

SANI IBRAHIM

**ÉVOLUTION DES PAYSAGES DUNAIRES
FIXÉS PAR LA VÉGÉTATION AU NIGER**

ÉVOLUTION DES PAYSAGES DUNAIRES FIXÉS PAR LA VÉGÉTATION AU NIGER

MODIFICATIONS MORPHOLOGIQUES ACTUELLES DANS LES
COUCHES SUPERFICIELLES DES DUNES ET POSSIBILITÉS DE
«RÉGÉNÉRATION» ET DE «PÉDOGÉNÈSE»

Sani Ibrahim

Résumé

Les sécheresses des années 1970 et 1980 ont occasionné des changements remarquables dans les paysages et écosystèmes sahéliens. Au Niger, les milieux dunaires sont les plus affectés par la dégradation des paysages aux conséquences parfois irréversibles. Cette étude tente de montrer que, malgré les modifications climatiques et les pressions anthropiques, une régénération des sols dunaires serait possible, dans cette dynamique complexe. Cela a été démontré à travers l'analyse micromorphologique des matériaux des parties superficielles des sols (0-20 cm). L'étude des caractéristiques particulières des croûtes (organisations pelliculaires de surface des sols) offre des pistes de recherches pouvant proposer des moyens et méthodes de fixation des dunes dégradées. Elle propose également des alternatives de lutte contre l'érosion éolienne et hydrique dans les écosystèmes sahéliens. Ceci cadre parfaitement avec la situation au Niger, où les phénomènes de désertification et d'ensablement des cuvettes interdunaires constituent une préoccupation majeure en matière de protection de l'environnement.

Publié en ligne: 02.03.2016

urn:nbn:de:bvb:20-opus-126528

© Junges Afrikazentrum der Universität Würzburg (JAZ) 2016



L'auteur

Sani Ibrahim, né en 1975 à Dabnou/Tahoua (Niger), fit ses études universitaires en géographie physique à l'Université Abdou Moumouni (Niger). Après l'obtention du diplôme d'études approfondies en gestion des ressources naturelles, sous financement du DAAD, il obtint son doctorat à l'Institut de Géographie Physique et de la Géologie de l'Université Julius-Maximilians-de Würzburg (Allemagne). Ses travaux ont porté sur l'Evolution des paysages dunaires fixés par la végétation au Niger, modifications morphologiques actuelles dans les couches superficielles des dunes et possibilités de « régénération » et de « pédogénèse ». Contact: mamsani75@yahoo.fr.

**Dissertation zur Erlangung des
Naturwissenschaftlichen Doktorgrades der
Julius-Maximilians-Universität
Würzburg**

Eingereicht am: 12.08.2015

1. Gutachterin: Prof. Dr. Barbara Sponholz, Institut für Geographie und Geologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Deutschland
2. Gutachter: Dr. Issa Ousseini, Département de géographie, Université Abdou Moumouni Dioffo de Niamey, Niger

Tag der mündlichen Prüfung: 12.11.2015

1. Prüferin: Prof. Dr. Barbara Sponholz, Institut für Geographie und Geologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Deutschland
2. Prüfer: Prof. Dr. Jürgen Rauh, Institut für Geographie und Geologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Deutschland)
3. Prüfer: Dr. Issa Ousseini, Département de géographie, Université Abdou Moumouni Dioffo de Niamey, Niger

Table des matières

Résumé	VIII
Zusammenfassung	XII
Summary	XVI
Liste des figures et illustrations	XX
Liste des cartes.....	XX
Liste des croquis.....	XX
Liste des graphiques.....	XX
Liste des photos.....	XX
Liste des schémas.....	XXI
Liste des tableaux	XXI
Plan de la thèse	XXII
Aufbau der Arbeit	XXII
1 Introduction générale et contexte de l'étude	1
1.1. Introduction générale.....	1
1.2. Questions générales de recherche	3
1.3. Motivations et point sur les recherches antérieures.....	4
1.4. Contexte actuel des milieux dunaires au Niger.....	6
2 Cadre général de l'étude	8
2.1. Localisation des zones d'étude.....	8
2.2. Caractéristiques spécifique des bassins sédimentaires des Iullemenden et du Lac Tchad.....	9
2.2.1. Le Bassin des Iullemenden.....	9
2.2.2. Bassin du Lac Tchad.....	10
2.3. Matériaux géologiques de base des zones d'ergs étudiées.....	12
2.4. Héritages sédimentaires et pédologiques immédiats des sols dunaires étudiés	13
2.5. Caractéristiques générales actuelles des sols des milieux dunaires.....	13
2.6. Les caractéristiques géomorphologiques et profils des édifices dunaires.....	16
2.7. Influences climatique et humaine sur les paysages dunaires.....	18
2.7.1. Influences climatiques : variations saisonnières et interannuelles.....	18
2.7.2. Influences de l'occupation humaine : usage et vulnérabilité des paysages dunaires.....	21
2.8. Usages des paysages dunaires.....	21
2.9. Vulnérabilité des paysages dunaires.....	22
2.10. Conclusion partielle.....	22

