avec des strates organiques, le tout suggérant le probable piégeage des sables en accumulations successives sur une végétation en cours de croissance. On ne remarque aucune trace distincte d'oxydo-réduction dans l'ensemble de la coupe, donc les dépôts se sont vraisemblablement formés lors de brefs épisodes aqueux. Le niveau plus clair à sables grossiers, qui présente une conductivité électrique bien plus forte que les niveaux sous-jacents, est donc le plus salé soulignant un possible dépôt dans un milieu aqueux de faible profondeur à forte évaporation, Cette coupe, qui est plus éloignée de la source que la précédente (coupe A), semble donc avoir moins subi son influence, ni connu de submersions de longue durée.

### 4.3.6 La Coupe C Trt 36

La coupe C se situe au sud-ouest du terre Trt 36 ; elle mesure environ 2 m de hauteur. On peut la diviser en 3 niveaux numérotés de I à III en partant du bas (Figure 4.20).

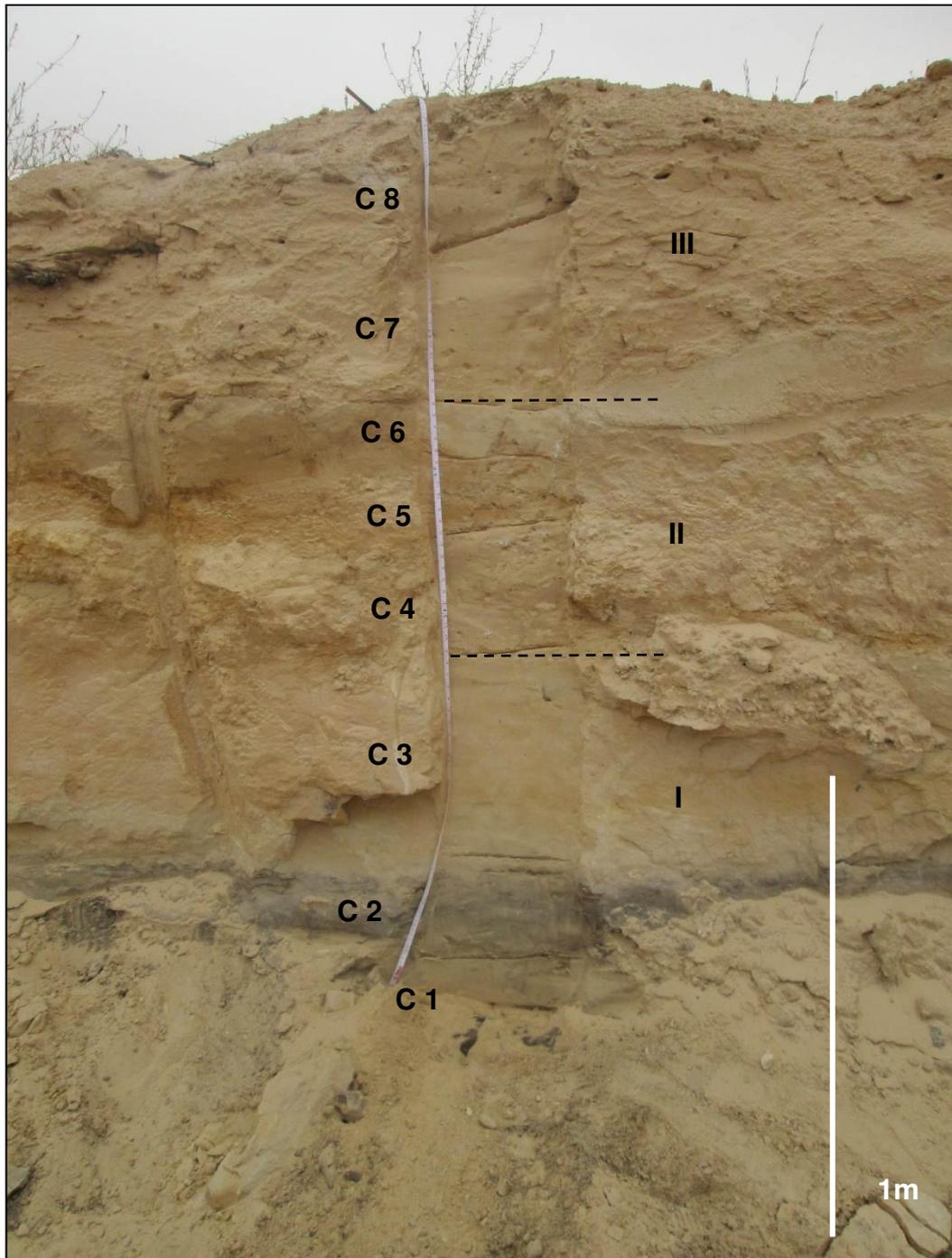


Figure 4.20 : La Coupe C Trt 36 photo du sol.

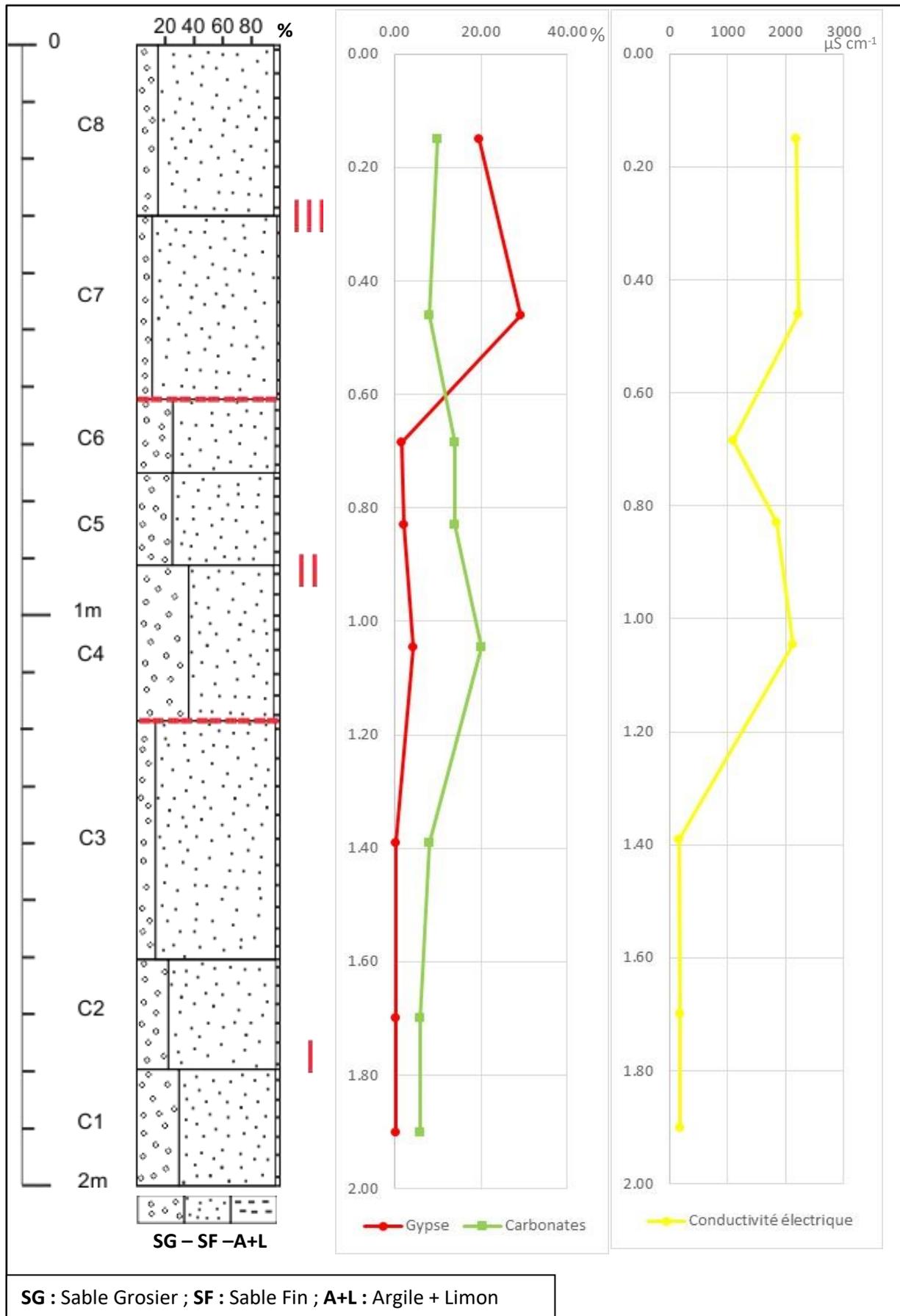


Figure 4.21 : Log synthétique de la Coupe C.

### 4.3.6.1 Le Niveau inférieur III (échantillons C1 à C3)

#### ➤ Description

Ce niveau inférieur fait 0,80 m d'épaisseur environ (Figure 4.21). Les strates ont une conductivité électrique basse ( $>0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) et une teneur en argile moyennement élevée de 12,7 % (C1), 12,5 % (C2) et 9,7 % (C3). Les deux strates C1 et C2 se différencient par une couleur brun foncé associée à des couleurs plus claires (vert) (10YR5/3 ; 2.5 Y 7/3 ; 10 YR 7.4 et 10YR5/4). Les deux échantillons ont fait l'objet d'une analyse microscopique.

#### ➤ Observations des échantillons au MEB

Tableau 0.1 Tableau 4.1 : Correspondance entre les références des échantillons

Coupe C		
Échantillons prélevés pour l'analyse chimique	Échantillon prélevé pour le MEB	Couleurs
C1	TRT 36 CA <sup>13</sup>	Niveau argileux vert
C1	TRT 36 C2B	Niveau vert et noir lité
C2	TRT 36 C2C	Niveau noir un peu rouille, un peu vert
C2	TRT 36 C	Noir

#### L'échantillon Trt36C

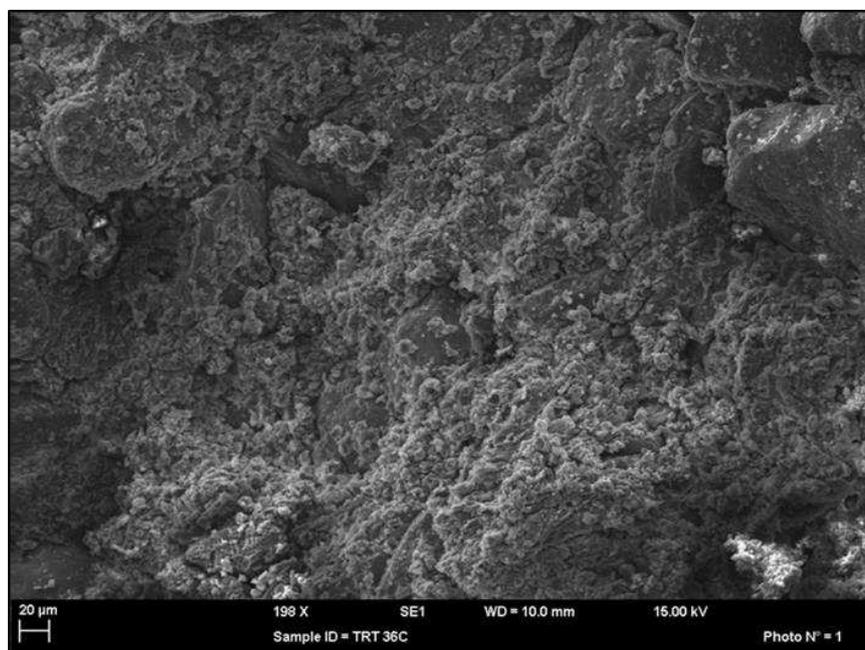
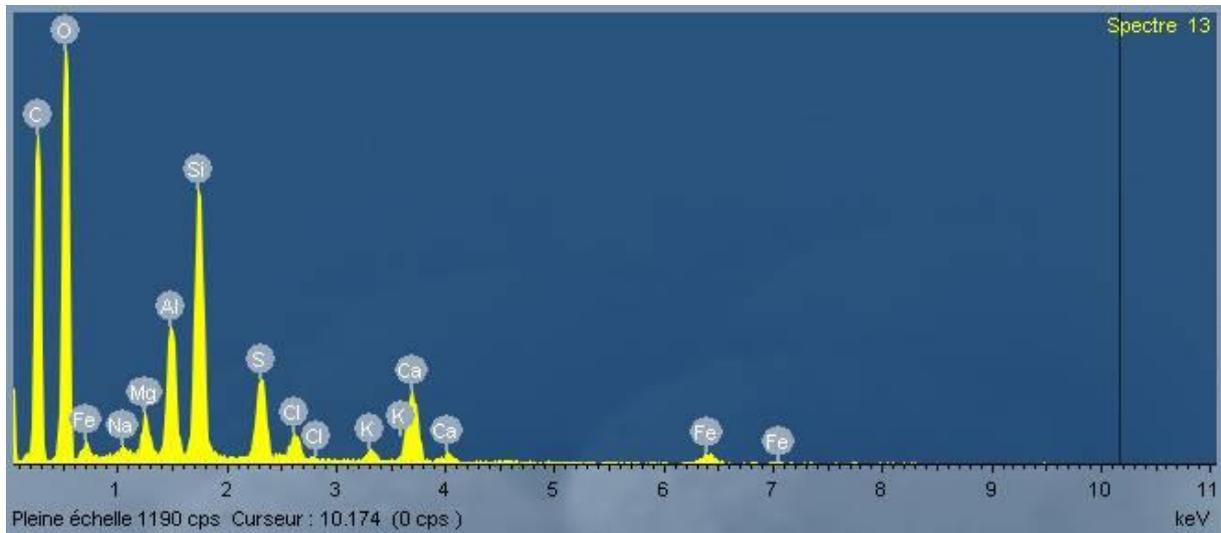


Figure 4.22 : Vue détail de l'échantillon Trt 36C.

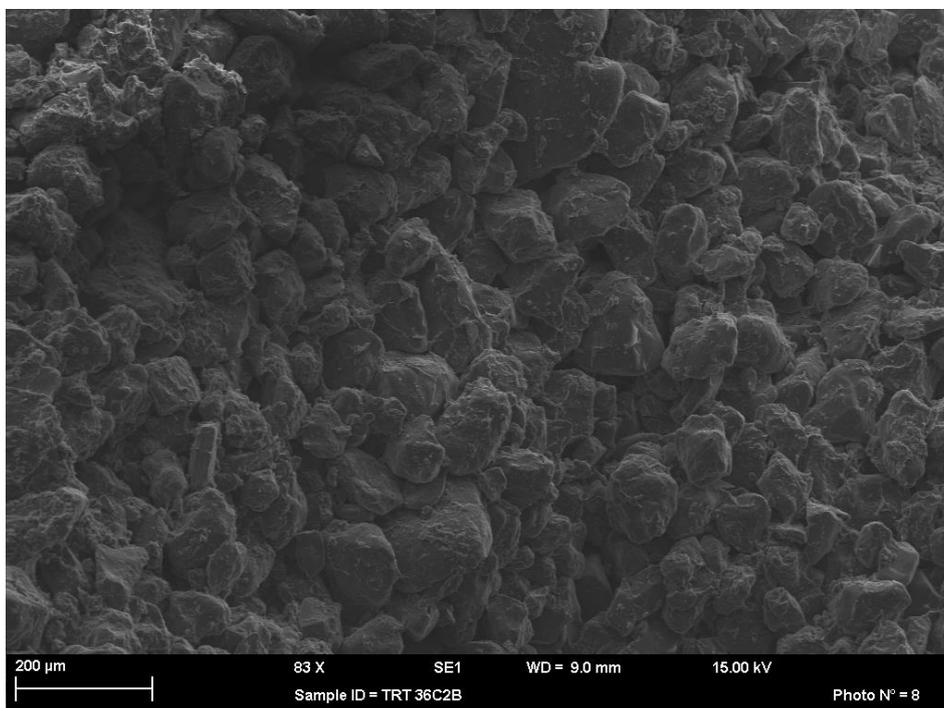
<sup>13</sup> Echantillon objet d'une détermination minéralogique effectuée par diffraction aux rayons X

L'observation plus détaillée au microscope de la Figure 4.22 de l'échantillon Trt 36 C a révélé des grains de quartz avec des revêtements d'argile, de fer, de gypse (pic de S) et d'halite (présence de Na et Cl), d'après le spectre déterminé à la sonde (Figure 4.23).

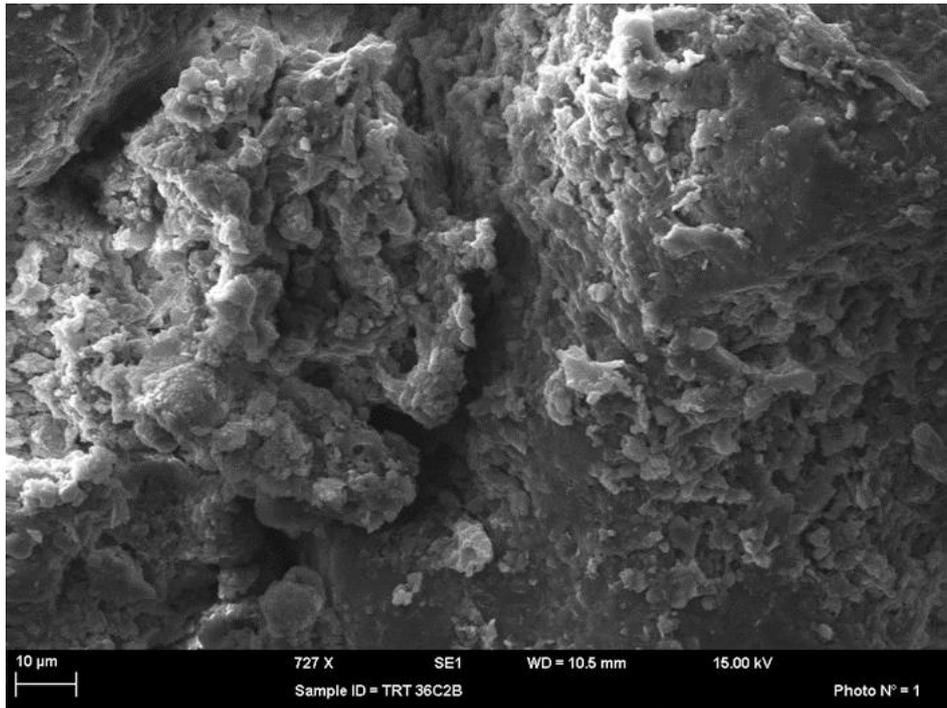


**Figure 4.23 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36C.**

- L'échantillon Trt 36C2B a été isolé car il présente deux couleurs différentes à l'œil nu (niveau vert et noir lité).



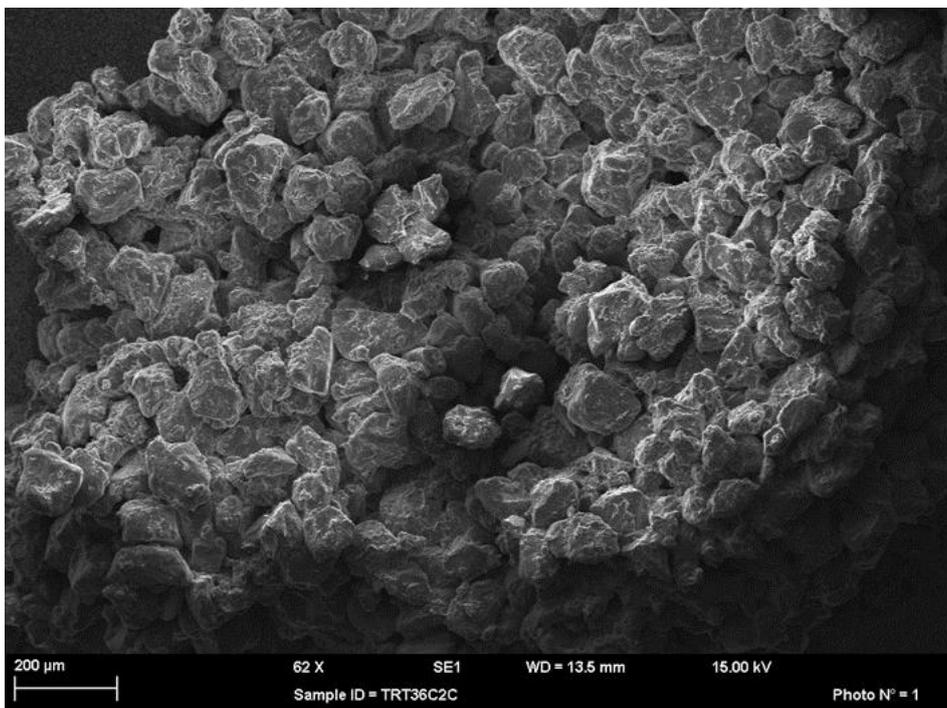
**Figure 4.24 : Vue d'ensemble de l'échantillon Trt 36C2B.**



**Figure 4.25 : Détail de l'échantillon Trt 36C2B.**

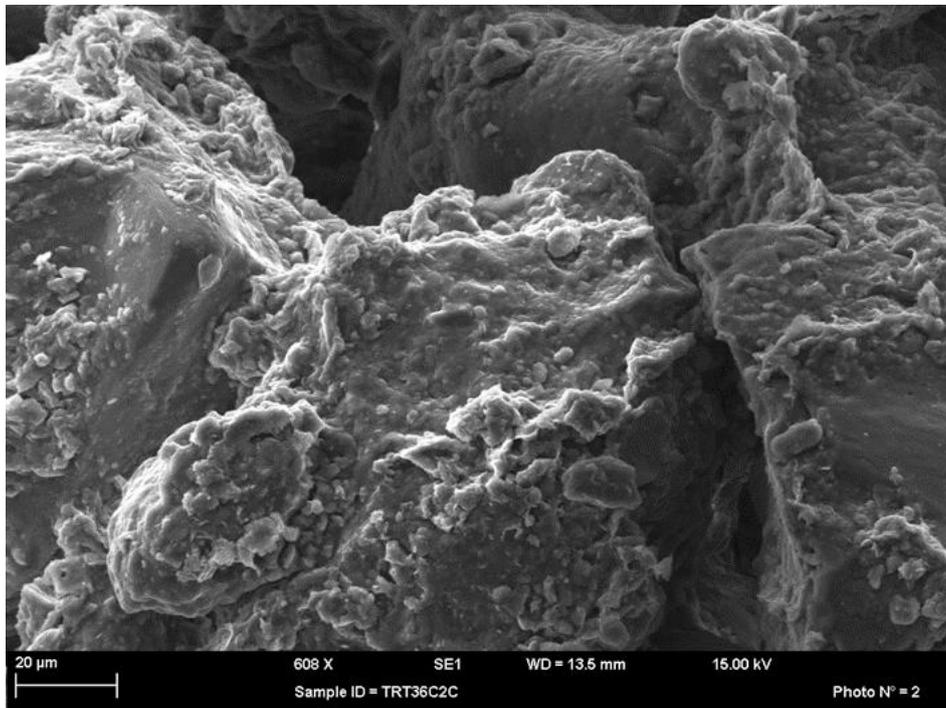
L'analyse de l'échantillon Trt 36C2B (Figures 4.24 et 4.25) indique la présence de quartz avec de nombreux revêtements d'argile, et de fer assez voisine du spectre de la figure 4.28.

- **L'échantillon Trt36C2C** se caractérise par des traces de couleur noire interstratifiées avec des nuances rouille et verte.

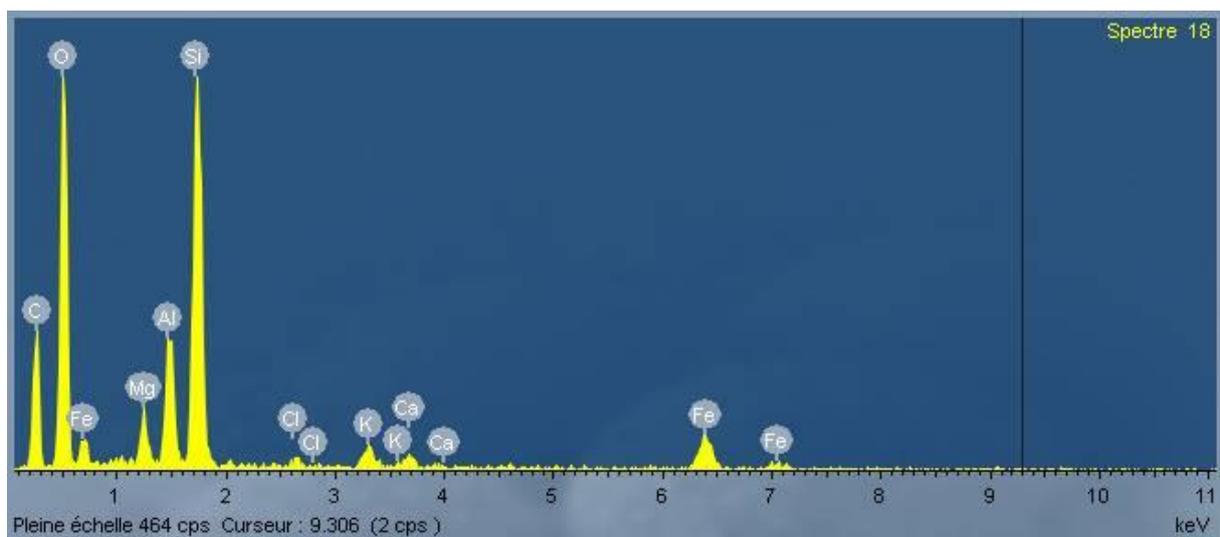


**Figure 4.26 : Vue d'ensemble de l'échantillon Trt36C2C.**

Sur cette photo d'ensemble (Figure 4.26) on observe nettement une caractéristique typique des dépôts éoliens, l'isométrie des grains de quartz entre 80 et 120 microns de diamètre. En revanche les marques d'impact éolien ne sont pas visibles, d'une part parce qu'elles sont rares dans ces grains de petite taille, d'autre part parce qu'elles sont masquées par un ciment parfois ferrugineux, mais surtout calcitique et gypseux (Figure. 4.27).



**Figure 4.27 : Détail de la vue d'ensemble Trt36C2C.**



**Figure 4.28 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt36C2C.**

L'observation à la sonde (Figure 4.28) a montré un revêtement d'argile et un peu de fer. Le pic de Si est 2 fois plus grand que celui de Al + Mg, ce qui indique une argile de type 2/1

(smectite). Les argiles smectiques présentant une substitution de l'Al par le Mg sont caractéristiques des milieux confinés à faible drainage.

L'analyse microscopique des échantillons C1 et C2 ne nous a pas permis de différencier micro-morphologiquement les raisons des différences de couleur des sédiments. Mais les analyses nous ont permis de déterminer que la couleur noire est donnée par le fer, dont la quantité est faible mais systématique et suffisante pour donner cette coloration. La teneur en matière organique qui est faible (1,61 g kg<sup>-1</sup> pour C1 et de 1,29 g kg<sup>-1</sup> pour C2) n'est donc pas à l'origine de la couleur foncée. Il faut noter la présence généralisée d'argiles de type smectite qui adhèrent aux grains de sable quartzeux. Cette argile se néoforme à partir d'une solution dans des zones confinées et se concentre dans des micro-lits caractéristiques d'une sédimentation limnique. Elle est la principale cause de l'imperméabilisation de certains niveaux et de l'occurrence de phénomènes d'hydromorphie dans un paléosol. Mais les analyses permettent également de noter la présence d'argiles héritées de type illite ou la présence de feldspaths.

L'ensemble de l'échantillon C3 est composé de taches d'oxydo-réduction rouille dans une couleur d'ensemble 10YR6/4 brun jaunâtre clair, indiquant une fluctuation de la nappe de courte durée ; il est très sableux, à sables fins ( $\approx 84\%$ ).

#### **4.3.6.2 Le Niveau II (échantillons C4 à C6)**

Épais d'environ 0,60 m, de couleur 10YR6/4 brun jaunâtre clair, il est caractérisé par des efflorescences calcaires qui évoluent en nodules (Figures 4.20 et 4.21). De fait, c'est le niveau présentant la plus forte teneur en carbonate de calcium de l'ensemble de la coupe : 20 % de CaCO<sub>3</sub> pour C4, et 14 % pour C5 et C6. Notons une augmentation du pourcentage du sable grossier ainsi qu'une augmentation de la conductivité électrique de l'ordre de 2.1 dS m<sup>-1</sup> pour C4, 1.8 dS m<sup>-1</sup> pour C5 et 1 dS m<sup>-1</sup> pour C6.

#### **4.3.6.3 Le niveau supérieur III (échantillons C7 à C8)**

Il fait 0.60 m d'épaisseur ; c'est un niveau massif, homogène, riche en gypse (29% pour C7 et 20% pour C8), d'origine éolienne avec plus de 80% de sables fins. Il est de couleur brun très pâle 10YR7/4 pour C7 et brun jaunâtre clair 10YR6/4 pour C8. Ces deux niveaux de surface ont une conductivité électrique élevée 2,2 dS m<sup>-1</sup>.

### **4.3.7 Synthèse de la Coupe C**

Cette coupe C présente 3 ensembles distincts qui reproduisent à une échelle plus réduite les ensembles de la coupe A et B : un niveau de base (C1 à C3) à faible conductivité électrique, mais présentant des signes morphologiques d'oxydo-réduction dès sa base ; en cela il se différencie de la coupe B où les seuls niveaux à taches sont B6 et B7 plus hauts dans la coupe. Le niveau intermédiaire (C4-C6), de conductivité électrique plus élevée, est plus riche en carbonates, appauvri en argiles et enrichi en sables grossiers. Enfin le niveau supérieur à gypse est caractéristique du sommet des tertres. On peut noter la faible teneur en matière organique dans toute la coupe, de valeur assez constante de 1,29 à 1,94 %.

### **4.3.8 Les sondages à la tarière**

Les sondages à la tarière, contrairement aux coupes donnent un aperçu des différentes strates traversées sans que l'on puisse déterminer de manière claire les transitions brutales. Les prélèvements ont été réalisés tous les 20 cm en prenant soin à ne pas polluer l'échantillon avec du matériel sus-jacent.

#### **4.3.8.1 Sondage T1**

Le sondage T1 a été prélevé dans le vestige de la source du tertre 36. Il est assez homogène dans son ensemble.

La couleur du premier prélèvement, proche de la surface, est plus foncée (brun pâle 10 YR 5/3) puis le reste des strates est très peu différencié ; elle fluctue du brun pâle au brun très pâle (10YR 6/3 à 7/3, 7/4) en passant par le brun jaune clair (10YR6/4). Ce sondage présente sur toute son épaisseur une granulométrie très sableuse à large dominance de sables fins ( $\geq 90$  % dans le tamisage à sec) ; les teneurs en argile (tamisage par voie humide) sont très constantes de 5,25 à 8,25 %. Les deux niveaux superficiels sont assez riches en matière organique avec une teneur en carbone proche de 1 % ( $9,1 \text{ g kg}^{-1}$ ). Le niveau le plus proche de la surface a une conductivité électrique nettement plus élevée que les strates sous-jacentes ( $2,12 \text{ dS m}^{-1}$ ) puis cette conductivité diminue régulièrement dans les niveaux inférieurs pour n'être plus que de  $0,30 \text{ dS m}^{-1}$  à 160 cm de profondeur. Les teneurs en carbonates sont de 13,5 % dans la strate de surface puis fluctuent entre 7,7 et 11,5 %. Elles sont faibles à partir de 80 cm de profondeur de 3,8 à 5,7 %. Les teneurs en sulfates restent faibles. Le niveau le plus riche en gypse se situe proche de la surface (1,7 %) puis baisse à  $<1$  % en profondeur.

#### **4.3.8.2 Sondage T2**

Le sondage T2 a été prélevé à proximité de la Coupe C dans la partie la plus basse du tertre pour atteindre les niveaux les plus profonds.

Tout comme le sondage T1, il présente une faible différenciation verticale de granulométrie et de couleur. Comme lui, ses niveaux supérieurs ont une conductivité électrique plus forte, de 2,21 à 1,23 dS m<sup>-1</sup>, que les niveaux sous-jacents à faible conductivité (0,29 à 0,41 dS m<sup>-1</sup>).

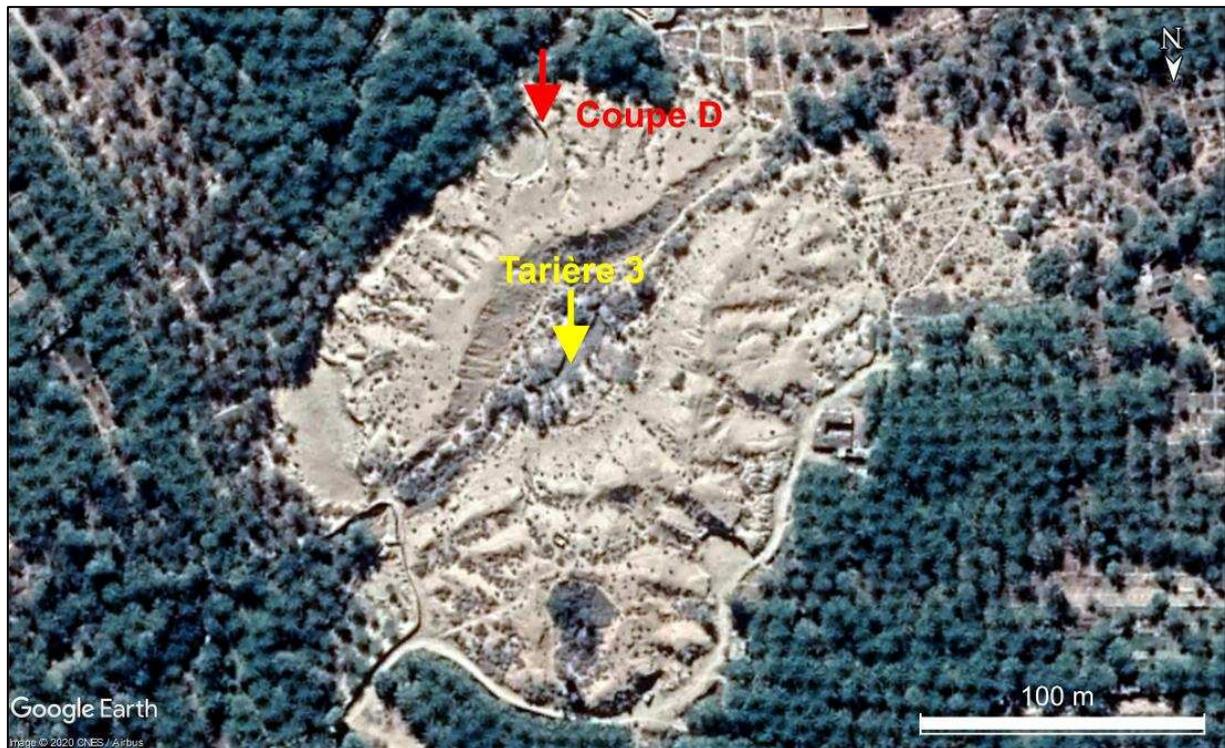
Pourtant ce sondage est fort différent du précédent. Les couleurs sont clairement des couleurs caractéristiques de niveaux à fer réduit 2,5Y à 5Y variant de l'olive clair (2,5Y 5/3) à des couleurs très pâles entre le gris et le gris olive clair (5Y 6/2 à 7/2) et du jaune au jaune pâle (5Y7/6 à 5Y7/3). La granulométrie présente beaucoup plus de sables grossiers, de 19,6 à 39,7 % et des teneurs en argile de 8,7 % en surface croissant subitement à 30,5 % dans la strate 20-40 cm ; dans la suite du profil elle passe progressivement de 18,7 % (40-60 cm) à 27,2 % en profondeur (120-140 cm). L'ensemble des niveaux possède des teneurs en carbone variant entre 3,3 et 8,3 ‰, quantité non négligeable comparée aux valeurs observées dans les coupes, mais réparties de manière assez aléatoire. Les teneurs en carbonates sont faibles entre 3,7 et 7,4 %. Celles de gypse varient de 3,5 % en surface à <0,3 % à partir de 40 cm de profondeur sauf pour le niveau 6 (entre 1,0 m et 1,2 m de profondeur) qui présente 15 % de gypse sans aucune modification sensible des autres mesures granulométriques, chimiques ou de couleur, indiquant une possibilité d'artefact.

#### **4.3.8.3 Synthèse des sondages à la tarière T1 et T2**

Ces deux sondages à la tarière confirment la faible conductivité des strates profondes. Seules les parties supérieures déposées sans doute dans des eaux plus évaporées montrent des conductivités plus élevées. Le sondage T1 proche de l'émission artésienne contient peu d'argiles contrairement au sondage T2 plus éloigné, preuve d'une dynamique hydrique plus forte donc d'un transport suivi d'une sédimentation des argiles dans des zones à dynamique faible éloignées de la source d'eau. A ces fortes teneurs en argile sont associées des teneurs en matière organique assez élevées. Les couleurs pâles indiquent un environnement réduit à faible fluctuation du niveau sans exondation donc oxydation des oxydes de fer.

## 4.4 Etude sédimentologique du tertre 9

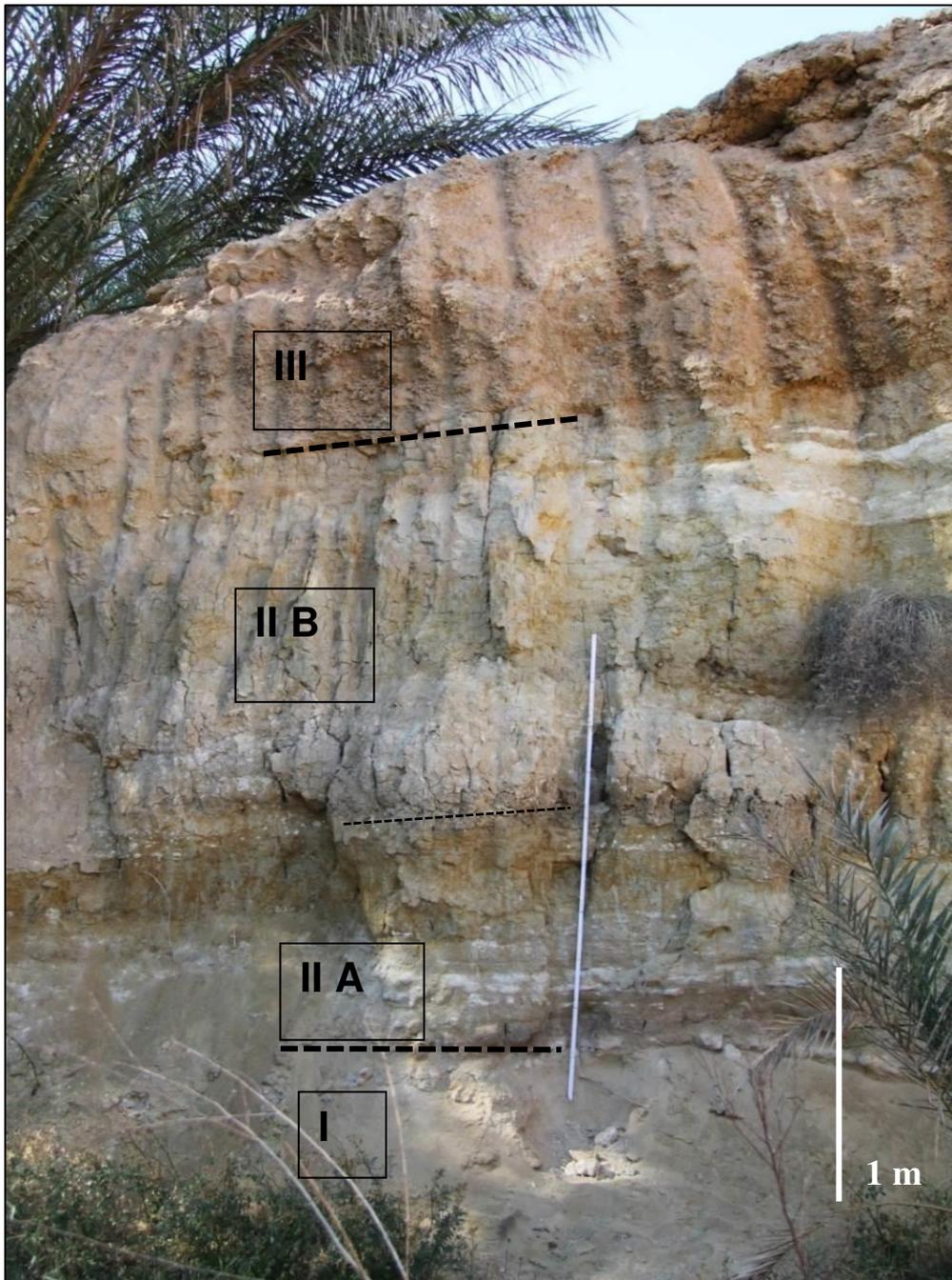
### 4.4.1 Localisation de la coupe D



**Figure 4.29 : Emplacement des coupes D et du sondage à la tarière 3 au sein du tertre 9 à Ain Ouled Aïssa (extrait Google Earth date de prise de vue 08/11/2018).**

Le tertre 9 d'Aïn Ouled Aïssa, typique par sa forme ovale, se localise dans la presqu'île de Kébili à l'ouest de cette ville. Il est constitué de deux ensembles en forme de demi-lune allongés NE-SW d'une longueur de 120 à 150 m pour 50 m de large dans la partie sud et 80 m dans la partie nord, d'une hauteur variant de 5 à 10 m entre le milieu et les deux côtés (Figure 29). Roberts et Mitchell, (1987) ont décrit ce tertre composé en grande partie de matériaux terreux durcis contenant un mélange de gypse, de calcaire et de sable fin (quartz) d'origine éolienne. Ces deux ensembles sont séparés par une échancrure d'entre 5 et 10 m de large séparant les structures en demi-lune. Au centre de cette échancrure on observe très nettement les vestiges de l'ancien bassin de la source entre deux monticules, ainsi que les vestiges de deux canaux d'irrigation laissant penser que l'écoulement s'effectuait au sein de cette échancrure dans les deux directions opposées, vers les parties basses. On peut aussi observer sur le terrain des vestiges de foggaras comblées, ainsi que des éclats de silex et des morceaux de poteries.

#### 4.4.2 La coupe D Trt 9



**Figure 4.30 : Image d'ensemble de la coupe D du tertre 9 Ain Ouled Aïssa.**

La coupe D se situe au sud du Trt 9 (Fig. 4.29), elle est sur la marge externe du tertre, mais présente à son sommet des niveaux gypseux originaux et une stratification de dépôts éoliens nette, marquée par des caractères d'hydromorphie. Elle mesure environ 5 m de hauteur. Elle se divise en 3 niveaux distincts (Figure 4.30).

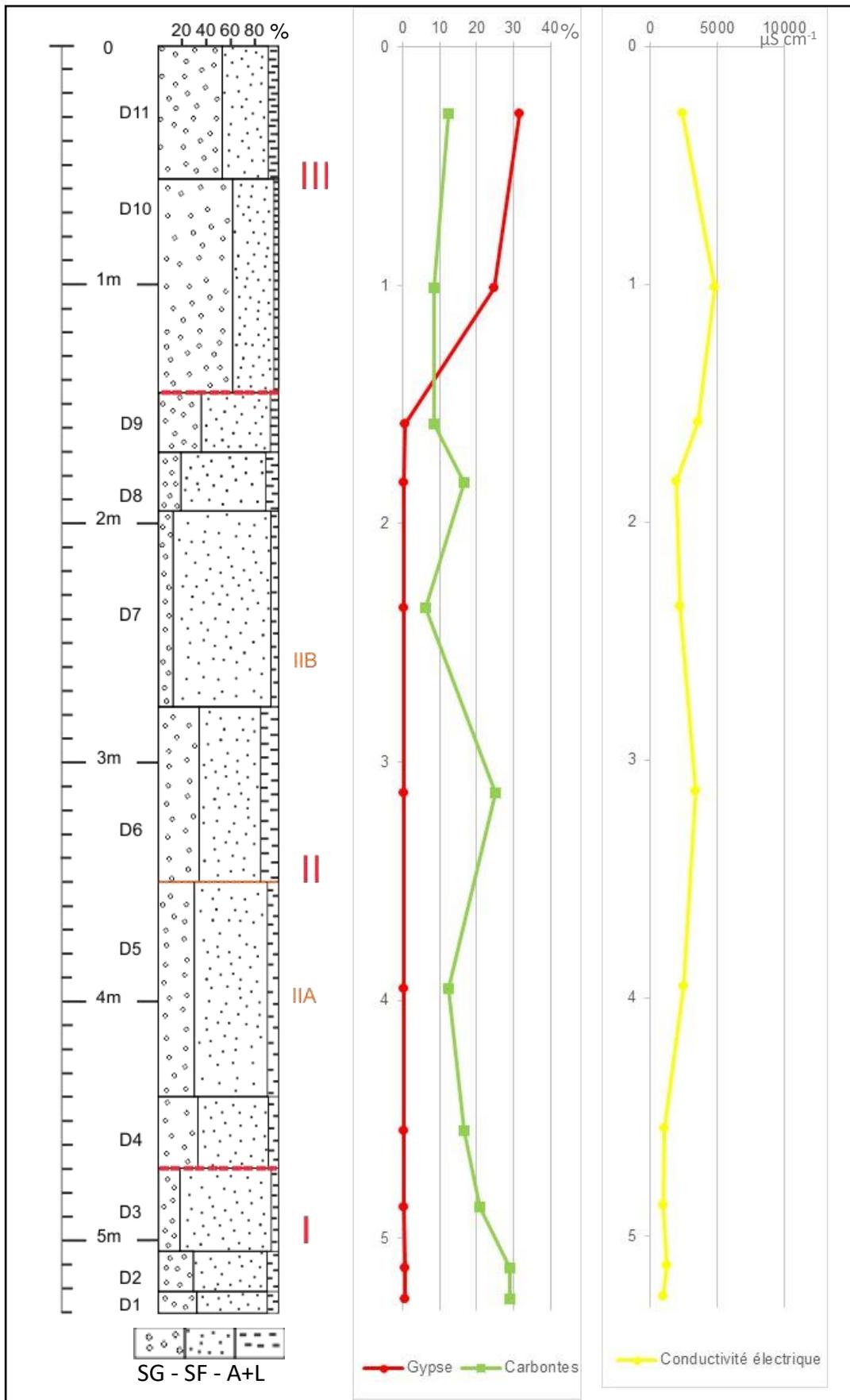


Figure 4.31 : Log synthétique de la Coupe D.

#### **4.4.2.1 Le niveau inférieur I (échantillons D1-D3)**

Ce niveau de base fait 0,60 m d'épaisseur, à une teneur en argile assez constante entre 17 et 18,7 % (Figure 4.31). Les teneurs élevées en sables grossiers de cet ensemble diminuent de la base vers le sommet variant de 31,5 à 18%. Ce premier sous-ensemble est assez riche en carbonates de 21 à 29 % environ. La conductivité électrique est faible de 910 à 1190  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Depuis la base vers le haut, les niveaux sont les suivants (Figures 4.32 et 4.33) :

**D1** : de couleur 10YR6/3 brun pâle, peu organique, constitue la base visible du tertre, son pH de 9,9 est très élevé.

**D 2** : est plus clair avec des marques de sédimentation ; il contient 6,8 ‰ de carbone, valeur élevée par rapport à l'ensemble des tertres. Sa couleur 10YR 7/3 est brun très pâle, associée à des carbonates.

**D3** : de couleur 10YR 7/3 (brun pâle), est sableux, assez homogène, plus clair que l'horizon sus-jacent, meuble sans marque précise de stratification, avec moins de sables grossiers (18 contre 37 %) et davantage de sable très fin (75 contre 65 %) que les strates sous-jacentes. Il est moins riche en carbone que le niveau sous-jacent (2,4 ‰). Il est assez typique de dépôts éoliens mais avec un enrichissement argileux.

Son sommet est constitué par une couche de carbonates pulvérulents de 20 cm d'épaisseur, indurée sur les 2 cm supérieurs. Les carbonates s'organisent en strates horizontales plus ou moins pulvérulentes de couleur jaune pâle (10YR8/2 brun très pâle). Fréquemment, les carbonates précipitent à partir de niveaux où la porosité capillaire devient discontinue, le plus fréquemment lorsque les niveaux sus-jacents sont plus argileux, générant une interruption de flux capillaires ascensionnels verticaux, induisant donc des phénomènes de précipitation. Dans le cas présent, il s'agit d'une augmentation brutale des teneurs en argile du niveau de base de l'ensemble II.

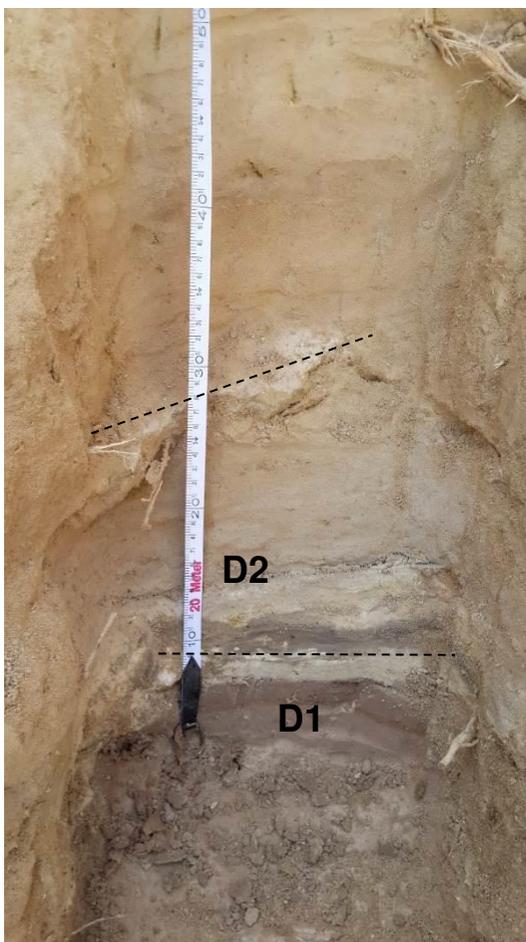


Figure 4.32 : Détail des strates D1 et D2 du niveau inférieur.