3. Caractéristiques particulières de la végétation sahélo-saharienne	23
3.1. Evolution spatio-temporelle de la végétation Sahélo-Saharienne	23
3.2. Modèle cartographique régional de la végétation des milieux dunaires sahélo-sahariens : typologie	27
3.3. Caractéristiques de la végétation des paysages dunaires étudiés	32
3.4. L'état de la couverture végétale perçu comme facteur clé de la stabilité des dunes	36
3.4.1. Dynamique et changement saisonnier de la végétation	36
3.4.2. Rôle de fixation et comportement de la végétation dans les paysages dunaires	42
3.4.3. Influences humaines sur la dégradation des dunes	49
3.5. Conclusion partielle	53
4. Méthodologie d'échantillonnage, d'analyse et d'interprétation des matériaux des sols dunaires	54
4.1. Transects d'échantillonnage et choix des échantillons	54
4.1.1. Transects	54
4.1.2. Echantillonnage	54
4.2. Choix des échantillons analysés	57
4.3. Préparation préliminaire des échantillons	58
4.4. Description des méthodes et outils d'analyse	58
4.4.1. Analyses granulométriques /mécanique et laser	58
4.4.2. Analyse élémentaire et minéralogique	60
4.4.3. Thermogravimétrie	65
4.4.4. Détermination du potentiel-Hydrogène (pH au CaCl ₂)	68
4.4.5. Analyses micromorphologiques par microscopie optique	69
4.4.6. Définition des concepts de base en vue de l'analyse micromorphologique	71
4.4.7. Traitement et signification statistique des données analysées	72
5. Caractéristiques et modifications des couches superficielles des dunes	73
5.1. Choix des paramètres d'analyse	73
5.2. Caractéristiques physiques des couches superficielles des dunes	73
5.2.1. Caractéristiques texturales	73
5.2.2. Indices d'homogénéité-hétérogénéité et pédogenèse	78
5.2.3. Indices d'altération mécanique, U-Ratio et pédogenèse	79
5.2.4. Spectre chromatique : couleur des matériaux dunaires	81
5.2.5. Caractéristiques structurales des couches superficielles des dunes	82
5.3. Caractéristiques géochimiques des couches superficielles des dunes	85
5.3.1. Potentiel hydrogène (pH)	85
5.3.2. Caractéristiques et évolution de la matière organique	86
5.3.3. Influences des apports allochtones et/ou autochtones sur les dunes	89
5.3.4. Rapports Fe total /TIC et Ti total /TIC	90
5.3.5. Rapport TOC/TN et influences extérieures des matériaux détritiques	93
5.4. Conclusion partielle	94
6. Altération chimique des matériaux dunaires et pédogenèse	96
6.1. Altération chimique des couches superficielles des dunes	96

6.2. Choix des indices d'altérations chimiques.....	96
6.3. Choix des indices testés.....	98
6.4. Altération chimique des matériaux à la surface des dunes étudiées.....	101
6.5. Conclusion partielle.....	103
7. Qualité chimique des couches superficielles des matériaux dunaires.....	103
7.1. Métaux lourds et pollution chimique des couches superficielles des dunes.....	103
7.2. Difficulté à définir les ETM.....	104
7.3. Variations locale et régionale des spectres en éléments trace métalliques (ETM).....	104
7.4. Conclusion partielle.....	107
8. Fonctions antagoniques des phénomènes d'encroûtement et du potentiel régénératif des couches superficielles des dunes.....	107
8.1. Les diverses fonctions des croûtes superficielles.....	107
8.2. Caractéristiques générales et importance des croûtes en milieux semi-arides.....	107
8.3. Les phénomènes d'encroûtement à la surface des dunes.....	109
8.4. Description micromorphologique des couches superficielles des dunes.....	114
8.5. Mécanismes généraux de formation des croûtes.....	119
8.6. Typologie des organisations microstructurales de la surface des dunes.....	123
8.7. Facteurs d'encroûtement des matériaux des couches superficielles des dunes.....	129
8.8. Encroûtement et enrichissement des couches superficielles des dunes.....	136
8.9. Conclusion partielle.....	138
9. Sédiments lacustres : archives et évidence des modifications environnementales.....	140
9.1. Contexte et situation générale.....	140
9.2. La fonction d'archives environnementales.....	141
9.3. Le charbon comme archive des activités humaines.....	142
9.4. Les enregistrements polliniques comme archives des paysages dunaires.....	143
9.5. Changements environnementaux reconstitués dans les milieux Sahélo-Sahariens.....	145
9.5.1. Modifications climatiques et environnementales.....	145
9.5.2. Mise en place des différentes générations de dunes au sahel.....	146
9.6. Conclusion partielle.....	149
10. Conclusion générale et perspectives.....	150
10.1. Conclusion générale.....	150
10.2. Perspectives.....	151
Références bibliographiques.....	152
Web-Bibliographie.....	163
Annexes.....	165