Figure 4.33 : Détail de la strate D3 du niveau inférieur.

#### 4.4.2.2 Le niveau intermédiaire II (échantillons D4 -D9)

Ce niveau fait 3.30 m d'épaisseur environ. Il se constitue de 2 sous-ensembles avec les couches D4 et D5 d'une part et D6 à D9 d'autre part. Ces deux sous-ensembles correspondent visiblement à deux épisodes de dépôts sédimentaires avec à la base un niveau argileux imperméable et des niveaux supérieurs présentant des signes d'hydromorphie temporaire avec un battement de la nappe (Figure 4.34).

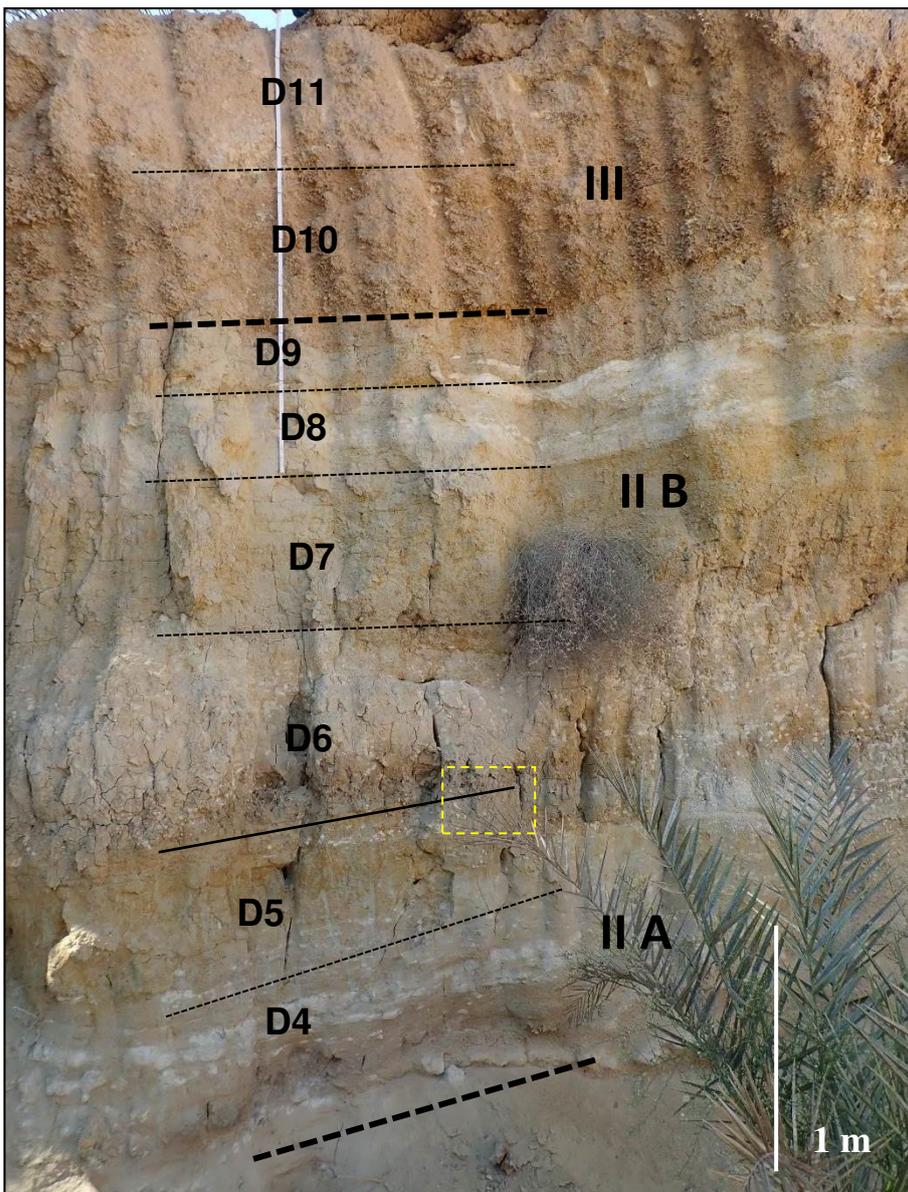


Figure 4.34 : Coupe D : vue d'ensemble du niveau intermédiaire II. La limite D5-D6 est détaillée figure 4.36



Figure 4.35 : Vue détaillée du niveau IIA (strates D4 et D5).

#### 4.4.2.2.1 Le niveau inférieur IIA du niveau intermédiaire (échantillons D4 -D5)

D 4 constitue la strate de base de cet ensemble. Elle est plus foncée (10YR 6/4 brun jaune clair), et bien plus argileuse que le niveau sous-jacent (29 contre 17 %), non carbonaté,

pauvre en carbone (1,6 %). Elle est surmontée d'un niveau carbonaté pulvérulent de 7 cm d'épaisseur environ, visible sur la figure de la coupe D (Figure 4.35).

**D 5** a une composition granulométrique semblable à celle de D4. Cette strate de 30 cm environ présente un matériau réticulé (figure 4.36) à taches d'oxydo-réduction de couleur rouille (10YR 5/8 brun vif) et à taches réduites gris clair (5Y7/2) à jaune clair (5Y7/3). Des taches pâles de 1 cm de large à bords nets suivent une direction verticale associée à des racines, signe de la présence de végétation et d'une saturation en eau temporaire et d'une exondation de la partie supérieure de ces couches. En profondeur, sur 20 cm la couleur est plus pâle 10YR 7/3 que vers le sommet (10YR 6/4). Ce niveau présente la plus forte teneur en matière organique de l'ensemble de la série (8 g kg<sup>-1</sup>). La conductivité électrique augmente aussi sensiblement de 1070 à 2530 μS cm<sup>-1</sup>. Ce niveau indique une stagnation aqueuse et un envahissement par de la végétation dans un niveau reposant sur une couche argileuse plus imperméable que l'ensemble I.

#### **4.4.2.2 Le niveau supérieur IIB du niveau intermédiaire (échantillons D6 -D9)**

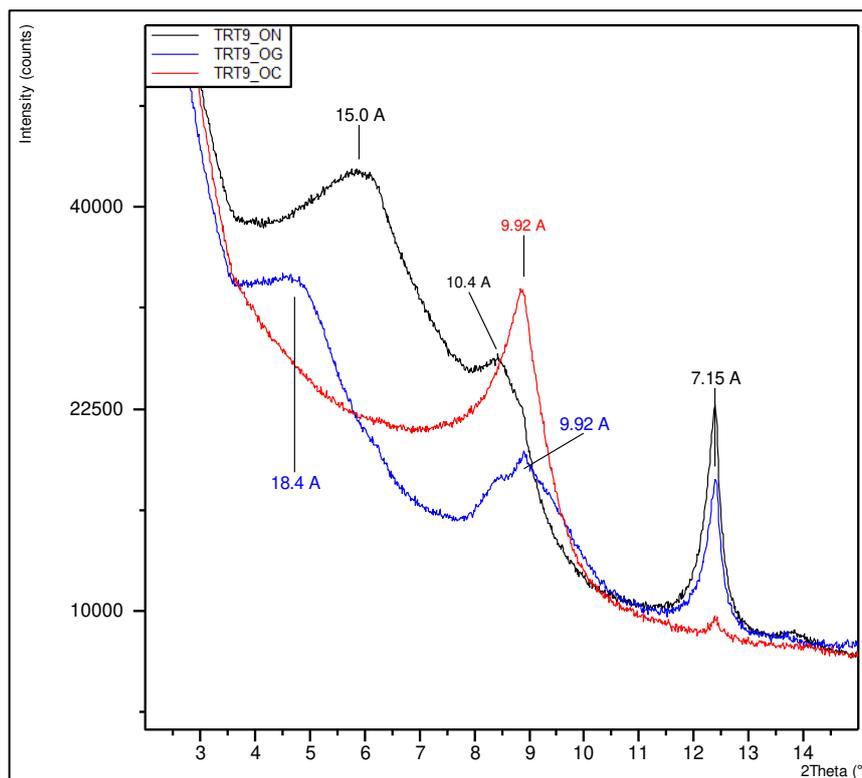


**Figure 4.36 : Détail de la limite entre l'ensemble A et B du niveau II (limite D5-D6 de la figure 4.34) soulignée par un niveau argileux présentant des traces de microfissuration du retrait des argiles gonflantes lors du séchage.**

**D 6** - Ce niveau de 75 cm d'épaisseur est continu et en transition très brutale avec la strate D5 sous-jacente. Il est de composition plus argileuse (33 %), de couleur plus sombre

(10YR 4/3) à la base, s'éclaircissant vers le sommet (2,5 6/3 brun jaunâtre clair) et contient 2,4 % de C. Il très riche en carbonates (25 %) et aussi en sables grossiers (36 %). À l'affleurement, la partie inférieure de la strate, de 20 cm d'épaisseur, est plus argileuse et présente de nombreuses craquelures indiquant des fissures de rétraction d'une argile de type smectite formant des polyèdres centimétriques à bords anguleux (figure 4.36) La conductivité électrique est élevée ( $3350 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), plus que celle des strates sous-jacentes.

Sur le diffractogramme de poudre (DRX) (§ annexes) : outre le quartz, on note la présence de feldspaths comme l'anorthite ou le microcline ainsi que la hornblende (amphibole) pouvant s'altérer en smectites (argile gonflante). Dans la détermination de la fraction argileuse (figure 4.37) sur lame orientée (courbe noire), on note la présence de smectite (pic à  $15\text{Å}$  qui gonfle à  $18,4$  en présence de glycol courbe bleue), de palygorskite (argile fibreuse typique des croûtes carbonatées et des niveaux sursalés des sebkhas, pic à  $10,4 \text{Å}$  se réduisant au chauffage courbe rouge), d'illite (pic à  $9,92\text{Å}$  bien exprimé au chauffage), et de kaolinite (pic à  $7,15\text{Å}$  disparaissant au chauffage). Le zoom du diagramme (§ annexes) permet de noter la présence d'halite (d'où la conductivité électrique élevée).



**Figure 4.37 : Diffractogramme DRX de la fraction argileuse (<2 µm) d'un agrégat argileux de la base du niveau D6 (Figure 4.36).  
Lame orientée (noir), glycolée (bleu), chauffée (rouge).**

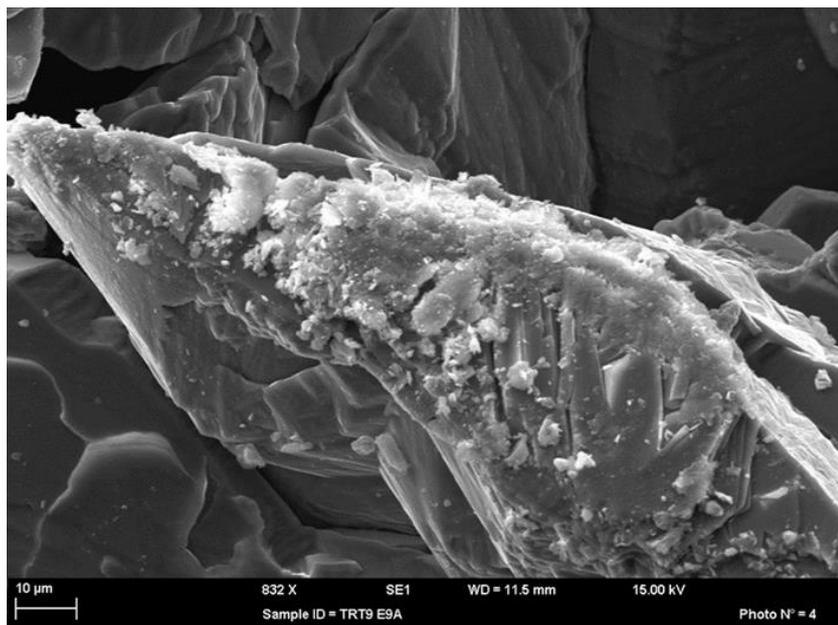
**Détermination de la seule fraction argileuse** : Au niveau de la microsonde les argiles fibreuses sont caractérisées par des pics d'Al (aluminium) et de Si (silicium) de même intensité (Figure 4.37).

**D 7** : Cette strate de 70 cm d'épaisseur environ est très riche en sables fin (81 %) et la plus pauvre en argile de cet ensemble intermédiaire (15,5 %). Elle est minérale, dépourvue de matière organique et non carbonatée, possède une couleur olive 5Y6/3, caractéristique d'un niveau réduit, avec des taches 10YR5/8 orangées à bords diffus. La stratification n'est pas très nette. Ce niveau semble être constitué de dépôts éoliens piégés dans une mare.

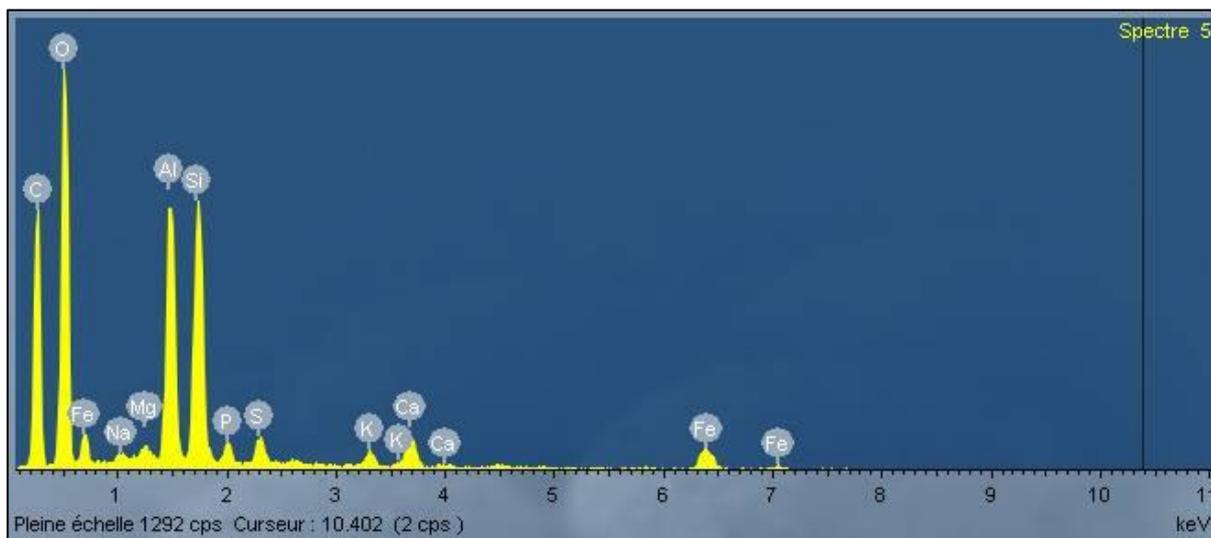
**D 8** : Le niveau 8 de 40 cm environ se distingue du précédent par sa couleur plus claire (5 Y 7/4 jaune pâle). Il est également très sableux (70,5 %), peu argileux pour cette coupe (17,2 %) et présente des taches d'oxydo-réduction à bords très diffus. Il est également bien plus carbonaté que le niveau 7. La conductivité électrique baisse régulièrement à partir du niveau D6 (1990  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

**D 9** de 30 cm d'épaisseur (couleur 2,5 Y 6/3 brun jaune clair) complète cet ensemble de strates fines. Il est plus argileux (27,5 %), beaucoup plus riche en sables grossiers (35,7 %) et moins carbonaté que la strate sous-jacente. Sa conductivité électrique est également bien plus forte, atteignant 3550  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

L'échantillon D9 a aussi fait l'objet d'une analyse microscopique de l'organisation des matériaux, pour déterminer l'origine de sa couleur violette observée sur le terrain. L'observation au MEB (Figure 4.38) montre un recouvrement sur du gypse.



**Figure 4.38 : Photographie au MEB de l'échantillon Trt 9 E9A correspondant à l'échantillon D9 : argile fibreuse.**



**Figure 4.39 : Spectre de l'échantillon D9 : présence d'argile fibreuse avec un peu de fer.**

Le spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon D9, présente des proportions relatives d'éléments qui confirment la présence d'argiles fibreuses, visibles sur la Fig 4.39. La faible quantité de Fe serait responsable de la couleur violette.

#### **4.4.1.1 III niveau supérieur (échantillons D10 et D11)**

Il marque une transition brutale avec les niveaux inférieurs. Les strates D 10 et 11, épaisses d'environ 1,5 m constituent la partie supérieure de la série sédimentaire. Elles sont composées essentiellement de cristaux de gypse centimétriques cimentés dans une matrice contenant du fer donnant une teinte orangée à l'ensemble : D10 est de teinte plus sombre (10YR 6/4 brun jaune) que D11 (10YR 73 brun très pâle) qui est plus riche en carbonates.

### **4.4.2 Synthèse de la coupe D**

Les niveaux I et II de cette coupe se distinguent des autres coupes de tertres par leur teneur élevée en argile, variant de 15,5 à 33 %.

Le niveau de base (I) est carbonaté à faible conductivité électrique avec des strates de couleur homogène et parfois enrichies en matière organique. Ensuite se superposent deux cycles (II A et B) de sédimentation reposant sur une base argileuse. Les strates sus-jacentes développent des figures d'oxydo-réduction caractéristiques d'une hydromorphie associée à de la matière organique, avec des taches de couleur pâles et vives. Certaines strates présentent des traces de racines. La conductivité électrique est élevée. Les strates supérieures de cet ensemble sont constituées de dépôts éoliens à dominante de sable fin. Enfin le niveau supérieur (III) est constitué d'un niveau gypseux et carbonaté à cimentation secondaire scellant la

partie supérieure du tertre. L'ensemble du tertre montre des figures de démantèlement avec une dissolution – redistribution du gypse et l'apparition de croûte calcaire par endroits au sommet. Cette induration contribue à la fixation du tertre.

### **4.4.3 Les sondages à la tarière**

#### **4.4.3.1 Le sondage T3**

Le sondage T3 a été réalisé dans les vestiges de la source d'Aïn Ouled Aïssa, maintenant tarie, pour préciser la nature des matériaux de sa base.

Tout comme les sondages précédents il montre une conductivité électrique élevée dans les niveaux supérieurs 2,25 et 2,31 dS m<sup>-1</sup> de 0 à 40 cm puis cette conductivité baisse de 1,8 à 0,98 dS m<sup>-1</sup> dans le niveau le plus profond. Elle est cependant plus élevée que dans les sondages précédents. A cela correspond une baisse régulière des teneurs en gypse de 4,1% en surface à 0,55 % puis à < 0,2 % en dessous de 1,0 m de profondeur. Les teneurs en carbonates sont également plus élevés, entre 30,3 et 21,2 % pour les niveaux entre 20 et 60 cm puis entre 12,1 et 16,7 % sur l'ensemble de la section. Les teneurs en carbone sont plus élevés que dans les coupes précédentes. Elles varient de 7,3 ‰ à 12,8 ‰ sur l'ensemble de la coupe. La granulométrie montre une proportion importante de sables grossiers augmentant régulièrement de 15,4 à 50,3 % vers 1,0 m de profondeur pour se stabiliser entre 36 et 46 % en profondeur. Les teneurs en argile varient peu, entre 5,2 et 8,5 %. Le niveau 100-120 cm un peu plus argileux possède également une conductivité électrique un peu plus forte et des teneurs en carbonates plus élevées que les 2 niveaux sur et sous-jacents. Si la partie supérieure montre clairement des niveaux hydromorphes de fer réduit (2,5 Y 4/3 et 5/3) brun olive clair à brun olive pour le 20-40 et 40-60 cm, les niveaux sous-jacents sont beaucoup plus sombres à cause de la matière organique (10YR 3/2 à 3/3 brun grisâtre très foncé à brun foncé).

#### **4.4.3.2 Synthèse de T3**

Ce sondage ressemble assez fortement au sondage T1, de par sa position à proximité de la source, par sa teneur élevée en sables grossiers avec peu d'argiles, preuve d'une dynamique hydrique forte. Seuls les niveaux supérieurs sont salés à carbonates ou à gypse. Il est cependant plus riche en matière organique.

## **4.5 Les échantillons pour datation au radiocarbone**

Pour compléter l'approche sédimentologique, une analyse basée sur la méthode du radiocarbone a été réalisée avec pour objectif de dater la mise en place des tertres de sources du Nefzaoua afin de comprendre leur genèse et la vitesse de leur formation. Les échantillons de charbons ont été prélevés lorsqu'il était possible d'avoir la qualité suffisante et sans risque de pollution et surtout lorsque cela était accessible. La datation par le radiocarbone, est une méthode fondée sur la mesure de l'activité radiologique du carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) contenu dans la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, c'est-à-dire le temps écoulé depuis la mort de l'organisme (animal ou végétal) qui le constitue. La méthodologie a été définie dans le §4.2.1.

Une dizaine d'échantillons contenant des charbons ont été prélevés dans plusieurs tertres de la région. Seul un échantillon prélevé au Trt 35 Oum El Meriss n'a pas pu être daté, il ne contenait finalement pas de charbon.

#### 4.5.1 Localisation des sites de prélèvement de charbons

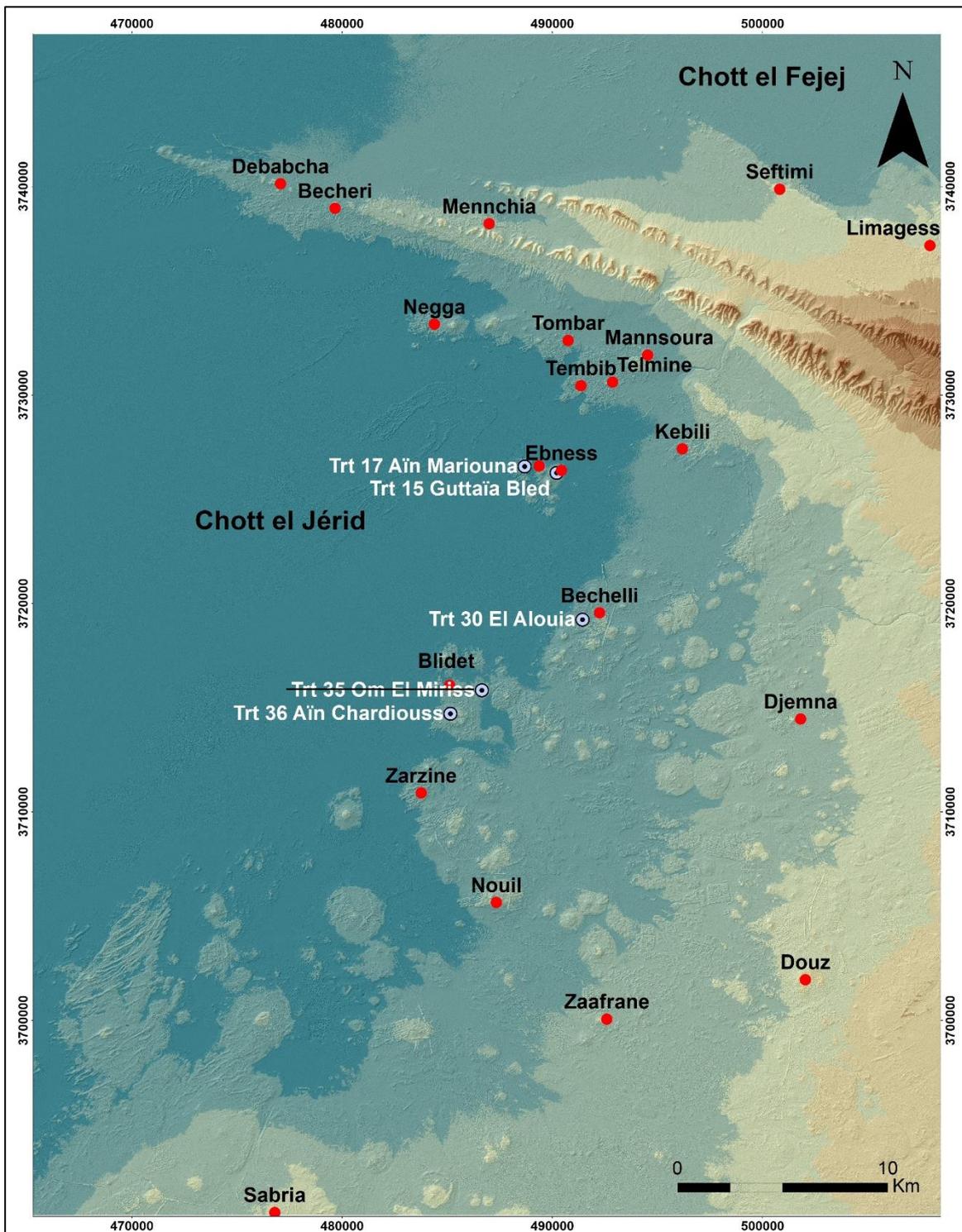


Figure 4.40 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons objet de datation au radiocarbone.

## 4.5.2 Résultats et interprétation

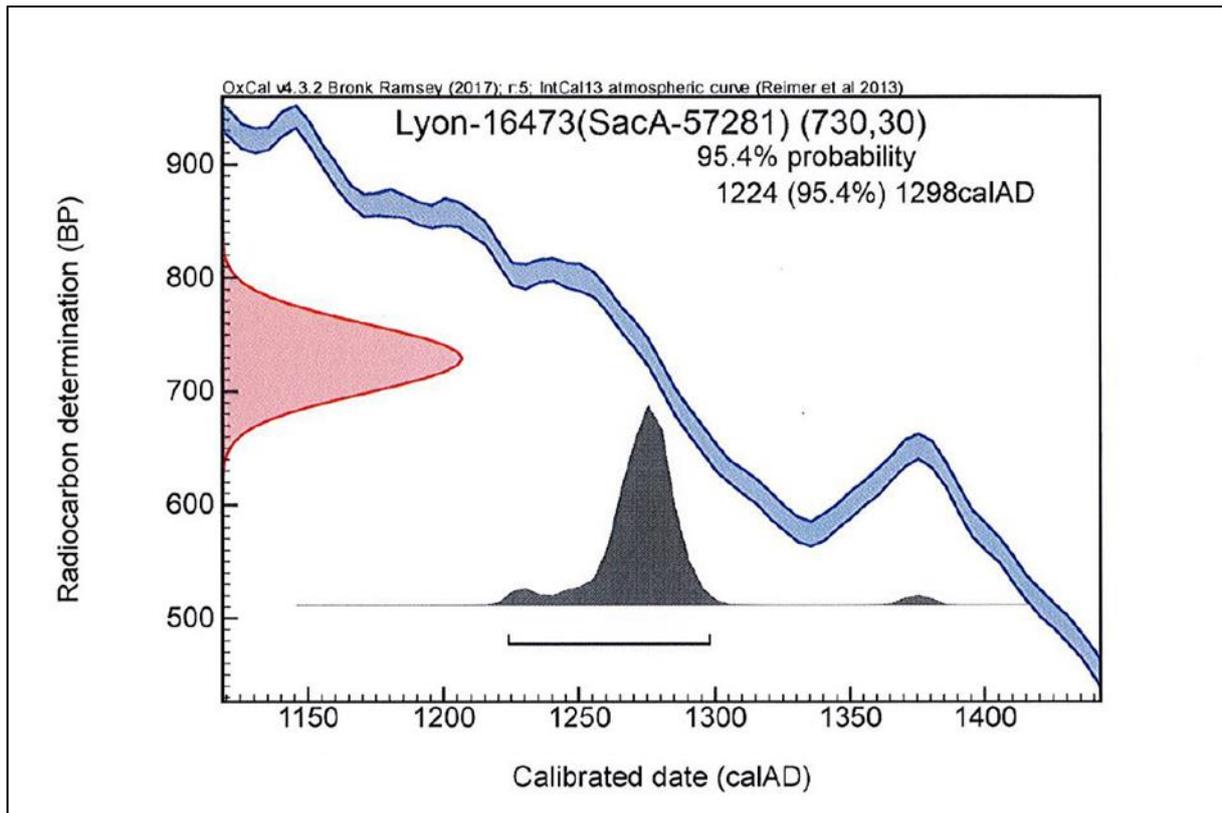
### 4.5.2.1 Le tertre d'Aïn Chardiouss (Trt 36)

Dans le tertre Trt 36 Ain Chardiouss les prospections ont permis le prélèvement de deux échantillons contenant des charbons : ECH1 et ECH2



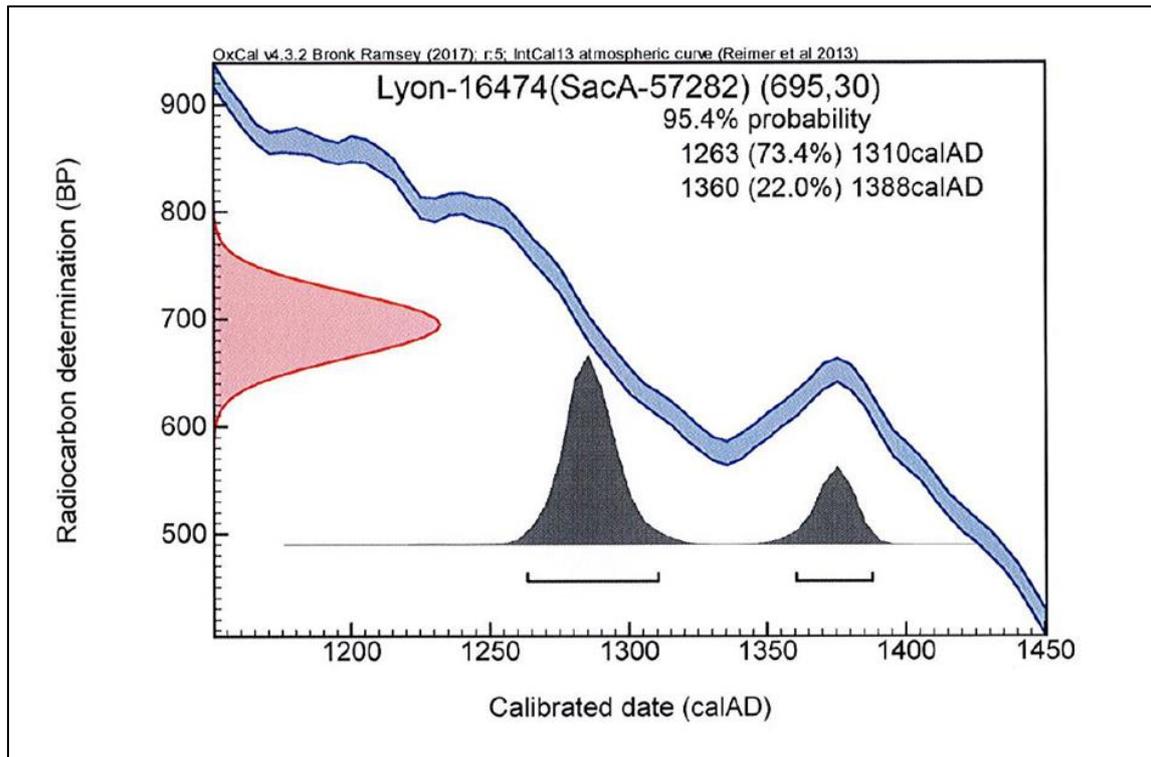
**Figure 4.41 : Emplacements du prélèvement des échantillons ECH 1et 2 pour la datation au radiocarbone.**

Un premier prélèvement ECH1 a été effectué au niveau de la strate A 12 de la coupe A (à 1,57 m du haut, voir figure 4.40). L'emplacement du prélèvement semble être un ancien foyer ; on note en effet la présence d'ossements et de fragments de poterie dans un horizon discontinu cendré. Les résultats obtenus ont donné une date estimée entre 1224 à 1298 ap. J.-C. comme le montre le pic noir sur le graphique de la figure 4.42, cela indique un âge probable de  $730 \pm 30$  ans (pic rouge) interprété en fonction de la courbe de calibration (courbe bleue). Cela nous renseigne essentiellement sur l'âge probable de l'occupation du tertre par l'Homme mais pas sur l'âge du dépôt de la strate.



**Figure 4.42 : Détermination de l'âge d'un fragment de charbon de la strate A 12 (coupe A) (pic rouge) en fonction de la date mesurée (en noir) et de la courbe de calibration (en bleu). Source : accélérateur ARTEMIS de Saclay (UMS 2572, Laboratoire mesure du carbone 14 (LMC14)).**

Un deuxième prélèvement de charbon ECH2 a été réalisé au niveau de la strate A 28 de la coupe A (8,10 m à partir du haut), mais les matériaux où a été fait le prélèvement semblent ne pas être en place. Les résultats obtenus ont donné une date estimée entre 1263 à 1388 ap J.-C comme le montre le graphite de la figure 4.43, cela nous donne un âge de  $695 \pm 30$  ans. Le résultat obtenu pour le charbon de la strate A 28 a donné un âge (compte tenue de l'incertitude et de la marge de  $\pm 30$  ans) proche de celui obtenu pour le charbon de la strate A 3. Il faut noter ici que les traces de phénomènes d'oxydo-réduction observés et étudiés entre les deux strates (voir § 4.3.2.3) indiquent un processus de sédimentation très lente. Cela conforte l'hypothèse que le niveau où on a effectué le prélèvement ECH2 n'était pas en place suite à un effondrement d'un bloc du niveau supérieur, comme en témoignent les importantes traces de creusement par pelles mécaniques observées dans le terte.



**Figure 4.43 : Détermination de l'âge d'un fragment de charbon de la strate A 12 (coupe A) (pic rouge) en fonction de la date mesurée (en noir) et de la courbe de calibration (en bleu). Source : accélérateur ARTEMIS de Saclay (UMS 2572, Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14)).**

#### **4.5.2.2 Le tertre d'Aïn Ben Zitoun (Trt 37)**

Les échantillons C14 ECH4 et ECH 5 ont été prélevés dans le tertre Trt 37 d'Aïn Ben Zitoun. Le tertre se localise dans l'oasis près de Blidet au sud de Kébili, il fait à peu près 470 m de diamètre mesuré sur les images satellites (Google Earth), son état est très dégradé. Il ressemble à une carrière de sable vu la quantité des matériaux déjà déblayés (Figure 4.44).



**Figure 4.44 : Vu panoramique sur le tertre Trt 37 Aïn Ben Zitoun. La flèche indique l'endroit où été effectué le prélèvement du charbon**

Le prélèvement des échantillons est situé dans un canal de sortie de l'eau vers l'oasis traversant la butte. Le matériel a été prélevé dans un dépôt de sédiments éoliens (sable fin limoneux) induré à ciment carbonaté avec de nombreuses racines pseudomorphosées par de la calcite (gangues). L'emplacement est donc un dépôt de sable éolien piégé par la végétation ; vu la hauteur du dépôt, on peut supposer que c'était un rebdou (Figure 4.45).

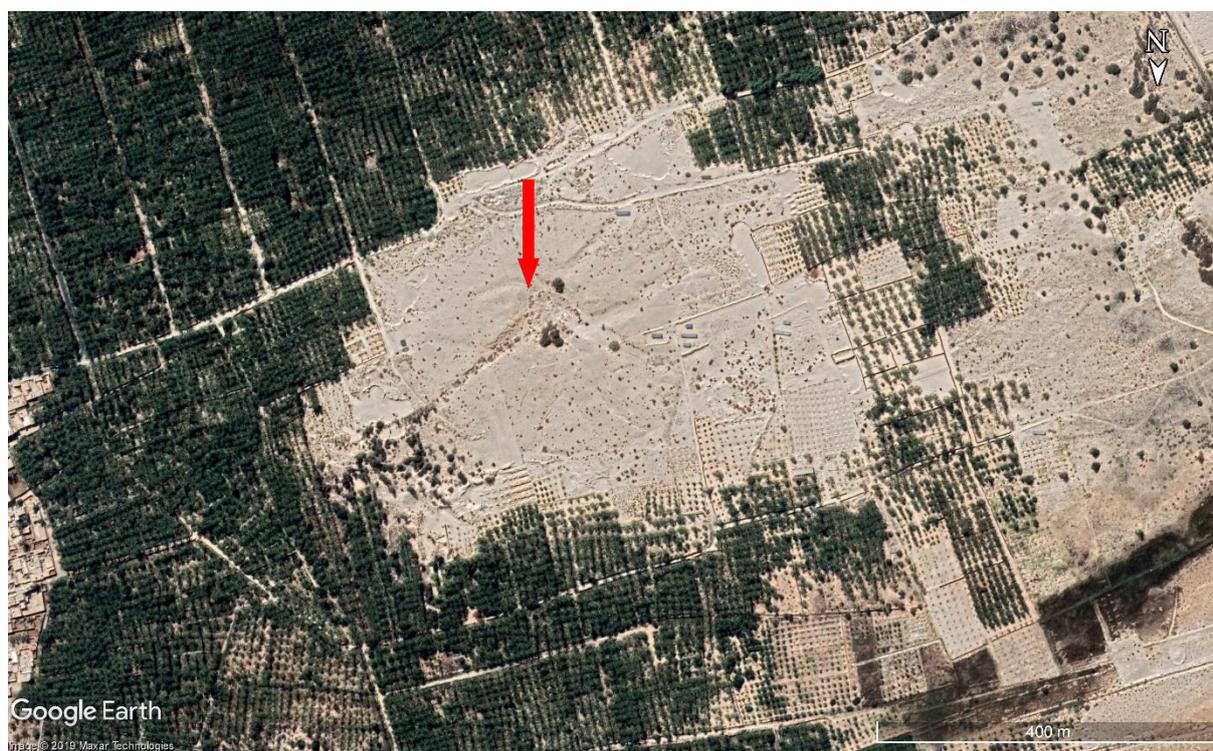


**Figure 4.45 : Emplacements du prélèvement de l'échantillon ECH4 et 5 pour la datation au radiocarbone.**

Les résultats obtenus pour ECH4 et ECH 5 ont donné une date estimée entre 1016 à 1155 ap J.-C et entre 986 à 1153 ap J.-C, cela nous donne un âge de  $970 \pm 30$  ans pour ECH4 et un âge de  $995 \pm 30$  ans pour ECH5. On peut conclure ici qu'il que le dépôt s'est effectué rapidement, car l'incertitude sur les dates ( $\pm 30$  ans) permet de les considérer comme contemporaines.

### 4.5.2.3 Le tertre d'El Alouia (Trt 30)

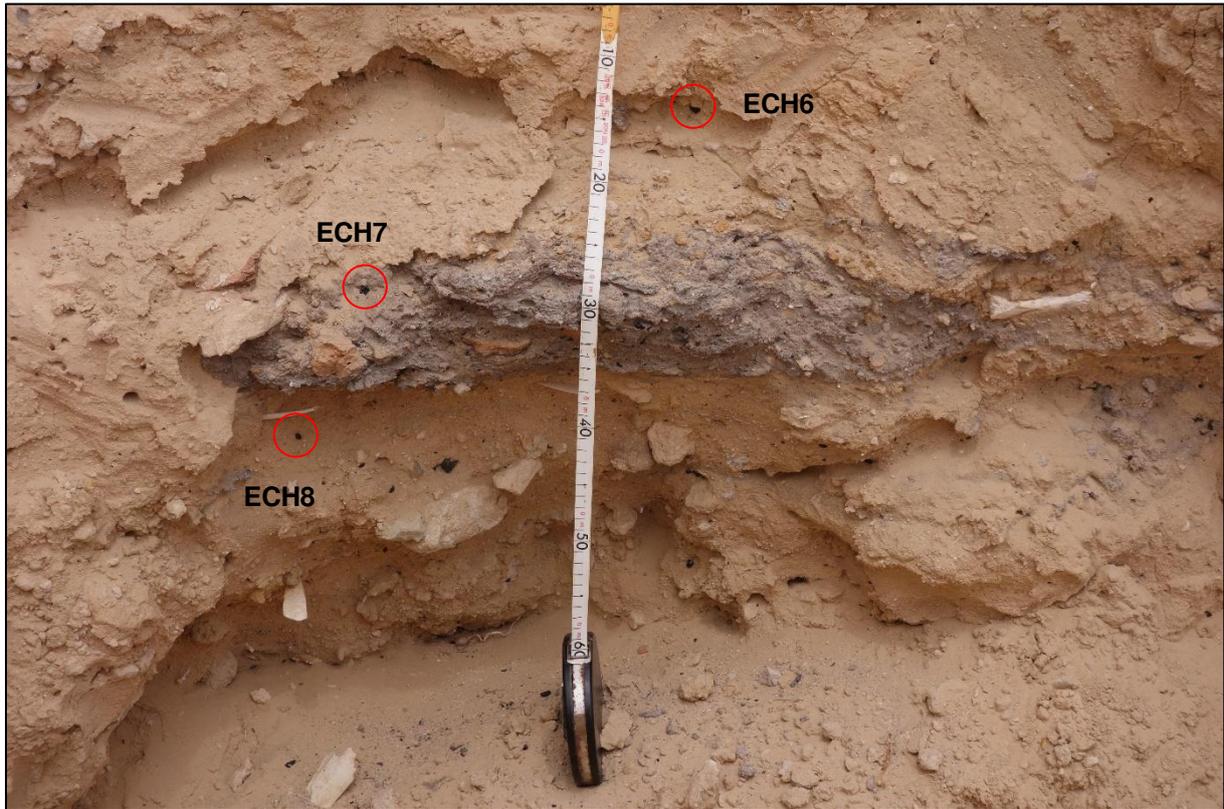
Les échantillons C14 ECH6, 7 et 8 ont été prélevés dans le tertre Trt 30 d'El Alouïa, dans l'oasis près de Bhelli au sud de Kébili. Il fait à peu près 500 mètres de diamètre, mesuré sur les images satellites (Google Earth). Le tertre était faiblement entamé par les pelles mécaniques lors de notre prospection en mai 2018, mais plusieurs nouvelles parcelles irriguées ont été installées tout autour. L'ancienne source est comblée, mais peut être localisée par la présence de grands tamaris au centre du tertre (Figure 4.46). Les canaux de sortie de l'eau vers l'oasis sont encore reconnaissables, même sur les images satellite (Google Earth).



**Figure 4.46 : Vue d'ensemble du tertre Trt 30 El Alouia : extrait Google Earth du 15/03/2019.**

La flèche indique l'endroit où été effectué le prélèvement du charbon.

Le prélèvement des trois échantillons de charbon a été effectué dans un matériau foncé sur la paroi d'une ravine creusant le sommet du tertre (Figure 4.47). La présence d'ossements et de poteries dans un horizon cendré nous renvoie sur une hypothèse similaire à celle d'ECH1, soit un possible foyer.



**Figure 4.47 : Emplacement du prélèvement des échantillons ECH6, 7 et 8 pour datation au radiocarbone.**

Les résultats obtenus ont donné une date estimée entre 1295 à 1401 ap J.-C pour ECH6 et ECH8 et une date estimée entre 1300 à 1419 ap J.-C, pour ECH 7. Cela nous donne un âge de  $615 \pm 30$  ans pour ECH6 et ECH 8 et un âge de  $580 \pm 30$  ans pour ECH7. Même si ECH7 semble un peu plus récent, compte tenu de l'incertitude sur la datation, les trois échantillons sont de la même période.

#### **4.5.2.4 Le tertre de Guettaïa Bled (Trt 17)**

L'échantillon C14 ECH10 été prélevé dans le Trt 17 de Guettaïa Bled, situé dans le village de Guettaïa. L'ancien village était bâti sur le tertre, on observe encore les vestiges de ses maisons. L'état général du tertre est très dégradé suite à la disparition d'une quantité très importante de son matériau sédimentaire ; ici encore on reconnaît l'action des pelles mécaniques. La mise à nu par ablation mécanique a permis l'observation de plusieurs galeries pour la conduite d'eau, supposées souterraines, à plafond effondré.



**Figure 4.48 : Vu d'ensemble du tertre Trt 17 Guettaïa Bled : image Google Earth du 08/11/2018.**

La flèche indique l'endroit où été effectué le prélèvement du charbon (Figure 4.48). L'endroit où on a effectué le prélèvement de ECH10 est un foyer (Figure 4.49).

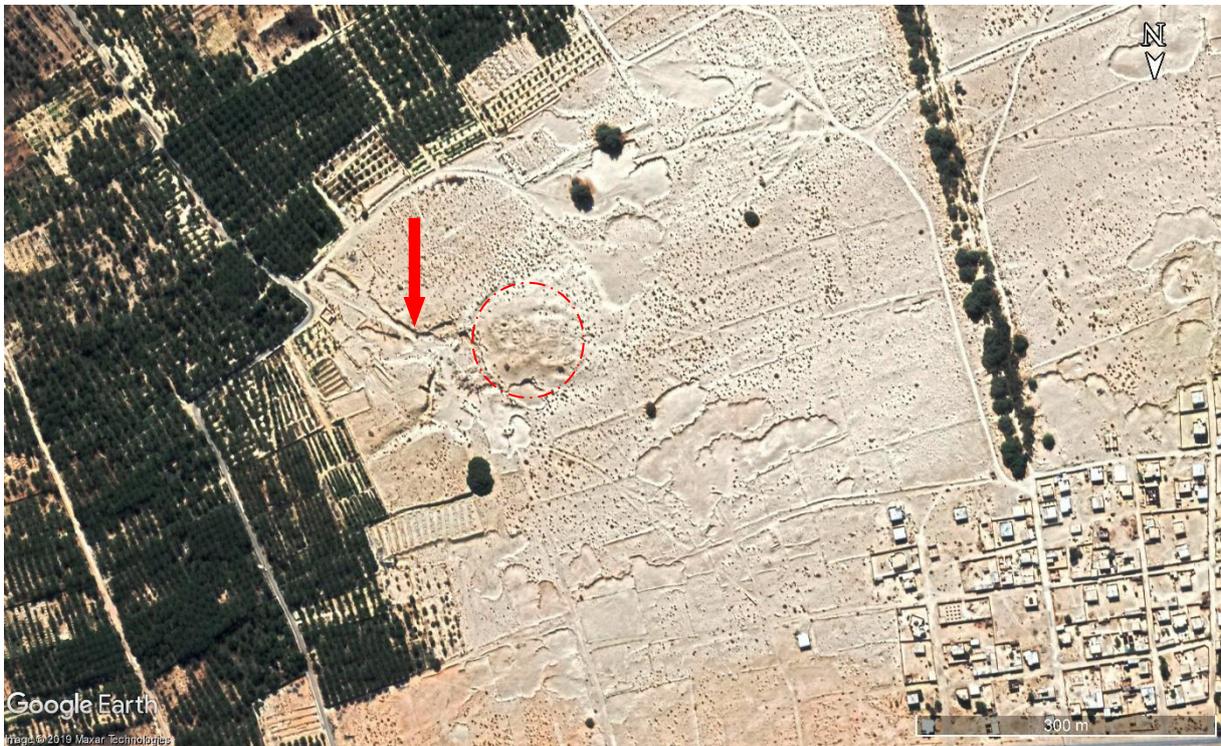


**Figure 4.49 : Emplacements du prélèvement de l'échantillon ECH10 pour datation au radiocarbone.**

Les résultats obtenus ont donné une date estimée entre 1470 et 1640 ap J.-C. cela indique un âge probable de  $340 \pm 30$  ans. C'est l'échantillon le plus récent parmi ceux qui ont été analysés.

#### **4.5.2.5 Le tertre d'Aïn Mariouna (Trt 15)**

L'échantillon C14 ECH9 a été prélevé dans le tertre Trt 15 d'Aïn Mariouna qui se localise à proximité de Ebness au sud-ouest de Kebili. Le tertre fait à peu près 650 m de diamètre mesuré par satellite (Google Earth), il est dans un état très dégradé, des vestiges d'anciennes fondations de maisons sont localisées au sommet de la structure ainsi que des éclats de silex et des morceaux de céramique. Ce tertre est indiqué comme source comblée sur la carte topographique de 1933 (1/100 000) du service géographique de l'armée (Figure 4.50).



**Figure 4.50 : Vu d'ensemble du tertre Trt 30 El Alouia : image Google Earth du 08/11/2018.**

La flèche indique l'endroit où a été effectué le prélèvement du charbon. Le cercle rouge indique l'emplacement des vestiges de l'ancien village.



**Figure 4.51 : Emplacement du prélèvement de l'échantillon ECH9 pour datation radiocarbone.**

L'endroit où on a effectué le prélèvement de ECH9 se trouve dans un horizon foncé et sa proximité avec une fondation de mur semble indiquer qu'il s'agit d'un foyer. La date obtenue, estimée entre 258 à 428 ap. J.-C., donne un âge probable de  $1670 \pm 30$  ans calibré et nous fait remonter jusqu'à l'Antiquité tardive.

### 4.5.3 Synthèse

Le principal objectif des prélèvements d'échantillons contenant des charbons par la méthode du C14 était la datation de la mise en place des tertres et la vitesse de leur formation afin de comprendre leur genèse. Cependant la majorité des échantillons n'ont pu être collectés que dans d'anciens foyers, ce qui nous donne une date probable de l'occupation des tertres par l'Homme peut-être bien postérieure à la formation des tertres. Les échantillons les plus anciens nous ont fait remonter jusqu'à l'Antiquité tardive. Les échantillons ECH4 et ECH 5 qui ont été prélevés dans un vestige probablement de rebdo ont donné un âge probable de  $970 \pm 30$  ans pour ECH4 et un âge de  $995 \pm 30$  ans pour ECH5 semblent indiquer une sédimentation rapide.