Dédicace

A la mémoire de ma très chère Mère disparue pendant mon séjour d'étude en Allemagne.

*...A ma bien aimée épouse
ASSAMAOU et ma chère fille MARYAM.
Recevez ici toute ma
reconnaissance pour avoir supporté
mes très longues absences d'une
part et d'autre part, pour vos
soutiens sans faille, sans lesquels, je
n'aurais eu le courage de finir ce
travail.*

Remerciements

Mes remerciements à:

- Pr Dr Sponholz Barbara, Dr Schulz Erhard, Pr Dr Baumhauer Roland, Prof Dr Felix-Henningsen Peter, Prof Dr Ousseini Issa, Pr Dr Schutz Brigitta, Pr Ambouta J.M. Karimou, Dr Abichou Abdelhakim. Pour leurs assistances multiples.

Mes remerciements aux:

- DAAD (service Allemand pour la coopération interuniversitaire et les échanges académiques) qui a financé ce travail et la complète prise de mon séjour académique en Allemagne et au Niger.
- Personnels techniques des laboratoires des sols et de géomorphologie de l'Institut de Géographie Physique et de la Géologie de l'Université de Würzburg (Allemagne), du Laboratoire de Géosciences de l'Université Libre de Berlin (Allemagne), du laboratoire de Minéralogie, Pétrologie et Géochimie de l'Université de Szeged (Hongrie) et du laboratoire de géographie et de Science du sol de de l'Université de Szeged (Hongrie)

Mes remerciements à ma famille d'accueil Allemande (amis et connaissances) pour leur hospitalité et assistances diverses. Il s'agit principalement de:

- Rotraut Fidora, Minnattallah Boutros, Christa Kitz, Sophia Lohmeayer, Jürgen Lohmeayer, Frederik Fidora, la famille Jens Brauneck, la famille Rückert Erhard et beaucoup d'autres que je ne pourrais tous citer ici !
- Je ne finirais pas sans remercier mes amis et collègues de l'Institut de Géographie Physique et de la Géologie de l'Université de Würzburg. Il s'agit particulièrement de : Dr Angela Tintrup gen. Suntrup, Dr Anja Scholten, Mlle Inka Wilhelm, Dipl.Ing. Dorothee Schill, Dipl.-Geogr. Birgit Mannig, Dr Dorothee Kleinschrot, Dr Jürgen Kempf, Dr Tobias Ullmann, Dr Christian Büdel, Dipl. M.Sc Adrian Emmert, Dr Jan Krause (Berlin), Mr. Günter Moritz... la liste est longue! Recevez ici toute ma gratitude.

Résumé

La situation climatique actuelle et les conditions écologiques des milieux dunaires sahéliens font l'objet de plusieurs études dont principalement les phénomènes d'érosion-dégradation. Des actions à l'échelle internationale sont en train d'être menées afin de réduire la dégradation des terres, de lutter contre la désertification et d'assurer la régénération des écosystèmes par les actions de plantation d'arbres et de récupération des terres dégradées. Actuellement un projet « pharaonique » est initié par les pays de la zone sahélienne pour soit disant arrêter « l'avancée du désert » par la construction d'une « grande muraille verte » le long des franges sud du Sahara de la Mauritanie à Djibouti. Ce projet concerne principalement le domaine des paysages dunaires fixés par la végétation. Toutefois, ces paysages dunaires, ont fait l'objet de nombreuses recherches dans plusieurs domaines. Concernant les processus érosifs, ils sont étudiés sur plusieurs aspects mais peu ou pas du tout sur l'impact positif de l'érosion, qui, de toute façon devrait normalement se produire. En outre, la notion de dégradation est toujours vaguement appréciée et celle de la régénération des paysages dunaires dégradés est chaque fois discutée en termes de fixation ou de stabilisation, sans pour autant comprendre comment les dunes sont naturellement fixées par la végétation et quels sont les facteurs in situ en jeu. Cette étude voudrait contribuer à fournir des éléments de base pour la compréhension des mécanismes entrant en jeu dans la dynamique actuelle de dégradation des milieux dunaires, de la végétation qui est supposée assurer leur stabilité et des processus pouvant conduire à leur régénération naturelle.