## Conclusion

Les quatre coupes décrites correspondant à deux tertres distincts ont donné des images de l'organisation stratigraphique de ces structures sédimentaires qui restent localisées et fragmentaires. La visibilité des strates et de leur organisation dépend malheureusement du front de taille de leur démantèlement. En complément de la description fine de ces coupes, l'observation d'autres coupes de tertres non étudiées en détail, mais présentant le même schéma d'organisation global nous permet de proposer l'interprétation suivante :

i. Les accumulations éoliennes *stricto sensu* (sans trace de dépôts dans un environnement aqueux) sont visibles le plus nettement à la base de la coupe B. Elles témoignent de la formation de nebkhas par piégeage des sédiments éoliens par la végétation.

ii. Autour des sources artésiennes se créait une dynamique hydro-éolienne par coalescence des nebkhas et plus généralement par fixation autour des végétaux : étalement de l'eau issue de la source contenue dans la vasque du tertre ainsi formé, apparition de séries de dépôts vraisemblablement lacustres ou palustres sur une base souvent enrichie en argile, le plus souvent de smectites néoformées et qui se sont sédimentées dans un milieu aqueux. Ces niveaux argileux parfois très fins sont suffisants pour renforcer le caractère imperméable du substrat, permettant la stagnation de l'eau émergeant du centre du tertre durant de longues périodes. Ces surfaces d'eau dégagées pouvaient ainsi piéger des particules d'origine éolienne puis après un processus de sédimentation très lente, permettaient leur redistribution en strates très fines. L'observation au MEB des sédiments montre qu'outre la nature homomorphe des

sables quartzeux de la taille de sables très fins (entre 80 et 100  $\mu\text{m}$ ) présentant des marques de dissolution en milieux aqueux dans les zones de fluctuation de nappe, ces sables fins sont souvent recouverts d'une pellicule (cutane) argileuse de nature diverse. Celle-ci est le plus souvent formée de smectites (argiles gonflantes peu perméables) caractéristiques d'une néoformation dans un milieu confiné ou d'argiles fibreuses caractéristiques des environnements évaporitiques très secs. Si les argiles fibreuses pourraient plutôt provenir d'un transport éolien à partir de la surface évaporée des sebkhas environnantes, les smectites sont néoformées *in situ* à partir de la dissolution de minéraux primaires de nature feldspathique ou d'amphiboles.

iii. Sur ces dépôts sédimentaires se superposent des traits d'évolution pédologique : Les strates ennoyées de manière prolongée développent des teintes pâles de gley<sup>14</sup> de couleur gris pâle à olive clair signe de la réduction du fer et de sa migration en solution en dehors des niveaux observés. La conductivité électrique des niveaux inférieurs est en général faible et augmente de la base vers le sommet des séries stratigraphiques au contact d'une eau de plus en plus évaporée.

Les niveaux soumis aux battements de la nappe dans sa partie supérieure vont présenter des taches caractéristiques d'oxydo-réduction de gley associant des teintes gris pâle et des taches d'oxydation rouille ou orangées à bords plus ou moins distincts durant les phases d'exondation.

Les taches se concentrent quelquefois dans des interstrates particulières avec une rupture de la connectivité verticale des pores lors des remontées capillaires. La couleur noire parfois observée est due à l'accumulation d'oxyde de manganèse encore plus mobile que le fer ;

Au-dessus de ces structures de gley, on peut parfois noter la présence de stagnogley (horizons stagniques<sup>15</sup>) dans des nappes perchées généralement situées dans la partie médiane supérieure des coupes excavées. A l'inverse des gleys, la coloration dominante est brun vif à orangée avec des taches pâles dans les fissures et les pores.

Parfois, des traces de la présence de végétation sont identifiables avec des traces d'oxydo-réduction associées à des anciennes racines (manchons gris pâle dans une matrice

---

<sup>14</sup> Propriétés gleyiques : Saturé par l'eau de nappe (ou par des gaz ascensionnels) suffisamment longtemps pour que surviennent des conditions réductrices. **IUSS WRB 2015**

<sup>15</sup> Propriétés stagniques : Saturé par l'eau de surface (ou par un liquide), au moins temporairement et pendant suffisamment longtemps pour que surviennent des conditions réductrices **IUSS WRB 2015**

orangée dans les cas de niveaux oxydo-réductiques des niveaux stagniques ou orange vif dans une matrice grise dans les cas de gley (IUSS, WRB, 2015).

Les niveaux carbonatés très nombreux, le plus souvent en amas pulvérulents centimétriques à décimétriques se développent de manière stratifiée. Ces carbonates peuvent s'indurer en rognons centimétriques. La concentration en carbonates et leur précipitation provient très probablement des remontées capillaires<sup>16</sup> suite à une forte évaporation. La rupture de la connectivité des pores entre les strates favorise le développement de ces amas dans ces interfaces.

iv. Dans la phase terminale de croissance du tertre, les sommets sont occupés par des croûtes gypseuses ou carbonatées qui les protègent de l'érosion éolienne. Comme l'avait déjà suggéré Watson 1985 et 1988 deux hypothèses complémentaires peuvent être évoquées pour expliquer ces concentrations de gypse :

- Des dépôts d'origine éolienne probablement issus de la remobilisation de dépôts évaporitiques à la surface des chotts viennent recouvrir les dépôts lacustres. Cette hypothèse est évoquée par Watson (1983) puis développée par Drake et al. (2004). Ce gypse particulaire se dépose à la surface de toutes les structures. Comme le gypse est soluble dans l'eau à raison d'un peu plus de 2,0 g l<sup>-1</sup>, il va se solubiliser durant les rares pluies puis reprécipiter et cimenter les particules gypseuses les unes aux autres en une « carapace gypseuse ». Cependant cette hypothèse de formation de concentration gypseuse per descensum (lixiviation d'ions sulfates) décrite par des géologues ou des géomorphologues nécessite une forte discrimination des particules éoliennes souvent à dominante quartzeuse dans la région. Elle est cependant possible car la densité du gypse est plus légère ( $\approx 2,3$ ) contre 2,65 pour le quartz. Si les vents dominants sont orientés du Nord-Est, ces dépôts nécessitent une orientation constante avec une source d'émission sans doute du Chott el Fejaj d'extension bien plus réduite que le Chott el Jérid. Le gypse précipite à la surface du chott lors d'épisodes pluvieux plutôt hivernaux qui abaissent la salinité en chlorure de sodium très soluble provoquant ainsi la précipitation du gypse car en présence de chlorure de sodium le

---

<sup>16</sup> Le système de pores connectés dans un sol permet à l'eau de progresser, essentiellement sous forme liquide, en fonction de la tension capillaire (fonction notamment du rayon du capillaire ou pore, d'après la Loi de Jurin), y compris en allant à l'encontre de la gravité, les forces exercées par tension sur l'eau l'équilibrant. Outre la teneur en eau du sol, c'est donc la nature du matériau (sa structure poreuse) qui a un impact décisif sur la hauteur des remontées capillaires. Plus les pores sont fins plus la remontée sera grande. Elle peut atteindre 2 m pour un matériau constitué exclusivement de sables fins.

gypse est en sursaturation. Puis une fois les eaux évaporées, il est transporté par déflation durant les forts vents de printemps.

Cette origine peut aussi être raisonnablement complétée par une autre origine corroborée par les observations de pédologues comme Pouget, qui dès 1968 remarquait des concentrations de gypse en horizons pédologiques de type gypsique dans les sols oasiens, souvent irrigués à partir d'une nappe à faible profondeur parfois fortement salée et présentant une hydromorphie temporaire.

- Tout comme pour les carbonates, mais avec une solubilité bien plus grande, les sulfates migrent le long des pores par remontées capillaires. Ces remontées capillaires proviennent de manière surprenante d'un niveau piézométrique assez haut, probablement au centre du tertre, au maximum à 10 m sous le niveau de précipitation du gypse. Ainsi le tertre durant l'apogée de sa formation devait avoir une forme ressemblant à un petit cône volcanique avec un lac ou un marécage en son centre (d'où les traits d'oxydo-réduction particulièrement importants dans la partie médiane du tertre). A partir de ce niveau aqueux par remontée capillaire les sels se concentrent per ascensum vers la surface dans des niveaux où ils précipitent en masse, là aussi en contact avec les eaux météoriques peu chargées en sels. Comme dans l'hypothèse précédente, le gypse est en sur-saturation dans les solution très salées et le lessivage du chlorure de sodium provoque sa précipitation principalement en saison fraîche.
- Il existe des précipitations primaires de gypse évaporitique associées à la périphérie du Chott El Djerid (Drake, 2004 ; Stivaletta, 2009). Ce dernier a décrit des micro-organismes endolithiques associés à des croûtes gypseuses peu ou pas remaniées formant des tertres en bordure du Chott. Cependant il n'existe aucune précision concernant la localisation exacte des prélèvements gypseux associé à des tertres. Il n'est donc pas possible d'effectuer un lien entre ces structures et celles qui sont décrites dans ce document.

Une fois cette structure établie, les rares pluies cimentent les cristaux de gypse et de calcite en une croûte imperméable sous forme de niveaux pétrogypsique ou pétrocalcique qui résistent fort bien à l'érosion hydrique ou éolienne (Watson, 1988). On peut d'ailleurs observer les migrations de traînées gypseuses provenant du sommet des tertres et formant des revêtements superficiels d'épaisseur centimétriques en voiles de teinte orange pâle à la surface des affleurements récemment excavés.

Il est à noter que hormis la partie supérieure des tertres soumise à une exposition prolongée aux remontées capillaires et à l'accumulation de sels en surface, les sédiments constituant les tertres et particulièrement la base du tertre ont une conductivité électrique très faible ( $<2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) (Figures 4.6, 4.18, 4.21 et 4.31) . Ce sont des matériaux relativement meubles, facilement excavables et ils sont à présent entièrement utilisés pour étendre les palmeraies. Ces dernières de par l'utilisation immodérée de l'irrigation par pompage solaire sont victimes d'une salinité grandissante. Ces tertres représentent des volumes estimés à plusieurs milliers de  $\text{m}^3$  de matériau disponible comme amendement pour augmenter les surfaces de plantation. Malheureusement cet amendement disponible voit sa ressource s'amenuiser très rapidement et son efficacité est réduite dans le temps.

# Conclusion de la deuxième partie

La diachronique récente, par l'utilisation de données multiples : télédétection, cartographie et photographies aériennes anciennes nous a permis d'observer l'ampleur et la rapidité de l'évolution spatiale du paysage oasien dans le Nefzaoua. A l'échelle des oasis, l'indicateur retenu pour le suivi du paysage est l'indice de végétation par différence normalisé, le NDVI. Cet indice a permis de repérer les zones où les oasis sont développées et celles où elles sont rares ou absentes. La composition colorée particulière des NDVI des trois dates superposées sur le MNT tandem X a fait affleurer en même temps la topographie des tertres mettant en évidence leur position au centre des anciennes oasis ainsi que l'évolution des oasis à échelle temporelle sur plus de 40 ans d'écart. A une échelle plus détaillée au niveau du tertre lui-même nous avons utilisé Google Earth pour observer leurs états de plus en plus dégradés suite à l'extension des palmeraies. Les tertres sont rapidement détruits. Pour nous, l'avantage est que leur démantèlement permet d'en reconstituer l'histoire géomorphologique. En effet, les coupes mises à nu par ablation mécanique nous ont permis d'étudier les archives sédimentaires de ces structures et de comprendre leur organisation stratigraphique.

L'étude sédimentologique des quatre coupes nous a permis de déduire que la morphologie des tertres de sources est déterminée par une conjonction de facteurs :

- i) l'émission d'une source artésienne d'eau peu salée ;
- ii) la colonisation par la végétation s'installant en couronne autour de ce point d'eau ;
- iii) le piégeage de sédiments d'origine éolienne par cette végétation ;
- iv) les dépôts stratigraphiques au sein du plan d'eau et leur induration par remontées capillaires.

La stratigraphie des tertres comprend des alternances de dépôts de sables d'origine cristalline (quartz, feldspaths), de sable gypseux mêlés à du sel (halite) formé par évaporation en surface des chotts avoisinants et soufflé par le vent, de néoformations de carbonates, sulfates et de certains composés argileux (smectites, argiles fibreuses) se formant en milieu confiné ou à partir de remontées capillaires, de couches riches en matière organique. Ces dépôts sont organisés en strates fines vraisemblablement sédimentées en milieu aqueux, disposés en séquences superposées avec une pente de dépôt vers l'extérieur à partir du griffon

central. Les phénomènes d'oxydo-réduction observés et étudiés indiquent un processus de sédimentation très lente.

Ces formes sont donc une source potentielle d'informations sur les changements environnementaux intervenus à l'Holocène.



**Troisième Partie : les tertres de  
sources : une entité  
géomorphologique en voie de  
disparition**



# Introduction de la troisième partie

*L'environnement naturel constitue le cadre de vie de tous les êtres vivants et de l'homme en particulier. De par sa complexité, sa dynamique et sa sensibilité, l'environnement naturel et son histoire représentent un patrimoine pour les sociétés humaines (Martini 1994).*

Alors que la dégradation des terres est considérée comme l'une des causes les plus importantes de la perte de biodiversité (Prince et al. 2018), la salinisation causée par une mauvaise gestion de l'irrigation est considérée comme une cause majeure de la dégradation des terres et de la désertification dans les terres arides, en particulier dans les milieux oasiens (UNCCD, 1994, FAO et ITPS, 2015). Cette dégradation spécifique des terres est très documentée dans le Nefzaoua (El Fekih et Pouget, 1966 ; Hachicha et al, 1995 ; Zammouri et al, 2007 ; King et Thomas, 2014 ; Hirche et al, 2017).

Cependant, il existe une autre forme de dégradation des terres très peu documentée, la destruction complète et récente d'une caractéristique géomorphologique naturelle, les tertres associés aux sources artésiennes. Les tertres de sources représentaient l'ancien système hydroagricole oasien. Le fait que la base des tertres soit constituée de sédiments peu chargés en sels (conductivité  $< 2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), leur usage pour étendre les surfaces cultivables dans les zones sursalées des chotts a vite été assimilée par les agriculteur locaux. Leur état est de plus en plus dégradé suite à leurs démantèlements excessifs et à l'extension des palmeraies.

Cette partie est composée de deux chapitres. Le chapitre cinq sera consacré à l'étude de l'état actuel des tertres. Pour mieux caractériser ce remarquable paysage en voie de disparition, une typologie a permis d'identifier six types d'état actuel des tertres. Elle a été illustrée par une étude de cas pour chaque type identifié. Ensuite un inventaire sous la forme d'une base de données des vestiges des tertres est réalisé. Enfin, pour mieux estimer l'état actuel de l'ensemble des tertres de la région, une analyse cartographique est mise en place. Nous avons utilisé pour cela le maximum des documents disponibles, détaillés dans la deuxième partie : cartes anciennes, photographies aériennes à plusieurs dates, image satellite, le modèle numérique de terrain (MNT) le plus récent et bien sûr nos observations sur le terrain. Le chapitre six sera consacré à la question de la valeur patrimoniale que ces tertres représentent dans l'histoire de la région et sur les menaces qui pèsent sur leur préservation. Pour cela nous avons cherché à définir les tertres comme patrimoine à protéger, puis les étapes nécessaires à une éventuelle patrimonialisation.



# **Chapitre 5 : Typologie des tertres du Nefzaoua**

# Introduction

Par la reconnaissance, l'observation sur le terrain, l'approche cartographique, l'utilisation des photographies aériennes et des images satellites, nous avons réalisé jusqu'à présent une cartographie-inventaire des tertres du Nefzaoua. Puis l'étude sédimentologique de quelques tertres remarquables nous a permis de préciser leur processus de formation. Ces travaux ont montré qu'ils forment un paysage remarquable, tant du point de vue géomorphologique, que de celui de l'histoire de l'occupation humaine de cette région, et du développement de ses oasis, notamment dans sa phase récente, accélérée.

Ce développement se traduit par une disparition rapide, qui paraît inexorable, de ces monticules si typiques de la région du Nefzaoua, uniques dans toute la Tunisie.

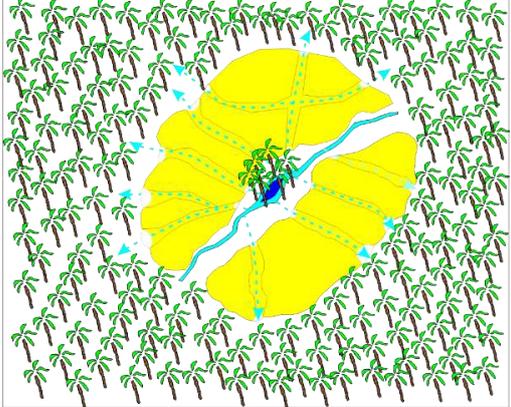
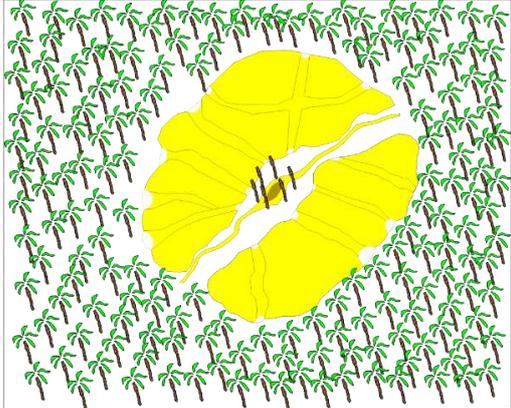
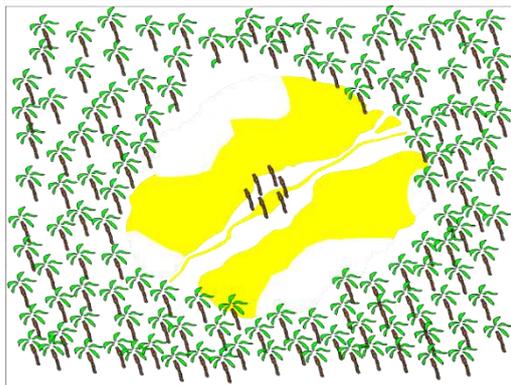
Les tertres « naturels » décrits dans la première partie ont été l'objet de transformations par l'Homme qui seront étudiés dans ce chapitre. Nous verrons d'abord comment ils ont évolué depuis l'abaissement des nappes artésiennes puis nous proposerons une typologie des formes, illustrée par des études de cas.

## 5.1 Évolutions des tertres depuis l'abaissement de la nappe artésienne

Nous avons présenté dans la première partie un schéma de la formation ainsi que l'évolution naturelle qu'ont suivie les tertres de sources artésiennes dans le Nefzaoua. Dans cette partie nous nous intéresserons à l'évolution qu'ils ont subie après l'intervention anthropique.

L'Homme a aménagé les tertres en transformant cette formation naturelle en un système hydraulique. Il a également contribué à l'entretien du tertre (curage et désensablement) et ainsi à sa durabilité. En effet l'entretien du système hydraulique des tertres de sources demandait beaucoup d'efforts et particulièrement une main-d'œuvre robuste et bon marché. Ce n'est qu'après la baisse de la nappe et le tarissement des sources dû au développement des forages dès l'aube du 20<sup>ème</sup> siècle que les tertres ont été abandonnés progressivement. L'abandon des tertres n'a pas duré longtemps. L'homme a recommencé à les réutiliser, mais d'une autre manière : il a commencé leur démantèlement. Puisqu'ils ont cessé de fournir de l'eau, ils sont devenus source de matériel meuble, principalement du sable.

Ce sable est utilisé pour le rehaussement des sols salés dans le but de gagner du terrain en avançant dans le chott pour l'extension des oasis modernes de la région.

Étapes des interventions anthropiques	Schéma
<p>Aménagement du tertre par l'homme : établissement d'un système d'irrigation par gravité à partir du tertre.</p> <p>Le système est maintenu par le creusement de sorties de l'eau, aérienne (brèches dans le tertre) ou souterraine (foggaras), ainsi que par le désensablement de la cuvette et l'installation de l'oasis traditionnelle cultivée en trois étages.</p>	 <p>(Tertre en vue verticale)</p>
<p>Forme relictuelle : lorsque la pression artésienne de l'eau baisse (naturellement ou à cause des forages), l'exurgence se tarit et le système tertre n'est plus fonctionnel. Le tertre n'est plus qu'un vestige.</p>	 <p>Palmiers morts</p>
<p>Démantèlement et arasement du tertre : le sable du tertre est utilisé pour créer un substrat pédologique surélevé non salé au-dessus des terres salées pour étendre la superficie de la palmeraie.</p>	

**Figure 5.1 : Étapes de l'intervention anthropique depuis l'abaissement de la nappe artésienne dans le Nefzaoua**

A partir de ce schéma simplifié nous allons voir maintenant plus en détail comment ces modifications s'effectuent.

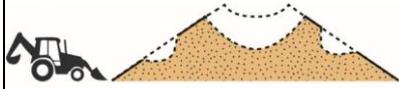
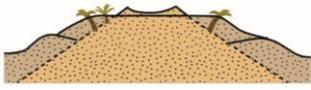
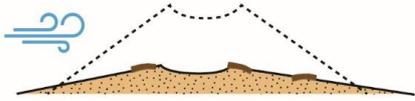
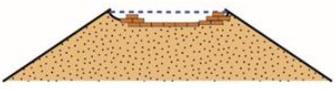
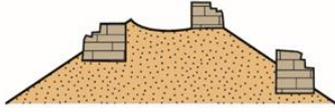
## 5.2 Typologie de l'état actuel des tertres du Nefzaoua

Les prospections effectuées sur le terrain ont permis la mise en place d'une typologie de l'état de dégradation des tertres du Nefzaoua ainsi que l'identification du degré et la forme de leurs destructions.

### 5.2.1 Classification de l'état des tertres

En suivant l'état de dégradation des vestiges des tertres, nous avons retenu six types principaux, listés dans le tableau suivant (Tableau 5.1) :

**Tableau 5.1 : Classification des tertres du Nefzaoua.**

<i>Type de vestige</i>	<i>Illustration</i>	<i>Description</i>
<b>Tertre démantelé</b> Type D		Tertre qui a subi des extractions par des pelles mécaniques
<b>Tertre peu dégradé</b> Type P		Tertre qui a conservé sa morphologie originelle avec un faible prélèvement à sa périphérie Partie centrale intacte : vasque visible
<b>Tertre ensablé</b> Type E		1-Tertre recouvert par des dépôts de sable vif, de différentes formes [voile éolien, Nebka...] 2-Tertre si ensablé que la morphologie originelle de la partie sommitale n'apparaît plus
<b>Tertre aplani</b> Types N et A		<b>Naturel (N)</b> : tertre dont la surface est érodée, le cratère est ensablé et les troncs de palmiers restants sont couchés
		<b>Anthropique (A)</b> : toute la partie sommitale du tertre a été décapée, arasée par l'Homme
<b>Tertre aménagé</b> Type M		Tertre à griffons aménagés : La collecte des eaux artésiennes se faisait dans des bassins aménagés
<b>Tertre urbanisé</b> Type U		Tertre modifié : en général un village est bâti sur le tertre Ruines d'anciennes maisons

Dans cette typologie nous nous sommes basés principalement sur le critère qui domine le paysage du tertre. Cela part de l'état actuel du tertre et s'élargit ensuite vers l'environnement l'entourant. L'observation générale puis détaillée ne nous a pas conduit à une typologie où chaque tertre appartient strictement à un seul type. Un même tertre peut présenter les caractères de plusieurs types à la fois. Dans l'inventaire qui suivra selon l'ordre du tableau, les tertres n'appartiennent donc généralement pas à un type pur, mais on distingue un type dominant et des types jugés secondaires. Ainsi, dans l'étude de cas qui suit, chaque tertre sera présenté avec son type dominant suivi de son ou de ses types secondaires.

Exemple : un tertre qui a été attaqué par les pelles mécaniques est également occupé par des ruines d'anciennes maisons ; le type « démantelé » lui sera attribué parce que c'est le critère qui domine le paysage du tertre actuellement. « Urbanisé » sera son type secondaire de par la présence de restes d'un ancien village.

### **5.2.2 Typologie : Étude de cas**

Afin d'illustrer la typologie proposée, les six types de l'état actuel des vestiges des tertres sont illustrés par une étude de cas. Pour les exemples concrets, observés et étudiés sur le terrain, afin de mieux saisir la démarche utilisant les six types, nous signalons le type dominant (en **Gras**) ainsi que les types secondaires. Les tertres du Nefzaoua n'ont pas été tous identifiés par leurs noms. Pour faciliter le travail, des codes ont été attribués. Une carte avec localisation des codes permettra de situer chaque tertre et son état.

Les exemples de la typologie sont illustrés par :

- Des images satellites (extraites de Google Earth) à au moins deux dates : la plus ancienne ainsi que la plus récente disponible ;
- Des photographies (aériennes et au sol) exposant l'état des tertres avec une date ancienne (dans le cas où nous en disposons dans les archives bibliographiques) et une date récente faite sur le terrain.

Cela permet de montrer la stabilité ou bien la destruction du tertre, et plus généralement d'illustrer, définir et expliquer la logique de notre typologie.

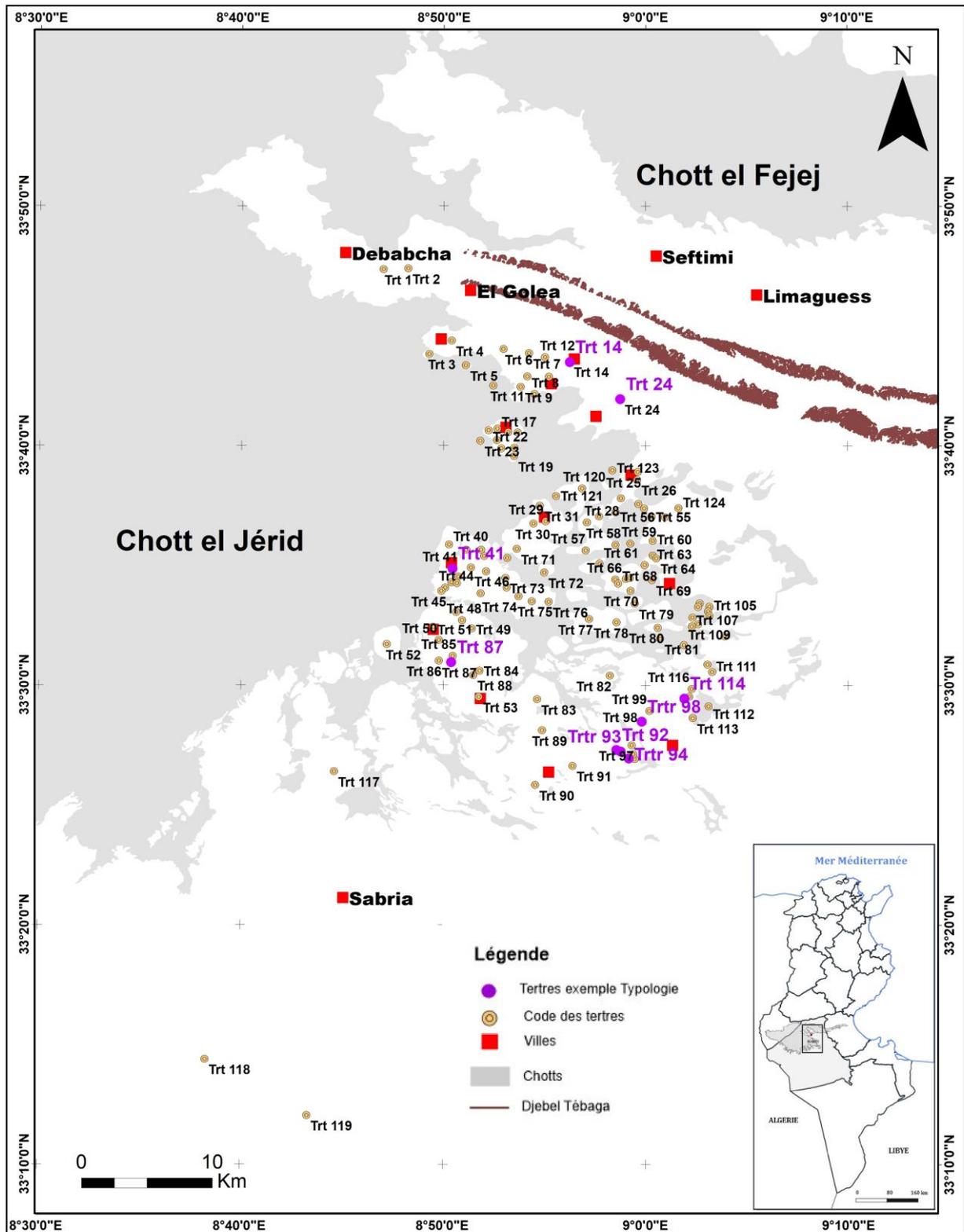


Figure 5.2 : Carte de localisation des tertres avec leurs codes : les tertres utilisé comme exemple pour la typologie sont indiqués sur la carte par la couleur mauve.

### 5.2.2.1 Type démantelé (type D)

Un tertre de type démantelé est un tertre qui a subi un démantèlement, voire un arasement par des pelles mécaniques. Le prélèvement de sable est réalisé généralement dans le but de gagner de nouveaux terrains sur le chott en le comblant avec le sable prélevé pour étendre la surface cultivable. En même temps, le tertre arasé permet la création de nouveaux champs. Ce type se localise surtout sur les limites des chotts (topographiquement la partie la plus basse) où se trouvent les plus grands tertres du Nefzaoua.

#### 5.2.2.1.1 Un tertre complexe démantelé : Tarfaïet el Kraoub (Trt 92)

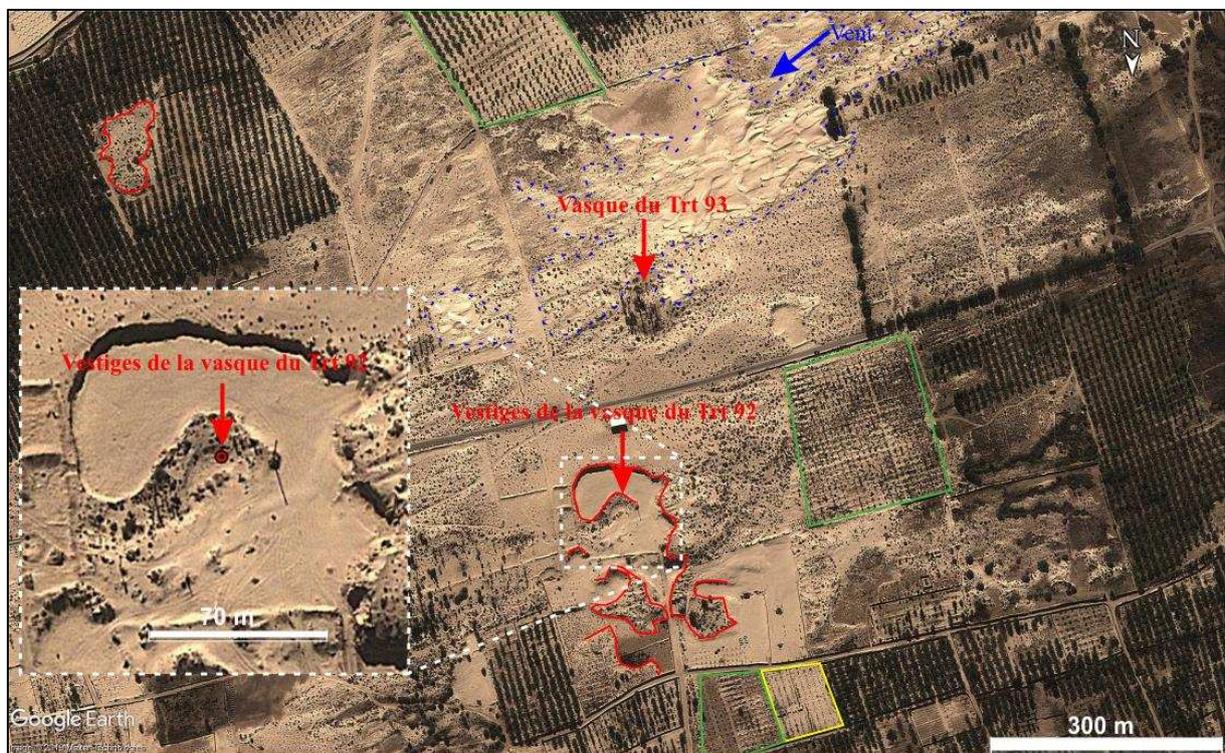
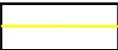
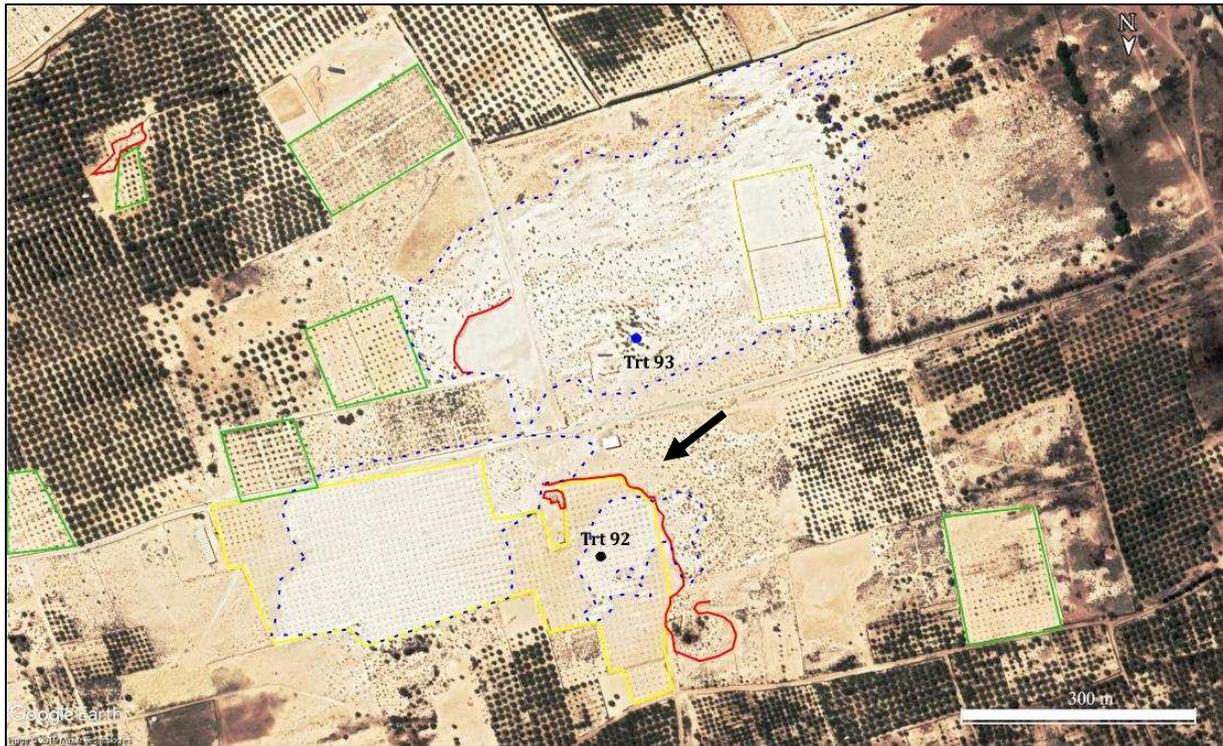


Figure 5.3 : Le tertre de Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) et le Trt 93 le 07-11-2012 (extrait de Google Earth) avec agrandissement de la vasque de Trt 92.

#### Légende

-  Abrupts principaux marquant les rebords des zones d'extraction
-  Plantations en cours
-  Plantations récentes
-  Surface ensablée



**Figure 5.4 : Le tertre de Tarfaïet el Kraoub Trt 92 et le Trt 93 le 04-05-2019 (extrait de Google Earth).**

↙ Emplacement d'où la photo de la figure 5.5 a été prise.

### **Description**

Ce tertre 92 (comme le Trt 93 voir paragraphe suivant) se localise à l'WSW de Douz, leur hauteur est estimée à 14 m (Figures 5.3, 5.4 et 5.5).

La destruction d'une grande partie du Trt 92, le rapprochement des deux tertres (ils sont collés l'un à l'autre) ainsi que la proximité d'autres tertres (Trt 94, 95, 96 et 97) ont rendu difficile le calcul de leur diamètre.

Le Trt 92 a perdu sa morphologie originelle. Il a été détruit par l'Homme qui a aplani toute sa partie centrale laissant des bords où nous avons observé des ruines de maisons anciennes. Elles semblent avoir été bâties dans le tertre ce qui suggère un habitat en partie troglodyte. On note aussi la présence de foyers avec des résidus de charbons en place très intéressants pour la datation au  $^{14}\text{C}$  de cette occupation.



**Figure 5.5 : Ruines de maisons du tertre Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) au SWde Douz : Prise de vue d’octobre 2019.**

Le démantèlement du tertre Trt 92 a commencé bien avant l’année 2012 (figure 5.3), première année que l’archive des images de Google Earth permet de visualiser. Sur cette image 2012 et à l’aide de la carte topographique, nous avons pu localiser les vestiges de la partie centrale du tertre (la vasque et le griffon).

Depuis 2012, d’après les images suivantes, le démantèlement du tertre paraît interrompu jusqu’au 12-09-2018. Depuis, il paraît avoir repris avec un rythme assez accéléré (Figure 5.4). Toute la surface aplaniée du tertre a été transformée en aire de plantations (illustré par la photo de terrain de la figure 5.6 ci-dessous).



**Figure 5.6 : photographie panoramique des plantations en cours du tertre Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) : Prise de vue octobre 2019.**

- Le tertre Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) est du type **démantelé**, aplani, urbanisé et ensablé. Il est en effet recouvert par des dépôts de sable vif (voile éolien).

### 5.2.2.2 Type peu dégradé (type P)

Un tertre de type peu dégradé est un tertre qui a conservé sa morphologie originelle avec un pourcentage plus au moins faible de destruction naturelle ou anthropique.

#### 5.2.2.2.1 Le tertre Trt 93



**Figure 5.7 : photographie du tertre Trt 93 avec un panneau en Arabe : « Terres privées, strictement interdit de prélever le sable, Merci ». Prise de vue octobre 2019**

#### **Description :**

Le Trt 92 est un petit tertre par rapport aux grandes formations où des coupes stratigraphiques ont permis d'effectuer l'étude de leur évolution sur le temps long. Il est très peu dégradé et a conservé sa forme originelle, une petite vasque entourée de palmiers en bon état et il est ensablé à sa périphérie (Figure 5.7). Des nebkas fixant une végétation autochtone entourent la vasque (Figure 5.8). Ce qui le rend intéressant est qu'un forage est installé aujourd'hui au cœur de sa vasque (figure 5.9). Le propriétaire a choisi de conserver ce tertre en indiquant qu'il est strictement interdit de prélever le sable sur ses terres. Il a aussi choisi d'installer ses propres jardins un peu loin en bas du tertre (figure 5.4 : les jardins sont indiqués comme plantations en cours), conservant ainsi le paysage naturel de ce tertre.



**Figure 5.8 : Photographie Vue d'ensemble du Trt 93 avec la vasque remplie d'eau. Prise de vue octobre 2019.**



**Figure 5.9 : Photographie de l'emplacement du forage dans la vasque (griffon de la source naturelle) du Trt 93. Prise de vue octobre 2019.**

\*Le tertre Trt 93 est du type **peu dégradé** et ensablé.

### 5.2.2.2.2 Le tertre de Selamia (Trt 98)

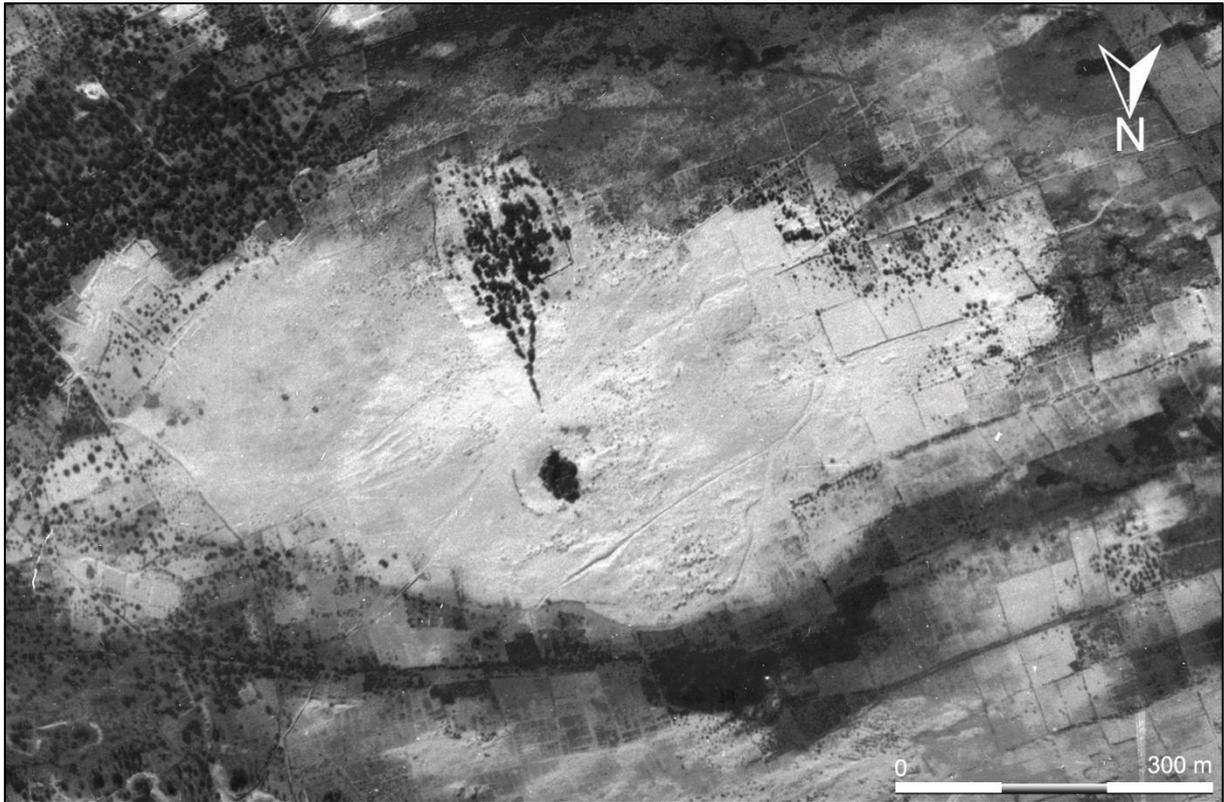


Figure 5.10 : Extrait d'une photographie aérienne de 1950 du Trt 98 Selamia.

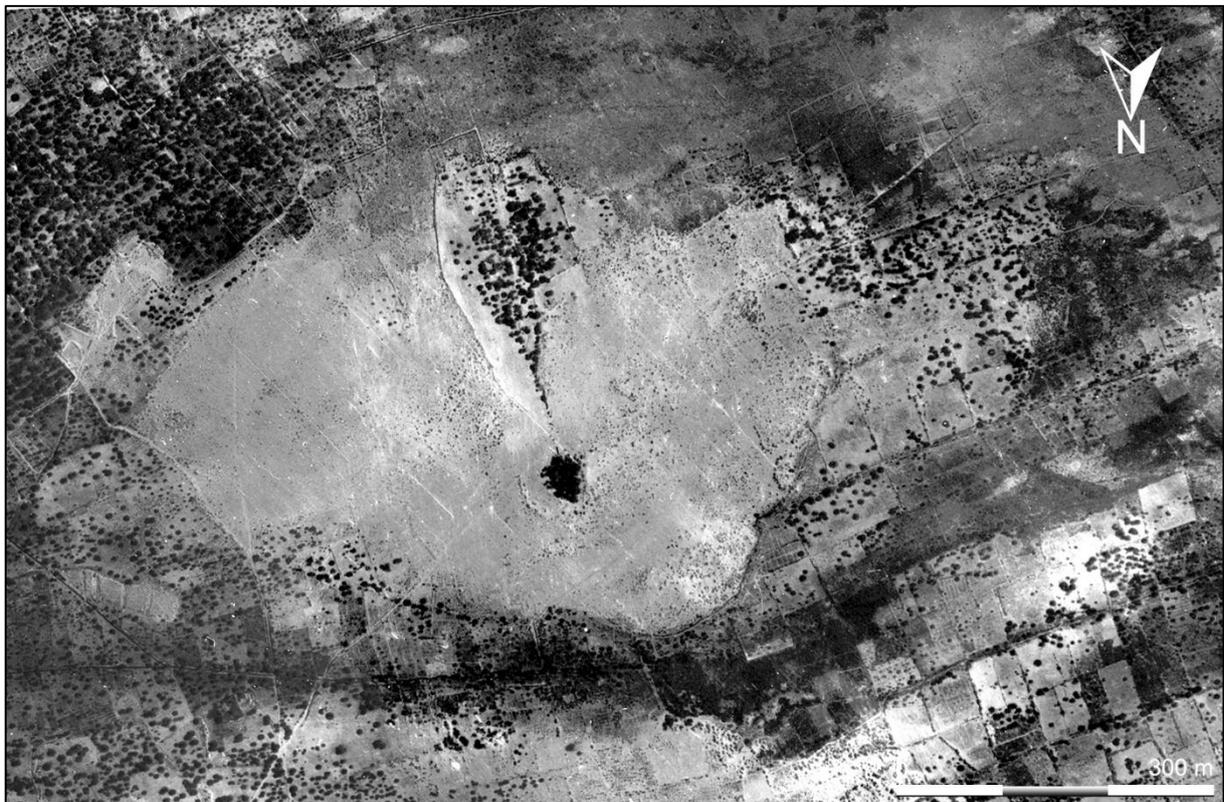
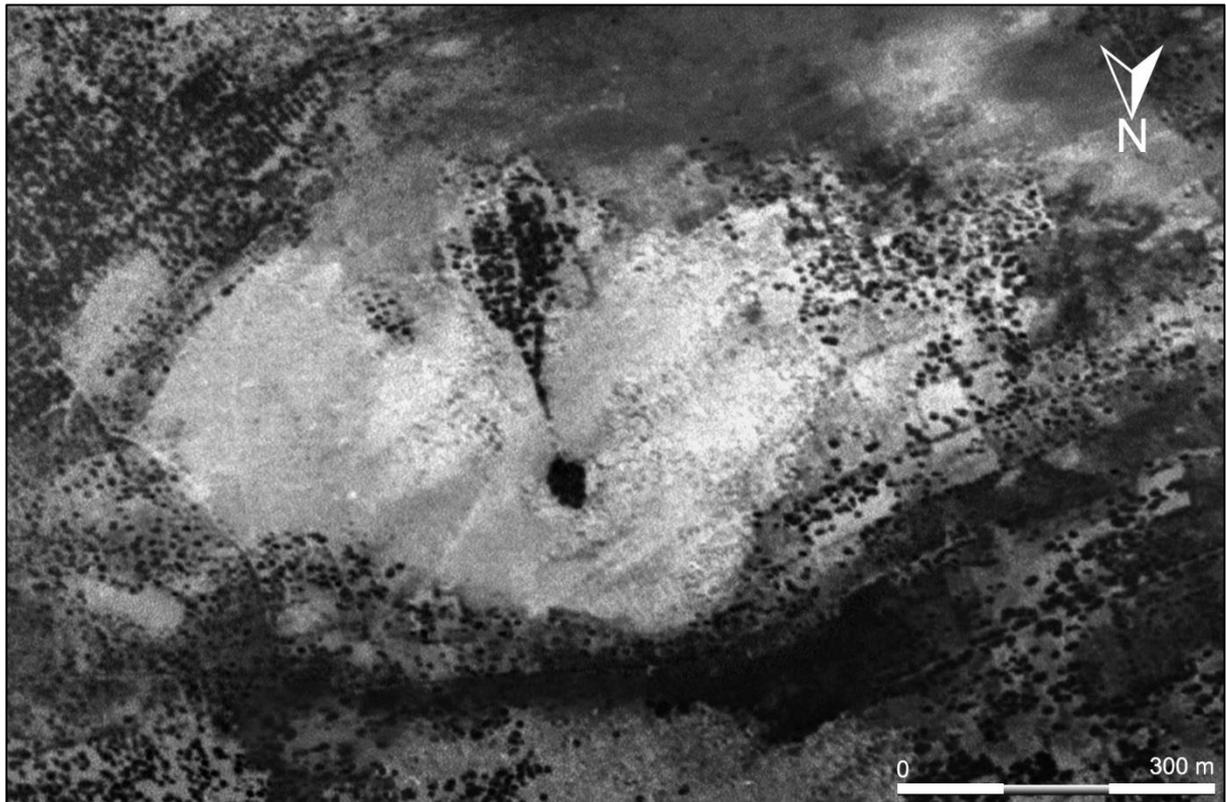


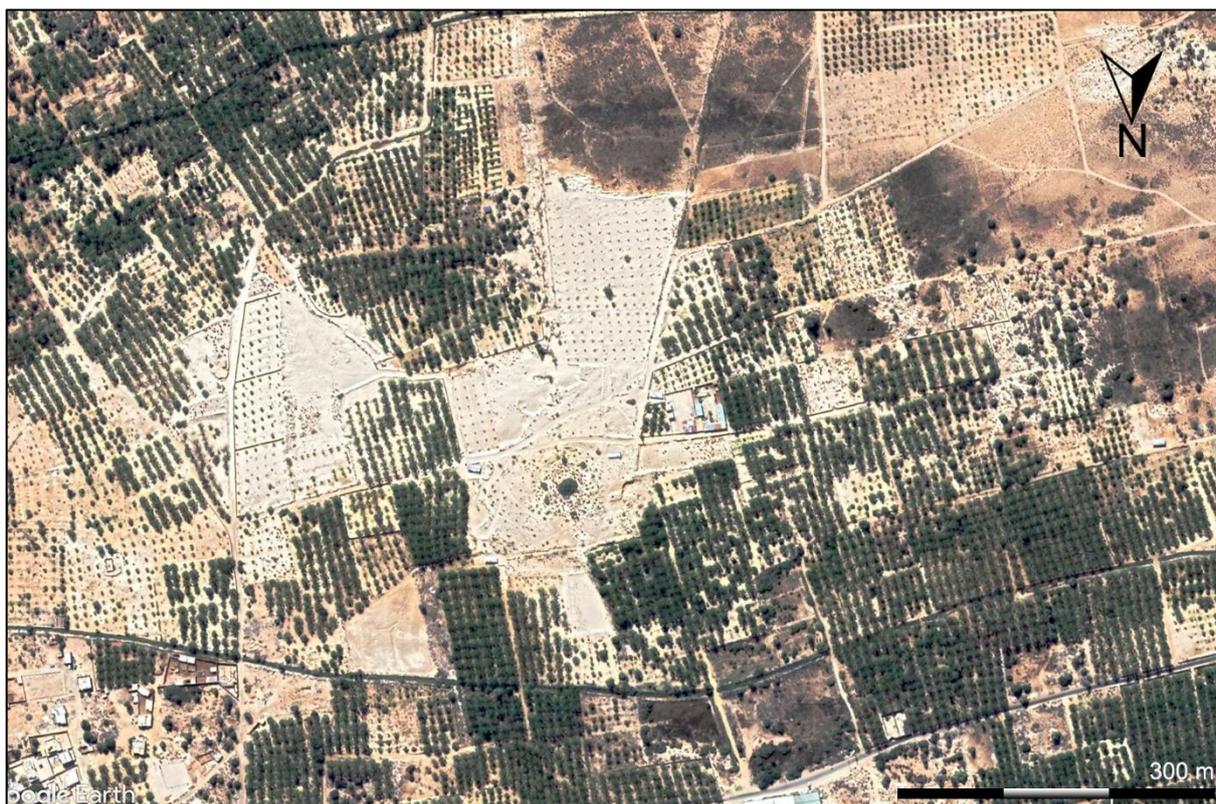
Figure 5.11 : Extrait d'une photographie aérienne de 1959 du Trt 98 Selamia.



**Figure 5.12 : Extrait d'une photographie aérienne de 1967 du Trt 98 Selamia.**



**Figure 5.13 : Le tertre de Selamia le 07-11-2012 (extrait de Google Earth).**



**Figure 5.14 : Le tertre de Selamia le 07-04-2019 (extrait de Google Earth).**

### **Description**

Le tertre de Selamia est classé en type peu dégradé en raison la conservation de la morphologie originelle de sa vasque. Il est localisé dans la région de El Galaa au NW de Douz. Il fait à peu près 600 m de diamètre, mesuré sur les images satellites (Google Earth), sa hauteur est estimée à 7 m. Il a été l'objet d'une étude diachronique par photo aérienne depuis 1950, (cf 3). Au début des années 1950, presque toute la superficie de l'édifice était encore à nu (Figure 5.10). Quelques petites parcelles entourant le bas du tertre étaient en cours de préparation, surtout à l'ouest. En 1959, elles étaient en plantation (Figure 5.11) et en 1967 toute la périphérie du tertre commençait à être bien occupée par l'oasis moderne (Figure 5.12). En 2012 le tertre est occupé dans sa partie centrale par de nouvelles parcelles, en revanche l'ancienne oasis existe encore (Figure 5.13). Aujourd'hui le tertre est couvert de plantations, ne laissant paraître que sa partie centrale qui a conservé sa morphologie originelle jusqu'à présent (Figures 5.14 et 5.16). Toutefois son diamètre se rétrécit au profil de l'extension de l'oasis moderne.



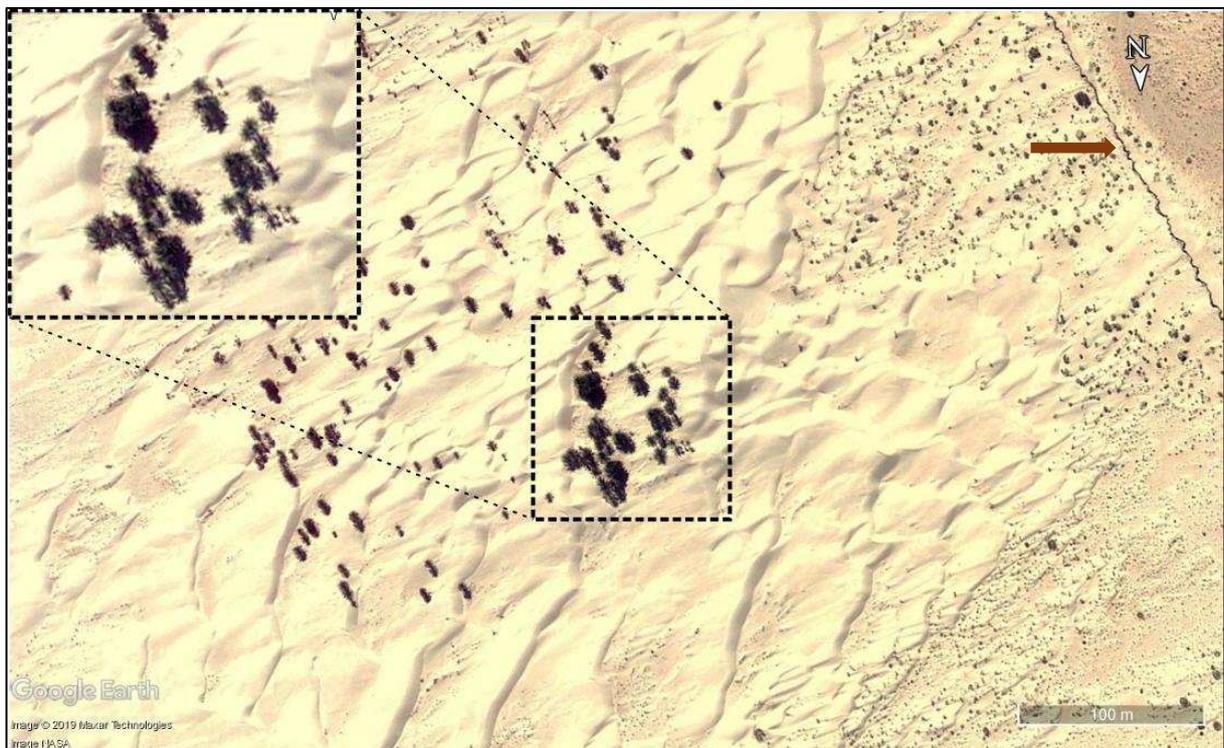
**Figure 5.15 : Photographie panoramique de la vasque du Trt 98 : Prise de vue : octobre 2019.**

- Le tertre de Selamia (Trt 98) est de Type **peu dégradé**, démantelé .

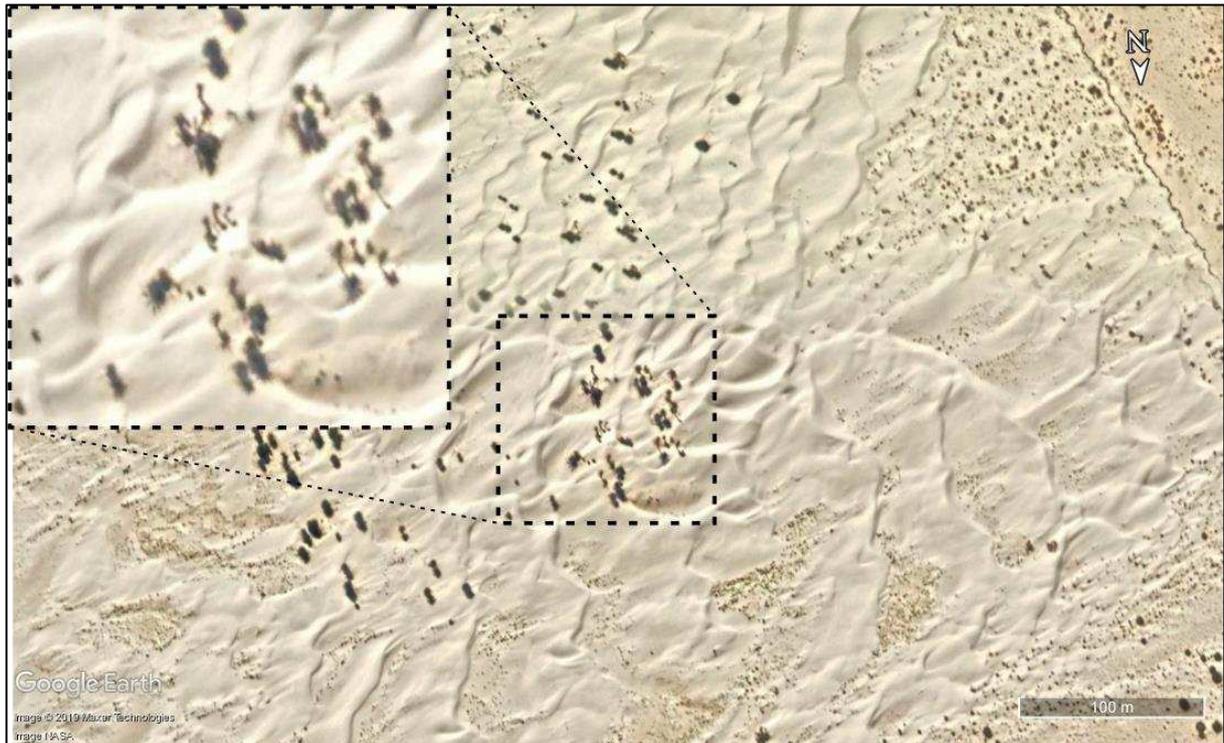
### **5.2.2.3 Type ensablé (type E)**

Un tertre de type ensablé est un tertre dont la morphologie originelle de la partie sommitale n'apparaît plus sous le sable.

#### **5.2.2.3.1 Le tertre de Zerhbia (Trt 87)**



**Figure 5.16 : Le tertre de Zerhbia avec agrandissement sur sa partie sommitale (extrait de Google Earth le 25-09-2010). Le nord est en bas.**



**Figure 5.17 : Le tertre de Zerhbia avec agrandissement de partie centrale (extrait de Google Earth le 04-05-2019). Le nord est en bas.**

### Description

Le tertre de Zerhbia se localise au sud de la région de la région de Zarzine. Il fait à peu près 670 m de diamètre, mesuré à l'aide du MNT TandemX et sa hauteur est estimée à 14 m. En 2010 (Figure 5.16) le tertre est couvert de dunes assez denses couvrant l'ensemble de sa superficie. La morphologie dunaire indique un vent dominant de l'ENE. La partie sommitale est ensablée, mais encore visible, laissant paraître des palmiers en bon état. En 2019 (Figure 5.17). Toute la partie centrale est submergée de dunes ne laissant paraître par endroit que des têtes de palmier (Figure 5.18). La zone est très ensablée (zone de dépôt éolien) ce qui explique l'absence d'oasis entourant le tertre, qui n'a également pas bougé depuis 2010, hormis la mort des palmiers (logique puisqu'ils n'ont plus d'eau artésienne). Quelques champs abandonnés (qui n'apparaissent pas sur les figures) ont été repérés aux alentours. L'abandon paraît avoir précédé leur ensablement. Comme en le voit en haut à droite de l'image (Figure 5.16) une palissade est utilisée comme protection contre l'ensablement. Cette technique est omniprésente dans la zone (Cf chapitre 2). À proximité du Trt 87 se localisent les tertres Trt 84, 85 et 86. Ils sont tous les trois semblables au tertre de Zerhbia.



**Figure 5.18 : Photographie panoramique du tertre de Zerhia : une marée de dunes submerge le tertre jusqu'au sommet. Prise de vue octobre 2019.**

- Le tertre de Zerhbia (Trt 87) est de Type ensablé.

#### **5.2.2.4 Type aplani (types N et A)**

Le type aplani se divise en deux sous types : le tertre aplani naturellement (type N) et le tertre aplani par l'Homme (type A).

Un tertre aplani naturellement est un tertre dont la surface est érodée, la vasque est ensablée, et les troncs de palmiers restants sont couchés. Ce type de tertre est surtout localisé au sud du chott et au NE de Douz. C'est une zone ensablée avec des traces de tertres à peine identifiées sur les images satellites, mais qui sont bien marquées sur le terrain et surtout sur le MNT TandemX. Les éléments les plus visibles sont l'endroit de collecte de l'eau, la vasque qui est souvent de forme arrondie, avec parfois des troncs de palmier couchés au milieu et certains quelques vieux palmiers encore debout.

Les prospections de terrain dans cette zone ont montré des vestiges très variés : des éclats de silex, de la céramique, de coquilles d'œufs d'autruche, des restes de murs probablement romains (ou des pierres qui pourraient avoir été taillées à l'époque romaine, puis récupérées), des limites d'anciens champs, etc. Notre hypothèse est qu'il s'agit de la zone où se trouvent les tertres les plus anciens de la région.

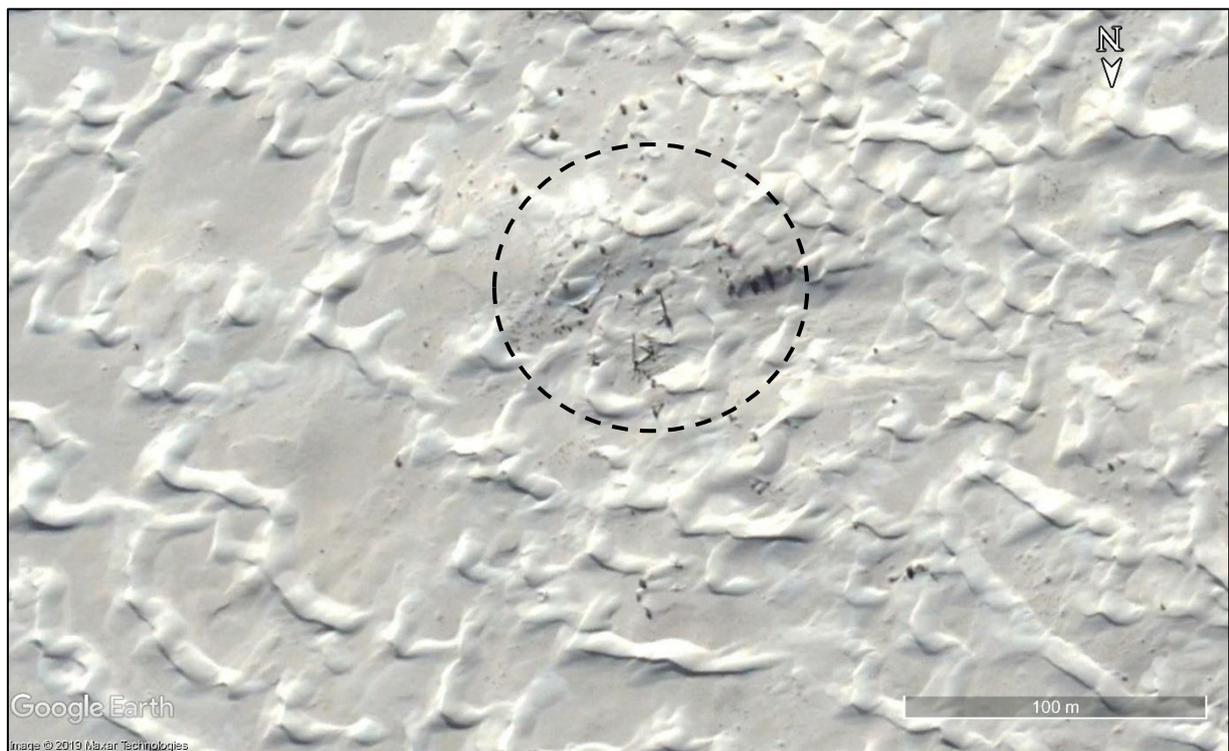
*« Les Romains connurent peut-être ces résurgences plus abondantes qu'aujourd'hui. Les rives du chott étaient, disent-ils, couvertes de forêts de palmes. Mise de côté la part d'exagération, cette affirmation trouve néanmoins un certain crédit, ne serait-ce que pour la*

*rive sud aujourd'hui déserte et ensablée, alors qu'elle était parcourue jadis par la route Turris- Nepte. » (Moreau, 1947)*

Un tertre aplani par l'Homme est un tertre dont la morphologie originelle n'existe plus. C'est un tertre dont la surface a été décapée et ensuite, remplacée par des nouveaux champs.

#### **5.2.2.4.1 Le Trt 114 (type N)**

Sur la carte topographique Douz (1/100 000) du service géographique de l'armée de 1933, ce tertre n'est pas indiqué par le symbole signalant la présence d'une source, mais par celui correspondant à une aire ensablée. Il peut être interprété comme un tertre dont la source est déjà tarie depuis longtemps, mais où les palmiers se maintiennent encore. L'abandon du tertre a accéléré le phénomène de l'érosion (Figure 5.19).



**Figure 5.19 : Vasque du tertre Trt 114 avec deux palmiers encore debout (image Google Earth du 19-01-2013).**



**Figure 5.20 : Photographie de la vasque du Trt 114 avec des troncs de palmiers couchés. Prise de vue novembre 2016.**



**Figure 5.21 : Vasque du tertre Trt 114 ensablé (image Google Earth du 28-02-2019).**

## Description

Le Trt 114 se localise au NE de la région de Douz. Son diamètre n'a pas pu être identifié ni à l'aide de l'extension règle sur Google Earth (toute la superficie est submergée de dunes) ni à l'aide du MNT TandemX (le tertre est érodé et il a moins de 10 m de hauteur). Les deux extraits de Google Earth (Figures 5.19 et 5.21) montrent que le Trt 114 se localise dans une zone sableuse où le vent est l'acteur dominant dans la formation du paysage. En 2013 deux vieux palmiers restaient encore debout témoignant que ce tertre existait autrefois. En 2016 ces palmiers ont fini par tomber probablement naturellement (rien ne laisse suggérer une intervention anthropique dans une zone sableuse sans intérêt) (Figure 5.20). En 2019 le sable a envahi la vasque. Les troncs de palmiers sont à peine repérables. Ce tertre représente l'action destructive par l'éolien.

### 5.2.2.4.2 Le Trt 94 (type A)

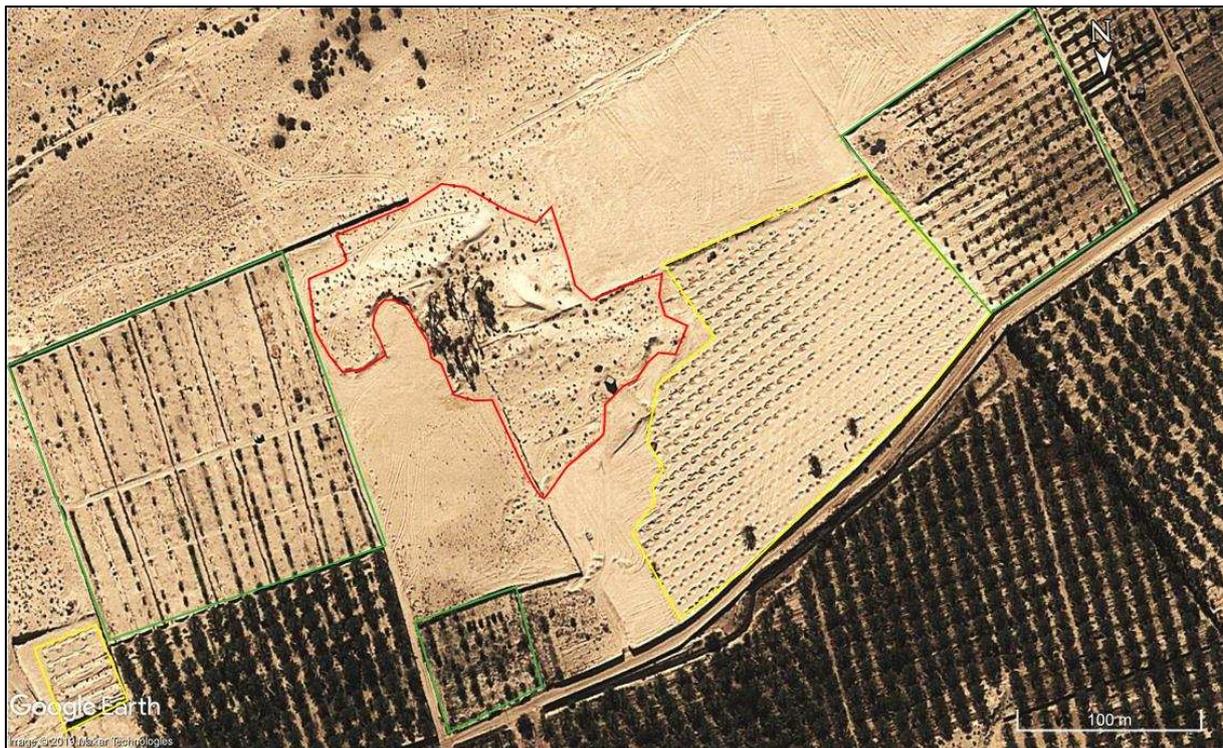
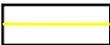
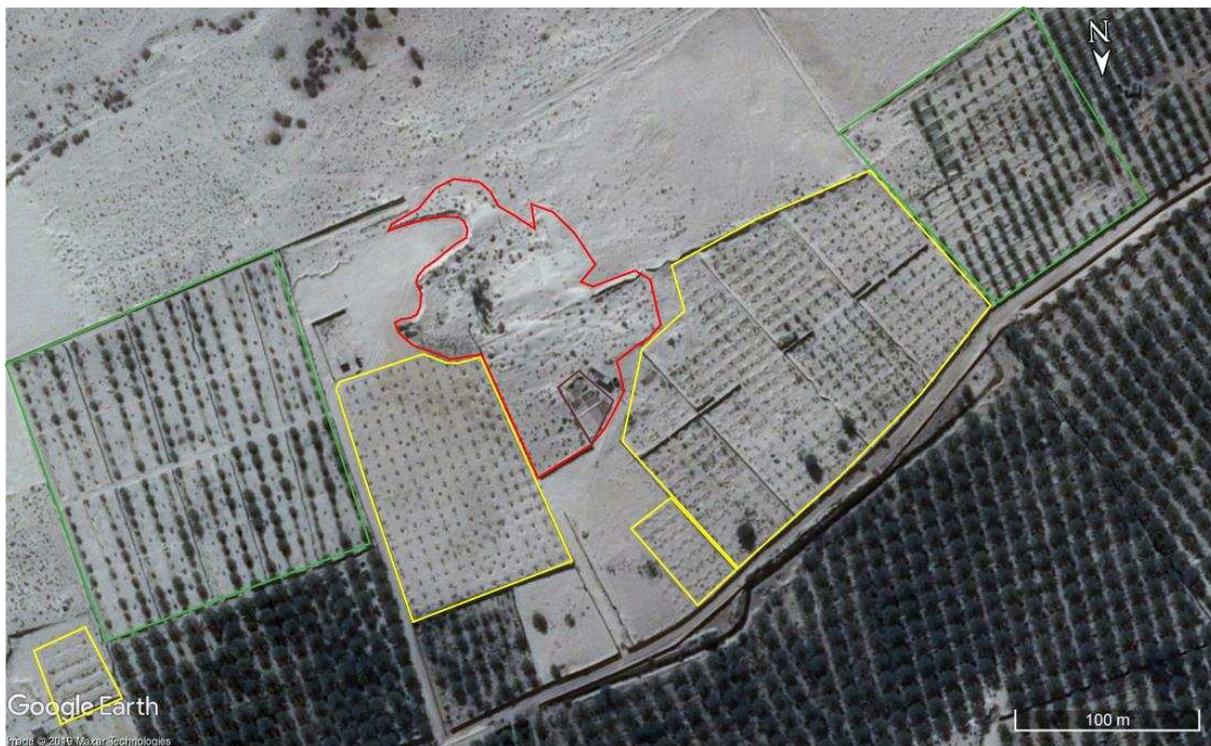


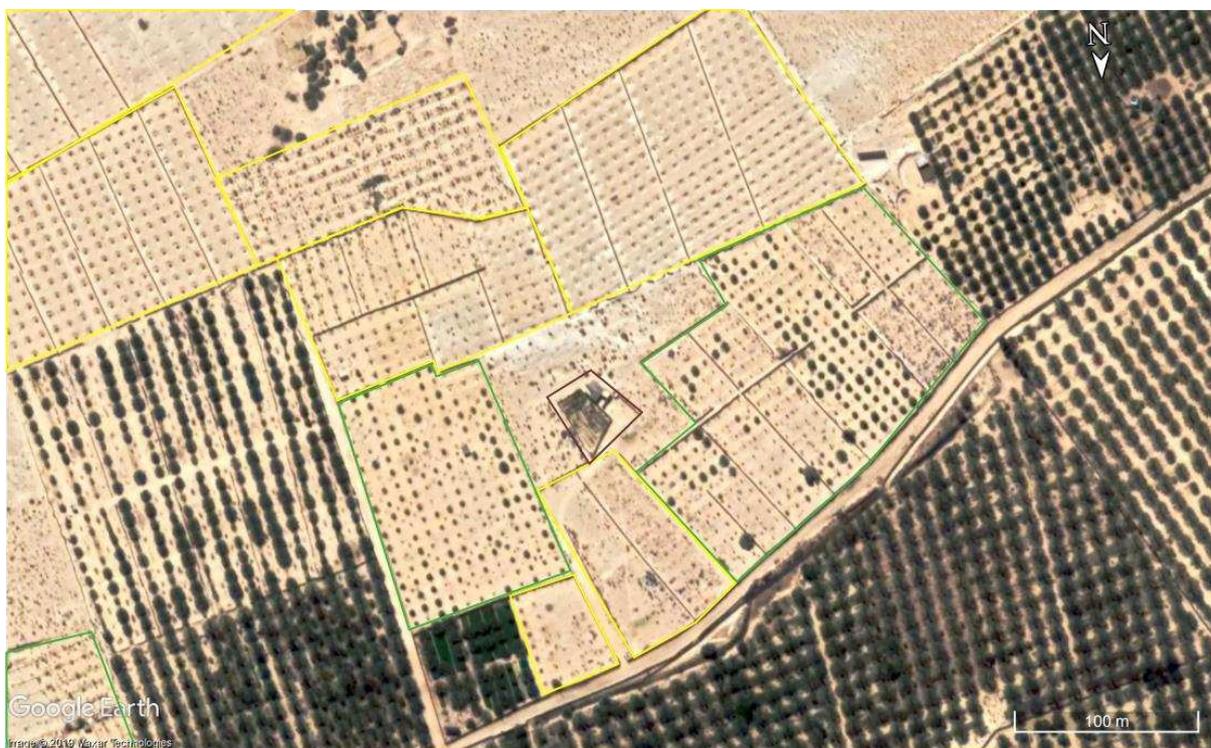
Figure 5.22 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 07-11-2012).

#### Légende

	Abrupts principaux marquant les rebords des zones d'extraction
	Plantations encours
	Plantations récentes
	Habitat



**Figure 5.23 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 24-02-2016).**



**Figure 5.24 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 07-04-2019).**

## **Description**

Le tertre Trt 94 se localise au WSW de Douz. L'état actuel du tertre ainsi que la proximité des tertres Trt 95 et 96 n'ont pas permis la mesure de son diamètre. Sa hauteur est estimée à 7 m. les parcelles en cours se sont installées progressivement. En 2012 le tertre était de type démantelé très dégradé et conservait encore sa partie centrale (Figure 5.22). En 2016, la partie centrale du tertre est attaquée (Figure 5.23). Elle cède la place à de nouveaux champs. En 2019 le tertre n'existe plus. Il a été définitivement aplani par arasement total : le paysage a radicalement changé (Figure 5.24).

- Le Trt 94 est de type aplani (A) (par l'Homme)

### **5.2.2.5 Type aménagé (type M)**

Un tertre de type aménagé est essentiellement un tertre dont la collecte des eaux artésiennes se faisait dans des bassins souvent circulaires. Autour du griffon naturel, ces bassins sont souvent aménagés dans le but de collecter les eaux. D'après quelques récits recueillis sur le terrain ils étaient aussi utilisés pour la pisciculture.

#### **5.2.2.5.1 Le tertre de Rass el Aïoun (Trt 24)**



**Figure 5.25 : Photographie de la source du tertre de Rass el Aïoun Kebili (Trt 24) (Moreau 1947).**

Moreau (1947) décrivait ainsi le tertre de Rass el Aïoun « *L'eau coule des parois et jaillit du fond d'une vingtaine de petites criques sablonneuses, pour se réunir en deux bassins naturels d'où part la rigole principale d'irrigation, véritable petit oued pérenne.* »



**Figure 5.26 : Photographie de la source du tertre Trt 24 Rass el Aïoun Kebili aménagée en fontaine au centre d'un jardin public : Prise de vue mai 2018.**



**Figure 5.27 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Rass el Aïoun (Trt 24) Kebili avec agrandissement sur l'emplacement de l'ancienne source (extrait de Google Earth le 15-03-2019).**

## Description

Le tertre de Rass el Aïoun (tête de la source) comme l'indique son nom se situe au sommet (en hauteur par rapport à l'oasis) de l'oasis de Kebili. Son diamètre n'a pas pu être mesuré suite à l'extension de l'oasis et de la ville, sa hauteur est estimée à 27 m. D'après Moreau (1947) ce tertre était considéré parmi les plus grands du Nefzaoua et il présentait un intérêt particulier. Il est situé sur une pente légèrement inclinée au bas du versant Djebel Tébagha, ce qui explique sa forme allongée. Le débit jaugé en 1945 atteignait 75 litres par seconde. La collecte d'eau se faisait dans deux bassins naturels (figure 5.25). Avec la baisse du débit, la source a été aménagée en bassin dont l'objectif était de collecter et de diminuer la @aménagée au centre du bassin et le site a été transformé en jardin public (figure 5.26 et 5.27). De nos jours l'extension de l'oasis de Kebili continue. Sur l'image Google figure 5.27 on observe des champs en cour de plantation ainsi que des champs avec des jeunes plantations qui contournent l'ancienne oasis.

- Le tertre de Rass el Aïoun est de type **aménagé** et urbanisé

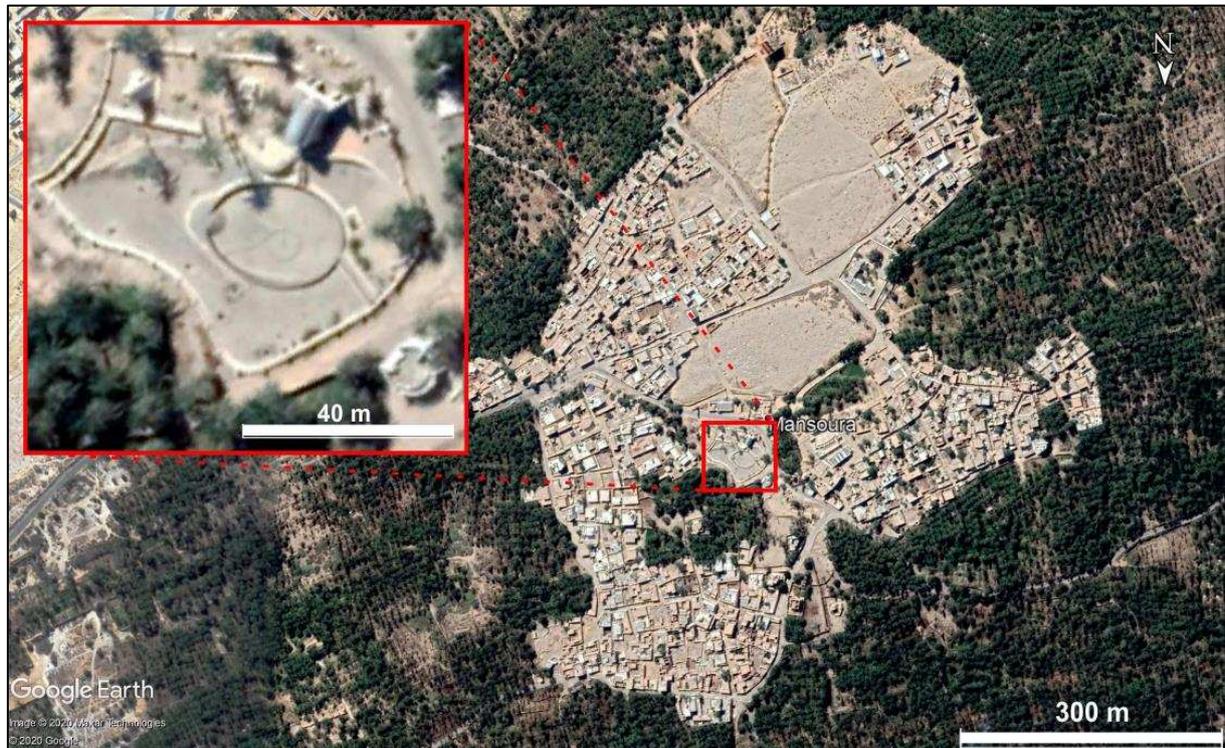
### 5.2.2.5.2 Le tertre d'Aïn er Rellig ou d'El Gharig (Trt 14)



**Figure 5.28 : Vestiges antiques d'aménagements hydrauliques romains de la source du tertre d'Aïn er Rellig ou d'El Gharig (Trt 14) à El Mansourah (photographie extraite de Troussset, 1986).**

Gauckler P. cité par Troussset 1986 « ... À l'époque romaine les eaux d'Aïn er Rellig s'écoulaient dans une séguia unique, de laquelle partaient tous les canaux d'irrigation. Il

semble que cette séguia est celle que l'on peut suivre de Mansourah à Telmine. Sans que l'on puisse affirmer qu'autrefois elle était entièrement maçonnée, l'énorme quantité de pierres taillées que l'on trouve dans cette séguia permet de supposer que les colons romains l'avaient établie avec tout le soin possible ».



**Figure 5.29 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Ain er Rellig (Trt 14) El Mansourra avec agrandissement sur l'emplacement de l'ancienne source (extrait de Google Earth le 15-03-2019).**

### **Description**

Le tertre de source Aïn er Rellig se situe au centre de la ville d'El Mansourra qui est bâtie sur un mamelon au milieu de son oasis (Idoux 1902). Il fait à peu près 2200 m de diamètre et 17 m de hauteur. Cinq sources étaient à l'origine de ce tertre. Elles étaient considérées comme les plus abondantes et les plus pures du Nefzaoua. En 1947, d'après Moreau, « on y voyait très bien le bouillonnement de la terre soulevée par l'eau du sous-sol qui jaillit au fond des sources. Ces bouillonnements marquent la place des griffons d'une mobilité permanente ». L'écoulement s'est poursuivi jusqu'en 1978 avec un débit global de près de 450 l/s en 1950 (Observatoire du Sahara et du Sahel, 2003). Les sources d'El Mansourra avaient bénéficié d'aménagements de leur réseau hydrauliques lors de l'occupation romaine (Toutain, 1895 ; Gauckler P, cité par Troussset 1986, et Moreau 1947 ; Troussset 1978). Aujourd'hui il ne reste aucune trace de ces aménagements romains. Il a été construit à

sa place un bassin circulaire pour la récolte des eaux, lorsque le débit a baissé. Ce bassin existe encore (figure 5.29) témoignant que jadis existaient des sources artésiennes abondantes qui irriguaient l'oasis d'El Mansourra.

Cette source est la seule connue dont l'aménagement à l'époque romaine est attesté.

- Le tertre d'Ain er Rellig ou Kharig (Trt 14) est de type **aménagé** et urbanisé.

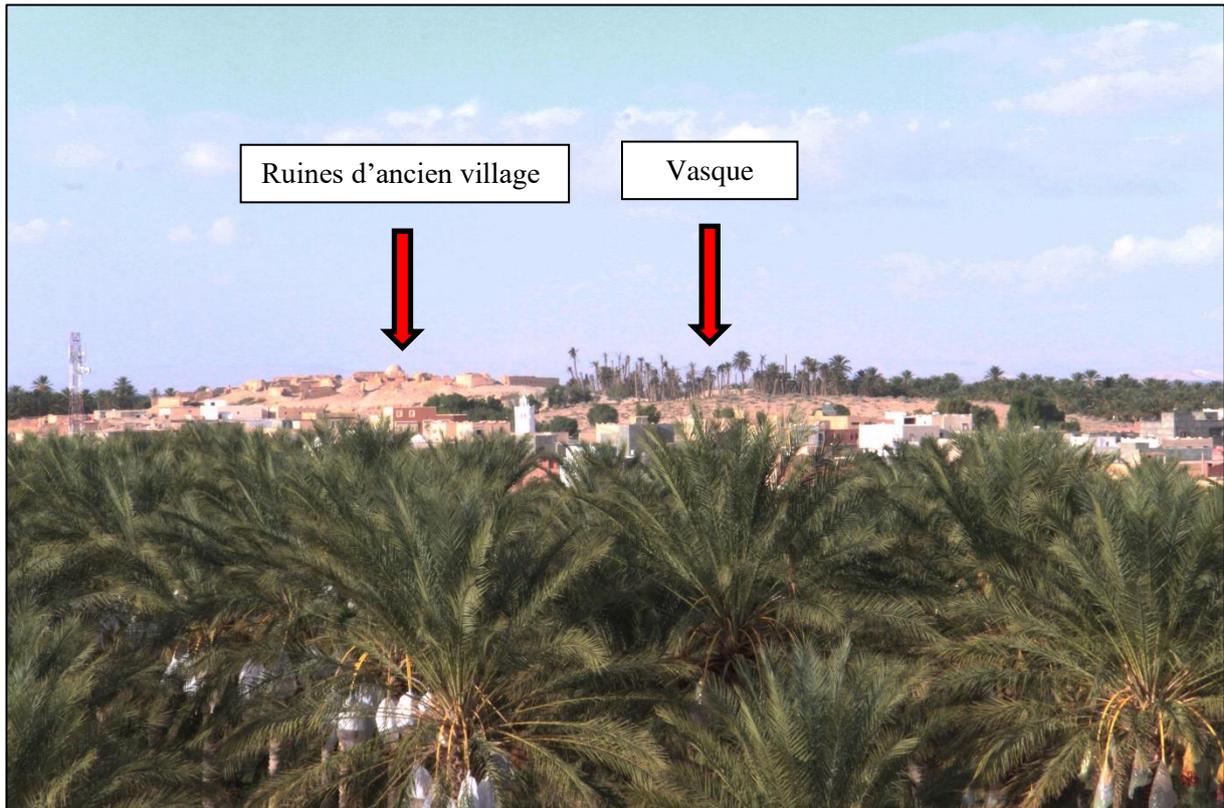
### **5.2.2.6 Type Urbanisé (type U)**

Un tertre urbanisé est un tertre qui a été, ou est occupé par un village. Ce fut le cas de la plupart des grands tertres. Tous les villages du Nefzaoua étaient bâti au départ sur un tertre où une source artésienne sourdait à ses pieds.

#### **5.2.2.6.1 Le tertre de Blidet Beld (Blidet ville) (Trt 41)**



**Figure 5.30 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Ain El Bled (Trt 41) à Blidet avec un agrandissement sur les ruines de l'ancien village et de la vasque (extrait d'une image Google Earth du 08-11-2018).**



**Figure 5.31 : Photographie des ruines de l'ancien village de Blidet bâti sur le tertre Trt 41 : Prise de vue mai 2017.**



**Figure 5.32 : Photographie du tertre d'Aïn El Bled Prise de vue octobre 2018.**

### **Description**

Le tertre d'Aïn El Bled, comme l'indique son nom, se situe au centre du village de Blidet (Figures 5.30 et 5.31). Il fait à peu près 1300 m de diamètre et 23 m de hauteur. L'oasis est organisée au pied du tertre avec un alignement des palmiers de l'amont vers l'aval. Il est l'unique tertre de type urbanisé relativement bien conservé que nous ayons observé pendant nos prospections de terrain. Il a conservé sa morphologie originelle avec les ruines de l'ancien village (Figure 5.32). En revanche sa grande vasque est à l'abandon, perdue au milieu de vieux palmiers. Ce site illustre l'ancien paysage souvent décrit, comme nous l'avons dit, par

les auteurs : chaque village du Nefzaoua était bâti sur un tertre où une source artésienne sourdait à ses pieds.

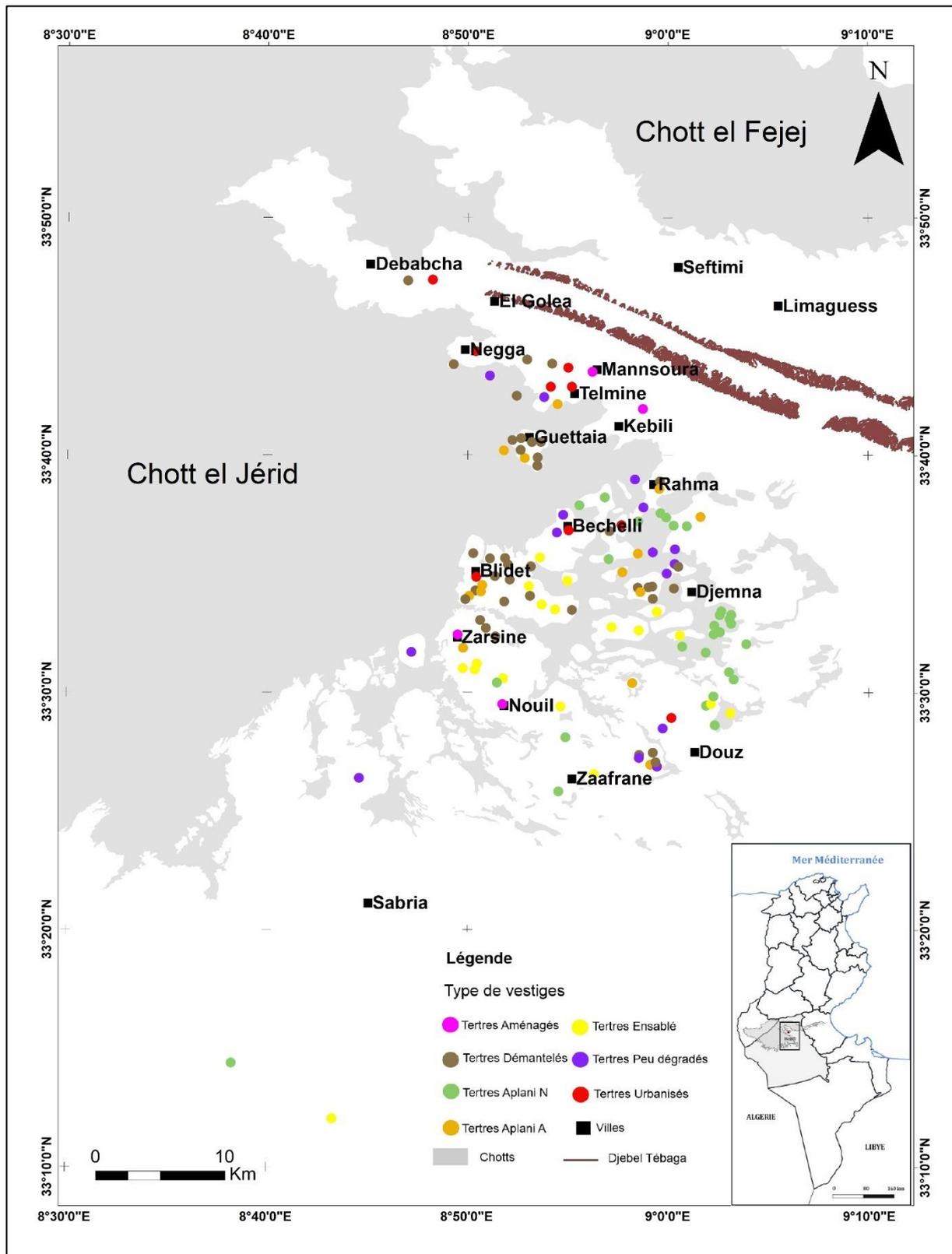
Notons que le tertre de Guettaïa Bled (Trt17) est du même type de Aïn El Bled. Mais il a perdu sa morphologie originelle suite au démantèlement de ses sédiments, laissant paraître d'anciens tunnels d'irrigation partant de vasques. Une grande partie de l'ancien village a également été détruite. Cela lui a valu d'être classé dans le type démantelé.

### **5.3 Inventaire des tertres et de leur degré de dégradation**

La typologie mise au point a mis en évidence les variations de l'état actuel des terres et surtout leur degré de destruction. À ce stade de la recherche, un inventaire sous forme d'une base de données a paru nécessaire, vu la vitesse de changement du paysage observé et étudié. Nous avons donc entrepris de constituer un tableau listant l'ensemble des vestiges de tertres de la région. Pour cet inventaire nous avons utilisé différents paramètres. La localisation bien sûr et la mesure des dimensions. Surtout nous avons cherché à identifier les types de ces vestiges actuels (principal et secondaires) afin d'évaluer leur degré de destruction qu'il soit naturel et/ou anthropique. À cet inventaire s'ajoute une synthèse bibliographique des sources de tertre de la Nefzaoua avant leur tarissement définitif. Cette synthèse (Annexe) est collectée sous forme de plusieurs témoignages et observations rassemblés dans un tableau regroupant des descriptions de l'état des sources avec les noms des auteurs et la date de la publication.

Le tableau inventaire (Annexe) donne les éléments d'inventaire suivants pour chaque tertre ou vestige de tertre ;

- Un code attribué à chaque vestige de tertre identifié à la fois sur le terrain et sur Google Earth ;
- Le nom du tertre attribué en se référant aux cartes topographiques couvrant la zone d'étude, confirmé par témoignages collectés sur le terrain. Pour certains tertres ces informations ne sont pas disponibles, ils apparaissent donc « sans nom » ;
- La localisation (latitude et longitude) ;
- Le type attribué parmi les 6 définis dans la typologie établie ci-dessus ;
- L'estimation de la hauteur et le diamètre, mesurés sur Google Earth et/ou le MNT ;
- Une évaluation du pourcentage de la destruction (anthropique ou naturelle), ;
- Des observations complémentaires sur l'état du tertre et l'état du griffon (la vasque).

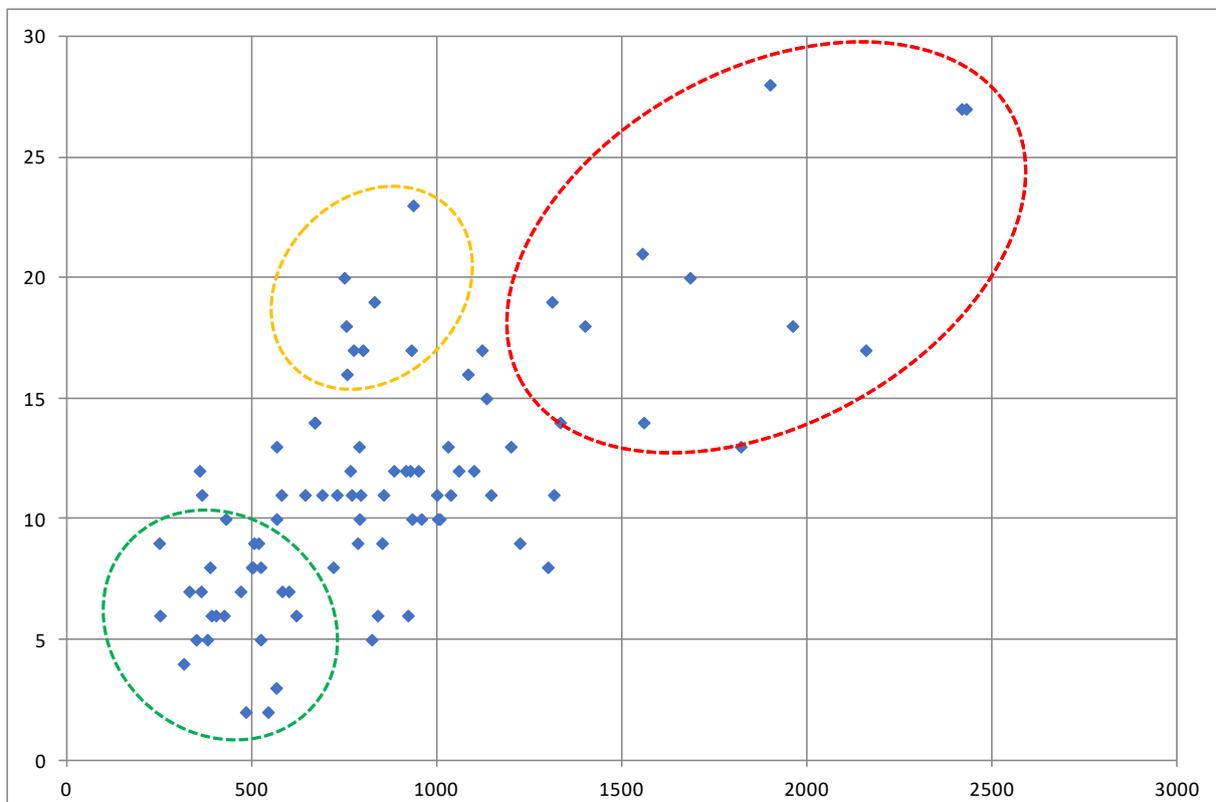


**Figure 5.33 : Carte typologie des vestiges des tertres.**

Le tableau (5.2) récapitule les caractéristiques de l'ensemble des tertres inventoriés (voir la légende pour les détails). Un total de 126 tertres a été dénombré sur la région étudiée,

et même si quelques-uns ont pu échapper à nos observations, tant sur le terrain que par satellite et MNT, ce chiffre peut être considéré comme proche de la réalité.