Pour cela des séries de questions sont posées. Ces questions visent en effet à savoir

- comment se présentent les processus de dégradation dans les milieux dunaires et quels rôles jouent-ils dans les processus de régénération?
- Comment les mesurer ?
- Et quel modèle peut être proposé ?

Tant de questions dont les réponses sont proposées à partir de l'étude du comportement de la végétation sur les unités géomorphologiques caractéristiques des zones étudiées et de l'étude des caractéristiques géochimiques, géophysiques et micromorphologiques de couches superficielles (0-20 cm de profondeur) des dunes en place.

- Où se localisent alors ces dunes étudiées ?

Les paysages dunaires étudiés sont localisés dans les milieux semi-arides des zones sahéliennes (>300 mm/an) et dans les milieux hyperarides des zones sahariennes (<10 mm/an) du Niger. Ceux-ci occupent une large partie du pays. Ils sont cependant, confrontés à des phénomènes de dégradation dont les causes sont à la fois d'origine naturelle (baisse des précipitations et sécheresses récurrentes, intense activités éoliennes) et anthropique (croissance démographique, extension des terres de cultures, déforestation, surpâturage). Cette situation rend ces paysages dunaires très vulnérables à la dynamique de dégradation dont les dunes jadis fixées par la végétation et les sols sableux dunaires qui s'y étaient développés sont les plus affectés. Quel est le but de l'étude ?

Cette étude voudrait contribuer à l'établissement d'un modèle de fonctionnement de la dynamique actuelle de ces paysages dunaires. Elle se base sur la caractérisation de la végétation qui fixe les dunes en fonction de la disponibilité en eau du sol et de la géomorphologie locale. Elle se base aussi sur les caractéristiques géophysiques, géochimiques et micromorphologiques des couches superficielles (0-20 cm) des dunes fixées par la végétation. Concernant les analyses géophysiques, il a été procédé à l'analyse granulométrique aux tamis et au laser. Les analyses micro-morphologiques (structure et microstructure des matériaux) sont faites à la loupe et au microscope et le spectre chromatique au Code Munsell (Standard International des couleurs des sols). En ce qui concerne les analyses géochimiques, la concentration en ions hydrogène (pH) a été déterminée au pH-mètre électronique. La détermination des minéraux et des éléments

majeurs est faite par diffractométrie aux rayons X, par fluorescence aux rayons X et par spectrométrie CNS-H et ICP-OES. D'autres analyses élémentaires ont été aussi faites par thermogravimétrie. Celles-ci visent à déterminer les caractéristiques des couches superficielles des dunes et à identifier les processus qui participeraient à la régénération des sols dunaires dégradés. En outre, pour comprendre les dernières modifications environnementales intervenues dans les milieux dunaires sahéliens, un carottage a été fait dans le lac de Guidimouni. Des analyses stratigraphique et pollinique des enregistrements sédimentaires du lac sont faites.

- Comment l'étude a été abordée et quelles sont les échelles de mesure ?

Le travail est basé sur une approche multiscalaire combinant les observations de terrain, aux échantillonnages et analyses en laboratoire. Les observations et les échantillonnages des matériaux effectués sur le terrain sont menés suivant deux (2) transects : Ouest-Est pour les dunes fixées par la végétation en milieux sahéliens et Nord-Sud pour les dunes mobiles situées en milieux sahariens. Ces transects sont en effet, faits sur différents paysages dunaires du Niger localisés dans deux (2) différents bassins sédimentaires : le Bassin des Iullemenden (B.IU) et celui du Lac Tchad (B.LT). Les paysages dunaires précisément concernés sont ceux des dunes fixées par la végétation de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N,) et du Goulbi (Gl 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N) localisés dans le B.IU et ceux des dunes fixées par la végétation du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N), du Manga (Mg 11°10' - 12°03'E et 13°10'-13°35' N) localisés dans le B.LT. Quant à celui Ténéré, considéré comme paysage dunaire de référence (TEN Réf. 10°34'-10°50' E et 18°22'-18°38' N), il est aussi localisé dans le B.LT mais en milieu hyperaride à dunes encore mobiles.