L'estimation de leurs dimensions (selon la méthode décrite dans le paragraphe 3.3 du chapitre 3) permet de se rendre compte qu'ils sont loin d'être tous identiques. Si leur forme est généralement arrondie (ce qui a permis de mesurer un diamètre moyen), avec une hauteur relativement faible, on remarque que certains sont bien plus grands que d'autres, et les rapports entre hauteur et diamètre sont variables. Certains sont plus pentus (figure 5.34). Cela signifie que les tertres varient en forme. Ils ont probablement accumulé des masses de sédiments plus ou moins importantes au cours de leur formation, selon le débit des sources en eau, mais aussi selon les apports en sable.



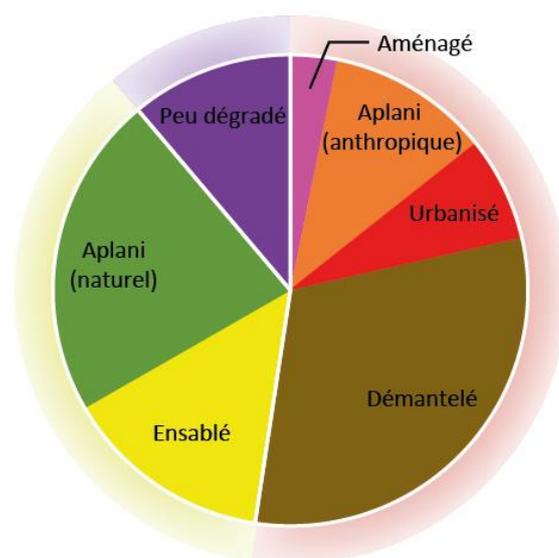
**Figure 5.34 : Distribution du diamètre et de la hauteur des tertres mesurés (axe des x : diamètre en m, axe des y hauteur en m) Limites en rouge : grands tertres /en jaune : tertres pentus / en vert : petits tertres.**

La détermination de l'état actuel de chaque tertre, précisé par son type principal (et éventuellement un type secondaire) a permis d'autre part de dresser le tableau 5.2.

**Tableau 5.2 : Pourcentage des différents types de tertres recensé (types principaux et secondaires).**

Type	Types secondaires								Sommes
	(aucun)	m	a	n	d	e	p	u	
<b>D</b> Démantelé	22,2	0,0	0,8	0,0	0,0	1,6	0,0	6,3	31,0
<b>P</b> Peu dégradé	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,8	11,1
<b>E</b> Ensablé	9,5	0,0	1,6	0,0	2,4	0,0	0,0	0,8	14,3
<b>N</b> Aplani (naturellement)	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	0,8	0,8	22,2
<b>A</b> Aplani (action homme)	9,5	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,8	11,1
<b>M</b> Aménagé	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	3,2
<b>U</b> Urbanisé	4,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	7,1
<b>TOTAUX</b>	<b>63,5</b>		<b>3,2</b>		<b>3,2</b>	<b>14,3</b>	<b>0,8</b>	<b>15,1</b>	<b>100</b>

Les types secondaires les plus souvent notés, sont le type ensablé, et le type urbain. Cela correspond aux caractéristiques du Nefzaoua, région où l'érosion éolienne est un facteur omniprésent où le vent joue un rôle très important dans la modélisation des dunes et où l'urbanisation ancienne et actuelle est importante.



**Figure 5.35 : Abondance relative des différents types de tertres**

Le tableau 5.2 illustré par le graphique de la figure 5.35 montre qu'il y a 33.3% des tertres de type aplani dont 22.2% sont aplanis naturellement. 11.1% sont aplanis par l'action anthropique, 31% sont de type démantelé, 14.3% de type ensablé, 7.1 % de type urbanisé et 3.2% de type aménagé. Il n'y a que 14 tertres soit 11.1 % qui sont de type peu dégradé.

Le pourcentage des tertres détruits par l'action humaine est de 52.4%. Cela regroupe les types : démantelé, aplani par l'action anthropique, aménagé et urbanisé (tous représentés par des couleurs chaudes). L'action humaine est donc prépondérante par rapport à la destruction naturelle (action éolienne) qui est de 36.5% et regroupe les types ensablé et aplani naturellement.

31% des vestiges des tertres du Nefzaoua sont démantelés, ce qui correspond à des états très abîmés. Ils sont attaqués pour leur matériel et leur espace. La rapidité du démantèlement laisse craindre leur disparition rapide. 22 % sont érodés, aplanis naturellement suite au tarissement et sous l'effet de l'érosion. Ces vestiges à peine identifiables ont perdu leurs formes originelles. 14,3 % sont envahis par les dunes. 11.1 % de ces vestiges sont aplanis par l'action anthropique : ils n'existent plus, leur histoire est perdue à jamais, l'oasis moderne est installée à la place. 7,1 % sont enterrés sous l'extensions des villes et 3,2 % sont modifiés par l'action humaine. Il ne reste que 11,1 % de vestige de tertres peu dégradés, c'est-à-dire relativement bien conservés. Ce chiffre très faible est très alarmant.

## **Conclusion**

La mise au point d'une typologie de l'état actuel des tertres du Nefzaoua a permis l'identification de la nature (anthropique ou naturelle) de la dégradation, et l'évaluation du degré de destruction subi sur les tertres.

Appliquée à tous les tertres listés au cours de la phase d'inventaire, elle a mis en évidence un ensemble de 126 de ces tertres de taille variant entre 200 et 2400 m de diamètre pour une hauteur n'excédant pas 30 m.

On peut donc dire que la présence de tertres de source dans le Nefzaoua est loin d'être anecdotique. Ils sont même une caractéristique fondamentale de ce paysage. En termes de dégradation, l'action humaine est très prépondérante vis-à-vis de l'action naturelle. Le tarissement des sources a mis fin au système d'irrigation traditionnel au pied des tertres.

52.4 % des tertres sont disparus et en voie de disparition sous l'action humaine et 36.5% sous celle de l'érosion naturelle. Actuellement, il ne reste que 11.1 % qui sont relativement en bon état (de type peu dégradé).

Cette rareté des tertres en bon état relatif souligne à quel point la totalité du paysage typique du Nefzaoua est altérée par la destruction progressive des tertres, ce qui pose la question de son évolution à venir... Il semble bien que ce soit là un patrimoine en cours de disparition. C'est la question que nous abordons dans le chapitre 6, en tentant d'achever ce travail par des conclusions et recommandations pratiques.

**Chapitre 6 : Les tertres du  
Nefzaoua : un patrimoine paysager  
à identifier ?**

## Introduction

*« Considérer le paysage comme un patrimoine, c'est l'assimiler à un monument avec la tentation de le réifier sous forme de musée naturel (parc naturel, écomusées, etc.) et de le conserver, voire de le restaurer » (Chenet, 2001).*

Le paysage est par nature un environnement en mutation, et le Nefzaoua en est un bel exemple. L'étude menée au cours de ce travail a permis de mettre en évidence que le paysage des tertres du Nefzaoua est actuellement en pleine transformation, mais conserve encore, en ses vestiges, des témoins de sa particularité. Aujourd'hui les vestiges de ce système d'irrigation, basé sur les tertres et leurs sources, héritage de la nature et des générations qui se sont succédées à leurs abords, sont abandonnés. Suite au tarissement, ils soumièrent à une utilisation détournée. Ils ne sont en effet plus sollicités pour l'eau qu'ils fournissaient, mais sont devenus une source minière de sédiments sableux. Les tertres sont donc en voie de disparition et semblent devoir être qualifiés de « patrimoine en péril ».

Pour préciser ce que cela peut signifier et pourrait impliquer, nous avons cherché à examiner les différentes conceptions de la notion de « patrimoine » et comment elles peuvent s'appliquer aux paysages des vestiges des tertres de source du Nefzaoua. La cartographie (chap. 3), puis l'inventaire des tertres ont montré leur nombre et leur extension, qui donne son caractère au paysage du Nefzaoua. Ils ont aussi permis d'évaluer leur état de conservation, qui est apparu médiocre (chap. 5). L'étude sédimentologique a par ailleurs mis en évidence le fait que leur formation est complexe et étalée dans le temps, ce qui leur confère une valeur d'archive des paléoenvironnements récents, et donc un intérêt scientifique indéniable. Il est également clair que les implantations humaines et les modes de vie, qui se sont historiquement développés grâce au contexte de ces tertres et de leurs sources, ont façonné une identité culturelle forte pour le Nefzaoua.

Quelles sont les conditions pour que les tertres du Nefzaoua apparaissent comme un patrimoine à sauvegarder ? Quels sont les critères à prendre en compte pour la préservation de tout ou partie de cet ensemble ? Il y a un sentiment d'urgence, car vu la rapidité de leur dégradation on se trouve presque dans une course contre la montre. Dans ce chapitre nous tenterons de réunir des éléments pour alimenter la discussion sur la patrimonialisation du paysage du Nefzaoua.

## **6.1 Valeur patrimoniale d'un paysage.**

### **6.1.1 Concepts et définitions du Patrimoine**

L'état actuel des tertres de sources du Nefzaoua met l'accent sur une rupture radicale, une modification irréparable d'un paysage unique, autrefois en équilibre avec son milieu. Au moment où ce paysage semble promis à une disparition quasi totale, il est utile de se demander s'il ne s'agit pas d'un patrimoine qui mériterait d'être mieux considéré, et finalement protégé.

Étant donné qu'un patrimoine est quelque chose d'hérité qui se transmet à travers les générations, on peut se demander dans quelle mesure les vestiges des tertres des sources du Nefzaoua constituent un héritage patrimonial. Dans ce cas il serait primordial de les conserver et de les transmettre aux générations futures. Ce travail visera donc à préciser dans quelles conditions la notion de patrimoine peut être appliquée aux vestiges de tertres de sources du Nefzaoua.

Nous passerons donc en revue successivement les définitions du patrimoine et la notion de patrimonialisation. Nous explorerons ensuite dans quelles conditions elles s'appliquent au cas des tertres des sources, et quels sont les éléments de conclusion et les pistes à explorer pour mieux préciser cette dimension.

#### **6.1.1.1 La notion de patrimoine**

Lorsque nous parlons de patrimoine, nous pensons tous à un héritage. Cela implique l'idée de quelque chose qui nous a été transmis par ceux qui nous ont précédés. Le dictionnaire propose ainsi une définition très courte du patrimoine « Bien, qu'on tient par héritage de ses ascendants » (Larousse, 2020). À souligner que ce bien peut être celui d'un individu, d'une famille, d'un groupe, d'une entreprise ou d'une collectivité publique. Dans cette vision, le patrimoine fait appel à l'idée d'un héritage légué par les générations qui nous ont précédées, et que nous devons transmettre aux générations futures, ainsi qu'à la nécessité de constituer un patrimoine pour demain. On dépasse donc la simple propriété personnelle.

## Le patrimoine selon l'UNESCO

La notion de patrimoine est marquée par la diversité de ses formes et de ses usages. Ainsi que le rappelle l'Unesco (Tableau 6.1), la notion de patrimoine recouvre l'ensemble des traces laissées par le passé. Ces traces peuvent être matérielles et immatérielles.

**Tableau 6.1 : Les catégories de patrimoine selon l'UNESCO, 2012**

- **Le patrimoine culturel :**
  - Le patrimoine culturel matériel :
    - le patrimoine culturel mobilier (peintures, sculptures, monnaies, instruments de musiques, armes, manuscrits) ;
    - le patrimoine culturel immobilier (monuments, sites archéologiques) ;
    - le patrimoine culturel subaquatique (épaves de navire, ruines et cités enfouies sous les mers).
  - Le patrimoine culturel immatériel : traditions orales, arts du spectacle, rituels.
- **Le patrimoine naturel :**  
sites naturels ayant des aspects culturels tels que les paysages culturels, les formations physiques, biologiques ou géologiques.

Pour se mettre d'accord sur une définition commune permettant des stratégies coordonnées de préservation du patrimoine de l'humanité, une convention spécifique a été mise au point dès 1972 sous l'égide de l'UNESCO (cf. Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO <http://whc.unesco.org>). Sans entrer dans tous ses détails, retenons les principaux articles entrant en relation directe avec notre étude :

Retenons donc **l'article 1** définissant le **patrimoine culturel** : « Les sites œuvres de l'homme ou œuvres conjuguées de l'homme et de la nature, et zones incluant des sites archéologiques, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue historique, esthétique, ethnologique ou anthropologique. »

Retenons aussi **l'article 2 qui définit le patrimoine naturel** : « - les monuments naturels constitués par des formations physiques et biologiques ou par des groupes de telles formations qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue esthétique ou scientifique ;

- les formations géologiques et physiologiques et les zones strictement délimitées constituant l'habitat d'espèces animale et végétale menacées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science ou de la conservation ;

- les sites naturels ou les zones naturelles strictement délimitées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science, de la conservation ou de la beauté naturelle ».

- **Extension de la notion de patrimoine**

**Le patrimoine naturel est** aussi « l'ensemble des biens dont l'existence, la production et la reproduction sont le résultat de l'activité de la nature, même si les objets qui le composent subissent des modifications du fait de l'Homme » (INSEE, 1986).

Au départ la notion de patrimoine était surtout focalisée sur un objet matériel emblématique. Elle s'est élargie ensuite à des formes moins monumentales, puis à des monuments naturels, ensuite à des paysages culturels pour arriver jusqu'au patrimoine immatériel et oral (Skounti, 2010). Aujourd'hui, tout héritage de notre passé peut être catégorisé comme patrimoine. On parle désormais de patrimoine urbain, architectural, rural, artisanal, culinaire, oral, scientifique, paysager, linguistique, etc. (Berriane, 2010). Des biens sont considérés comme « patrimoine mixte culturel et naturel » s'ils répondent à une partie ou à l'ensemble des définitions du patrimoine culturel et naturel.

### **6.1.1.2 Concepts patrimoniaux**

Pour une identification des tertres des sources du Nefzaoua en tant que patrimoine, nous avons cherché à rassembler les concepts qui s'y appliquent.

- **Le patrimoine paysager**

Dans les concepts patrimoniaux on reconnaît les paysages culturels, « Œuvres conjuguées de la nature et de l'homme » (art. 1<sup>er</sup> UNESCO). Cela comprend l'ensemble des éléments bâtis et naturels qui forment l'ensemble patrimonial. « Ils illustrent l'évolution de la société et des établissements humains au cours des âges, sous l'influence de contraintes et/ou des atouts présentés par leur environnement naturel et les forces sociales, économiques et culturelles successives, internes et externes » selon le Comité du patrimoine mondial.

Limiter le patrimoine naturel au seul patrimoine du vivant (c'est-à-dire à la biodiversité) paraît une vision un peu trop restrictive, particulièrement dans un pays où l'empreinte du monde rural est omniprésente (Milian, 2001). Une évaluation sérieuse demande de prendre en compte la contribution de ce monde à la formation du patrimoine naturel, qui s'opère au croisement d'aspects culturels, économiques et écologiques. L'idée de patrimoine implique

une appropriation, alors que la notion de nature implique une description complète, le patrimoine naturel est donc lié à la notion de territoire.

D'après Lavieille (2003), « à priori les paysages naturels sont inscrits comme biens naturels et les paysages culturels sont inscrits comme biens culturels, mais il arrive aussi qu'un paysage inscrit comme bien naturel le soit aussi comme bien culturel, il devient alors un patrimoine paysager mixte ».

### **« Géo-patrimoine » et patrimoine géomorphologique**

Ce type de patrimoine est défini sur la base de considérations géologiques, au sens large. Ainsi, toujours selon l'UNESCO, l'expression "patrimoine géologique" inclut des objets et/ou des sites relatifs à l'ensemble des disciplines des sciences de la Terre (paléontologie, minéralogie, tectonique, sédimentologie, géomorphologie...)<sup>17</sup>.

#### **○ Les géomorphosites**

Ils sont une subdivision du géopatrimoine. Panizza (2001) définit les « géomorphosites » comme des formes du relief ayant acquis une valeur scientifique, culturelle et historique, esthétique et/ou socio-économique, en raison de leur perception ou de leur exploitation par l'Homme. Il peut s'agir de simples objets géomorphologiques ou de grandes portions du paysage. Les géomorphosites peuvent être modifiés, endommagés, voire détruits par l'impact des activités humaines.

Un objet géomorphologique ne peut être considéré comme géomorphosite que s'il a une valeur scientifique et/ou une originalité remarquable (Reynard et Panizza, 2005).

#### **○ Les Géoparcs**

Il est utile ici d'introduire les géoparcs car leur création a été envisagée dans le Sud tunisien. Selon l'UNESCO, les géoparcs sont des espaces géographiques unifiés, où les sites et paysages de portée géologique internationale sont gérés selon un concept global de protection, d'éducation et de développement durable. Leur approche « partant de la base » et associant la conservation et le développement durable tout en impliquant les communautés locales devient de plus en plus populaire.

Selon la charte du réseau Géoparc, « *il s'agit d'un territoire aux limites bien définies qui a une superficie assez étendue pour contribuer au développement économique local. Il*

---

<sup>17</sup>([Http://geopark.mnhn.fr/fr/geopatrimoine/elements-definition/geopatrimoine-patrimoine-geologique](http://geopark.mnhn.fr/fr/geopatrimoine/elements-definition/geopatrimoine-patrimoine-geologique))

*comprend un certain nombre d'héritages géologiques (à différentes échelles) ou une mosaïque d'entités géologiques d'importance scientifique particulière, pour leur rareté ou leur beauté représentative d'un lieu et de son histoire géologique. Il ne doit pas seulement avoir une signification géologique mais aussi écologique, archéologique, historique ou culturelle. L'importance géologique devra être reconnue par les autorités scientifiques du territoire compétentes en la matière. »*

Selon l'article 1 de la charte du réseau géoparc « un géoparc doit donc comporter un certain nombre de sites géologiques d'une importance particulière en fonction de leur qualité scientifique, de leur rareté, de leur esthétique ou de leur valeur éducative. Leur intérêt peut également être archéologique, écologique, historique ou culturel ». Notons que l'intérêt géomorphologique n'est cité nulle part.

## **6.2 Du patrimoine à la patrimonialisation**

« La patrimonialisation se définit comme une activité sociale consistant à faire être quelque chose qui prend nom et valeur de patrimoine [...] Pour qu'il y ait patrimoine, il faut donc des processus sociaux au sens complet du terme » (Micoud, 2005). Selon Fabre (1997), patrimonialiser consiste, à « mettre à part, opérer un classement, constater une mutation de fonction et d'usage, souligner la conscience d'une valeur qui n'est plus vécue dans la reproduction de la société mais qui est déclarée dans la protection de traces, de témoins, de monuments ».

« La patrimonialisation est donc le processus par lequel un collectif reconnaît le statut de patrimoine à des objets matériels ou immatériels, de sorte que ce collectif se trouve devenir l'héritier de ceux qui les ont produits et qu'à ce titre il a l'obligation de les garder afin de les transmettre » (Davallon, 2014).

Différentes phases de la patrimonialisation ont été décrites. La première est la prise de conscience patrimoniale qui doit conduire à la valorisation d'un patrimoine. Cela passe par les phases de sa sélection et de sa justification, de sa conservation et de son exposition (François et al, 2006 ; Di Méo, 2007).

## 6.2.1 Les étapes d'une éventuelle patrimonialisation des tertres du Nefzaoua

Pour une première analyse de l'intérêt d'une patrimonialisation des tertres, nous pouvons esquisser ce qu'implique l'application des étapes décrites ci-dessus.

La **prise de conscience** de l'intérêt patrimonial peut être étayée par les éléments décrits tout au long de ce travail de thèse axé sur le milieu naturel. Ils mériteraient d'être complétés par des éléments culturels que peuvent donner les historiens et les chercheurs en sciences sociales sur la spécificité culturelle liée aux populations qui se sont établies et le système de culture oasien particulier qu'elles ont développé à partir des tertres et de leurs sources artésiennes.

La **sélection** du patrimoine à préserver, est un point plus délicat. Faut-il envisager des mesures de protection de l'ensemble de la zone des tertres, c'est-à-dire d'une grande partie de la région du Nefzaoua ou se focaliser sur une zone plus restreinte où le paysage typique de cette région est encore bien reconnaissable, ou bien se concentrer sur quelques tertres particulièrement intéressants ?

La **justification** est plus aisée pour les tertres remarquables, qui pourraient faire l'objet de mesures spécifiques et devenir un géomorphosite, tant pour l'intérêt pédagogique (visites de groupes scolaires, d'universitaires...) que touristique (esthétique, mise en valeur de traditions, de savoir-faire locaux).

La **conservation** demanderait des mesures d'ordre économique et législatif spécifiques de nature différente selon que les éléments de territoire contenant des tertres remarquables seraient de droit privé ou de droit collectif (ou public).

L'**exposition** devrait permettre de faire connaître ce patrimoine, y compris dans des dimensions pédagogiques, sur place en le rendant facilement accessible et visitable, et par la diffusion via différents médias.

La **valorisation** enfin, peut revêtir des aspects culturels et économiques : meilleure visibilité et reconnaissance de la région, et meilleure attractivité notamment du point de vue touristique.

En effet, pour qu'il y ait patrimonialisation, il ne suffit généralement pas que l'héritage pointé ait acquis du sens pour un groupe, une collectivité et qu'il y ait une légitimation

« scientifique » par les spécialistes du patrimoine : il faut également que l'objet patrimonial puisse acquérir quatre valeurs : scientifique, esthétique, culturelle, économique.

Par ailleurs la perception de l'usage des tertres par la population joue un rôle essentiel dans ces choix.

## **6.2.2 Comment la population du Nefzaoua perçoit les tertres**

*« ...les contours du patrimoine, ne peuvent être dessinés qu'à partir d'une inscription de l'objet considéré dans le territoire d'un groupe social, dans son histoire, et donc dans l'espace et le temps de ce groupe, parce que cet objet lui donne du sens et participe à sa définition. L'objet, avoir inscrit dans un territoire, participe de fait de l'être de sa population, de son identité. » (Barrère et al, 2005).*

Comprendre comment le paysage des tertres est perçu par les habitants de la région, les Nefzaouis, demanderait la préparation d'un questionnaire et/ou des entretiens visant aussi bien ceux qui ont vécu le fonctionnement naturel (artésien) des sources que, bien évidemment, les utilisateurs récents des forages profonds. Une telle approche permettrait de bien saisir les perceptions et valeurs attribuées au paysage par les groupes sociaux qui les ont façonnés où les occupent. Elle dépasse nos compétences et le cadre de ce travail. Nous avons cependant recueilli, au cours de notre travail de terrain, des témoignages qu'il nous paraît pertinent d'exploiter.

Ce qui est frappant mais logique, c'est que dans le Nefzaoua au climat nettement aride, l'eau est considérée comme la ressource principale pour le développement de la région. L'eau vient en premier, ensuite la terre. La terre sans eau n'a pas grand intérêt et ne tire sa valeur d'usage et même marchande que de la possibilité d'irriguer, donc la valeur d'une parcelle dépend de la part d'eau distribuée qu'elle peut recevoir.

Les témoignages nous ont permis de comprendre que nous sommes devant une population peu consciente de l'originalité de son territoire. Sans s'en rendre compte, la population du Nefzaoua contribue à la destruction d'une partie de son histoire. Les habitants ne se sont peut-être jamais posés la question, ou n'ont peut-être même pas senti la perte de la valeur patrimoniale des tertres avec le tarissement des sources. Le passage du système d'irrigation naturel à l'irrigation par pompage ne s'est pas fait sans poser de problèmes. L'eau de la source n'était pas gratuite, sa production était le résultat d'un investissement en capital

travail fondé sur l'utilisation d'une main d'œuvre abondante et sa production était d'un coût de revient assez bas. Il a fallu ensuite, pour produire l'eau, un investissement considérable que la population n'a pas pu assumer sans le consentement d'avances par l'État ou des banques. Et les investissements coûtent cher pour les Nefzaoui dont l'assise foncière et les revenus sont faibles (Badauel et Badauel, 1984).

D'après Belhedi (1998), l'État n'a pas beaucoup investi dans la région à part pour l'administration et les services sociaux collectifs. La rénovation des oasis au début des années 1980, dans le cadre du projet PDES (cf.1), n'a pas été suffisante pour assurer la survie d'une population devenue surnuméraire par rapport aux ressources d'une agriculture intensive où la culture des dattes se trouvait à cette époque monopolisée par l'État. Cela a poussé une partie de la population vers la migration. Des vagues de migration de la population se sont effectuées vers la France à partir des années 1960, ensuite vers la Libye. La concentration des flux financiers émanant des émigrés, qui ont trouvé dans l'agriculture des vecteurs pour le placement de l'argent épargné, a joué un rôle très important dans l'extension des oasis devenues de plus en plus privatisées (Belhedi, 1998). Le développement de migrations qui ont assuré des ressources régulières aux ménages a permis une monétarisation accrue de l'économie locale.

Cela a été vécu comme un soulagement qui a permis d'éviter plusieurs problèmes en rapport avec l'ancien système et le partage des eaux. Le nouveau système a donné une autonomie aux agriculteurs oasiens qui n'avaient pas de droits privilégiés sur la source alors qu'aujourd'hui celui qui a les moyens de payer l'eau l'aura. Rappelons ici que les *Aïoun* dans le Nefzaoua sont des biens communs partagés par les membres d'une communauté qui les a aménagés et s'est sédentarisée autour. La gestion différente du système moderne a donné l'accès à l'eau à tous et a contribué à l'extension des nouvelles oasis en raison de l'augmentation considérable des débits par les forages. Les Nefzaouis ne voient pas ce qu'ils ont perdu, ils se sont focalisés sur ce qu'ils sont en train de gagner et sur l'illusion de ressources souterraines inépuisables.

La mobilisation des ressources a atteint son maximum, tandis que la demande continue d'augmenter, conduisant à des risques de crise dans un futur proche, dans un contexte où les ressources en eau fossiles ont déjà à tendance à s'épuiser et à se saliniser (Beloumi et Matoussi, 2005 ; Mamou, 2010).

Aujourd'hui la patrimonialisation des tertres semble loin d'être l'objectif de la population du Nefzaoua. Nous sommes dans une phase que l'ethnologue Rautenberg (2003) appelle « la rupture » : les Nefzaouis ont rompu avec les tertres, on peut même dire que nous sommes dans une phase destructive. Après avoir abandonné les tertres ils sont en train de les détruire, et finalement de détruire avec eux tout un paysage remarquable, parce qu'il n'a plus de sens pour eux.

Pour une prise de conscience, l'argumentaire pour convaincre les habitants et les politiques, notamment locaux, devrait donc expliquer en substance que les tertres sont à l'origine de l'histoire du Nefzaoua. Il faut s'adresser à eux, par exemple, comme nous le présentons dans les phrases suivantes. C'est l'histoire d'un paysage remarquable, aujourd'hui endommagé de façon irréversible. La beauté du paysage qui pourrait attirer les visiteurs est détruite de façon irrémédiable, tout comme les archives archéologiques de vos ancêtres. Vous ne pouvez plus remettre en état ce qui a été aplani au bulldozer mais vous avez encore une chance d'en sauver quelques-uns.

La patrimonialisation des tertres peut être alors considérée comme un processus de revalorisation du paysage et aussi comme un investissement économique (tourisme, valorisation du savoir-faire oasien).

### **6.2.3 Un argumentaire en faveur des tertres du Nefzaoua**

D'une façon générale, la Tunisie a déjà développé, dans différents autres lieux, une protection de son patrimoine culturel archéologique et naturel. Huit sites tunisiens sont d'ores et déjà inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO : La Médina de Tunis, la Médina de Sousse, Kairouan, la ville de Dougga, le site archéologique de Carthage, la Cité punique de Kerkouane et sa nécropole, l'amphithéâtre d'El Jem, et le parc national d'Ichkeul, classé au patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1980 .

Pour ce qui est des efforts récents en faveur du patrimoine du sud tunisien, on peut noter que la Tunisie fait partie des pays inscrits depuis 2019 sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité pour les connaissances, le savoir-faire, les traditions et les pratiques associées au palmier dattier. En 2018 l'Office National des Mines, en collaboration avec des partenaires locaux et internationaux (swisscontact.org), a organisé deux réunions préparatoires au dépôt d'une demande d'inscription au réseau mondial des parcs géologiques

d'un Géoparc du Sud-Est tunisien, à l'horizon 2020<sup>18</sup>. Ce projet mettait en avant la richesse patrimoniale de la région, qui se distingue par un registre paléontologique unique (traces de pas de dinosaures, géosites remarquables comme le Dejbel Tébagha de Médenine et ses empreintes de plantes supérieures datant du Crétacé inférieur...), des sites archéologiques et historiques, et des vestiges de techniques ancestrales dans la gestion de l'eau. Les tertres du Nefzaoua correspondent parfaitement au projet. À notre connaissance le projet a rencontré quelques problèmes vis-à-vis la délimitation des circuits qui concernent trois gouvernorats (Gabés, Médenine et Tataouine). Mais il existe toujours dans le programme de l'Office National des Mines<sup>19</sup>.

#### **6.2.4 Considérations en vue d'une patrimonialisation**

Le bilan de cette revue des critères indique que ce paysage mérite que soit élaborée une demande d'effort de protection dans une perspective patrimoniale dont on peut se demander si elle devrait être limitée à quelques exemplaires remarquables ou étendue à tout ou partie de l'ensemble du Nefzaoua.

Quelques points sont à prendre en considération pour le succès d'une demande de protection :

- la mobilisation de l'attention et l'intérêt des populations : les tertres du Nefzaoua en tant que patrimoine géomorphologique ne peuvent pas être la seule propriété du monde scientifique. Leur sauvegarde ne sera assurée que lorsque la population locale se sera approprié ce patrimoine et en sera devenu le véritable gardien (Martini 1994). La prise de conscience est un élément très important dans le processus de la patrimonialisation qui pourrait faire suite à la reconnaissance du statut de patrimoine géomorphologique des tertres. Malheureusement il ne semble y avoir aucun attachement patrimonial de la population locale vis-à-vis des tertres jusqu'à présent. Ils semblent plutôt attachés aux tertres comme ressources « minière ».

- les aspects économiques : qu'en est-il du manque à gagner si les habitants ne peuvent plus « miner » les tertres ? Quels seraient les bénéfices potentiels d'une préservation grâce à une valorisation culturelle et touristique ?

---

<sup>18</sup><http://www.webdo.tn/2018/02/05/tunisie-oeuvre-a-linscription-geoparc-sud-reseau-mondial-parcs/>

<sup>19</sup> <http://www.onm.nat.tn/files/Programme2020.pdf>

- le tourisme : le tourisme saharien existe dans le Sud tunisien et dans le Nefzaoua, surtout à Douz qui est considéré comme la porte d'accès au Sahara. Un festival y a par exemple lieu chaque année au mois de décembre et célèbre le riche patrimoine Arabo-Berbère de la région.

Il reste à évaluer les difficultés potentielles, parmi lesquelles l'impossibilité pour les agriculteurs d'accepter d'abandonner les bénéfices à court terme obtenus par la destruction des tertres. En effet ils ne sont pas conscients des retombées financières à long terme de la patrimonialisation des tertres, des aléas du tourisme (particulièrement ces dernières années), de la mise en place et du respect d'une réglementation supplémentaire, etc.

Cet examen rapide des critères pourrait conduire à proposer une patrimonialisation avec pour objectif minimal de garder quelques tertres pour la transmission aux générations futures de ce patrimoine naturel et culturel propre au Nefzaoua.

Sans nécessairement viser le fameux classement au patrimoine mondial de l'UNESCO, qui donne un label reconnu internationalement, une reconnaissance par les autorités de l'État serait une étape indispensable pour des actions de protection. En le déclarant « patrimoine à protéger », l'État devrait alors mettre en œuvre des lois et mécanismes pour une politique de protection comme l'interdiction de prélever du sable, etc. Comme il s'agit de défendre un patrimoine lié à la culture oasienne, il serait utile de s'approcher des ONG qui œuvrent à la préservation des oasis et les associer à la sauvegarde des oasis remarquables du Nefzaoua.

## **6.3 Outils d'analyse**

### **6.3.1 Les critères retenus pour une éventuelle patrimonialisation**

Après avoir analysé la question de la patrimonialisation dans le cas du Nefzaoua, il s'agit maintenant de repérer les outils opérationnels pour en définir le patrimoine. On peut les lister selon les trois catégories suivantes :

### **1) Critères scientifiques, issus de ce travail**

- Ces tertres sont des formations géomorphologiques originales (chap. 2) dont les sources ont donné naissance à un paysage d'oasis typiques du Nefzaoua, qui s'étend sur une zone importante (126 tertres inventoriés, cf. chap. 5)

- Ils constituent une archive paléoclimatique inédite du Sud tunisien (chap. 4).

Ces deux éléments militent en faveur d'une approche type « géomorphosite », sans que cet accent sur l'aspect géologique ne doive pour autant conduire à négliger les autres critères esthétiques et culturels, et la dimension paysagère.

D'un point de vue scientifique, le rôle des tertres comme témoin de l'histoire humaine et géologique récente de cette région, comme archive paléoclimatique, nous fait définitivement plaider en faveur de la patrimonialisation des tertres remarquables du Nefzaoua.

### **2) Critères esthétiques**

Les tertres dans leur forme originelle représentent un paysage unique, berceau de la culture oasienne des bords du chott, un paysage ondulant formé d'une suite de petites collines blanches portant en leur sommet souvent un bouquet de palmiers, et pour les plus importantes, un ancien village et une oasis traditionnelle à leur pied. Ce paysage qui a retenu l'attention de nombreux voyageurs est reconnaissable entre tous, il ne semble pas avoir d'équivalent dans le monde. Les critères esthétiques sont éminemment sociaux, nous les mentionnons ici car ils sont importants, mais il ne nous appartient pas d'en juger.

### **3) Critères culturels**

Le paysage dans le Nefzaoua a été clairement influencé par les actions de mise en valeur par l'homme. Une société s'y est développée avec ses méthodes agricoles, ses traditions, sa culture. Une évaluation complète de la dimension culturelle sort du cadre de ce travail.

On peut cependant mentionner ici la manière dont a été conduite la mise en valeur des tertres, dans sa dimension technique. Un ensemble d'éléments ont été déployés pour l'irrigation à partir des tertres : aménagements de la sources, prises d'eau, canaux, partage de

l'eau dans le temps et l'espace, organisation de la répartition de l'eau et les techniques de mesure, notamment.

L'homme a transformé les tertres des sources en un système d'irrigation et a développé autour ses cultures d'oasis à trois étages. Il a aménagé la source, effectué le creusement et le curage du bassin pour la collecte des eaux. Il a mis au point un système d'irrigation basé sur la gravité, l'eau rejoignant l'oasis au pied des tertres par des *seguias* en terre régulièrement entretenues. Il a inventé un système de partage d'eau de plus en plus complexe, basé sur la rotation dans le temps et dans l'espace, la durée variant selon le type de cultures, la distance à la source et selon la saison. Il a aussi inventé d'autres techniques de mesure, notamment le *gadás* (voir cf. chap. 2 § 2.3).

La manière dont a été conduite la mise en valeur des tertres par l'homme au Nefzaoua est donc un élément convaincant pour le critère culturel. Les historiens, et spécialistes de la culture arabo-berbère ont mené nombre de travaux qui permettraient de mieux préciser les autres facettes de ce critère.

#### **4) Critère économique**

Un critère qui dépasse le cadre de cette thèse est certainement la dimension économique du patrimoine, sur les politiques publiques de mise en valeur, de développement touristique ou plus généralement de développement local. Par exemple, pour argumenter et financer la protection, le tourisme saharien semble être un bon moteur. C'est le cas des « ksour<sup>20</sup> » du sud-est tunisien qui sont une importante attraction touristique, ils font partie du patrimoine culturel de cette région et témoignent de son évolution historique et sociologique.

---

<sup>20</sup>Le Ksar (Ksour au pluriel) correspond à un grenier constitué de cellules d'engrangement, appelées *ghorfas*. Disposées en un ou plusieurs étages et qui ouvrent toutes sur une place centrale, la cour du Ksar. De l'extérieur, le mur, sans aucune ouverture à l'exception de la porte, se présente avec des hauteurs importantes pouvant atteindre 10 m dans le cas de certains Ksour, et évoque ainsi l'aspect de forteresse. Ils sont essentiellement concentrés dans le sud-est du pays, entre les gouvernorats de Médenine et de Tataouine, où l'on en dénombre environ 90. On trouve trois types de Ksour ceux de montagne, de plaine et les Citadelle ou Kalâa

Le centre du patrimoine mondial UNESCO a officiellement intégré la liste des Ksours du Sud tunisien dans sa dernière mise à jour. <http://kapitalis.com/tunisie/2020/02/03/les-ksours-du-sud-de-la-tunisie-inscrits-dans-la-liste-du-centre-du-patrimoine-mondial-de-lunesco/>

### **6.3.2 Le Nefzaoua et les critères du patrimoine naturel**

En ce qui concerne plus spécifiquement les aspects naturels, on peut considérer que chaque tertre dans le Nefzaoua est un objet géomorphologique. Sa formation est dépendante d'un ensemble de facteurs naturels déclenchant des phénomènes particuliers dans un environnement aride spécifique. A l'échelle mondiale, la formation des tertres peut être considérée comme le fruit d'un concours exceptionnel de circonstances favorables, présentées ici du général au particulier :

- Une structure géologique dans des roches sédimentaires servant d'impluvium et une disposition des couches de la roche magasin pouvant emmagasiner de l'eau en profondeur sous forme de nappe captive. Ces couches disposent d'un toit étanche pour mettre la nappe d'eau enfouie sous pression ;
- Des épisodes d'une pluviométrie passée et/ou actuelle suffisamment abondante sur l'impluvium pour générer une infiltration ;
- Une végétation importante s'accumulant autour des mares d'eau douce et des puits artésiens ;
- Un apport de sédiments sableux mis en mouvement par l'érosion éolienne et s'accumulant autour des points d'eau ;
- La formation de structures sédimentaires subhorizontales, reprises par l'eau artésienne et formant des mares perchées ;
- Des remontées capillaires favorisant la concentration de sulfates (gypse) et carbonates à la surface de ces édifices et scellant la structure des tertres par cimentation.

Nous avons vu que les tertres conservent une mémoire sédimentologique, témoignage des paléogéographies qui se sont succédées dans le temps et dans l'espace. Cette richesse de leurs dépôts leur confère une valeur scientifique significative, qui serait certainement encore plus nette lorsque les aspects archéologiques seront pris en compte, ce que nous n'avons pas pu faire dans ce travail.

### 6.3.3 Le Nefzaoua face aux 10 critères de l'UNESCO

Pour se donner un cadre d'analyse, on peut se référer à la liste des critères mise à jour et synthétisée par l'UNESCO en 2005 (<https://whc.unesco.org/fr/criteres/>). Pour figurer sur la liste du patrimoine mondial, les sites doivent avoir une **valeur universelle exceptionnelle** et satisfaire à au moins un des dix critères suivants (Tableau 6.1 : **en gras ceux qui semblent les plus appropriés dans le cas du Nefzaoua**). Ces critères sont ceux définis pour la notion de patrimoine mondial, mais ils peuvent aussi être utilisés d'une façon plus générale, pour se demander si tel ou tel bien culturel/naturel peut être considéré comme un patrimoine, par exemple au niveau national, ou d'une région. Parmi les caractéristiques des tertres, certaines semblent satisfaire des critères de l'UNESCO, listés dans le tableau suivant. Pour chaque critère nous avons tenté d'estimer la pertinence dans le cas du Nefzaoua, d'après les observations et éléments dont nous disposons.

Cette série de critères a une vocation très « universelle », mais il apparaît que plusieurs semblent tout à fait pertinents dans le cas du Nefzaoua. Nous avons vu que, pour qu'on parle de patrimoine, il faut que ce que l'on veut protéger possède un caractère exclusif, particulier. Les tertres du Nefzaoua semblent bien avoir un caractère unique et seraient ainsi des éléments potentiellement importants de l'identité régionale de cette partie du sud tunisien, au fil des siècles par les activités humaines.

La rareté des tertres conservant leur forme originelle leur donne maintenant une grande valeur patrimoniale : ils sont à la fois un patrimoine naturel par leur intérêt géomorphologique et hydrogéologique et un patrimoine culturel parce que chaque tertre était le centre d'une activité humaine qui dépendait entièrement de la source. Ils témoignent d'une longue et profonde relation entre la population oasienne du Nefzaoua et son environnement, basée comme nous l'avons vu sur la mise en place d'un réseau hydro-agricole à base d'eau de source, qui a permis le développement des oasis dans un milieu hostile.

Considérés comme le premier maillon de l'histoire de l'occupation de l'espace oasien dans un milieu aride et hostile, les tertres du Nefzaoua sont des éléments potentiellement importants de l'identité régionale dans le sud tunisien, façonnée au fil des siècles par les activités humaines. Ils apportent un témoignage unique ou du moins exceptionnel sur une tradition culturelle ou une civilisation vivante ou disparue. **Ces dimensions, culturelle et historique, sont à mettre en regard des critères 3, 4 et 5 du tableau 6.1.**

**Tableau 6.1 : les 10 critères de sélection pour la liste du Patrimoine mondial de l'Unesco.**

Critères de l'UNESCO	Degré de pertinence
1 : Représenter un chef-d'œuvre du génie créateur humain	Peu pertinent.
2 : <b>Témoigner d'un échange d'influences considérable pendant une période donnée</b> ou dans une aire culturelle déterminée, sur le développement de l'architecture ou de la technologie, des arts monumentaux, de la planification des villes ou <b>de la création de paysages</b>	Moyennement pertinent
3 : <b>Apporter un témoignage</b> unique ou du moins exceptionnel sur une <b>tradition culturelle</b> ou une civilisation vivante ou disparue	Très pertinent
4 : Offrir un <b>exemple éminent</b> d'un type de construction ou d'ensemble architectural ou technologique ou <b>de paysage illustrant une ou des périodes significative(s) de l'histoire humaine</b>	Très pertinent
5 : Être un <b>exemple éminent</b> d'établissement humain traditionnel, <b>de l'utilisation traditionnelle du territoire</b> ou de la mer, qui soit <b>représentatif</b> d'une culture (ou de cultures), ou de <b>l'interaction humaine avec l'environnement</b> , spécialement quand celui-ci est devenu vulnérable sous l'impact d'une mutation irréversible	Très pertinent
6 : Être directement ou matériellement associé à des événements ou des traditions vivantes, des idées, des croyances ou des œuvres artistiques et littéraires ayant une signification universelle exceptionnelle	Peu pertinent
7 : Représenter des phénomènes naturels ou des aires d'une beauté naturelle et d'une importance esthétique exceptionnelles	Moyennement pertinent
8 : Être des exemples éminemment <b>représentatifs</b> des grands stades de l'histoire de la Terre, y compris le témoignage de la vie, de processus géologiques en cours dans le développement des formes terrestres ou <b>d'éléments géomorphiques</b> ou physiographiques ayant une grande signification	Très pertinent
9 : être des exemples éminemment représentatifs de processus écologiques et biologiques en cours dans l'évolution et le développement des écosystèmes et communautés de plantes et d'animaux terrestres, aquatiques, côtiers et marins	Peu pertinent
10 : contenir les habitats naturels les plus représentatifs et les plus importants pour la conservation <i>in situ</i> de la diversité biologique, y compris ceux où survivent des espèces menacées ayant une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science ou de la conservation.	Très peu pertinent

Si la question de la beauté naturelle du Nefzaoua a nécessairement une part de subjectivité, il est indéniable que ce paysage fait partie des éléments attrayants du tourisme saharien et sans aller jusqu'à considérer qu'il a une importance esthétique exceptionnelle, cela reste un élément pertinent, satisfaisant tout au moins le **critère 7**.

De plus, nous avons vu que les tertres renferment dans leurs archives sédimentologiques les traces de leur formation sur le long terme, ainsi que les traces d'une occupation humaine sédentaire dans la région depuis au moins l'Antiquité tardive jusqu'à nos jours. Ce critère « d'archive » paraît le mieux établi et pourrait amener à qualifier les tertres de « géomorphosites », puisque leur particularité tient essentiellement à leur origine géomorphologique, liée à une géologie et une hydrogéologie originale. En revanche, ce terme a l'inconvénient d'occulter la dimension de leur mise en valeur par l'homme. Grandgirard, (1997) considère qu'un géomorphosite est un objet géomorphologique participant à la compréhension et à la reconstitution de l'Histoire de la Terre. Les tertres sont à la limite de cette définition qui ne prend pas en considération les actions anthropiques. Une définition générale qui prend en compte la relation entre l'homme et le site est celle établie par Panizza (2001). Elle qualifie un objet géomorphologique, aux dimensions variées, allant de la forme ponctuelle (une doline) à des reliefs de grande taille (une vallée, une côte), auquel l'Homme confère une certaine valeur pour des raisons scientifiques, écologiques, esthétiques, culturelles ou économiques.

Selon cette dernière définition, qui est plus large, les tertres du Nefzaoua peuvent être considérés comme des géomorphosites, formant un paysage qui a vécu pendant des siècles, qui est vulnérable et menacé d'une destruction irrémédiable. Cette conclusion de l'étude de la dimension naturelle ne permet cependant pas de trancher sur son importance, ni de juger de la pertinence d'une approche « géoparc » pour ce paysage. Nous retiendrons simplement qu'ils sont un exemple remarquable, représentatif d'éléments géomorphiques significatifs **et donc satisfont le critère 8.**

Il semble donc qu'il soit raisonnable de s'intéresser à l'aspect patrimonial de ce paysage, même si nous n'avons pas pu apporter la preuve définitive de son caractère « exceptionnel, éminent, remarquable, ou représentatif » selon les termes de l'UNESCO, nous avons mis en évidence assez d'éléments pour qu'une discussion sur la patrimonialisation s'impose.

## **6.4 Utilisation de l'inventaire des Tertres en vue d'une éventuelle patrimonialisation**

Au cours du travail d'inventaire des tertres que nous avons réalisé (chap. 5) nous avons pour chacun d'eux non seulement décrit le type, les dimensions, mais aussi l'état de conservation général. Nous avons vu que si une majorité d'entre eux est dégradée, certains tertres sont

encore bien conservés, ou parfois, bien que déjà en partie excavés, ils sont intéressants car ils présentent de belles coupes facilitant leur étude et les prélèvements d'échantillons. Du point de vue patrimonial, les tertres qui ne sont pas trop abîmés pourraient être conservés en priorité dans le cas d'une action de préservation.

En analysant le tableau d'inventaire des tertres (cf. annexe) nous avons retenu les tertres qui paraissent intéressants pour une éventuelle patrimonialisation, en prenant en compte plusieurs considérations. Pour que l'action de sauvegarde du tertre ne se résume pas à le soustraire à la dégradation, voire l'aplanissement, il faut envisager son rôle de témoin dans l'histoire, notamment culturelle, sur la base de la liste des critères suivant.

- **Témoignage historique**

Terre témoin de l'histoire de la sédentarisation d'une population nomade vivant autour de ces points d'eau douce, du développement de l'oasis et de son système d'irrigation sophistiqué, à travers les points suivants :

- Curage de la source ;
- Culture irriguée, creusement de tunnels et/ou d'axes de drainage pour cultures irriguées avec de l'eau artésienne ;
- Système de cultures à 3 étages.

- **Esthétique**

Terre qui témoigne de la beauté du paysage traditionnel du Nefzaoua : la dimension esthétique peut intervenir, en sélectionnant un tertre particulièrement intéressant sur le plan visuel, symbolisant bien l'image caractéristique de la région. Il y a un lien potentiel avec le tourisme saharien.

- **Intérêt scientifique**

Un certain nombre de tertres dégradés présentent des coupes remarquables, notamment ceux que nous avons caractérisés lors de l'étude sédimentologique. Ces coupes de tertres et d'autres, similaires, ont clairement un rôle de témoin d'intérêt scientifique, qu'il s'agit également de conserver. Dans ce cas il s'agirait d'une préservation de l'archive qu'ils constituent, plutôt que de la sauvegarde d'un tertre « modèle ».

- **Intérêt pédagogique**

La dimension pédagogique est au moins tout aussi importante, pour sensibiliser les habitants et faire connaître les caractéristiques du paysage du Nefzaoua, particulièrement auprès des jeunes, nationaux et internationaux (lien avec le tourisme). Par exemple

l'organisation d'excursions de sensibilisation et de découverte des tertres au profit des écoliers (logistique, support pédagogique...).

Au final, les 11 tertres listés dans le tableau 6.2 ont été retenus. Ce n'est qu'une proposition, selon l'importance de tel ou tel critère ou la profondeur de l'analyse, cette liste peut bien sûr être affinée.

**Tableau 6.2 : Les tertres remarquables extraits de l'inventaire général (voir tableau en annexe)**

Code Tertre	Nom du tertre	Intérêt	Commentaire
Trt 5	Djezira el Berrhoutsia	Pédagogique	Tertre de type peu dégradé système d'oasis rayonnant autour d'une source dans le Chott.
Trt 9	Djezira Ouled Aïssa	Esthétique, scientifique et Pédagogique	Tertre de type peu dégradé conserve sa forme originelle <sup>21</sup> , un griffon dégagé et une coupe très intéressante.
Trt 10	Ain Tifout	Scientifique	Tertre de type aplani seule une coupe très intéressante à étudier existe encore.
Trt 30	El Alouia	Pédagogique et esthétique	Tertre de type peu dégradé où l'ancienne canalisation vers l'oasis est encore conservée.
Trt 41	Aïn El Bled	Témoignage historique	Ce tertre de type urbanisé a conservé en lui l'histoire de l'installation de la population sur les tertres et l'exploitation de la source.
Trt 52	Touiba	Esthétique	Tertre de type peu dégradé, ensablé. Il se localise loin de la zone urbanisée, dans le Chott mais facile d'accès. Il peut être un bon exemple pour une reconstitution du paysage.
Trt 93	Tertre sans nom sur la carte	Pédagogique	Tertre type peu dégradé où le propriétaire du tertre a installé le forage dans l'ancien griffon : reconstitution de la source en mode artésianisme.
Trt 95	Aïn Djedida	Esthétique et Pédagogique	Tertre de type peu dégradé urbanisé il a conservé sa forme originelle.
Trt 98	Selamia	Pédagogique	Tertre de type peu dégradé, a conservé la forme originelle de son griffon.
Trt 117	Non indiqué sur la carte	Esthétique et Pédagogique	Tertre de type peu dégradé ensablé.
Trt 122	Fartassa	Pédagogique et Esthétique	Tertre de type peu dégradé : a conservé sa morphologie originelle et conserve toujours le système de canal qui chemine de la source vers l'oasis.

<sup>21</sup> Un tertre qui a conservé sa forme originelle est défini comme un tertre qui n'a pas subi de modification en sa forme.

A travers ce tableau nous avons examiné les éléments qui pourraient composer un exemple de sauvegarde de tertre qui soit un exemple « pilote » d'une action de patrimonialisation. Au-delà, il semble bien que les bouleversements qu'a connu l'environnement de cette région par le tarissement des sources, la multiplication des forages, l'extension des plantations modernes, l'urbanisation, ont une dimension plus globale que la simple sauvegarde de tertres remarquables. Le développement durable de la région, suppose non seulement de préserver ce qu'il reste, mais de gérer durablement les différentes ressources. C'est là un objectif qui dépasse le cadre de cette thèse.

Il serait cependant sans doute possible d'aller un cran plus loin dans la stratégie de sauvegarde de ces tertres remarquables et voir si leur valorisation pourrait s'articuler avec d'autres attracteurs touristiques. La carte de la figure 6.1 montre l'emplacement de ces tertres. On voit qu'ils sont relativement bien distribués dans le paysage du Nefzaoua, ce qui laisse augurer qu'ils en sont probablement assez représentatifs pour un éventuel circuit touristique.

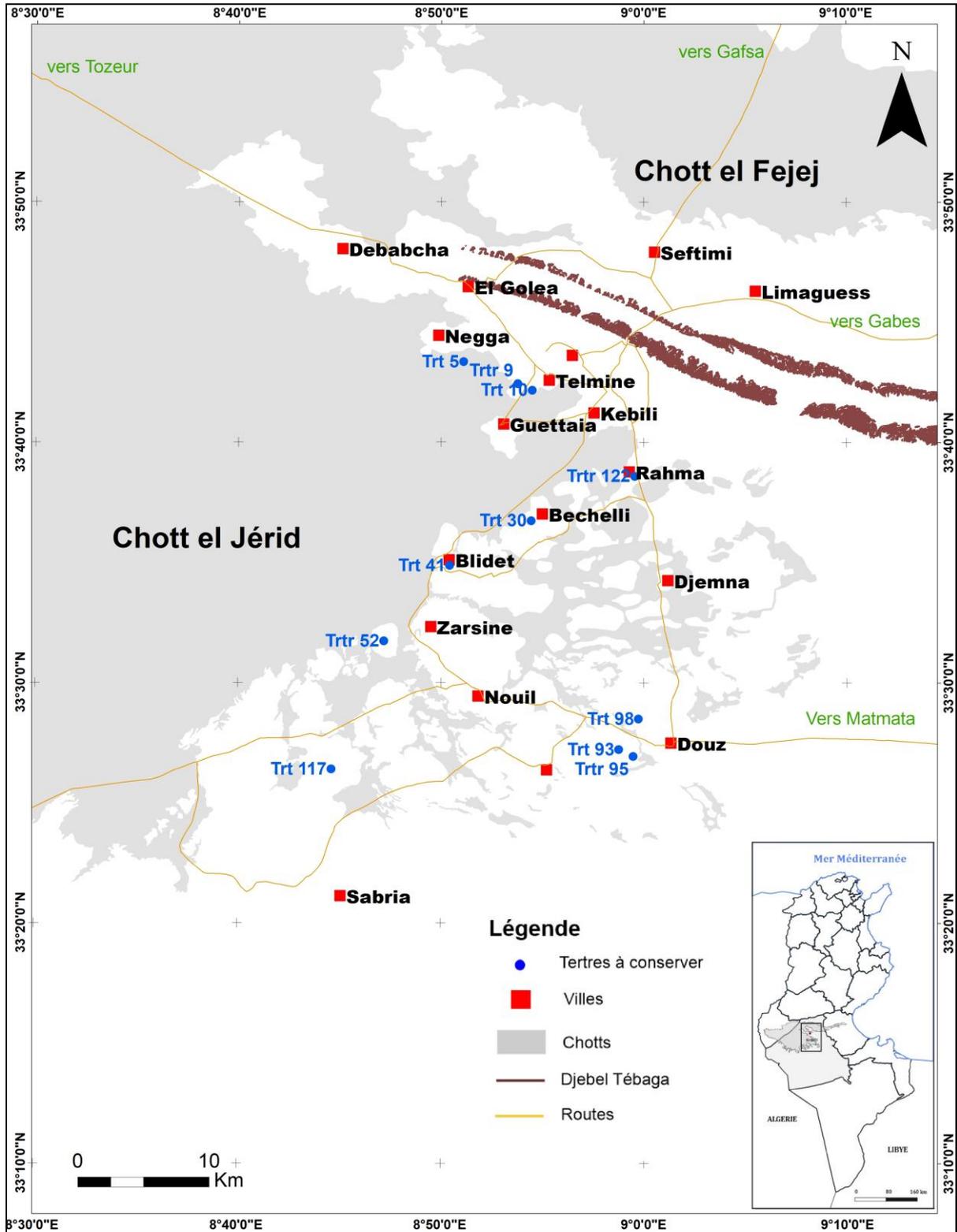
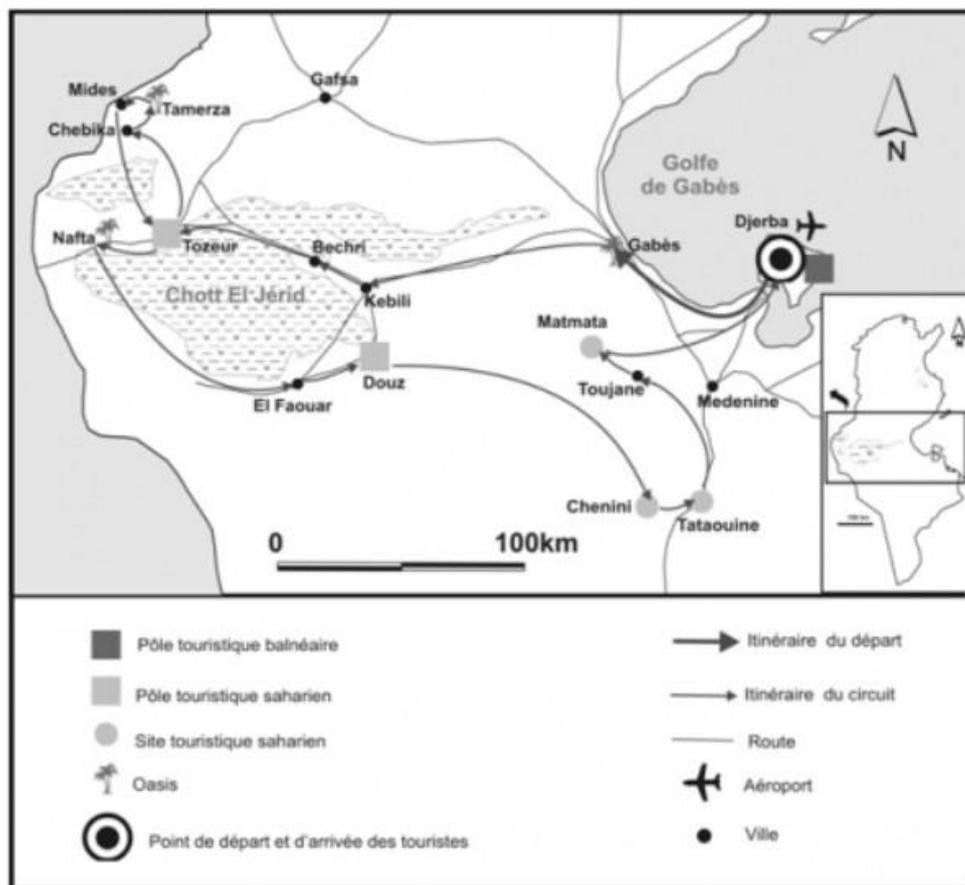


Figure 6.1 : Carte de localisation des terres intéressantes pour une éventuelle conservation.

Selon le découpage régional généralement utilisé, le tourisme saharien concerne quatre gouvernorats du Sud tunisien, ceux de Tozeur, Kébéli, Gafsa et Tataouine. Ils sont regroupés sous l'appellation de « zone touristique de Gafsa-Tozeur » qui attirait en moyenne près de 800 000 touristes étrangers par an (ONTT, 2007).



**Figure 6.2 : Itinéraire d'un circuit touristique saharien organisé par le tour opérateur français Jet Tours, d'après Souissi 2011.**

Souissi (2011) nous donne un exemple (figure 6.2) d'itinéraire d'un circuit touristique saharien organisé par le tour opérateur français Jet Tours. Dans ce circuit Douz est considéré comme un pôle touristique saharien. Dans ce contexte, on peut imaginer d'intégrer les tertres que nous avons identifiés comme devant être sauvegardés, dans ce genre de circuit touristique. Cette connexion avec le tourisme saharien semble un point très intéressant pour faire connaître les tertres comme éléments du patrimoine régional, dont la culture est par ailleurs déjà mise en valeur, particulièrement par le Festival de Douz cité plus haut :

([https://fr.wikipedia.org/wiki/Festival\\_international\\_du\\_Sahara](https://fr.wikipedia.org/wiki/Festival_international_du_Sahara)).

## Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons tenté de tirer les enseignements de nos travaux de caractérisation des tertres, pour voir dans quelle mesure ces monticules peuvent être qualifiés de patrimoine. Nous avons vu que cette notion est pour le moins complexe, dans la mesure où un patrimoine d'origine naturelle a généralement aussi de multiples dimensions, historiques, culturelles, économiques, etc. En passant en revue quelques-unes de ces notions et en s'appuyant sur des critères opérationnels (ceux de l'UNESCO), nous avons retenu celles qui semblent bien s'appliquer au cas du Nefzaoua. Même si les habitants ne semblent pas considérer actuellement les tertres comme un patrimoine à préserver, il est assez clair que le développement de la culture oasienne, ses traditions, son mode de vie sont intimement liés à l'histoire des tertres et de leurs sources. En effet il n'y a de tertres que grâce aux sources artésiennes, qui ont permis très tôt dans l'histoire de la région le développement d'une agriculture irriguée au milieu de cet environnement hyperaride, à proximité du chott El Jerid hostile à toute végétation. Cette agriculture d'abord vivrière, s'est de plus en plus orientée vers la culture des dattes, jusqu'à devenir une monoculture, par l'intensification qu'a permis l'utilisation de forages profonds et la mécanisation. Cette intensification s'est faite au détriment des tertres ; leurs sources étant toutes tarées, ils sont devenus de simples « tas » de sédiments sableux, exploités pour amender les sols des nouvelles palmeraies.

En utilisant nos travaux de cartographie et d'inventaire nous avons mis en évidence qu'une majorité des tertres sont dégradés, mais aussi qu'il reste un certain nombre de tertres assez bien conservés, et d'autres qui sont déjà excavés mais de ce fait présentent des coupes intéressantes.

En effet, dans le cadre de notre étude nous avons pu montrer l'intérêt scientifique de l'approche sédimentologique des tertres, des coupes permettent d'observer et analyser les dépôts successifs. Ils forment ainsi une archive qui peut être interprétée notamment en termes paléoclimatiques. Nul doute que ces archives, qui renferment aussi des restes d'organismes vivants, des traces d'occupation humaines, non étudiés ici, sont aussi très intéressantes des points de vue écologique et historique.

Nous avons ainsi repéré dans notre inventaire les tertres les plus intéressants, que ce soit pour cet aspect scientifique, ou pour l'aspect esthétique, car ils représentent bien l'harmonie du paysage traditionnel du Nefzaoua, mais aussi didactique car ils sont de beaux témoins de la

mise en valeur des sources artésiennes et de l'organisation mise en place autour des tertres par les sociétés traditionnelles.

Si l'on considère l'ensemble de la région du Nefzaoua, on peut dire qu'elle est globalement un patrimoine naturel déjà bien dégradé et en danger de disparition. En revanche, au niveau plus local, une petite douzaine de tertres remarquables mérite l'attention et certainement un effort de protection et de conservation, pour éviter que toute trace de la « civilisation des tertres » ne disparaisse définitivement.

# Conclusion de la troisième partie

Dans le chapitre 5 nous avons réalisé un inventaire des tertres du Nefzaoua, étape indispensable pour caractériser l'état actuel du paysage fortement touché par des excavations importantes. La mise au point d'une typologie a permis l'identification de six types de tertres en se basant sur la nature et le degré de dégradation. L'inventaire ainsi établi constitue une base de données localisant, dénombrant et caractérisant tous les tertres repérés dans la région, grâce à nos travaux de terrain et de cartographie (chap. 3). D'après cet inventaire, il se confirme que l'action humaine est prépondérante, plus rapide et plus destructive que l'action exercée par l'érosion éolienne, pourtant très présente dans la région, mais ayant plus tendance à combler qu'à détruire.

Dans le chapitre 6 avons abordé la question de l'aspect patrimonial des tertres. Pour cela il a été nécessaire d'évaluer les tertres comme patrimoine en mettant en lumière leurs caractéristiques naturelles (formation géomorphologique et hydrogéologique) et ensuite, leur apport historique dans le développement de la région en considérant leur aménagement par l'Homme. En effet, les tertres des sources artésiennes des oasis du Nefzaoua témoignent de plusieurs siècles de mise en place d'une technicité ingénieuse en matière d'irrigation et de drainage, de maîtrise de la gestion collective de ressources rares en eau (chap. 2) et du savoir-faire oasisien. A cet aspect s'ajoute l'intérêt de ces tertres du point de vue scientifique, sous leur forme d'archive historique et paléo-environnementale. Par ces différents aspects, les tertres du Nefzaoua méritent d'être considérés comme un patrimoine. Ils répondent en effet à au moins à quatre critères de l'UNESCO. Ils contribuent fortement en particulier à l'identité régionale et sont un exemple remarquable d'éléments géomorphiques significatifs.

Passer de cette interrogation sur la valeur de ce patrimoine à une véritable patrimonialisation nécessitera d'agir pour sauvegarder au moins une relique de ce patrimoine naturel et humain. Une tâche urgente et difficile car la population du Nefzaoua, très orientée vers la phoeniciculture intensive, semble encore peu consciente de la perte inexorable de son patrimoine.

# Conclusion générale

## Rappel des objectifs

L'objectif principal de notre travail était d'interroger le paysage des tertres de sources artésiennes du Nefzaoua, d'étudier et d'analyser les différentes étapes des transformations de ce paysage oasien dans le temps et dans l'espace. Un paysage où la population oasienne de cette région s'est progressivement sédentarisée. À travers l'histoire elle a survécu et a prospéré autour de ces tertres. Pour ce travail il était nécessaire de comprendre les facteurs topographiques, hydrogéologiques, climatiques, les conditions édaphiques, mais aussi les activités humaines et les aspects historiques expliquant les conditions de leur formation et leur évolution. Le démantèlement mécanique des tertres nous a offert la possibilité d'observer et d'échantillonner le cœur des structures afin de comprendre les processus de leur formation géomorphologique à travers une étude sédimentologique. Il s'agissait aussi d'évaluer le degré de changement suite au tarissement des sources et d'identifier les facteurs principaux de leur dégradation. Enfin, nous avons cherché à identifier leur rôle dans l'identité régionale en questionnant leur aspect patrimonial.

## Une étude du paysage du Nefzaoua en trois phases

Ce travail a été réalisé selon trois grandes étapes auxquelles correspondent autant de parties dans le manuscrit.

Dans la première partie nous avons cherché à caractériser le milieu naturel, notamment le contexte géologique, et ses particularités hydrogéologiques, qui donnent son originalité au paysage du Nefzaoua, qui se caractérise en particulier par ses nombreux tertres de sources artésiennes. Le paysage des tertres est donc le résultat d'une interaction établie, à temps long, entre l'eau, le vent et l'homme. L'eau, collectée par des structures géologiques aux formes d'impluvium, est stockée dans des couches perméables, puis émerge sous forme de résurgence artésienne. Le vent intervient sous forme d'érosion éolienne. Enfin l'Homme aménage les sources en système d'irrigation. Les tertres du Nefzaoua sont le résultat d'accumulations de sédiments, caractérisées par une lente édification naturelle. Ils sont souvent circulaires, leur hauteur varie de moins d'1 m à plus de 30 m. Ils peuvent atteindre

plusieurs centaines de mètres de diamètre. Ils sont constitués d'une ceinture de matériel éolien piégé par la végétation. Puis, dans le bassin, le matériel sédimentaire est redistribué par les eaux artésiennes et affecté par une pédogenèse.

Les tertres ont été aménagés par l'Homme en un système d'irrigation agricole ingénieux permettant le développement d'une culture oasisienne depuis, au moins, l'Antiquité. Les forages profonds à partir du début du 20<sup>ème</sup> siècle, puis plus récemment les pompes alimentés par l'énergie solaire, ont tari les sources artésiennes naturelles et, de ce fait, bouleversé cette organisation traditionnelle. Les oasis anciennes ont été entourées de périmètres irrigués modernes et ont commencé à perdre leur équilibre écologique.

Dans la deuxième partie, nous avons mobilisé un grand nombre de techniques afin de caractériser le paysage. Il a été étudié à partir d'images de télédétection aérienne et spatiale et à partir de nombreux prélèvements de terrain complétés par des analyses sédimentologiques en laboratoire.

Nous avons tout d'abord entrepris la cartographie des éléments du paysage, et de leur évolution dans le temps. Pour l'analyse diachronique des paysages du Nefzaoua, différentes méthodes ont été utilisées. Grâce à la combinaison de méthodes de photo-interprétation, de traitement d'archives (photos aériennes anciennes des années 1950), d'analyse spatiale d'images satellitaires des années 1970 jusqu'à nos jours, et de modèles numériques de terrain récents, nous avons pu mettre en évidence que le paysage des oasis du Nefzaoua vit un changement profond dans le temps et dans l'espace à travers l'extension des oasis modernes créées grâce à l'introduction des forages. Ce changement de paysage a été étudié à deux échelles : celle des oasis du Nefzaoua et celle du tertre.

À l'échelle des oasis nous avons retenu 3 images satellites enregistrées respectivement en 1973, 1998, 2017. Afin de déceler l'ordre de grandeur de l'extension des oasis, nous avons calculé l'indice de végétation (NDVI) pour chacune des dates après les avoir converties à une même résolution. Le résultat obtenu a montré que les surfaces des oasis ont presque quadruplé depuis 1973, passant d'un peu plus de 5000 ha à près de 20 000 ha. Nous avons ensuite réalisé une analyse multi-dates simple et visuelle en combinant les 3 images NDVI en affectant à chacune une des couleurs de base Rouge, Vert et Bleue. Cette composition multi-date combinant les valeurs de NDVI nous a permis une visualisation très nette de la modification qu'a subi le territoire du Nefzaoua avec une extension très visible autour des oasis anciennes, souvent localisées près de tertres de sources. La combinaison du modèle numérique de terrain

récent (MNT TandemX) d'une résolution spatiale de 10 m avec l'image multi-date a permis de révéler la topographie des tertres au centre des oasis anciennes, et de mesurer leurs dimensions.

Par ailleurs, à l'échelle des tertres, la possibilité d'afficher des images d'archive disponibles sur Google Earth nous a permis de retracer la destruction récente et rapide des tertres. Ces images d'archive remontant seulement à 2010 dans la région montrent que depuis une dizaine d'années les tertres subissent une destruction progressive. Elle se caractérise par un démantèlement suivi par un aplanissement total du centre des tertres riche en sédiments non salés. Le matériel meuble démantelé est utilisé pour l'amendement de nouveaux champs pour l'extension des oasis sur les sols salés du chott. De nouveaux champs s'installent progressivement sur les anciens emplacements du tertre. De nombreuses carrières ont ainsi été repérées dans la zone d'étude, indiquant une disparition plus ou moins prononcée des tertres. En revanche le démantèlement des tertres par les pelles mécaniques, dont on peut regretter les effets, a eu incidemment l'effet positif d'une opportunité de trouver localement des coupes très intéressantes à étudier. En effet, l'étude des coupes remarquables de quelques grands tertres nous a permis de décrire et échantillonner sur 4 coupes et 3 sondages les différentes strates de sédiments qui les composent, ce qui n'aurait pas été possible sans leur démantèlement.

Les analyses sédimentologiques en laboratoire ont montré que l'origine du matériel des tertres est essentiellement éolienne. Les grains de quartz apparaissent homométriques au MEB (100  $\mu\text{m}$ ) et des argiles y adhèrent. Cela indique qu'ils ont été transportés par le vent, captés par la végétation et resédimentés, comme en témoigne leur stratification fine, qui indique un dépôt en milieu aqueux. Ce milieu est peu salé d'après les mesures de conductivité électrique, très inférieure à  $2\text{dS m}^{-1}$  dans la partie basale des sédiments et sans doute peu évaporé, sauf dans les structures sommitales des séries sédimentaires. Les résultats de l'analyse chimique indiquent que la pédogenèse s'est effectuée avec une remontée de carbonates par capillarité, des dépôts en poches de calcaire pulvérulents ou en rognon le long des strates (rupture de la capillarité). Un dépôt de type évaporitique est peu probable en raison de la faible salinité des strates y compris celles contenant des carbonates. Ces dépôts sont accompagnés d'un processus d'oxydo-réduction, de gleyification et de dépôts stagniques. Ces derniers consistent en une accumulation de végétation entraînant la réduction du fer, soulignée par des colorations gris-vert pâles. Des phases d'oxydation du manganèse se présentent en taches noires, alors que le fer se signale par des taches orangées. Ces phénomènes d'oxydo-réduction observés et

étudiés indiquent un processus de sédimentation très lente en phases successives d'accumulations limniques envahis de végétation. De plus, on remarque une remontée capillaire ou un apport éolien de gypse formant une croûte sommitale. Cette croûte s'indure par re-cimentation pendant les rares épisodes pluvieux. On voit des traces de dissolution et de redistribution à la surface de tertres démantelés. Il s'agit donc d'un processus actif actuel.

Dans la troisième et dernière partie nous avons cherché à exploiter l'ensemble des observations, caractérisations, analyses de la deuxième partie pour dresser un inventaire des tertres de sources du Nefzaoua, leur localisation, dimensions et surtout leur état actuel. Nous avons identifié six types de tertres suivant l'état de leur dégradation. Chaque type identifié a été illustré par des extraits d'images satellites récentes. Cet inventaire a mis en évidence l'instabilité actuelle du système des tertres, et a permis d'identifier l'Homme comme facteur prépondérant dans la destruction en cours du paysage du Nefzaoua. Nous avons dénombré près de 400 sources mentionnées sur les cartes topographiques du début de 20<sup>ème</sup>, correspondant vraisemblablement à autant de tertres. Seuls 126 tertres ont été localisés et inventoriés dans ce travail, dont 33,3 % sont totalement aplanis, 31 % sont en voie de démantèlement et seuls 11,1 % semblent encore intacts ou encore peu dégradés ; le reste se regroupe entre tertres aménagés et urbanisés. Il en ressort que ce paysage unique disparaît sous l'action de l'Homme qui exploite ses sédiments pas ou peu salés pour réaliser des extensions des périmètres irrigués voués à la culture de la datte, principale richesse agricole de la région.

Outre la question de la pérennité de cette culture avec le développement du processus de salinisation, cela nous a conduit à nous demander s'il s'agit là d'un patrimoine en danger. Nous avons ainsi cherché à identifier le caractère patrimonial que pourraient représenter les tertres. Pour cela, parmi les critères mis en place par l'UNESCO, ceux valides dans le cas du Nefzaoua se sont révélés opérationnels. Ce travail a permis de dégager à quel point l'importance historique, esthétique et scientifique que les vestiges des tertres peuvent avoir pour la région, serait valorisée dans le cas où ils seraient identifiés comme patrimoine. Jusqu'à présent la population du Nefzaoua semble ne pas être consciente de la perte considérable de son identité régionale et de la dégradation lente et irréversible de son environnement. Il faut souligner à leur décharge qu'il est exceptionnel qu'une population, intégrée depuis toujours dans un environnement, qu'il soit naturel ou culturel, ait conscience de sa valeur. C'est donc de l'extérieur que doivent venir les initiatives.

Deux projets dans le domaine patrimonial, l'un abouti, l'autre en cours, forment un contexte favorable dans lequel les tertres du Nefzaoua pourraient s'intégrer :

- L'inscription de la Tunisie sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité pour les connaissances du savoir-faire, des traditions et des pratiques associées au palmier dattier.
- Le projet de dépôt d'une demande d'inscription au réseau mondial des parcs géologiques d'un Geoparc du Sud-Est tunisien.

### **Une étude du paysage des tertres du Nefzaoua nécessairement incomplète**

Ce travail de thèse a été réalisé en partie sans la proximité d'un environnement universitaire, et donc avec des moyens assez limités. Plusieurs aspects intéressants n'ont pu être abordés, qui certainement mériteraient d'être explorés. Ainsi, plus de temps et de moyens sur le terrain auraient permis d'étudier davantage de coupes et d'avoir une vision plus complète de la formation des tertres. Nous n'avons pas d'arguments pour penser qu'il puisse y avoir une remontée de sédiments sous l'effet de l'artésianisme, car nous n'avons pas pu distinguer le matériau éolien de celui qui pourrait provenir des remontées artésiennes à partir de sédiments profonds. Enfin, il manque à cette étude plusieurs interventions pluridisciplinaires que nous aborderons dans les Perspectives.

### **Perspectives**

L'approche du paysage du Nefzaoua développée dans ce travail a cependant permis d'avoir une vision d'ensemble des enjeux en cours. Pour le grand public, s'il fallait retenir une seule conclusion à l'issue de ce travail, il est clair qu'il faudrait choisir le caractère unique du paysage du Nefzaoua. C'est le seul qui soit formé par des sources artésiennes dispersées sur son territoire, qui ont donné naissance à des centaines de tertres par accumulation de sable. Façonnés par les hommes qui ont exploité ces sources pendant des siècles, ils ont ensuite été remplacés par des forages, qui ont détruit le paysage traditionnel pour faire place à des plantations modernes.

Afin de mieux comprendre les enjeux de leur conservation alors que leur destruction est en cours, des études complémentaires de ce paysage pourraient avantageusement être mises en œuvre. De nombreuses incertitudes demeurent, ainsi la chronologie de la formation des tertres n'a pu être établie. Si les séquences de sédiments montrent bien des âges relatifs, les quelques datations au  $^{14}\text{C}$  ont été insuffisantes pour dater les différentes strates et pour

établir clairement la cinétique de formation des tertres et de leur aménagement. Pour compléter ces premiers résultats, il faudrait organiser des prospections archéologiques, suivies d'études et d'identification des artefacts préhistoriques et historiques. L'apport des Sciences de l'Homme, indispensable, donnerait un puissant éclairage sur l'interaction population/environnement qui est la clé de l'évolution de ces paysages.

Pour ce qui est de la compréhension de la formation et de la dynamique de ce paysage, l'étude des strates de sédiments bénéficierait grandement de l'apport de la caractérisation des éléments biologiques (pollens, fragments végétaux par exemple) pour ajouter une dimension paléoécologique, explicitant les interactions entre géosphère et biosphère spécifiques à cette région. Un projet pluridisciplinaire permettrait de conjuguer les apports des Sciences de l'Homme et des Sciences de la Nature dans une compréhension globale de sa mise en place et de la façon dont elle a évolué, et des convergences qui lui ont donné son caractère unique.

En conclusion, les tertres du Nefzaoua se trouvent actuellement à un point de non-retour dans la longue histoire de leur évolution. Leur émergence dans le paysage s'est construite grâce à une convergence exceptionnelle de conditions naturelles dans un environnement aride et d'interventions anthropiques. Rappelons les phénomènes naturels : formation des tertres nécessitant un impluvium pour la collecte des eaux dans les nappes ; la tectonique permettant l'artésianisme ; l'humidité favorisant l'installation de la végétation qui, elle-même, piège les sédiments éoliens. Quant à l'action anthropique, elle consiste en curage des sources, construction de canaux de drainage, tunnels, occupation des surfaces. Les sources se sont tarées soit de manière naturelle, soit le plus fréquemment par rabattement irréversible de la nappe lors de pompages intensifs, causant leur dégradation par érosion naturelle ou leur démantèlement total par voie mécanique.

Les sources artésiennes se sont toutes complètement tarées depuis une trentaine d'années, suite logique d'une augmentation intensive des pompages et de l'abaissement concomitant du niveau des nappes. Ce phénomène initié des 1907 avec les premiers forages s'est accéléré avec la multiplication des forages. Le point de non-retour de la permanence des sources artésiennes a donc été atteint en parallèle avec une extension des surfaces de production intensives de cultures de dattes associées à une dégradation irréversible de la ressource en eau. Cette dégradation se manifeste au niveau de la quantité, car seule une très faible part de cette ressource prélevée est remplacée de manière naturelle, mais aussi au niveau de la qualité par l'augmentation de la salinité des eaux d'irrigation, entraînant une salinisation des sols qui les rend impropres à l'agriculture.

Ce tarissement des sources n'a laissé que des tertres d'apparence stérile, comme autant de reliques qui ont perduré dans le paysage, protégées de l'érosion par une couche de gypse cimenté en croûte par les faibles pluies, alors que les oasis laissent la place à de grandes plantations de palmier dattier dont l'extension n'est limitée que par la mobilisation des eaux profondes. Cette extension se fait maintenant au détriment des tertres qui, après leur assèchement, subissent maintenant un arasement, puis un épandage de ces sédiments peu salés à leur base dans des parcelles en bordures du chott et soumises à des remontées de sels par une irrigation mal maîtrisée, détruisant ainsi définitivement le paysage originel. Il ne subsiste que l'orientation initiale des palmeraies qui apparaît sous forme de cercles concentriques avec des axes de partage des parcelles comme autant de rayons convergents sur les reliques de tertres circulaires. Alors que le rabattement des aquifères du Nefzaoua (qui font partie des aquifères du nord-Sahara) est bien documenté, que les preuves de la salinisation des terres par irrigation à partir de ces nappes sont nombreuses et ont fait l'objet de nombreuses études, il n'y a que très peu de mentions de la disparition complète de la ressource en terres non salées, résultat du démantèlement des tertres en faveur de l'extensions des palmeraies. La disparition de cette ressource est pourtant bien plus rapide et définitive que les dégradations des ressources hydriques.

Parce que les tertres sont le reflet un peu dissimulé de la création d'une « civilisation oasienne », la disparition des tertres dans le paysage de cette écorégion désertique est donc une destruction de patrimoine à plusieurs titres :

- un patrimoine naturel avec des origines multiples mais séquencées et concordantes : c'est une « curiosité naturelle » résultant d'un concours de circonstances assez exceptionnel de conditions géomorphologiques, géologiques, tectoniques, climatiques, hydrologiques, botaniques et même anthropiques dans son existence juvénile ; ce patrimoine est centré sur la ressource hydrique de bonne qualité, jaillissante du sol, et disponible ;
- un patrimoine « sol » qui est une ressource, un bien commun doté de nombreux services écosystémiques (rapport FAO 2015 ou IPBES, 2018) qui permet entre autres à une population de se nourrir ;
- Un patrimoine humain car les civilisations oasiennes bien que d'origines diverses se sont partagés les richesses de ce territoire autour de ces sources d'eau ; elles y ont aménagé le paysage en canalisant les eaux qui s'écoulaient par gravité le long des flancs des tertres, permettant la production d'un agrosystème étagé et surtout durable.

La baisse de la ressource en eau tirée des profondeurs et dont on croit qu'elle est inépuisable, constitue une altération de patrimoine qui reste toutefois faiblement renouvelable. La disparition des ressources en terres que constituent ces tertres qui ne sont plus fonctionnels constitue au contraire une phase beaucoup plus irrémédiable de la disparition d'un patrimoine dont la prochaine étape sera le patrimoine culturel et humain.

La destruction des tertres est une étape cruciale dans la course vers un développement économique orienté principalement vers une production massive de dattes destinées à l'exportation et qui nécessite un pompage massif dans une nappe très peu renouvelable. Elle entraînera vraisemblablement, outre la dégradation de la ressource en terre, un tarissement irréversible de la nappe. Tant que la nappe était préservée, l'artésianisme était suffisant pour alimenter en eau douce un système éco-responsable durable avec les trois strates de production végétale oasienne de référence. Cette dégradation irréversible de la nappe sans changement radical dans la politique d'attribution de cette ressource peut entraîner l'abandon des terres, la présence de villages fantômes<sup>22</sup> et potentiellement l'effondrement de la société oasienne comme cela s'est produit dans le passé en Mésopotamie (Jouve, 2012) ou dans d'autres écosystèmes fragiles.

---

<sup>22</sup> Villages fantômes : ils existent lorsqu'une ressource (une mine, une industrie ou une production agricole) procurent des ressources insuffisantes à une population pour survivre.

Existent aussi dans des endroits où le risque naturel ou industriel est tel que les populations doivent migrer.

# Bibliographie

- ADELSBERGER K.A. & SMITH J.R., 2010 - Paleolandscape and paleoenvironmental interpretation of spring-deposited sediments in Dakhleh Oasis, Western Desert of Egypt. *CATENA*, 83, (1), 7-22. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.009>.
- AFNOR, 2003 - *Qualité du sol Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol-Méthode à la pipette. Propriétés physiques des sols*, Paris.
- ARAMBOURG C. & COQUE R., 1958 - Le gisement villafranchien de Aïn Brimba (sud tunisien) et sa faune. *Bull. Soc. Géol. France*, (VIII), 607-614.
- AUFÈRE L., 1931 - Le cycle morphologique des dunes. *Annales de Géographie*, 40, (226), 362-385. DOI : <https://doi.org/10.3406/geo.1931.11173>.
- BADUEL A.F. & BADUEL P.-R., 1984 - Une oasis continentale du Sud-Tunisien. *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, 38, (1), 153-170. DOI : <https://doi.org/10.3406/remmm.1984.2051>.
- BADUEL P.R., 1979 - Kebili, petit centre urbain du Sud-Tunisien. *In Urbanisation et nouvelle organisation des compagnes au Maghreb*. Université de Tours, Tours, 187-203.
- BALLAIS J.-L., 1996 - L'origine des limons sableux éoliens des Monts de Matmata (Tunisie). *Etudes de Géographie Physique*, 25, 35-44.
- BALLAIS J.L., 1998 - Rythmes et bilans de l'érosion dans les domaines arides. *In Y. Veyret, J. L. Ballais, A. Marre, A. Miossec, S. Morin et S. Valadas (eds.), L'érosion entre nature et sociétés*. SEDES, Balland, Paris, 237-262.
- BALLAIS J.-L. & HEDDOUCHE A., 1998 - Bas Sahara septentrional et Grand Erg Oriental. *In T. Tillet (ed.), Sahara. Paléolémieux et Peuplement Préhistorique au Pléistocène supérieur*. 139-163.
- BARABAN L., 1887 - *A travers la Tunisie études sur les Oasis, les dunes, les forêts la flore et la géologie*. Rothschild, Paris, 227 p.
- BARRÈRE C., BARTHÉLEMY D., NIEDDU M. & VIVIEN F.-D., 2005 - *Réinventer le patrimoine. De la culture à l'économie, une nouvelle pensée du patrimoine ?* Paris, L'Harmattan, 339 p.
- BATTESTI V., 2002 - Les jardins d'oasis : des natures en construction. *In Séminaire Ethnohistoire des jardins*, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 15.

- BÉDOUCHA-ALBERGONI G., 1976 - Système hydraulique et société dans une oasis tunisienne. *Études rurales*, 62, (1), 39-72. DOI : <https://doi.org/10.3406/rural.1976.2155>.
- BEL HADJ KACEM S., MÜLLER H.-P. & WIESNER H., 1994 - *Gestion de la faune sauvage et des parcs nationaux en Tunisie : Réintroduction, gestion et aménagement*. Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 305 p.
- BELHEDI A., 1995 - Stratégies et contre-stratégies aux prises des problèmes de développement à Souk Lahad (Nefzaoua). *Cahiers du CERES*, (12), 229-246.
- BELHEDI A., 2018 - Le développement socio-économique de Nefzaoua Quelques éléments de réflexion. 13.
- BELLOUMI M. & MATOUSSI M.S., 2005 - Sustainable Groundwater Management: A Stochastic Frontier Approach for Measuring Technical Efficiencies of Date Farmers in Nefzaoua Oases of Tunisia. In *La 12e Conférence annuelle du Forum de la recherche économique*, Le Caire, Égypte, 21.
- BEN OUEZDOU H., 1998 - Les chotts et le pays des oasis. *Brochure*, 30.
- BENAOUN A., ELBAKKEY M. & FERCHICHI A., 2014 - Change of oases farming systems and their effects on vegetable species diversity: Case of oasian agro-systems of Nefzaoua (South of Tunisia). *Scientia Horticulturae*, 180, (Supplement C), 167-175. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.030>.
- BERRIANE M., 2010 - Patrimoine et patrimonialisation au Maroc. *Hesperis-Tamuda*, XLV, 11-17.
- 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) (Gypseous platforms and spring mounds near 'Ayn al Zarqa (North Syria)). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 77, 10-16.
- BISSON J., 2003 - *Mythes et réalités d'un désert convoité : le Sahara*. Paris, L'Harmattan, 484 p.
- BLOOMFIELD C., 1952 - The Distribution of Iron and Aluminium Oxides in Gley Soils. *Journal of Soil Science*, 3, (2), 167-171. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1952.tb00640.x>.
- BLÜMEL F., 1962 - Formen der Eisenoxydhydrat-Ausscheidungen in Gleyen und Pseudogleyen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 98, (3), 258-264. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.19620980310>.
- BLINN, W. D., RICHARD, H. H., & OWEN, K. D., 1994 - Continuous Holocene Record of Diatom Stratigraphy, Paleohydrology and Anthropogenic Activity in Spring-Mounds in Southwestern United states. *Quaternary Research*, 42, 197-205.

- BONN F. & ESCADAFAL R., 1996 - La télédétection appliquée aux sols. In F. Bonn (ed.), *Précis de télédétection, applications thématiques*. Québec, Canada, 92-136.
- BONN F. & ROCHON G., 1998 - *Preci de la télédétection Principes et méthodes*. Sillery, Québec, Presses Universitaires Quebec, 485 p.
- BOUGEAULT, C., VENNIN, E., DURLET, C., MULLER, E., MERCUZOT, M., CHAVEZ, M., GERARD E., ADER M., VIRGONE, A. And & GAUCHER, E. C. 2019 - Biotic–Abiotic Influences on Modern Ca–Si-Rich Hydrothermal Spring Mounds of the Pastos Grandes Volcanic Caldera (Bolivia). *Minerals*, 9(6), 380.
- BOURKE M.C., CLARK J., MANGA M., NELSON P., WILLIAMS K., FONSECA J. & FOBAR B., 2007 - Sring mounds and channels at Dalhousie central Australia. *Lunar and Planetary Science*, 2.
- BROCHIER-PUIG J., 2004 - Modes d'organisations et modalités d'accès à l'eau dans les périmètres irrigués privés (sur forages illicites) : cas des anciens nomades sédentarisés à El Faouar (Nefzaoua, Tunisie). In M. Picouet, M. Sghaier, D. Genin, A. Abaab, H. Guillaume et M. Elloumi (eds.), *Environnement et sociétés rurales en mutation : approches alternatives*. Paris, 307-321.
- BULLIET R.W. & DESAIVE J.-P., 1981 - Botr et Beranès : hypothèses sur l'histoire des Berbères. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 36, (1), 104-116. DOI : <https://doi.org/10.3406/ahess.1981.282718>.
- BUREAU DES AFFAIRES INDIGÈNES, 1931 - *Historique du bureau des affaires indigènes*. Imp. Victor Berthad, Bourg.
- 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, 412 p.
- CALLOT Y., 2008 - Formations éoliennes. In Y. Dewolf et G. Bourriés (eds.), *Les Formations superficielles*. 293-320.
- CALLOT Y. & OULEHRI T., 1996 - Géodynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien : relation entre aérologie et géomorphologie. *Géodinamica acta, Paris*, 9, (1), 1-12.
- CALOZ R., COLLET C. & BONN F., 2002 - *Précis de télédétection : Traitements numériques d'images de télédétection*. Sillery, Québec, Presses de l'Université du Québec, 386 p.
- CARTON, 1914 - Nybgenii et Nefzaoua. *Revue Tunisienne*, 21, 207-216.
- CHENET F., 2001 - Le paysage fait-il partie du patrimoine ? *Paysage et patrimoine*, 27-28, (105-106), 11-24. DOI : <https://doi.org/10.3406/tigr.2001.1397>.
- CLARKE J., BOURKE M., NELSON P., MANGA M. & FONSECA J., 2007 - The Dalhousie Mound Spring Complex as a Guide to Martian Landforms, Processes, and Exploration. In

*Mars Society Australia Clifton Hill, Proceedings of the 7th Australian Mars Exploration Conference.* Australia, 14.

COQUE R., 1962 - *La Tunisie présaharienne. Etude géomorphologique.* Colin, Paris, 476 p.

COQUE R., 1965 - *Carte géomorphologique de la Tunisie Présaharienne.* Centre de recherches et documentation cartographique et géographiques du C.N.R.S, Paris, Institut de géographie.

CÔTE M., 2012 - *Signatures Sahariennes. Terroirs et territoires vus du ciel.* Presses Universitaires de Provence, 308 p.

CRDA KEBIL, 1998 - *Consultation Nationale sur l'amélioration de la productivité du secteur agricole, gouvernorat de Kébili.* 19 p.

CRÉPY M., 2016 - *Les Paysages du vent : géohistoire et géoarchéologie de la dépression de Kharga (désert Libyque, Égypte) du cinquième siècle avant notre ère à nos jours.* Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon 2, 364 p.

DAHECH S., BELTRANDO G. & HÉNIA L., 2007 - Le sirocco et son impact sur l'agriculture et la qualité de l'air dans la région de Sfax (Tunisie). *Sécheresse*, 18, (3), 177-184.

DAVALLON J., 2014 - À propos des régimes de patrimonialisation : enjeux et questions. In *Patrimonialização e sustentabilidade do Património : reflexão e prospectiva*, Lisbonne, Portugal, 29. [En ligne] : [https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01123906/file/PatriSusPatri\\_Davallon\\_%2027\\_28\\_29%20Novembre%202014.pdf](https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01123906/file/PatriSusPatri_Davallon_%2027_28_29%20Novembre%202014.pdf).

DI MÉO G., 2007 - Processus de patrimonialisation et construction des territoires. In *Patrimoine et industrie en Poitou-Charentes : connaître pour valoriser*, Poitiers-Châtelleraut, France., 87-109. [En ligne] : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00281934>.

DOMERGUE C., DUMON E., DE LAPPARENT A.F. & LOSSEL P., 1952 - Sud et Extrême Sud tunisiens. In *Monographies régionales.* Tunis, 38.

DRAKE N.A., ECKARDT F.D. & WHITE K. H., 2004 - Sources of Sulphur in Gypsiferous Sediments and Crusts and Pathways of Gypsum Redistribution in Southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, (12), 1459-1471. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1133>.

DUBIEF J., 1963 - *Le Climat du Sahara. L'eau atmosphérique au Sahara.* Mem. Hors-série, Inst. Rech. Sahara, 2. Université d'Alger, 275 p.

EL FEKIH M. & POUGET M., 1966 - Les sols des oasis anciennes du Sud tunisien. In *Les Sols Méditerranéens : Conférence.* Les sols méditerranéens., O.R.S.T.O.M, Madride, 12-17.

ELLEFI M., 2014 - Turrus Tamalleni : Essai de Géographie Historique d'une cite du Nefzaoua Antique. In M. Abdellatif (ed.), *Géographie Historique du Maghreb Antique et Médiéval. Etat des lieux et perspectives de recherche, Actes du premier colloque international du Laboratoire de Recherche : Occupation du sol, peuplement et modes de vie dans le Maghreb*

- antique et médiéval*. Université de Sousse Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Sousse, Tunisie, 299-315.
- ESCADAFAL R. & BEGNI G., 2016 - *Surveiller la désertification par télédétection*. Les dossiers thématiques du CSFD. Agropolis International, Montpellier, France., CSFD, 44 p.
- FABRE D., 1997 - Le patrimoine, l'ethnologie, In P. Nora (ed.), *Science et conscience du patrimoine, Actes des entretiens du patrimoine*. Edition du patrimoine, Paris-Fayard, 59-72.
- FAO 2015 - *Status of the World Soil Resources*. Technical summary, FAO Rome. <http://www.fao.org/3/a-i5126e.pdf>
- FONTES, J. C., & POUCHAN, P. 1975 - Concretions of Abbe Lake (Djibouti). Hydroclimatic recorders of Hologene. *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences, série D*, 280(4), 383-386.
- FORKASIEWICZ J., MARGAT J. & PEAUDECERF P., 1976 - *Essais sur les forages artésien jaillissants et sur les sources*. Bureau de Recherche Géologique et Minières, Orléans, 41 p.
- FOURNET A., 1971 - Les gisements à faune villafranchienne de Tunisie. *Notes Service Géologique Tunisie*, 34, 53-69.
- FRANÇOIS H., HIRCZAK M. & SENIL N., 2006 - Territoire et patrimoine : la co-construction d'une dynamique et de ses ressources. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, (5), 683-700.
- FUSILLIER J.-L., AMAMI H.E. & GAL P.-Y.L., 2009 - Stratégies des agriculteurs des oasis du Nefzaoua. In S. Marlet et I. Mekki (eds.), *Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua, Actes de l'atelier Sirma*. Cirad, Montpellier, France, Douz, Tunisie, 9. [En ligne] : <https://hal.archives-ouvertes.fr/cirad-00495751/>.
- GHARBI N., 2010 - Aménagements hydrauliques et amélioration de la gestion de l'eau dans les oasis du sud. In S. Marlet et I. Mekki (eds.), *Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua, Actes de l'atelier Sirma*. Cirad, Montpellier, Douz, Tunisie, 5.
- GHAZOUANI W., MARLET S., MEKKI I. & VIDAL A., 2009 - Déterminants de l'allongement du tour d'eau et de la faible efficacité d'irrigation dans l'oasis de Fatnassa-Nord, Nefzaoua, Tunisie. In *Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua, Actes de l'atelier Sirma*. Cirad Montpellier, Douz, Tunisie, 7. [En ligne] : <https://hal.archives-ouvertes.fr/cirad-00495751/>.
- GIRARD M.-C. & GIRARD C.-M., 2010 - *Traitement des données de télédétection - 2e éd. : Environnement et ressources naturelles*. Dunod, 577 p.
- GONÇALVÈS J., PETERSEN J., DESCHAMPS P., HAMELIN B. & BABA-SY O., 2013 - Quantifying the Modern Recharge of the "Fossil" Sahara Aquifers: Recharge of the Sahara Aquifers. *Geophysical Research Letters*, 40, (11), 2673-2678. DOI : <https://doi.org/10.1002/grl.50478>.

- GRANDGIRARD V., 1997 - Géomorphologie et gestion du patrimoine naturel : la mémoire de la Terre est notre mémoire. *Geographica Helvetica*, 52, (2), 47-56. DOI : <https://doi.org/10.5194/gh-52-47-1997>.
- GUEDDARI M., 1980 - *Géochimie des sels et des saumures du Chott el Jerid (sud tunisien)*. These de doctorat. Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 131 p.
- HACHICHA M., MTIMET A., ZIDI C. & JOB J.-O. (eds.), 1995 - *La salinisation des sols et la gestion des eaux dans les oasis*. Bulletin de la Direction des Sols, 16. [En ligne] : <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010012629>.
- HADJ AMMAR F., CHKIR N., ZOUARI K., HAMELIN B., DESCHAMPS P. & AIGOUN A., 2014 - Hydro-Geochemical Processes in the Complexe Terminal Aquifer of Southern Tunisia: An Integrated Investigation Based on Geochemical and Multivariate Statistical Methods. *Journal of African Earth Sciences*, 100, 81-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.015>.
- HAJ-AMOR Z., HASHEMI H. & BOURI S., 2017 - Soil Salinization and Critical Shallow Groundwater Depth under Saline Irrigation Condition in a Saharan Irrigated Land. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, (14), 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3093-y>.
- HAJ-AMOR Z., IBRAHIMI M.-K., FEKI N., LHOMME J.-P. & BOURI S., 2016 - Soil Salinisation and Irrigation Management of Date Palms in a Saharan Environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, (8), 17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5488-8>.
- HAJ-AMOR Z., TÓTH T., IBRAHIMI M.-K. & BOURI S., 2017 - Effects of excessive irrigation of date palm on soil salinization, shallow groundwater properties, and water use in a Saharan oasis. *Environmental Earth Sciences*, 76, (17), 590. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6935-8>.
- HARRIS C., 1981 - Oases in the desert: the spring of northern south Australia. *In Presidential Address to the Society on 22 October 1981*. Australie, 26-39.
- HIRCHE A., PODWOJEWSKI P., MAHAMANE A., DALILA N., ABDELMADJID B., MOSTEFA S. & RATIBA H., 2017 - Dégénération des terres dans les zones sèches circum-sahariennes. *LIAISON*, (105), 47-53.
- IDOUX M., 1902 - Notes sur le Nefzaoua (Tunisie méridionale). *Annales de Géographie*, 11, 439-447.
- IDRIS H., 1996 - Springs in Egypt. *Environmental Geology*, 99-104.
- INSEE, 1986 - *Les Comptes du patrimoine naturel, collection de l'INSEE, série C, comptes et planifications*. Collection de l'INSEE. Paris, 552 p.
- IUSS WORKING GROUP WRB, 2015 - *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports. FAO, Rom.

- JOUVE P., 2012 - Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité ? *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, (62), 113–122.
- KASSAH A., 1980 - *Emploi et émigration dans le Nefzaoua*. Mémoire de CAR. FLSH, Tunis, 213 p.
- KASSAH A., 1996 - *Les oasis tunisiennes, aménagement hydro agricole et développement en zone aride*. Série géographique, 13. Tunis, Cahier du C.E.R.E.S, 346 p.
- KASSAH A., 2002 - Irrigation et développement agricole dans le Sud tunisien. *Méditerranée*, 99, (3), 21-26. DOI: <https://doi.org/10.3406/medit.2002.3255>.
- KEARNEY, 1910 - *Bulletin de Direction de l'Agriculture du Commerce et de la Colonisation Tunis*.
- KENNOU SEBEI S., BERGAOUI R., HAMOUDA M.B. & COOPER R.G., 2009 - Wild Ostrich (*Struthio Camelus Australis*) Reproduction in Orbata, a Nature Reserve in Tunisia. *Tropical Animal Health and Production*, 41, (7), 1427-1438. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-009-9331-x>.
- KEPPEL M.N., POST V.E.A., LOVE A.J., CLARKE J.D.A. & WERNER A.D., 2012 - Influences on the carbonate hydrochemistry of mound spring environments, Lake Eyre South region, South Australia. *Chemical Geology*, 296-297, 50-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.12.017>.
- KHATTELI H., 1981 - *Recherches stationnelles sur la désertification dans la Djeffara, Tunisie. Dynamique de l'érosion éolienne*. Thèse 3ème cycle. Université Paris I, 218 p.
- KHATTELI H., 1996 - *Erosion éolienne en Tunisie aride et désertique : Analyse des processus et recherches des moyen de lutte*. Thèse de doctorat. Université Gent-Belgique, 198 p.
- KING C. & THOMAS D.S., 2014 - Monitoring environmental change and degradation in the irrigated oases of the Northern Sahara. *Journal of Arid Environments*, (103), 36-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.12.009>.
- KRAIEM Z., CHKIR N., ZOUARI K., PARISOT J.-C., AIGOUN A. & HERMITTE D., 2012 - Tomographic, hydrochemical and isotopic investigations of the salinization processes in the oasis shallow aquifers, Nefzaoua region, southwestern Tunisia. *Journal of Earth System Science*, 121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0221-7>.
- KRAIEM Z., ZOUARI K., CHKIR N. & AGOUNE A., 2014 - Geochemical Characteristics of Arid Shallow Aquifers in Chott Djerid, South-Western Tunisia. *Journal of Hydro-environment Research*, 8, (4), 460-473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.06.002>.
- LAROUSSE É., 2020 - Définitions : patrimoine - Dictionnaire de français Larousse. [En ligne] : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/patrimoine/58700>, consulté le 14 septembre 2020.

- LASRAM M., 1990 - Les systèmes agricoles oasiens dans le Sud de la Tunisie. *Options Méditerranéennes*, série A, (11), 21-27.
- LAVIEILLE J.-M., 2003 - Les paysages et la Convention du patrimoine mondial. *Revue Européenne de Droit de l'Environnement*, 7, (3), 265-277. DOI : <https://doi.org/10.3406/reden.2003.1612>.
- LE BRUSQU J.Y. & LOYER J.Y., 1982 - Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 19, (3), 293-301.
- LE HOUEROU H.N., 1959 - *Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie Méridionale*. Mémoire de l'Institut de recherches sahariennes. Université d'Alger, 283+232 p.
- LIMONDIN-LOZOUET N., DABKOWSKI J., ANTOINE P., BAHAIN J.J., CARBONEL P. & GHALEB B., 2012 - Les formations de tuf de Condat-sur-Vézère et de la vallée du Coly. In *Quaternaire Continental d'Aquitaine, excursion AFEQ - ASF 2012.*, 98-121.
- MAINGUET M., DUMAY F., OULD EL HACEN M.L. & MAEFOUDH A., 2001 - Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne. *Télédétection*, 2, (2), 129-136.
- MAINGUET M. & JACQUEMINET C., 1984 - Le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental. Classification des dunes, balance sédimentaire et dynamique d'ensemble. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 59, (1), 29-48. DOI : <https://doi.org/10.3406/tigr.1984.1151>.
- MAMOU A., 1976 - *Contribution à l'Etude Hydrogéologique de la Presqu'île de Kebili*. Thèse 3ème cycle. Pierre et Marie Curie, Paris, 107 p.
- MAMOU A., 1978 - *Le tarissement des sources artésiennes dans le Sud Tunisien et son effet sur l'augmentation de la salinité de l'eau*. DRE, Gabès, Tunisie, 22 p.
- MAMOU A., 1990 - *Caractéristiques, évaluation et gestion des ressources en eau du sud-tunisien*. Thèse de doctorat. Paris 11. [En ligne]: <http://www.theses.fr/1990PA112380>.
- MAMOU A., 1995 - Incidence de l'exploitation des nappes du sud tunisien, dans les oasis, sur la qualité chimique de leurs eaux. *Sols de Tunisie*, (15), 12-25.
- MAMOU A., 2010 - Ressources en eau du sud tunisien et développement agricole. In S. Marlet et I. Mekki (eds.), *Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua, Actes de l'atelier Sirma*. Cirad, Montpellier, France, Douz, Tunisie, 4.
- MAMOU A. & KASSAH A., 2002 - *Eau et développement dans le sud tunisien*. Série: *Géographie*, Cahiers du CERES. Tunis, 286 p.

- MARLET S., BOUKSILA F. & BAHRI A., 2009 - Water and Salt Balance at Irrigation Scheme Scale: A Comprehensive Approach for Salinity Assessment in a Saharan Oasis. *Agricultural Water Management*, 96, (9), 1311-1322. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.016>.
- MARTINI G., 1994 - Bilan général de la protection du patrimoine géologique en France. *Mem. Soc. géol. France, N. S.*, (165), 111-118.
- McCARTHY, T. S., ELLERY, W. N., BACKWELL, L., MARREN, P., De KLERK, B., TOOTH, S., BRANDT, D., & WOODBORNE, S. 2010 - The character, origin and palaeoenvironmental significance of the Wonderkrater spring mound, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 58(1), 115-126.
- MEKKI I., MARLET S., GHAZOUANI W., LOUIS F. JEAN-, AMMAMI H. & LE GAL P.-Y., 2009 - L'oasis de Fatnassa Nord sous contraintes environnementale, socioéconomique et d'organisation de la filière dattes : éléments de diagnostic de son fonctionnement. In *Conférence : Sociétés en transition et développement local en zones difficiles (DELZOD)*, 183-193.
- MICOUD A., 1995 - Le bien commun des patrimoines. In *Patrimoine culturel, patrimoine naturel*, Ecole nationale du patrimoine/ la Documentation française, Paris, 25-38.
- MILIAN J., 2001 - Le projet Natura 2000 et la protection du patrimoine naturel : L'exemple des sites expérimentaux pyrénéens. *Études rurales*, (157-158), 173-194. DOI : <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.35>.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2016 - *Monographie des oasis traditionnelles du gouvernorat de Kébili*. Projet : Gestion durable des Ecosystèmes Oasiens Renforcement des capacités pour la gestion durable des écosystèmes oasiens. CDCGE, Tunisie, 614 p.
- MONTOROI J.-P., 2018 - Sel pédologique : une menace pour les sols agricoles. *Géosciences*, (22), 42-51.
- MOREAU P., 1947 - *Des lacs de sel aux chaos de sable. Le pays des Nefzaouas*. Institut des Belles Lettres Arabes, Tunis, impr. Bascone et Muscat, 206 p.
- NEAL, J. T., & MOTTS, W. S. 1967.- Recent geomorphic changes in playas of western United States. *The Journal of Geology*, 75(5), 511-525.
- NIFTAH S., DEBÉNATH A. & MISKOVSKY J.-C., 2005 - Origine du remplissage sédimentaire des grottes de Témara (Maroc) d'après l'étude des minéraux lourds et l'étude exoscopique des grains de quartz. *Quaternaire*, (vol. 16/2), 73-83. DOI : <https://doi.org/10.4000/quaternaire.295>.
- ONTT, 2007 - *Le tourisme tunisien en chiffres*. Organisation Nationale du Tourisme Tunisien. Tunis, 49 p.

- ORI G.G., KOMATSU G. & MARINANGELI L., 2001 - Exploring Mars Surface and its Terrestrial Analogues. *In Field Trip Guidebook, Chott el Gharsa and Chott el Jerid*. Alenia Spazio, 91.
- OSS, 2003 - *Système aquifère du Sahara septentrional : gestion commune d'un bassin transfrontière*. Hydrogéologie. Tunis, Observatoire du Sahara et du Sahel, 130 p.
- OULEHRI T., 1992 - *Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la province de Laayoune*. Thèse de doctorat. Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris 6), 223 p.
- PANIZZA M., 2001 - Geomorphosites: concepts, methods and exemple of geomorphological survey. *Chinese Science Bulletin*, Suppl. Bd, (46), 4-6.
- PANSU M., GAUTHEYROU J. & LOYER J.-Y., 1998 - *L'analyse du sol : échantillonnage, instrumentation et contrôle*. Masson, Paris, 497 p. [En ligne] : <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010012515>.
- PÉZARD, 1908 - Recherches préhistoriques dans la Région Nord du Grand Erg Tunisien. *Bulletin de la Société préhistorique de France*, 5, (6), 273-277. DOI : <https://doi.org/10.3406/bspf.1908.11634>.
- PICOUËT M., SGHAIER M. & ZAAFOURI M.S., 1998 - Relation Population environnement En Tunisie Désertique. *Espace, populations, sociétés*, 16, (1), 53-65. DOI: <https://doi.org/10.3406/espos.1998.1822>.
- PONDER W.F., 1986 - Mound Springs of the Great Artesian Basin. *In P. De Deckker et W. D. Williams (eds.), Limnology in Australia*. Monographiae Biologicae. Springer Netherlands, Dordrecht, 403-420. DOI : [https://doi.org/10.1007/978-94-009-4820-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4820-4_25).
- PONTANIER R., 1968 - *Etude pédologique du périmètre du Nefzaoua*. Direction HER, service pédologique, Tunis, 85 p.
- PONTANIER R., 2004 - Les bio-indicateurs du fonctionnement et du changement du milieu rural. *In M. Picouet, M. Sghaier, D. Genin, A. Abaab, H. Guillaume et M. Elloumi (eds.), Environnement et sociétés rurales en mutation*. IRD Éditions, 101-117. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.1116>.
- PONTANIER R., M'HIRI A., AKRIMI N., ARONSON J., LE FLOC'H E. & KALLALA A., 1995 - L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait? *In Science et Changements Planétaires/Sécheresse, Congrès International sur la Restauration des Terres Dégradées, des Zones Arides et Semi-Arides, Tunis (TUN), 1994/11/14-19*. Colloques et Congrès : Science et Changements Planétaires/Sécheresse., J. Libbey Eurotext, Montrouge, 481. [En ligne]: <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010004774>.
- POUGET M., 1968 - Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux dans le Sud-tunisien. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*, 6, (3-4), 309-365.

- POWELL, O., & FENSHAM, R. 2016. - The history and fate of the Nubian Sandstone Aquifer springs in the oasis depressions of the Western Desert, Egypt. *Hydrogeology journal*, 24(2), 395-406.
- POWELL, O., SILCOCK, J., & FENSHAM, R. 2015 - Oases to oblivion: The rapid demise of springs in the south-eastern Great Artesian Basin, Australia. *Groundwater*, 53(1), 171-178. DOI : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.834.3475&rep=rep1&type=pdf>
- PRINCE S., VON MALTITZ G. & ZHANG F., 2018 - *Status and Trends of Land Degradation and Restoration and Associated Changes in Biodiversity and Ecosystem Functions*. IPBES, Bonn, 315-495 p. [En ligne] : <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010075051>.
- PROVENCHER L. & DUBOIS J.-M.M., 2007 - *Précis de télédétection, volume 4 : Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image*. Presses de l'Université du Québec, Sillery, Québec, 540 p.
- RADDADI A., FEHRI N. & GAMMAR A.M., 2015 - Relation entre le régime des vents et le modelé des champs dunaire dans la région de Tataouine (Tunisie du Sud). In *Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides africaines : processus physiques, métrologie et techniques de lutte*, 36. *Actes du colloque international*. Revue des Régions Arides, 95-105.
- RAUTENBERG M., 2003 - *La rupture patrimoniale*. Bernin, A la croisée, 173 p.
- REYNARD E. & PANIZZA M., 2005 - Géomorphosites : définition, évaluation et cartographie. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 11, (3), 5. DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.336>.
- RHOUMA A., 1993 - Le Palmier Dattier En Tunisie : Un Secteur En Pleine Expansion. In M. Ferry et D. Greiner (eds.), *Le palmier dattier dans l'agriculture d'oasis des pays méditerranéens, Journées Internationales d'Elche sur le Palmier Dattier dans L'Agriculture d'Oasis des Pays Méditerranéens 25-27 Apr 1995, Elche (Spain)*. *Options Méditerranéennes*. Série A. Séminaires Méditerranéens., CIHEAM, Zaragoza, 85-104.
- ROBERTS C.R. & MITCHELL C.W., 1987 - Spring Mounds in Southern Tunisia. *Geological Society, London, Special Publications*, 35, (1), 321-334. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.035.01.22>.
- ROUATBI R., 1967 - *Contribution à l'étude hydrogéologique du Karst en terre de Gabès Sud*. Thèse 3ème cycle. Univ. Montpellier, France.
- SAHNOUN H., JOB J.-O., ZIDI C. & MTIMET A., 1995 - Paysages oasiens et réhabilitation des oasis de la Nefzaoua (Tunisie). In R. Pontanier, A. M'Hiri, N. Akrimi, J. Aronson et E. LeFloc'h (eds.), *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ? Congrès International sur la Restauration des Terres Dégradées, des Zones Arides et Semi-Arides, 1994/11/14-19, Tunis*. John Libbey Eurotext, Paris, 325-335. [En ligne] : [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers10-09/010004784.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-09/010004784.pdf).

- SARFATTI P., 1988 - Il clima del governatorato di Kebili in Tunisia. *Rivista di Agricoltura Subtropicale e Tropicale*, 62, (1-2), 23-35.
- SCHOELLER H., 1962 - *Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique*. Masson, Paris, 642 p.
- SEREPT, 1951 - *Stratigraphie du Crétacé moyen et supérieur de la région des Chotts*. SEREPT, Tunis, 61 p.
- SGHAIER M., 1999 - *Les Oasis de la Région de Nefzaoua. Projet IMAROM*, IRA, Médenine, Tunisie, 37 p.
- SHAO Y., 2008 - *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Springer Science et Business Media, 459 p.
- SKOUNTI A., 2010 - De la patrimonialisation. Comment et quand les choses deviennent-elles des patrimoines ? *Hesperis-Tamuda*, XLV, 19-34.
- SOUISSI M., 2011 - Le tourisme de circuit dans le Sahara tunisien : réalités et perspectives. *Insaniyat / □□□□□□□□*. *Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales*, (51-52), 271-287. DOI : <https://doi.org/10.4000/insaniyat.12811>.
- STIVALETTA N., & BARBIERI R., 2009 - Endolithic microorganisms from spring mound evaporite deposits (southern Tunisia). *Journal of arid environments*, 73(1), 33-39.
- TISSOT C.J., 1884 - *Exploration scientifique de la Tunisie : Géographie comparée de la province romaine d'Afrique*. Impr. nationale, 697 p.
- TORAB M., 2013 - Geomorphology of Fossil Spring Mounds near El Gedida Village, Dakhla Oasis, Western Desert of Egypt. *In 16th International Congress of Speleology*, Czech Republic Brno, 5.
- TOUTAIN J., 1895 - Notes sur quelques voies romaines de l'Afrique proconsulaire. *Mélanges d'archéologie et d'histoire*, 15, (1), 201-229. DOI : <https://doi.org/10.3406/mefr.1895.6136>.
- TROUSSET P., 1974 - *Recherches sur le limes tripolitanus du chott El-Djerid à la frontière tuniso-libyenne*. Études d'antiquités africaines. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 178 p. DOI : <https://doi.org/10.3406/etaf.1974.949>.
- TROUSSET P., 1978 - Les bornes du Bled Segui. Nouveaux aperçus sur la centuriation romaine du Sud tunisien. *Antiquités africaines*, 12, (1), 125-177. DOI : <https://doi.org/10.3406/antaf.1978.1003>.
- TROUSSET P., 1986 - De la montagne au désert. Limes et maîtrise de l'eau. *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, 41, (1), 90-115. DOI : <https://doi.org/10.3406/remmm.1986.2111>.

- TROUSSET P., 1986 - Les oasis présahariennes dans l'Antiquité : partage de l'eau et division du temps. *Antiquités africaines*, 22, (1), 163-193. DOI : <https://doi.org/10.3406/antaf.1986.1130>.
- UNCCD, 1994 - About the convention to combat desertification. United Nation convention to combat desertification. [En ligne] : <https://www.unccd.int/convention/about-convention>, consulté le 15 septembre 2020.
- UNESCO, 2012 - *Gerer le Patrimoine Naturel Mondial*. UNESCO, Paris, 104 p.
- UNESCO, 2017 - *Orientations devant guider la mise en oeuvre de la Convention du patrimoine mondial*. Comité Intergouvernemental pour la Protection du Patrimoine Mondial, Culturel et Naturel, Paris, 183 p.
- VALENTIN C. & BRESSON L.M., 1992 - Morphology, genesis and classification of soil crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, (55), 225-245.
- VENARD C., 2012 - *Approche à très haute résolution de la morphodynamique éolienne des régions sèches. Télédétection et cartographie analytique*. Thèse de doctorat. Université Lyon 2, 309 p.
- VIEILLEFON J., 1979 - Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, XVII, (3), 195-223.
- VIZIER J.F., 1971 - Etude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 9, (4), 373-397.
- VIZIER J.F., 1992 - Éléments pour l'établissement d'un référentiel pour les solums hydromorphes. *INRA, Paris*, 193-207.
- WALKLEY A., 1947 - A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil science*, 4, (63), 251-264.
- WATSON A., 1983 - *The origin, nature and distribution of gypsum crusts in deserts*. Doctoral dissertation. University of Oxford, 294-669 p. [En ligne]: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:265247f4-f85f-4920-925e-c82afcb9f674/>.
- WATSON A., 1985.- Structure, chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. *Sedimentology*, 32(6), 855-875. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)31002-4](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)31002-4)
- WATSON A., 1988. - Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators: a micropetrographic study of crusts from southern Tunisia and the central Namib Desert. *Journal of Arid Environments*, 15(1), 19-42. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1985.tb00737.x>

WATTS S.H., 1975 - Mound Springs. *Australian Geographer*, 13, (1), 52-53. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049187508702678>.

ZAMMOURI M., SIEGFRIED T., EL-FAHEM T., KRIÂA S. & KINZELBACH W., 2007 - Salinization of Groundwater in the Nefzawa Oases Region, Tunisia: Results of a Regional-Scale Hydrogeologic Approach. *Hydrogeology Journal*, 15, (7), 1357-1375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0185-x>.

ZINK M., BACHMANN M., BRAUTIGAM B., FRITZ T., HAJNSEK I., MOREIRA A., WESSEL B. & KRIEGER G., 2014 - TanDEM-X: The New Global DEM Takes Shape. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2, (2), 8-23. DOI: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2014.2318895>.

# Liste des figures

Figure 1 : carte de situation : A : la Tunisie avec ses limites climatiques approximatives de la Tunisie présaharienne (d'après le Houerou 1959) B : Croquis du Nefzaoua (Gouvernorat de Kebili) et ses environs montrant sa position à la convergence de 4 ensembles géomorphologiques distincts C : Agrandissement en image satellite Google Earth du Nefzaoua situ dans le Sud tunisien.....	11
Figure 1.1 : Le gouvernorat de Kébili avec localisation de la zone d'étude : Altitude d'après SRTM 30 m.....	21
Figure 1.2 : Extrait Google Earth de la zone d'étude : en vert sombre les oasis .....	22
Figure 1.3 : Extrait de la carte géologique 1/500 000 du Service Géologique de Tunisie, 1985. ....	23
Figure 1.4 : Coupe géologique de Seftimi à Djemna (Mamou, 1976). ....	26
Figure 1.5 : Coupe hydrogéologique des aquifères du Continental Terminal, (Hadj Ammar, 2014 modifié). ....	27
Figure 1.6 : Extrait de la carte géomorphologique de la Tunisie Présaharienne, (Coque, 1965, modifié).....	30
Figure 1.7 : Extrait de la carte pluviométrique (Dubief, 1963).....	31
Figure 1.8 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (1999 et 2000 manquants).....	33
Figure 1.9 : Précipitations annuelles observées entre 1996 et 2016 (certaines années sont manquantes). ....	33
Figure 1.10 : Rose des vents de la Station de Kebili 2001-2010 (Raddadi, 2014) .....	35
Figure 1.11 : Rose moyenne annuelle des déplacements potentiels sableux à Kebili de 2001 à 2010. ....	36
Figure 1.12 : Roses mensuelles des déplacements potentiels sableux à Kébili 2001-2010.....	38
Figure 1.13 : Nombre moyen mensuel de jours de vent saharien (2013 à 2015).....	40
Figure 1.14 : barkhane à l'Est de l'oasis de Jemna (extrait de Google Earth le 25-03-2019). ....	43
Figure 1.15 : Nebkas et Rebdou (extrait de Callot, 2008). ....	43
Figure 1.16 : Accroissement de la population du Nefzaoua depuis 1881. Sources (1) Kassah, 1980, p. 33., (2) Moreau 1947., (3) Kearney, 1910., (4) Bureau des affaires indigènes, 1931, p. 16, (5) I.N.S 66-75-84- 94-2004, 2014 ; (6) ODS, 1999. ....	49
Figure 2.1 : Schéma de synthèse d'un cycle de vie d'un tertre de sources artésienne .....	54
Figure 2.2 : Morphologie d'un tertre de source artésienne du Nefzaoua (d'après Pontanier, 1968, modifié). ....	55
Figure 2.3 : Eclats de silex taillés collectés en surface des tertres du Nefzaoua, photo A. Raddadi. ....	56
Figure 2.4 : Schéma explicatif d'une dune afreg d'après Callot (à paraître). ....	62
Figure 2.5 : Technique de palissade pour la protection contre l'ensablement dans la région de Zarzine, au sud-ouest de Kébili.....	63

Figure 2.6 : Technique de quadrillage pour la protection contre l'ensablement dans la région de Zarzine, au sud-ouest de Kébili. ....	63
Figure 3.1: plan de vol de la série de photographies aériennes prises sur la région de Douz le 24 février 1950 (en rouge, les limites de la zone « Douz-El Golaa » retenue pour l'étude diachronique). Source : Service historique du ministère de la Défense à Paris. ....	78
Figure 3.2 :plan de vol de la série de photographies aériennes prises sur la région de Douz le 24 février 1950. Source : service historique du ministère de la Défense à Paris. ....	79
Figure 3.3 : plan de vol de la série de photographies aériennes prises sur la région de Douz en 1967. Source Centre National de la Cartographie et de la Télédétection de Tunisie. ....	80
Figure 3.4 : extrait de la carte topographique feuille de Douz au 1/100 000e de 1904: source service géographique de l'armée. (La légende complète avec les signes conventionnels est présentée en Annexe). ....	81
Figure 3.5 : Oasis de Douz et d'El Golâa : mosaïque de photographie aérienne de 1950. ....	83
Figure 3.6 : Oasis de Douz et d'El Golâa : mosaïque photographies aériennes de 1967. ....	85
Figure 3.7 : Oasis de Douz et d'El Golâa : image GoogleEarth de 2019. ....	86
Figure 3.8 : Extrait de la mosaïque des cartes topographiques du début du 20 <sup>ème</sup> siècle, assemblées et géoréférencées (le rectangle rouge délimite la zone représentée sur la figure suivante). ....	88
Figure 3.9 : Extrait de la carte topographique au 1/100 000e (zoom sur la figure précédente, feuille de Douz, 1904) : les nombreuses sources sont figurées avec la direction de leur exutoire. ....	89
Figure 3.10 : Carte des tertres et sources artésiens du Nefzaoua au début du 20 <sup>ème</sup> siècle. ....	90
Figure 3.11 : Composition colorée en fausses couleurs sur la région d'étude (Image Sentinel2 du 04/05/2017 résolution 10 m, et nom des agglomérations d'après la carte topographique)..	92
Figure 3.12 : Carte de vestiges de tertres et de sources (Google Earth 2019). ....	94
Figure 3.13 : Exemples d'images obtenues par 'Time Machine' de Google Engine Tour Editor sur la zone d'étude. A : 1984 ; B : 1994 ; C : 2004 ; D : 2014 ; E : 2018. ....	98
Figure 3.14 : Le tertre Derguich1 le 25-09-2010 (extrait de Google Earth). ....	100
Figure 3.15 : Le tertre Derguich1 le 19-01-2013 (extrait de Google Earth). ....	100
Figure 3.16 : Le tertre Derguich1 le 14-11-2013 (extrait de Google Earth). ....	101
Figure 3.17 : Trt 44 Derguich 1 dans l'oasis de Blidet prise de vue mai 2015. ....	101
Figure 3.18 : Le tertre Derguich1 le 11-02-2016 (extrait de Google Earth). ....	102
Figure 3.19 : Le tertre Derguich1 le 08-11-2018 (extrait de Google Earth). ....	103
Figure 3.20. Comparaison à plus de 40 ans d'écart avec 3 images (en 'fausses couleurs'). ...	105
Figure 3.21 : indice de végétation (NDVI) calculé pour les images des trois dates utilisées. ....	107
Figure 3.22 : Schéma explicatif de la composition colorée du NDVI des trois dates (1973, 1998, 2017). ....	108
Figure 3.23 : Composition colorée combinant les valeurs de NDVI aux trois dates sélectionnées :1973 en bleu, 1998 en vert, 2017 en rouge (voir la figure 3.22 pour l'interprétation). ....	110
Figure 3.24 : Evolution des superficies irriguées estimées à partir des 3 images NDVI (ha). ....	112
Figure 3.25 : Topographie de la région de Nefzaoua selon le modèle numérique SRTM (NASA, résolution 30m). À droite un extrait zoomé. ....	114

Figure 3.26 : Topographie de la région de Nefzaoua selon le modèle numérique TandemX (DLR, résolution 10 m). À droite un extrait zoomé. ....	115
Figure 3.27 : Les principales formes de tertres reconnaissables sur l'extrait de l'image TandemX.....	116
Figure 3.28 : Agrandissement du modèle numérique TandemX avec effet ombrage.....	117
Figure 3.29 : extraite de Google Earth montrant la méthodologie de mesure du diamètre d'un tertre dégagé (Trt59).....	119
Figure 3.30 : Elévation (m) le long d'un transect traversant les tertres Trt77 et 78 (données TandemX, résolution horizontale 10m, et verticale 1m). ....	120
Figure 3.31 : exemple de tertres très proches (Trt65, 66, 67 et 68) dont le diamètre est difficile à mesurer sur Google Earth.....	120
Figure 3.32 : MNT Tandem-X : transect sur la zone de l'exemple de la figure précédente. .	121
Figure 3.33 : Synthèse sur l'évolution de la région de Nefzaoua combinant l'image multi date et le modèle numérique de terrain TandemX sans effet d'ombrage.....	122
Figure 3.34 : Aggrandissement d'une partie de la figure précédente avec effet d'ombrage. .	123
Figure 4.1 : Localisation des tertres où ont été réalisés les descriptions et prélèvements des coupes ainsi que les sondages à la tarière. MNT TandemX 10 m. ....	128
Figure 4.2 : Echantillons collés sur un portoir a avec du nitrate d'argent. ....	132
Figure 4.3 : Emplacement des coupes A, B et C au sein du tertre 36 Ain Chardiouss (extrait Google Earth, date de prise de vue le 08/11/2018). ....	133
Figure 4.4 : Vue d'ensemble du front de la coupe à travers le tertre Trt 36 : prélèvement du niveau supérieur (III) mieux conservé à gauche, en utilisant une nacelle. A droite prélèvement des niveaux moyen (II) et inférieur (I), plus accessibles, en utilisant une simple échelle.....	134
Figure 4.5 : vue d'ensemble de la coupe A.....	135
Figure 4.6 : log synthétique de la Coupe A. ....	136
Figure 4.7 : Limite entre les deux sous ensembles du niveau II. Le cercle indique la zone de prélèvement de l'échantillon Trt 36 A-25 pour l'analyse microscopique de l'organisation des matériaux. Ce niveau a un contact brutal rectiligne avec l'ensemble sus-jacent. ....	138
Figure 4.8 : Détail de l'échantillon Trt 36A-25 (voir cercle figure précédente). Taches d'oxyde de fer (orange-rouille) associées à des taches noires d'oxyde de manganèse. ....	138
Figure 4.9 : Vue d'ensemble de la photographie au MEB de l'échantillon Trt 36 A-25 (fraction noire).....	139
Figure 4.10 : A échantillon Trt36 A-25 (revêtement noir sur un grain de quartz avec des marques de dissolution triangulaires) ; B Zoom sur un revêtement : cristaux lamellaires de MnO <sub>2</sub> . ....	140
Figure 4.11 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36A-25 (fraction noire). 141	
Figure 4.12 : Observation au MEB des revêtements d'oxyde de fer sur l'échantillon Trt36 A-25 (fraction rouge) ; B détail de l'image A.....	142
Figure 4.13 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36A-25 (fraction rouge).	
143	
Figure 4.14 : Détails du niveau intermédiaire II : II B inf. ....	144
Figure 4.15 : Détails du niveau supérieur II B. Remarquer les concentrations de carbonates blancs allongés dans le sens des strates. ....	145

Figure 4.16 : Vue d'ensemble de la coupe avec les détails du niveau supérieur III. La flèche souligne les traces d'une fondation. ....	146
Figure 4.17 : Photographie de la coupe B (vue d'ensemble avant rafraîchissement et prélèvement).....	148
Figure 4.18 : Log synthétique de la Coupe B. ....	149
Figure 4.19 : X détail de l'échantillon B1 photo terrain, Y photographie au MEB de l'échantillon B1 vue d'ensemble.....	150
Figure 4.20 : La Coupe C Trt 36 photo du sol. ....	152
Figure 4.21 : Log synthétique de la Coupe C. ....	153
Figure 4.22 : Vue détail de l'échantillon Trt 36C. ....	154
Figure 4.23 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt 36C. ....	155
Figure 4.24 : Vue d'ensemble de l'échantillon Trt 36C2B.....	155
Figure 4.25 : Détail de l'échantillon Trt 36C2B. ....	156
Figure 4.26 : Vue d'ensemble de l'échantillon Trt36C2C.....	156
Figure 4.27 : Détail de la vue d'ensemble Trt36C2C.....	157
Figure 4.28 : Spectre obtenu à la sonde MEB sur l'échantillon Trt36C2C. ....	157
Figure 4.29 : Emplacement des coupes D et du sondage à la tarière 3 au sein du tertre 9 à Ain Ouled Aïssa (extrait Google Earth date de prise de vue 08/11/2018). ....	161
Figure 4.30 : Image d'ensemble de la coupe D du tertre 9 Ain Ouled Aïssa. ....	162
Figure 4.31 : Log synthétique de la Coupe D. ....	163
Figure 4.32 : Détail des strates D1 et D2 du niveau inférieur. Figure 0.67	
Figure 4.33 : Détail de la strate D3 du niveau inférieur. ....	165
Figure 4.34 : Coupe D : vue d'ensemble du niveau intermédiaire II. La limite D5-D6 est détaillée figure 4.36.....	166
Figure 4.35 : Vue détaillée du niveau IIA (strates D4 et D5). ....	167
Figure 4.36 : Détail de la limite entre l'ensemble A et B du niveau II (limite D5-D6 de la figure 4.34) soulignée par un niveau argileux présentant des traces de microfissuration du retrait des argiles gonflantes lors du séchage.....	168
Figure 4.37 : Diffractogramme DRX de la fraction argileuse (<math>< 2 \mu\text{m}</math>) d'un agrégat argileux de la base du niveau D6 (Figure 4.36). ....	169
Figure 4.38 : Photographie au MEB de l'échantillon Trt 9 E9A correspondant à l'échantillon D9 : argile fibreuse. ....	170
Figure 4.39 : Spectre de l'échantillon D9 : présence d'argile fibreuse avec un peu de fer. ..	171
Figure 4.40 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons objet de datation au radiocarbone.....	174
Figure 4.41 : Emplacements du prélèvement des échantillons ECH 1et 2 pour la datation au radiocarbone.....	175
Figure 4.42 : Détermination de l'âge d'un fragment de charbon de la strate A 12 (coupe A) (pic rouge) en fonction de la date mesurée (en noir) et de la courbe de calibration (en bleu). Source : accélérateur ARTEMIS de Saclay (UMS 2572, Laboratoire mesure du carbone 14 (LMC14)).....	176
Figure 4.43 : Détermination de l'âge d'un fragment de charbon de la strate A 12 (coupe A) (pic rouge) en fonction de la date mesurée (en noir) et de la courbe de calibration (en bleu).	

Source : accélérateur ARTEMIS de Saclay (UMS 2572, Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14)).....	177
Figure 4.44 : Vu panoramique sur le tertre Trt 37 Aïn Ben Zitoune.....	177
Figure 4.45 : Emplacements du prélèvement de l'échantillon ECH4 et 5 pour la datation au radiocarbone.....	178
Figure 4.46 : Vue d'ensemble du tertre Trt 30 El Alouia : extrait Google Earth du 15/03/2019.	
179	
Figure 4.47 : Emplacement du prélèvement des échantillons ECH6, 7 et 8 pour datation au radiocarbone.....	180
Figure 4.48 : Vue d'ensemble du tertre Trt 17 Guettaïa Bled : image Google Earth du 08/11/2018. ....	181
Figure 4.49 : Emplacements du prélèvement de l'échantillon ECH10 pour datation au radiocarbone.....	181
Figure 4.50 : Vue d'ensemble du tertre Trt 30 El Alouia : image Google Earth du 08/11/2018.	
182	
Figure 4.51 : Emplacement du prélèvement de l'échantillon ECH9 pour datation radiocarbone.....	183
Figure 5.1 : Étapes de l'intervention anthropique depuis l'abaissement de la nappe artésienne dans le Nefzaoua .....	198
Figure 5.2 : Carte de localisation des tertres avec leurs codes : les tertres utilisé comme exemple pour la typologie sont indiqués sur la carte par la couleur mauve. ....	201
Figure 5.3 : Le tertre de Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) et le Trt 93 le 07-11-2012 (extrait de Google Earth) avec agrandissement de la vasque de Trt 92. ....	202
Figure 5.4 : Le tertre de Tarfaïet el Kraoub Trt 92 et le Trt 93 le 04-05-2019 (extrait de Google Earth).....	203
Figure 5.5 : Ruines de maisons du tertre Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) au SWde Douz : Prise de vue d'octobre 2019. ....	204
Figure 5.6 : photographie panoramique des plantations en cours du tertre Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) : Prise de vue octobre 2019.....	204
Figure 5.7 : photographie du tertre Trt 93 avec un panneau en Arabe : « Terres privées, strictement interdit de prélever le sable, Merci ». Prise de vue octobre 2019 .....	205
Figure 5.8 : Photographie Vue d'ensemble du Trt 93 avec la vasque remplie d'eau. Prise de vue octobre 2019. ....	206
Figure 5.9 : Photographie de l'emplacement du forage dans la vasque (griffon de la source naturelle) du Trt 93. Prise de vue octobre 2019. ....	206
Figure 5.10 : Extrait d'une photographie aérienne de 1950 du Trt 98 Selamia. ....	207
Figure 5.11 : Extrait d'une photographie aérienne de 1959 du Trt 98 Selamia. ....	207
Figure 5.12 : Extrait d'une photographie aérienne de 1967 du Trt 98 Selamia. ....	208
Figure 5.13 : Le tertre de Selamia le 07-11-2012 (extrait de Google Earth).....	208
Figure 5.14 : Le tertre de Selamia le 07-04-2019 (extrait de Google Earth).....	209
Figure 5.15 : Photographie panoramique de la vasque du Trt 98 : Prise de vue : octobre 2019.	
210	
Figure 5.16 : Le tertre de Zerhbia avec agrandissement sur sa partie sommitale (extrait de Google Earth le 25-09-2010). Le nord est en bas. ....	210

Figure 5.17 : Le tertre de Zerhbia avec agrandissement de partie centrale (extrait de Google Earth le 04-05-2019). Le nord est en bas.....	211
Figure 5.18 : Photographie panoramique du tertre de Zerhia : une marée de dunes submerge le tertre jusqu'au sommet. Prise de vue octobre 2019. ....	212
Figure 5.19 : Vasque du tertre Trt 114 avec deux palmiers encore debout (image Google Earth du 19-01-2013).....	213
Figure 5.20 : Photographie de la vasque du Trt 114 avec des troncs de palmiers couchés. Prise de vue novembre 2016.....	214
Figure 5.21 : Vasque du tertre Trt 114 ensablé (image Google Earth du 28-02-2019).....	214
Figure 5.22 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 07-11-2012).....	215
Figure 5.23 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 24-02-2016).....	216
Figure 5.24 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Trt 94 (extrait de Google Earth le 07-04-2019).....	216
Figure 5.25 : Photographie de la source du tertre de Rass el Aïoun Kebili (Trt 24) (Moreau 1947).....	217
Figure 5.26 : Photographie de la source du tertre Trt 24 Rass el Aïoun Kebili aménagée en fontaine au centre d'un jardin public : Prise de vue mai 2018.....	218
Figure 5.27 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Rass el Aïoun (Trt 24) Kebilli avec agrandissement sur l'emplacement de l'ancienne source (extrait de Google Earth le 15-03-2019).....	218
Figure 5.28 : Vestiges antiques d'aménagements hydrauliques romains de la source du tertre d'Aïn er Rellig ou d'El Gharig (Trt 14) à El Mansourah (photographie extraite de Trouset, 1986).....	219
Figure 5.29 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Ain er Rellig (Trt 14) El Mansourra avec agrandissement sur l'emplacement de l'ancienne source (extrait de Google Earth le 15-03-2019).....	220
Figure 5.30 : Vue d'ensemble de l'état du tertre Aïn El Bled (Trt 41) à Blidet avec un agrandissement sur les ruines de l'ancien village et de la vasque (extrait d'une image Google Earth du 08-11-2018).....	221
Figure 5.31 : Photographie des ruines de l'ancien village de Blidet bâti sur le tertre Trt 41 : Prise de vue mai 2017.....	222
Figure 5.32 : Photographie du tertre d'Aïn El Bled Prise de vue octobre 2018. ....	222
Figure 5.33 : Carte typologie des vestiges des tertres. ....	224
Figure 5.34 : Distribution du diamètre et de la hauteur des tertres mesurés (axe des x : diamètre en m, axe des y hauteur en m) Limites en rouge : grands tertres /en jaune : tertres pentus / en vert : petits tertres. ....	225
Figure 5.35 : Abondance relative des différents types de tertres (voir légende ci-dessus). ...	226
Figure 6.1 : Carte de localisation des tertres intéressants pour une éventuelle conservation. ....	251
Figure 6.2 : Itinéraire d'un circuit touristique saharien organisé par le tour opérateur français Jet Tours, d'après Souissi 2011.....	252

# Liste des tableaux

-Tableau 1.1 : Valeurs mensuelles des précipitations en mm (1996-2016) calculées pour la station de Kébili d’après les données du CRDA .....	32
-Tableau 2.1 : Superficie des oasis et alimentation en eau dans la Nefzaoua à partir de 1920 d’après Sahnoun et al 1995 .....	64
-Tableau 2.2 : Extension de la superficie des oasis du Nefzaoua a palmiers dattiers en (ha) entre 1976 et 1999 .....	65
-Tableau 3.1 : Tableau d’assemblage des des huit cartes topographique qui couvre la Zone étudiant .....	89
-Tableau 3.1 : composition colorée utilisée. ....	93
-Tableau 3.2 : Estimation des superficies irriguées dans la zone d’étude (à partir des indices de végétation calculés pour les 3 images MSS, SPOT et Sentinel). ....	111
-Tableau 3.3 : Estimation de l’accroissement des superficies irriguées (d’après les valeurs du tableau 3.2).....	112
-Tableau 0.6Tableau 4.1 : Correspondance entre les références des échantillons .....	154
-Tableau 5.1 : Classification des tertres du Nefzaoua. ....	199
-Tableau 5.2 : Pourcentage des différents types de tertres recensé (types principaux et secondaires).....	226
-Tableau 6.1 : les 10 critères de sélection pour la liste du Patrimoine mondial de l’Unesco. ....	246
-Tableau 6.2 : Les tertres remarquables extraits de l’inventaire général (voir tableau en annexe).....	249

# Table des matières

Remerciements .....	4
Sommaire .....	8
Introduction générale.....	10
Première partie : Un milieu aride et anthropisé .....	16
Introduction de la première partie .....	18
Chapitre 1 : Le Nefzaoua : vue d'ensemble .....	20
Introduction.....	21
1.1 La géologie .....	23
1.1.1 Les grands ensembles géologiques.....	23
1.1.2 L'artésianisme dans la région du Nefzaoua .....	24
1.1.2.1 Géologie et hydrogéologie régionales.....	24
1.1.2.2 Caractéristiques et extension des aquifères .....	25
1.1.3 Les chotts .....	28
1.2 Géomorphologie et formation superficielles.....	29
1.2.1 Aperçu de la géomorphologie du Nefzaoua.....	29
1.3 Le Climat.....	30
1.3.1 Les précipitations.....	30
1.3.2 Les températures .....	33
1.3.3 Le vent.....	34
1.3.3.1 Analyse fréquentielle et déplacement de sable dans le Nefzaoua.....	35
1.3.3.2 Fréquence des vents sahariens .....	39
1.4 Les Processus éoliens dans le Nefzaoua .....	40
1.4.1 Les processus d'ablation .....	41
1.4.2 Les processus de transport .....	41
1.4.3 Processus et formes d'accumulation.....	42
1.4.4 Morphologie dunaire du Nefzaoua .....	42
1.5 Les sols du Nefzaoua .....	44
1.6 La végétation .....	46
1.7 L'occupation humaine.....	47

1.7.1	Éléments d'histoire du peuplement .....	47
1.7.2	La démographie récente .....	48
	Conclusion .....	49
Chapitre 2 : Les tertres du Nefzaoua : origine, formation, intérêt .....		51
	Introduction.....	52
2.1	Les tertres : un système hydro-agricole d'origine hydrogéologique et éolienne....	53
2.1.1	Qu'est-ce qu'un tertre du Nefzaoua ?.....	53
2.1.2	Formations des tertres (rôle du vent et de l'eau).....	53
2.1.3	Morphologie des tertres de sources .....	55
2.2	Les tertres des sources artésiennes : une occupation à travers les âges.....	56
2.3	Les tertres : des sources artésiennes transformées en un système d'irrigation complexe.....	58
2.4	Les interactions entre les aménagements de sources et les contraintes du milieu..	61
2.5	L'évolution anthropique récente : « mort » des tertres et extension des oasis.....	64
	Conclusion .....	67
	Conclusion de la première partie .....	69
Deuxième partie : Les tertres artésien du Nefzaoua : les outils d'étude d'un paysage en pleine transformation.....		71
	Introduction de la deuxième partie.....	73
Chapitre 3 : L'utilisation de la cartographie et des images de télédétection pour l'étude de l'évolution du paysage des tertres au Nefzaoua. Étude diachronique récente .....		74
	Introduction.....	75
3.1	La localisation et la cartographie des tertres .....	75
3.1.1	Les photographies aériennes .....	76
3.1.1.1	Le géoréférencement .....	77
3.1.1.2	Utilisation des photos aériennes anciennes : une aire d'étude limitée .....	77
3.1.1.3	Interprétation des photos aériennes.....	81
3.1.1.3.1	L'apport de la carte topographique.....	81
3.1.1.3.2	La mosaïque des photos aériennes de 1950 .....	82
3.1.1.3.3	La mosaïque des photos aériennes de 1967 .....	84
3.1.1.3.4	Une image satellite récente à haute résolution .....	86
3.1.1.4	Bilan de l'utilisation des photographies aériennes.....	87
3.1.2	Les cartes des tertres de source du Nefzaoua .....	88

3.1.2.1	Carte de l'état des tertres de sources artésiennes au début du 20ème siècle	88
3.1.2.2	Les images satellites récentes .....	91
3.1.2.3	Carte de l'état des sources et des tertres artésiens en 2017 .....	93
3.1.3	Série temporelle disponible via Google Earth.....	95
3.1.3.1	Diachronie récente à l'échelle de l'oasis sur Time Machine.....	95
3.1.3.2	Étude diachronique récente d'un tertre (2010-2018) sur Google Earth : exemple de Derguish1 .....	99
3.2	Constitution d'une série temporelle à partir d'images d'archive .....	103
3.2.1	Les catalogues utilisés.....	104
3.2.2	Les images satellites utilisées.....	104
3.2.3	Utilisation de l'indice de végétation.....	106
3.3	Une analyse multi-dates simple.....	108
3.3.1	Combinaison des trois dates par codage couleur.....	108
3.3.2	Utilisation du NDVI pour l'estimation de l'évolution des superficies irriguées	111
3.4	La troisième dimension : utilisation de modèles numériques de terrain (MNT)..	113
3.4.1	Le modèle numérique à résolution moyenne (SRTM) .....	113
3.4.2	Le modèle numérique récent à résolution fine (Tandem X) .....	114
3.5	Mesure des dimensions des tertres .....	118
3.5.1	Méthodologie de mesure sur Google Earth.....	118
3.5.2	Méthodologie de mesure sur le Modèle Numérique de Terrain de TandemX	119
3.6	Fusion de l'image multodate avec la topographie.....	121
	Synthèse et Conclusion.....	124
Chapitre 4 : Étude sédimentologique des tertres artésiens du Nefzaoua ...		126
	Introduction.....	127
4.1	Matériel et méthodes.....	128
4.1.1	Localisation des tertres analysés .....	128
4.1.2	Méthode de description et nomenclature .....	129
4.1.3	Analyses standard .....	130
4.1.4	Méthodologie de l'utilisation du Microscope électronique à balayage (MEB) couplé avec une micro-sonde .....	131
4.1.5	Diffraction Rayons X.....	132
4.2	Etude sédimentologique du tertre 36 .....	133

4.2.1	Localisation des coupes du tertre 36.....	133
4.3.2	La Coupe A Trt 36.....	134
4.3.2.1	Le niveau inférieur I (échantillons A31-A30) .....	137
4.3.2.2	Le niveau intermédiaire II .....	137
4.3.2.2.1	Le niveau inférieur du niveau intermédiaire : II-A (échantillons A29 à A26)	137
4.3.2.2.2	Le niveau supérieur du niveau intermédiaire II-B (échantillons A25 à A8)	143
4.3.2.3	Le niveau supérieur III (échantillons A1 à A7) .....	146
4.3.3	Synthèse de la coupe A.....	147
4.3.4	La coupe B Trt 36.....	148
4.3.4.1	Le niveau inférieur I (échantillons B1 à B5) .....	150
4.3.4.2	Le niveau intermédiaire II (échantillons B6 et B7).....	150
4.3.4.3	Le niveau supérieur III (échantillons B8 et B9).....	151
4.3.5	Synthèse de la coupe B .....	151
4.3.6	La Coupe C Trt 36.....	152
4.3.6.1	Le Niveau inférieur III (échantillons C1 à C3).....	154
4.3.6.2	Le Niveau II (échantillons C4 à C6) .....	158
4.3.6.3	Le niveau supérieur III (échantillons C7 à C8).....	158
4.3.7	Synthèse de la Coupe C .....	159
4.3.8	Les sondages à la tarière .....	159
4.3.8.1	Sondage T1 .....	159
4.3.8.2	Sondage T2.....	160
4.3.8.3	Synthèse des sondages à la tarière T1 et T2 .....	160
4.4	Etude sédimentologique du tertre 9 .....	161
4.4.1	Localisation de la coupe D.....	161
4.4.2	La coupe D Trt 9.....	162
4.4.2.1	Le niveau inférieur I (échantillons D1-D3) .....	164
4.4.2.2	Le niveau intermédiaire II (échantillons D4 -D9).....	166
4.4.2.2.1	Le niveau inférieur IIA du niveau intermédiaire (échantillons D4 -D5)	167
4.4.2.2.2	Le niveau supérieur IIB du niveau intermédiaire (échantillons D6 -D9)	168
4.4.1.1	III niveau supérieur (échantillons D10 et D11) .....	171

4.4.2	Synthèse de la coupe D.....	171
4.4.3	Les sondages à la tarière .....	172
4.4.3.1	Le sondage T3.....	172
4.4.3.2	Synthèse de T3.....	172
4.5	Les échantillons pour datation au radiocarbone.....	173
4.5.1	Localisation des sites de prélèvement de charbons .....	174
4.5.2	Résultats et interprétation.....	175
4.5.2.1	Le tertre d'Aïn Chardiouss (Trt 36) .....	175
4.5.2.2	Le tertre d'Aïn Ben Zitoun (Trt 37) .....	177
4.5.2.3	Le tertre d'El Alouia (Trt 30) .....	179
4.5.2.4	Le tertre de Guettaïa Bled (Trt 17).....	180
4.5.2.5	Le tertre d'Aïn Mariouna (Trt 15).....	182
4.5.3	Synthèse .....	184
	Conclusion .....	184
	Conclusion de la deuxième partie .....	189
	Troisième Partie : les tertres de sources : une entité géomorphologique en voie de disparition .....	192
	Introduction de la troisième partie .....	194
	Chapitre 5 : Typologie des tertres du Nefzaoua .....	196
	Introduction.....	197
5.1	Évolutions des tertres depuis l'abaissement de la nappe artésienne.....	197
5.2	Typologie de l'état actuel des tertres du Nefzaoua.....	199
5.2.1	Classification de l'état des tertres.....	199
5.2.2	Typologie : Étude de cas.....	200
5.2.2.1	Type démantelé (type D).....	202
5.2.2.1.1	Un tertre complexe démantelé : Tarfaïet el Kraoub (Trt 92) .....	202
5.2.2.2	Type peu dégradé (type P).....	205
5.2.2.2.1	Le tertre Trt 93.....	205
5.2.2.2.2	Le tertre de Selamia (Trt 98) .....	207
5.2.2.3	Type ensablé (type E).....	210
5.2.2.3.1	Le tertre de Zerhbia (Trt 87) .....	210
5.2.2.4	Type aplani (types N et A).....	212
5.2.2.4.1	Le Trt 114 (type N).....	213
5.2.2.4.2	Le Trt 94 (type A).....	215

5.2.2.5	Type aménagé (type M).....	217
5.2.2.5.1	Le tertre de Rass el Aïoun (Trt 24).....	217
5.2.2.5.2	Le tertre d'Ain er Rellig ou d'El Gharig (Trt 14) .....	219
5.2.2.6	Type Urbanisé (type U).....	221
5.2.2.6.1	Le tertre de Blidet Beld (Blidet ville) (Trt 41) .....	221
5.3	Inventaire des tertres et de leur degré de dégradation.....	223
	Conclusion .....	227
Chapitre 6 : Les tertres du Nefzaoua : un patrimoine paysager à identifier ?		
	.....	229
	Introduction.....	230
6.1	Valeur patrimoniale d'un paysage. ....	231
6.1.1	Concepts et définitions du Patrimoine .....	231
6.1.1.1	La notion de patrimoine.....	231
6.1.1.2	Concepts patrimoniaux.....	233
6.2	Du patrimoine à la patrimonialisation.....	235
6.2.1	Les étapes d'une éventuelle patrimonialisation des tertres du Nefzaoua .....	236
6.2.2	Comment la population du Nefzaoua perçoit les tertres .....	237
6.2.3	Un argumentaire en faveur des tertres du Nefzaoua.....	239
6.2.4	Considérations en vue d'une patrimonialisation .....	240
6.3	Outils d'analyse .....	241
6.3.1	Les critères retenus pour une éventuelle patrimonialisation .....	241
6.3.2	Le Nefzaoua et les critères du patrimoine naturel .....	244
6.3.3	Le Nefzaoua face aux 10 critères de l'UNESCO.....	245
6.4	Utilisation de l'inventaire des Tertres en vue d'une éventuelle patrimonialisation	
	247	
	Conclusion .....	253
	Conclusion de la troisième partie.....	255
	Conclusion générale .....	256
	Bibliographie.....	264
	Liste des figures .....	278
	Liste des tableaux .....	284
	Table des matières .....	285
	Annexe.....	292
	Signes conventionnels de la carte de la Tunisie au 100.000° .....	293

Tableau : Typologie des vestiges des tertres des sources du Nefzaoua .....	294
Analyse bibliographique des documents sur les tertres de sources du Nefzaoua .....	302
Protocoles d'analyses standard réalisées au laboratoire de l'IRA .....	309
Diagramme de poudre TRT9 Coupe D horizon D6 niveau argileux .....	312

# Annexe

# Signes conventionnels de la carte de la Tunisie au 100.000<sup>e</sup>

SIGNES CONVENTIONNELS		DE LA CARTE DE LA TUNISIE AU 100.000 <sup>e</sup>		
<p><b>Lieux habités</b> (Suivant leur forme à l'échelle)</p> <p>Ville ouverte </p> <p>Ville fermée </p> <p>Village Hameau </p> <p>Maisons </p> <p>Mechria ou Ferme </p> <p>Maison Cantonnière </p> <p>Bordj non fortifié </p> <p>Redoute, Bordj fortifié </p> <p>Batterie </p> <p>Huttes et Gourbis </p> <p>Tentes (Campements perméables) </p> <p>Troglodytes </p> <p><b>Signes divers</b></p> <p>Eglise </p> <p>Chapelle ou Eglise isolée </p> <p>Croix </p> <p>Tombe de Marabout </p> <p>Minaret, Koubba </p> <p>Cimetière chrétien </p> <p>Cimetière musulman </p> <p>Cimetière israélite </p>	<p>Ruines </p> <p>Ruines mégalithiques </p> <p>Murs </p> <p>Moulin à vent </p> <p>Moulin à eau </p> <p>Figures du terrain </p> <p>Télégraphe ou Sémaphore </p> <p>Phare à feu fixe </p> <p>Phare à éclipses </p> <p>Fours de ports marins </p> <p><b>Hydrographie</b></p> <p>en pierre </p> <p>Ponts en fer </p> <p>en bois </p> <p>Bac </p> <p>Gué </p> <p>Cours d'eau à sec pendant une partie de l'année </p> <p>Ravin sans eau </p> <p>Canaux d'irrigation </p> <p>Aqueduc </p> <p>Conduite d'eau sur le sol Souterraine </p> <p>Commencement de la Navigation </p>	<p>Source, Fontaine </p> <p>Puits </p> <p>Marais </p> <p>Marais salants </p> <p>Chotts et Dunes </p> <p>Dauu </p> <p><b>Points géodésiques</b></p> <p>Signal de 1<sup>er</sup> ordre </p> <p>Signal de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordre </p> <p>Clocher </p> <p>Minaret, Koubba </p> <p>Point coté </p> <p>Constructions et objets signa- lés représentés par leurs si- gnes conventionnels avec la mention (S<sup>al</sup>)</p> <p>Exemples</p> <p>Maison (S<sup>al</sup>) </p> <p>Arbre (S<sup>al</sup>) </p>	<p><b>Routes et Chemins</b></p> <p>Routes empierement continuës </p> <p>Piste à l'état de viabilité </p> <p>Pistes à l'état naturel </p> <p>Sentier muletier </p> <p>Sentier de piéton </p> <p>Vestiges d'anciennes voies </p> <p>Route encadrée en Chaussée </p> <p><b>Chemins de fer</b></p> <p>à voie normale </p> <p>Gare </p> <p>Déblai Remblai </p> <p>Passages en dessus, en dessous, à niveau </p> <p>Tunnel Viaduc Ponceau </p> <p>Chemin de fer à voie de 1<sup>re</sup> </p> <p>Ch<sup>ie</sup> de fer sur route </p> <p>Ch<sup>ie</sup> de fer à voie de moins de un mètre </p>	<p><b>Divisions de Culture</b></p> <p>Bois </p> <p>Broussailles </p> <p>Oliviers </p> <p>Cactus </p> <p>Palmiers </p> <p>Vergers </p> <p>Vignes </p> <p>Clôture de haies </p> <p>Limite de culture </p> <p><b>Signes administratifs</b></p> <p>Limite d'Etat </p> <p>Télégraphe </p> <p>Poste </p> <p>Télégraphe et Poste </p> <p>Ligne télégraphique </p>

## Tableau : Typologie des vestiges des tertres des sources du Nefzaoua

Code	Nom	Localisation		Type de tertre		H (m)	Ø (m)	État du tertre						État de griffon			
		Latitude	Longitude	Dominant	Secondaire			Détruit à %		Ensablé	Urbanisé		Démantelé	Ensablé	Aménagé	Intact	
								Anthropique	Naturelle		Ruines	Village					
Trt1	Bechri	33°47'22.62"	8°47'1.24"	Démantelé		13	1200	AA						X			
Trt2	Zaouïet el Harts	33°47'35.10"	8°48'12.52"	Urbanisé		20	ND	AAA					X				
Trt3	Hassine	33°43'50.86"	8°49'18.06"	Démantelé		11	580	A					X				X
Trt4	Chouchet el Mrazig	33°44'24.49"	8°50'24.81"	Urbanisé	Démantelé	28	1900	AAA									
Trt5	Djezira el Berrhoutsia	33°43'22.72"	8°51'6.61"	Peu dégradé		6	620										
Trt6	Koussana	33°44'3.18"	8°52'58.56"	Démantelé		14	670	AA									
Trt7	Aïn Selim	33°43'52.87"	8°54'14.02"	Démantelé	Urbanisé	5	ND						X	X			
Trt8	Tembib/ Aïn El Matlek	33°42'54.32"	8°54'9.45"	Urbanisé	Démantelé	11	1000	AAA					X	X			
Trt9	Djezira Ouled Aïssa	33°42'28.46"	8°53'49.77"	Peu dégradé		10	500	A									

<b>Trt10</b>	Djezira Taïfout	33°42'10.59"	8°54'30.58"	Aplani (A)		8	524	AAA								
<b>Trt11</b>	Djezira el Melaha/ Aïn Talint	33°42'34.87"	8°52'26.68"	Démantelé	Échelle de l'agrandisse ment illisible	4	316	AA					X			x
<b>Trt12</b>	Aïn el Msenn	33°43'42.56"	8°55'1.91"	Urbanisé		ND	ND	AAA					X			
<b>Trt13</b>	Telmine	33°42'54.31"	8°55'13.10"	Urbanisé		ND	ND	AAA					X			
<b>Trt14</b>	Mannsoura (Ain er Rellig ou Kharig)	33°43'30.20"	8°56'16.14"	Aménagé	Urbanisé	17	2159	AAA					X			x
<b>Trt15</b>	Aïn Mariouna	33°40'34.64"	8°53'40.17"	Démantelé	Urbanisé	20	750	AAA				X		X		
<b>Trt16</b>	Ebness	33°40'35.06"	8°53'12.80"	Démantelé	Urbanisé	13	790	AA					X	X		
<b>Trt17</b>	Guettaïa Bled	33°40'44.30"	8°52'40.85"	Démantelé	Urbanisé	18	755	AA				X				
<b>Trt18</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°39'55.83"	8°53'30.52"	Démantelé		11	730	AA						X		
<b>Trt19</b>	Djezira Mansour	33°39'35.33"	8°53'29.98"	Démantelé	Aplani	8	720	AAA						X		
<b>Trt20</b>	Aïn el Marmouna	33°39'54.43"	8°52'52.05"	Aplani (A)		9	1224	AAA						X		
<b>Trt21</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°40'15.16"	8°52'39.12"	Démantelé		6	391	AA						X		
<b>Trt22</b>	Guettaïa	33°40'39.80"	8°52'14.50"	Démantelé		7	582	AA						X		
<b>Trt23</b>	Djezira Mosbah	33°40'13.64"	8°51'49.33"	Aplani (A)		2	544	AAA								
<b>Trt24</b>	Rass el Aïoun	33°41'58.38"	8°58'46.02"	Aménagé	Urbanisé	27	ND	AAA					X			
<b>Trt25</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°38'55.30"	8°59'36.98"	Démantelé		18	ND	A								x
<b>Trt26</b>	Rahmet	33°38'35.98"	8°59'35.35"	Aplani (A)		20	ND	AA								

Trt27	Sidi Messaïd	33°37'4.46"	8°57'42.34"	Urbanisé	Démantelé	18	1400	AAA					x	x		
Trt28	Tiezzine	33°36'49.31"	8°57'6.10"	Démantelé		18	1961	AA								
Trt29	Becheri	33°36'51.55"	8°55'3.62"	Urbanisé		14	1333	AA					x			
Trt30	El Alouia	33°36'46.07"	8°54'27.92"	Peu dégradé		15	1134	A						x		x
Trt31	Guelb Tsour	33°37'30.64"	8°54'46.85"	Peu dégradé		19	1311	A			x			x		x
Trt32	Oum el Abid	33°35'20.09	8°53'9.88"	Démantelé		10	567	AA						x		x
Trt33	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°35'24.90"	8°52'1.90"	Démantelé		9	506	AA						x		
Trt34	Aouïnet el Kralif	33°35'41.02"	8°51'52.60"	Démantelé		6	403	AA						x		
Trt35	Oum el Mirss	33°34'57.96"	8°51'15.06"	Démantelé		16	1084	A						x		
Trt36	Aïn Chardiouss	33°34'19.27"	8°50'24.39"	Démantelé		16	757	AA						x		
Trt37	El Merhmouma	33°34'6.12"	8°53'7.76"	Démantelé	Urbanisé	10	933	AA								
Trt38	Ben Zitoune	33°34'47.80"	8°52'13.77"	Démantelé		17	1122	AA								
Trt39	Sidi Abdallah el Meurhbi	33°35'43.51"	8°51'10.07"	Démantelé		10	791	AA								
Trt40	Bargou	33°35'53.84"	8°50'17.36"	Démantelé	Ensablé	21	1555	A	A	x				x	x	
Trt41	Aïn el Bled	33°34'54.13"	8°50'26.51"	Urbanisé		23	936	A			x					x
Trt42	Kressi	33°34'33.18"	8°50'44.62"	Aplani (A)		5	350	AAA								
Trt43	Femilia	33°34'16.74"	8°50'40.54"	Aplani (A)	Démantelé	17	775	AAA						x		
Trt44	Derguiche1	33°34'5.79"	8°50'5.54"	Aplani (A)		9	518	AAA						x		



<b>Trt59</b>	Bou Dia	33°35'55.66"	8°59'16.49"	Peu dégradé		10	1008	A								
<b>Trt60</b>	Teneb	33°36'3.37"	9° 0'21.88"	Peu dégradé		ND	ND		AA							
<b>Trt61</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°35'6.07"	8°57'44.26"	Aplani (A)		10	958	AAA								
<b>Trt62</b>	Selia	33°35'2.74"	8°59'57.56"	Peu dégradé		9	852	AA	A							
<b>Trt63</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°35'26.13"	9° 0'21.26"	Peu dégradé		7	363		A							
<b>Trt64</b>	Kasba	33°35'19.37"	9° 0'32.24"	Démantelé		10	430	A								x
<b>Trt65</b>	Sidi Ahmed	33°34'27.56"	8°59'2.10"	Démantelé		ND	ND	A					X			
<b>Trt66</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°34'26.53"	8°58'30.84"	Démantelé		12	ND	A					X			
<b>Trt67</b>	Bou Zine	33°34'29.41"	8°59'13.67"	Démantelé		12	ND	A					X			
<b>Trt68</b>	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°34'15.59"	8°58'38.94"	Aplani (A)		11	690	A								
<b>Trt69</b>	Non indiqué sur la carte de 1933	33°34'24.65"	9° 0'18.75"	Démantelé		11	1037	A								
<b>Trt70</b>	Chefia	33°33'58.37"	8°59'15.89"	Démantelé		11	794	AA								
<b>Trt71</b>	Rhelissia	33°35'42.83"	8°53'38.00"	Ensablé	Urbanisé	12	916	A	AA	X	X		X			x
<b>Trt72</b>	Sandoudia	33°34'43.75"	8°54'59.99"	Ensablé	Démantelé	13	1821	A	AA							x
<b>Trt73</b>	Gueliada	33°34'30.35"	8°53'4.60"	Ensablé	Démantelé	11	856	A	AA	X	X			X		
<b>Trt74</b>	Guelb el Hachana	33°33'44.10"	8°53'43.37"	Ensablé		12	884		AA							x
<b>Trt75</b>	Bechria	33°33'31.90"	8°54'23.07"	Ensablé		12	1059		AA	X				X		

<b>Trt76</b>	Rachedia	33°33'30.34"	8°55'13.19"	Démantelé	Ensablé	11	1316	AA	A	x							x
<b>Trt77</b>	Oum er Rouss	33°32'41.19"	8°57'14.61"	Ensablé	Démantelé	27	2418	A	AA	x							x
<b>Trt78</b>	B. el Alouane : indiquer comme Bir sur la carte 1933	33°32'38.95"	8°58'33.70"	Ensablé		20	1684		A								
<b>Trt79</b>	Djedda	33°33'25.52"	8°59'28.27"	Ensablé		10	1003		A								
<b>Trt80</b>	Aïn el Margouïa	33°32'25.59"	9° 0'36.60"	Ensablé		12	928		A	x							x
<b>Trt81</b>	Mathouthia	33°31'57.57"	9° 0'43.66"	Aplani (A)	Ensablé	2	484	A	AAA								
<b>Trt82</b>	El Rhoula	33°30'25.50"	8°58'14.09"	Aplani (A)		8	1300	AAA									
<b>Trt83</b>	Souarakr	33°29'26.24"	8°54'39.04"	Ensablé		14	1559		AA		x						
<b>Trt84</b>	Guenissaïa	33°30'37.76"	8°51'48.05"	Ensablé		20	ND		AAA								
<b>Trt85</b>	Klebia	33°31'14.48"	8°50'28.49"	Ensablé		ND	ND		AAA								
<b>Trt86</b>	Amri Slaa	33°31'2.78"	8°49'47.34"	Ensablé		ND	ND		AA								
<b>Trt87</b>	Zerhbia	33°30'58.06"	8°50'26.22"	Ensablé		14	670		AAA	x					x		
<b>Trt88</b>	Jabria	33°30'26.85"	8°51'28.99"	Aplani(N)		17	ND		A								
<b>Trt89</b>	Douz el Ala	33°28'8.66"	8°54'53.78"	Aplani(N)	Ensablé	ND	ND		AAA	x							
<b>Trt90</b>	Senam	33°25'52.06"	8°54'33.20"	Aplani(N)	Ensablé	ND	ND		AAA	x							
<b>Trt91</b>	Maamoun	33°26'36.64"	8°56'20.12"	Ensablé	Démantelé Urbanisé	13	1030	A	AA	x	x			x	x		
<b>Trt92</b>	Tarfaït el Kraoub	33°27'26.56"	8°58'34.16"	Démantelé	Urbanisé + Ensablé	14	ND	AAA	A	x	x						



Trt109	Aïn Cherradia	33°31'42.09"	9° 1'53.95"	Aplani(N)	Peu dégradé	8	503		AAA									x
Trt110	Dzokra	33°30'55.03"	9° 3'2.25"	Aplani(N)		8	387		AAA									
Trt111	Non indiqué sur la carte	33°30'34.61"	9° 3'17.72"	Aplani(N)		9	250		AAA									
Trt112	Non indiqué sur la carte	33°29'8.81"	9° 3'7.40"	Ensablé	Aplani	12	359		AAA									
Trt113	Non indiqué sur la carte	33°28'39.67"	9° 2'21.66"	Aplani	Ensablé	7	331		AAA									
Trt114	Non indiqué sur la carte	33°29'28.60"	9° 1'54.50"	Aplani	Ensablé	ND	ND		AAA									
Trt115	Ali Ben Ahmed	33°29'32.57"	9° 2'9.86"	Ensablé	Aplani	ND	ND		AAA									
Trt116	Mehiet el Oussif	33°29'51.79"	9° 2'16.86"	Aplani	Ensablé	ND	ND		AAA									
Trt117	Non indiqué sur la carte	33°26'25.29"	8°44'36.95"	Peu dégradé	Ensablé	ND	ND		A	X								x
Trt118	Aïn Bou Rdaf	33°14'24.61"	8°38'16.40"	Aplani	Ensablé	ND	ND		AAA									
Trt119	Aïn Tefguia	33°12'4.36"	8°43'17.68"	Ensablé		ND	ND		AAA									
Trt120	Djedeïda	33°38'14.61"	8°56'51.99"	Aplani		3	566		A	X								
Trt121	<b>Pas de nom sur la carte</b>	33°37'55.06"	8°55'35.10"	Aplani	Ensablé	10	ND		AAA	X								x
Trt122	Fartassa	33°37'49.32"	8°58'47.39"	Peu dégradé		11	770											x
Trt123	Halbouda : Non indiqué sur la carte	33°38'59.87"	8°58'21.79"	Peu dégradé		5	824											x
Trt124	Djemna	33°37'25.18"	9° 1'38.24"	Aplani		6	ND		AA									

Trt125	Djeziret el Aliate1	33°37'24.13"	8°59'56.15"	Aplani		6	425	AAA								
Trt126	Djeziret el Aliate2	33°37'35.20"	8°59'38.57"	Aplani		11	644	AAA								

Code	Nom d'Oasis/Aïn	Description, état et caractéristiques des tertres de source	Localisation du village, oasis et sources	Cité par (Auteur)	Dates
------	-----------------	---	---	-------------------	-------

**Légende :**

**H** : hauteur

**Ø(m)** : Diamètre en mètre

**ND** : Non Déterminer

**Détruit à %** : AAA (70et100%) - AA (30et70%) - A (1 et 30%)

## Analyse bibliographique des documents sur les tertres de sources du Nefzaoua

	<b>(Ein goim-el-fardh</b>	Eau saumâtre		Baraban L.	1887
	<b>Limaguez</b>	La source tiède et légèrement saumâtre. La source fournit une eau abondante	Située à proximité des bords du chott El-Fedjedj	Baraban L.	1887
		Une source abondante, mais fade et magnésienne.	Oasis de quelques hectares ensablés	Idoux M.	1902
<b>Trt 24</b>	<b>Kebili</b>	Une source abondante et fraîche.		Baraban L.	1887
		La source est abondante et prend naissance à la tête de l'oasis. La source fournie une grande quantité d'eau	L'oasis est située à 5 kilomètres à l'ouest de Kebilli.	M. Idoux	1902
		L'eau coule des parois et jaillit du fond d'une vingtaine de petites criques sablonneuse, pour se réunir en, deux bassins naturels d'où part la rigole principale d'irrigation, véritable petit oued pérenne.	Au Nord du village d Kebili	Moreau	1947
<b>Trt 14</b>	<b>Mansoura</b> Ain er Rellig ou Kharig	Cinq sources, coule une eau tiède et abondante	La ville d'El Mansoura est bâtie sur un mamelon au milieu de son oasis	Idoux M.	1902
		« ... A l'époque romaine les eaux d'Aïn er Rellig s'écoulaient dans une séguia unique, de laquelle partaient tous les canaux d'irrigation. Il semble que cette séguia est celle que l'on peut suivre de Mansourah à Telmine. Sans que l'on puisse affirmer qu'autrefois elle était entièrement maçonnée, l'énorme quantité de pierres taillées que l'on trouve dans cette séguia permet de supposer que les colons romains l'avaient établie avec tout le soin possible. »	Entre les villages de Djedeïda et de Mannsourah et près de la clairière où la tradition place la ville de Torrah (Tunis Tamalleni), se trouvaient les sources les plus abondantes et les plus pures du Nefzaoua	Trousset P.	1986
<b>Trt 13</b>	<b>Telmine</b>	Situation analogue avec El Mansoura	La ville de Telmine a une origine historique ; c'est l'ancienne Turris Temellani des Romains	Baraban L.	1887
			C'est un lieu plein de ruines romaines, jadis très peuplé, où la végétation est puissante, mais le climat pernicieux.  Le marais qui baigne l'enceinte en ruines est fangeux, nauséabond, et engendre des fièvres terribles	Idoux M.	1902

	<b>Fernane</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
<b>Trt 31</b>	<b>Guebat-Saour/ Guelb Tsour</b>	Arrosée par un mince filet d'eau	Située sur un monticule peu élevé. Elle est peuplée de très beaux palmiers mélangés d'oliviers.  Les cultures d'orge et de blé s'étendent tout autour et sont circonscrites dans de petits terrains ensablés séparés par des clôtures en branches de palmier, qui forment à l'oasis une barrière suffisante contre les ensablements.	Baraban L.	1887
<b>Trt 29</b>	<b>Bchelli</b>	La source, qui sourd au pied du village, est emmagasinée dans une large cuvette. Dès qu'elle est pleine, c'est-à-dire en moyenne tous les quinze jours, on arrose.		Baraban L.	1887
		Bouquets qui couronnent des éminences peu élevé		Idoux M.	1902
	<b>Berhoutia Berrhoutsia</b>	L'oasis de Berhoutia, au sud de Bechilli est à peu près dans les mêmes conditions, quoi qu'un peu plus grande et plus accidentée  La source est située au nord, dans une sorte d'entonnoir	Le village est sur une éminence au milieu même des palmiers.	Baraban L.	1887
	<b>Ghélifia/ Rhelissa/ Ghulaysiyah</b>	La source prend naissance entre deux monticules de sable et s'étale en un bassin où croissent d'énormes roseaux		Baraban L.	1887
	<b>Kelmaouni Kelouamen</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
<b>Trt 41</b>	<b>Blidet</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
<b>Trt 43</b>	<b>Famili Femilia</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
<b>Trt 44</b>	<b>Darguich</b>	Il ne reste qu'une source à moitié tarie et quelques touffes de palmiers sur une butte assez élevée		Baraban L.	1887

Trt 51	Zarzine	La source, à la pointe nord du petit axe, est recueillie dans une large cuvette, d'où s'écoule une eau abondante, fraîche et de bonne qualité	Elle a la forme d'une ellipse très allongée, dont le grand axe serait dirigé de l'est à l'ouest. Le village en occupe l'extrémité ouest.	Baraban L.	1887
Trt 17	Guettaia	La source jaillit au fond d'un ravin abrupt et sinueux, dont les flancs, formés de sable calcaire concrétionné, paraissent résister à la désagrégation.	Le village est bâti sur une butte, au pied de laquelle s'étendent les jardins.	Baraban L.	1887
Trt 16	Ebenes	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
	Dechera	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
	Mebouda	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
Trt 20	Marmona Marmouna	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
	Ed-Koudy	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
	Touzaline	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
Trt 19	Ziret-Mansour	Situation analogue avec Guettaia		Baraban L.	1887
Trt 9	Zira-oued-Aïssa	La source abondante sort entre deux monticules formés de sable et de cailloux et pierres calcaires		Baraban L.	1887
Trt 10	Teïfut Aïn Taïfout	Situation analogue de Djezirat ira-ouled-Aïssa		Baraban L.	1887
Trt 8	Tembar et Tembib	La source est abondante et coule toute l'année. Son eau, fraîche et agréable, passe d'ailleurs pour la meilleure du pays.	Tembar et Tembib, une seule oasis avec deux villages distincts	Baraban L.	1887
	El-Hafira	Pas d'eau, fortement ensablée	Un petit village sur une hauteur et une tache de verdure au pied	Baraban L.	1887
	Em-Selim	Eau mauvaise, sable au sud		Baraban L.	1887
	Djiret-el-Hammoun	Source faible, sable au sud		Baraban L.	1887
	Oum-Relif	Source faible, sable au sud		Baraban L.	1887

	<b>El-Fretissa</b>	Source faible, sable au sud		Baraban L.	1887
	<b>Cheraf, Ez-Zaouia</b>	Peu d'eau, sable au sud		Baraban L.	1887
	<b>Choucha</b>	Eau mauvaise, non ensablée		Baraban L.	1887
	<b>Ziro-Zaïda</b>	Eau mauvaise, non ensablée		Baraban L.	1887
	<b>Dir-cl-Soltan</b>	Eau mauvaise, non ensablée		Baraban L.	1887
	<b>Oum-Sema</b>	Les sources d'Oum Sema sourdent au pied du bourg, au-dessous d'un banc de sable de 6 à 1 mètres de profondeur, reposant sur une couche calcaire, qui doit être le prolongement de celle de la crête.		Baraban L.	1887
		Les sources de cette oasis sortent d'une couche de sable reposant sur des bancs calcaires et située à 7 ou 8 m. de profondeur		Idoux M.	1902
	<b>Bou Abdallah</b>	La source qui l'alimente sort au pied du Djébel Zaouia, dans une anfractuosité de rochers dont la structure est ainsi compos�e de bas en haut banc de marne de Om,60, surmont�e d'un banc de calcaire compacte de 1 m, 20 étages de sable argileux avec fragments calcaires sur 2 mètres d'épaisseur puis, recouvrant le tout, une couche de sable de transport provenant des chotts, de 5 � 6 mètres d'épaisseur. Le débit de cette source est faible et ne permet l'arrosage que d'une partie des jardins.	Bou-Abdallah, grande et belle oasis, analogue à celle d'Oum-Sema, à l'est de laquelle elle est situ�e, sur une pente sud des derniers contreforts de la chaîne	Baraban L.	1887
	<b>El-Gol�ah</b>	La source prend naissance près du village, à l'affleurement des couches marneuses et calcaires, et fournit une eau fraîche et abondante.	Le village est situé de la façon la plus pittoresque, sur le versant sud et jusqu'au sommet d'un des pics de la chaîne. L'oasis s'allonge à ses pieds en pente avec gradins successifs au sud.	Baraban L.	1902
		La source sort au pied d'une montagne calcaire		Idoux M.	1902
	<b>El-Zira</b> <b>Djezira</b>	La source jaillit au pied du versant	Le village est sur le versant sud de la chaîne, sur un mamelon calcaire au pied duquel jaillit la source.		1887
	<b>Menchia</b>	La source sillonne tout le bourg pour arriver aux jardins dans de profondes tranch�es ou séguias	Menchia, vaste et belle oasis au nord de la précédente et sur le versant nord de la chaîne, s'allongeant de l'est à l'ouest. Le village est construit à la lisière sud, au pied d'une montagne, calcaire conique qui l'abrite et d'où la source sort très en	Baraban L.	1887

			contre-bas.		
Trt 2	<b>El-Ahart</b> Zaouïet el Harts	Cité sans description		Baraban L.	1887
	<b>Zoued-el-Aanes</b> Zaouïet el Haness	Cité sans description		Baraban L.	1887
	<b>Bechri</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
			Bechri- el-kdim (l'ancienne Bechri», ville arabe construite sur les ruines d'une cité romaine et dont il ne reste que des décombres.	Tissot Ch.J	1884
	<b>Fatnassa</b>	Cité sans description		Baraban L.	1887
	<b>Dabebcha</b>	Cité sans description		Baraban L.	1884
	<b>Djemna</b>		Djemna se dresse sur le flanc d'une colline couronnée par de très beaux palmiers poussés autour d'une mare inépuisable.	Idoux M.	1902
Trt 53	<b>Nouaïel</b>	Il semble bien que la résurgence n'ait fonctionné que pendant la première partie de l'époque <b>Villafranchien</b> et que, par ailleurs, l'extension des formations liées à cette résurgence soit assez réduite		Fournet A.	1971
		La source () est à l'origine de la fixation d'un centre. Il s'agit d'une de <b>ces pustules cratériformes</b> (elles se comptent par dizaines, dans le Nefzaoua, appelées <b>Jeziret = les îles</b> ) qui a été créée par un jaillissement artésien naturel, l'artésianisme étant particulièrement puissant au sud du Chott		Bisson J.	1991
Trt 118 et 119	<b>Les Aioun Bou Rdaf et Tefguia</b>	Les Aioun bou Rdaf et Tefguia nous apparaissent comme deux îlots émergeant de la mer de sable  Quelques silex ont été recueillis des outils ou des armes appartenant aux périodes robenhausienne et tardenoisienne quelques lames et couteaux des échantillons de pointes de flèches de formes très différentes : les unes longues à pédoncules peu marqués, d'autres courtes à grands pédoncules ; formes allongées et formes trapues, quelques-unes même sans pédoncule. des fragments de coquilles d'œufs d'autruches découpés en rondelles dans un but	Située à une quarantaine de kilomètres au sud de la piste principale, de Douz à l'Oued Souf. Il y a là 4 à 500 kilomètres carrés de sables et de chotts. Dans toute cette étendue il n'y a que deux sources vives : ce sont les Aioun bou Rdaf et Tefguia	Pezard	1908

		probable de parure...			
	Aïn Touaouergha	Aïn Touaouergha elle a une trentaine de mètres de diamètre...un remous très net existe au milieu, bien explicable par la forme en entonnoir de la source. Elle est très profonde et forme un joli lac bleu entouré de dunes rousses  Abondante (6.000 litres/minute), l'eau s'écoule par deux petits oueds et sert à l'irrigation des palmeraies de Bechri, Debabcha et Fatnassa.		Moreau	1947
		Il existe un gouffre circulaire, de cinquante à soixante pieds de diamètre, dont on a vainement essayé de mesurer la profondeur. L'eau en est chaude (de 26° à 28° centigrades), comme celle de la plupart des sources du Blad-el Djerid, et elle nourrit des poissons semblables à ceux qu'on remarque dans les piscines de Gafsa. On a donné à ce puits naturel le nom berbère de Taourgha.  Une tradition locale affirme que « ce gouffre s'est déplacé, il y a quelques siècles, à la suite d'un tremblement de terre ».	Près de Bechri el-Kdim	Tissot	1884
Trt3	Negga	La source artésienne de Negga est située dans un beau bassin bleu rectangulaire d'origine romaine, ou dans l'eau bleue se mirent les palmes proches		Moreau	1947
	Sabria, Gaza.	Ces deux oasis étaient abandonnées à l'époque de séjour de l'auteur au Nefzâoua : les sables avaient comblé leurs sources.		Tissot Ch J	1884

# Protocoles d'analyses standard réalisées au laboratoire de l'IRA

## Teneur en matière organique

1g de sol tamisé à 0.5 mm + 10ml bicarbonate de potassium 1N (49.035g/l) + 20ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré. Agiter quelques minutes, ensuite laisser reposer 30 mn, ajouter 170ml H<sub>2</sub>O distillée, laisser le temps de décantation, enfin prélever 20 ml de filtrat sans avoir touché le fond du bêcher .....+ 1ml de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> pur + 2 gouttes d'indicateur d'oxydoréduction (1g de diphénylamine dans 40ml H<sub>2</sub>O distillée et 200 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré)

Le tirage s'effectue avec sulfate ferreux 1/10 (278g FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>N/2) (virage vert bleu) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>N/2 = 14.11 ml/l

% C = 4\* (T-b) /T avec T= témoin, b= volume FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O

% M.O = 1.725\* % C

## Dosage du calcaire total : Calcimètre de BERNARD

Le calcimètre de Bernard est composé d'une burette graduée en ml reliée par le bas au moyen d'un tube en caoutchouc à une ampoule et par le haut à un erlenmeyer muni à l'intérieur d'un petit tube à essai.

### Mode opératoire

- Remplir le tube en U d'eau colorée de manière à ce que le niveau corresponde à l'origine des mesures.
- Peser 0.2 gramme de CaCO<sub>3</sub> pur et sec et le déposer dans l'erlenmeyer. Il va servir à étalonner l'appareil.
- Remplir le tube à essai au  $\frac{3}{4}$  d'HCl que l'on place délicatement dans l'erlenmeyer au moyen d'une pince en ayant soin qu'aucune goutte ne tombe sur le CaCO<sub>3</sub>.
- Boucher soigneusement l'erlenmeyer.
- Faire la lecture du niveau de la burette, soit V<sub>0</sub> le volume lu.
- Renverser l'acide sur le CaCO<sub>3</sub> en ayant soin de ne pas échauffer le mélange avec la main.
- Laisser la réaction se faire et attendre la stabilité du niveau de l'eau dans la tube marquant la fin du dégagement gazeux.
- Faire la lecture soit V<sub>1</sub> le volume lu, le volume réel est donc V<sub>1</sub>-V<sub>0</sub> = V.
- Renouveler l'opération en remplaçant le CaCO<sub>3</sub> par les échantillons de sol tamisés à 0.2 mm (prise d'essai de 0.2 à 1 g selon la richesse en calcaire) soit V le volume de dégagé par l'échantillon de sol.

### **Teneur en calcaire actif**

Mode opératoire

- 2.5 g de sol tamisé à 2 mm
- Ajouter 250 ml d'oxalate d'ammonium N/5
- Agitation mécanique pendant 2 h
- Filtration
- Prélever 20 ml de filtrat clair + 100 ml H<sub>2</sub>O distillée et 5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Tirer par KMnO<sub>4</sub> N/5 à température de 60° à 70°c en agitant (agitateur mécanique chauffant) jusqu'à persistance de la coloration rose
- Tirer le volume de KMnO<sub>4</sub> N/5 ajouté (v)
- Tirer de la même façon 20 ml de la solution oxalate d'ammonium N/5, noter le volume témoin (V)

### **Teneur en gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O)**

- Peser 5 g de sol tamisé à 2 mm + 200 ml de carbonate de sodium
- Ebullition 30 mn.
- Laisser refroidir, ajouter quelques gouttes de rouge de méthyle
- Acidifier avec Hcl jusqu'à dégazage (teinte rose)
- Filtrer, en lavant le filtre avec de l'eau bouillante
- Ajouter 30 ml de BaCl<sub>2</sub>
- Laisser les précipita se reposer une nuit
- Filtrer sous vide sur papier filtre cendre
- Introduire le filtre avec son contenu dans une capsule en porcelaine, mettre au four à 900°c pendant 2h
- Peser le résidu

### **Granulométrie ordinaire : Méthode pipette de Robinson**

L'analyse granulométrique consiste à séparer la partie minérale de la terre en catégories classées d'après les dimensions des particules et à diminuer en poids les proportions relatives de ces catégories d'après le système international.

Sables grossiers 2-----0.2 mm

Sables fins 0.2-----0.02 mm

Limon 0.02---0.002 mm

Argile < 0.002

**BUT :**

Élimination des agents de concentration principalement (M.O, Ca++)

## Séparation de la fraction des sables

Détermination de la fraction argileuse et de la fraction limoneuse dans l'échantillon dispersé par prélèvement à la pipette de Robinson

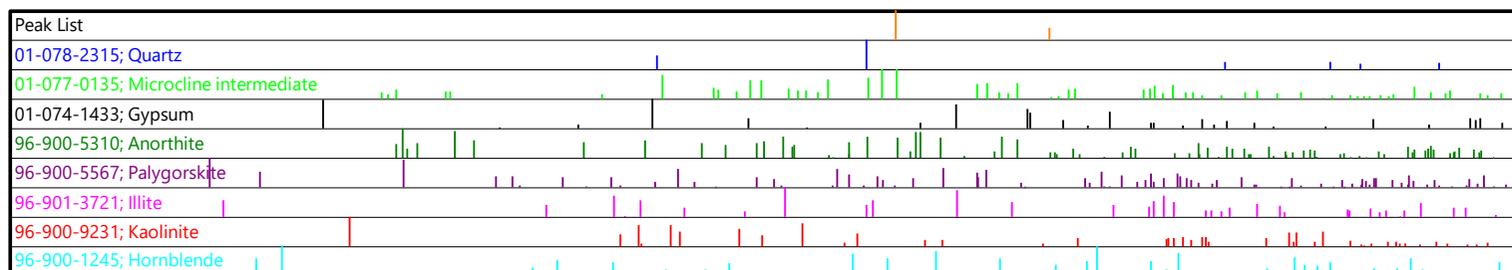
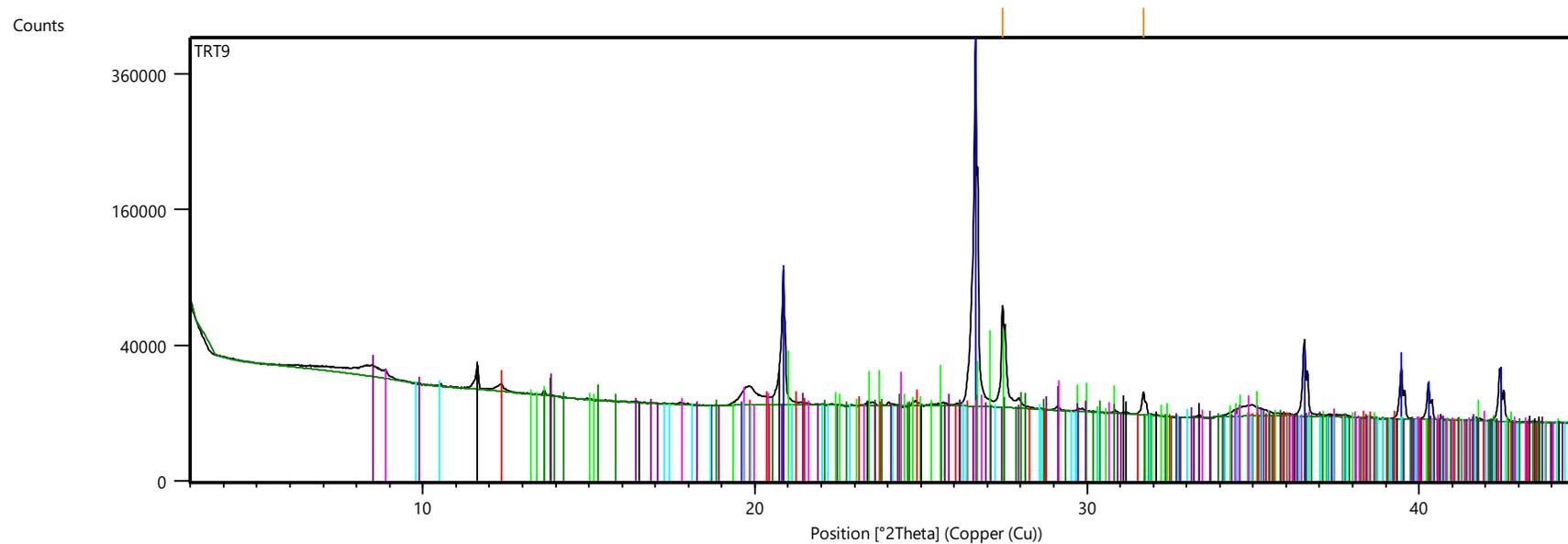
### **Principe**

La matière organique est oxydée par chauffage avec l'eau oxygénée et en la détruisant par ébullition. Ensuite, la partie minérale de la terre, ainsi traitée avec une solution d'examètophosphate de sodium, est agitée mécaniquement à grande vitesse pour assurer une bonne dispersion des particules.

### Mode opératoire

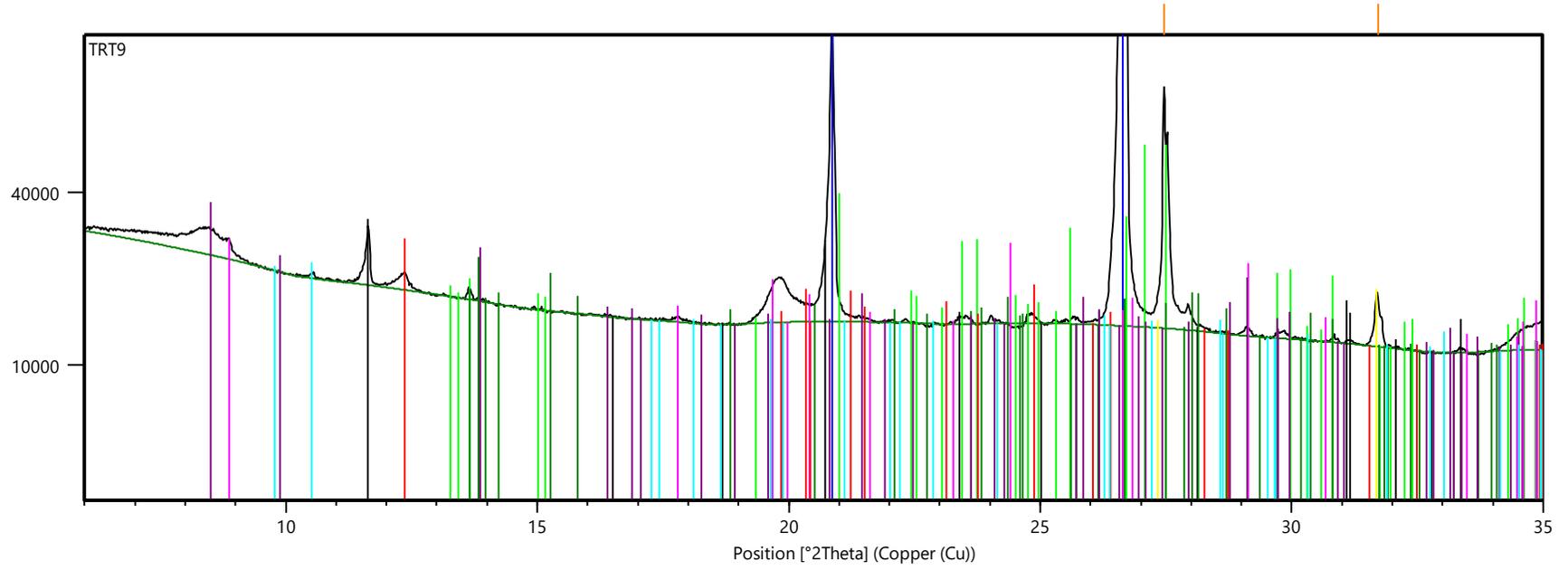
- 20 g de sol séché, broyé et tamisé à 2 mm plus 20 ml d'eau oxygénée (destruction de la MO)
- Laisser une nuit pour les échantillons riche en matière organique.
- Ajouter 300 ml d'eau distillée  
Ebullition 30 mn à faible température
- Transférer les échantillons avec rinçage dans des bouteilles d'un litre et ajouter 20 ml d'examètophosphate de sodium
- Agitation mécanique pendant 4 h
- Vider les bouteilles dans des allonges graduées à 1000 ml
- Prélèvement N°1 (Argile + Limon) cela dépend de temps et température
- Après 6 heures
- Prélèvement N°2 (Argile) cela dépend de temps et profondeur
- Lavage de sable
- Séchage, tamisage et pressage
- Calcul

# Diagramme de poudre TRT9 Coupe D horizon D6 niveau argileux



Zoom du diagramme précédent

Counts



Peak List
01-078-2315; Quartz
01-077-0135; Microcline intermediate
01-074-1433; Gypsum
96-900-5310; Anorthite
96-900-5567; Palygorskite
96-901-3721; Illite
96-900-9231; Kaolinite
96-900-1245; Hornblende
00-005-0628; Halite, syn

## Résumé

Les paysages oasiens du Nefzaoua (sud de la Tunisie) se sont structurés au moins depuis l'Antiquité autour de sources artésiennes. Elles émergeaient dans une formation géomorphologique circulaire pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de diamètre et quelques dizaines de mètres de hauteur qu'on appelle tertre. Ces tertres sont constitués d'une ceinture de matériel sédimentaire redistribué par les eaux artésiennes et surtout de matériel éolien piégé par la végétation poussant autour des sources. Les populations se sont sédentarisées grâce à ces tertres et y ont développé une agriculture oasienne à trois étages. Avec le développement récent des forages profonds et la multiplication des forages individuels, le paysage est aujourd'hui complètement changé : les oasis sont réorganisées et les tertres subissent des destructions.

Cette destruction montre les étapes de transformation du paysage oasien : une évolution dramatique vers un système certes productif, mais avec des limitations à long terme. Les ressources en eau peu renouvelables à partir de la nappe « fossile » se tarissent et baissent en qualité (salinité en forte augmentation). La transition de l'ancien au nouveau système paysager, ainsi que les transformations intermédiaires, sont analysées à travers l'étude sédimentologique des tertres restants, d'anciennes cartes topographiques et des images satellites à plusieurs dates. Notre travail devrait permettre de sensibiliser les décideurs pour définir des conditions nécessaires à la sauvegarde d'au moins une relique de ce patrimoine naturel, car ils sont des témoins essentiels mais fragiles de l'histoire des paysages hydro-agricoles des oasis du Nefzaoua.

**MOTS CLÉS :** Nefzaoua, oasis, artésianisme, tertres de sources, histoire du paysage.

## **Abstract**

The oasis landscapes of the Nefzaoua (southern Tunisia) have been structured at least since antiquity around artesian springs. They emerged in a circular geomorphologic formation that could reach several hundred meters in diameter and a few tens of meters in height called mound. These mounds of springs consist of a ring of sedimentary material redistributed by the artesian waters and especially of aeolian material trapped by the vegetation growing around the springs. Populations settled down thanks to these mounds and developed a three-stories oasis agriculture. With the recent development of deep drilling and the multiplication of individual boreholes, the landscape has now been completely changed: the oases are reorganized, and the mounds are being destroyed.

This destruction shows the transformation stages of the oasis landscape: a dramatic evolution towards a system that is certainly productive, but with long-term limitations. Water resources that are hardly renewable from the "fossil" water table are drying up and decreasing in quality (salinity increasing sharply). The transition from the old to the new landscape system, as well as the intermediate transformations, are analyzed through the sedimentological study of the remaining mounds, old topographic maps and satellite imagery at several dates. Our work should raise awareness among decision-makers to define the conditions necessary to safeguard at least one relic of this natural heritage, as they are essential but fragile witnesses of the hydro-agricultural landscape history of the Nefzaoua oases.

**KEYWORDS:** Nefzaoua, oasis, artesianism, mounds of springs, landscape history.