- Quels sont les résultats obtenus et que démontrent-ils?

Les résultats des observations effectuées sur le terrain ont permis d'identifier des paramètres essentiels à la compréhension des mécanismes entrant en jeu dans la dynamique actuelle de dégradation des dunes et les processus pouvant contribuer à la régénération des sols dunaires dégradés. En effet, l'étude montre que la dégradation des paysages dunaires est intrinsèquement liée aux caractéristiques des matériaux pédologiques. Elle est aussi liée à l'état de la couverture végétale qui, elle aussi est influencée par les facteurs naturels à travers les variations saisonnières et interannuelles des pluies et de l'humidité dans les corps dunaires. Ces facteurs sont : les variations saisonnières et interannuelles des régimes de la pluviométrie (saisons sèches et saisons humides, années sèches et humides), le type de couverture végétale (herbacée ou ligneuse, annuelle ou pérenne, éphémère), le type de système racinaire (densité, forme ou profondeur d'enracinement), la profondeur de la nappe phréatique (superficielle, peu profonde, profonde ou très profonde) et la géomorphologie locale (sommets dunaires ou dépressions interdunaires). En dehors de ces facteurs naturels, la dégradation des paysages dunaires est aussi influencée par des facteurs humains dont les plus importants sont la croissance démographique et du cheptel dont les conséquences sont la surexploitation et l'extension des terres agricoles, la déforestation et le surpâturage.

Les observations effectuées sur la végétation, montrent que dans la partie sahélienne, les sommets dunaires sont couverts d'une savane sahélienne à tapis d'herbacées diverses parsemé d'une strate de ligneux clairsemés composée principalement de *Acacia albida*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Ziziphus spinachristi*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Boscia senegalensis*, *Acacia nilotica* et *Acacia seyal*. Les dépressions interdunaires quant à elles sont densément couvert de *Hyphaena thebaica*, et *Phoenix dactylifera* et de strate d'herbacées composites. Dans les parties sahariennes, la végétation est essentiellement composée d'Acacias (*A. erheinbergiana*, *A. radiana*, *A. nilotica*), de palmiers (*Phoenix dactylifera*, *Hyphaena thebaica*) et des *Tamarix*. La végétation herbacée est principalement dominée par *Aristida* spp, *Cyperus conglomeratus*, *Panicum turgidum*. *Impérata cylindrica*. Ce qui est important à retenir de cette couverture végétale c'est son extraordinaire

adaptation à des conditions climatiques extrêmes (désertiques) où l'eau est un facteur limitant mais aussi son mode de distribution majoritairement « contracté » dans les dépressions ou le long des cours d'eau saisonniers et temporaires (koris). Toutefois, il y a des espèces florales qui poussent après une pluie de très courte durée (achabs) et couvrant de grandes étendues et capables de stabiliser les dunes mobiles. Les limites Sud du Sahara sont couvertes par une bande diffuse de ce type de végétation qui, est bien capable de fixer les dunes mais dont les processus sont à peine étudiés.

Quant aux résultats des analyses effectuées en laboratoire, relativement aux matériaux des couches superficielles des dunes, ils concernent le spectre granulométrique (analyse granulométrique au tamis et au laser), le spectre chromatique (Standard International Munsell), la structure et la microstructure (microscopie), la minéralogie (spectrométrie), l'état et évolution de la matière organique (thermogravimétrie), l'acidité-basicité (potentiel hydrogène).

Ainsi, les analyses du spectre granulométrique montrent que les matériaux des couches superficielles des dunes du bassin des Iullemenden sont plus hétérogènes (activités pédogénétiques plus intenses) que ceux du bassin du Lac Tchad qui sont quasi-homogènes et dont les caractéristiques texturales sont proches de celles des dunes mobiles de référence du Ténéré. Les couches superficielles des dunes du bassin des Iullemenden sont plus riches en fines que celles du bassin du Lac Tchad.

La couleur des matériaux n'a pas fondamentalement changée mais des nuances locales sont observées car les conditions locales (végétation, lithologie, climat) influencent fortement les couleurs des matériaux dunaires. Du point de vue structural, les dunes du bassin des Iullemenden présentent une structure plus homogène que celles du bassin du Lac Tchad qui, présentent parfois des traits de litage caractéristique des dunes mobiles des régions hyperarides. Elles présentent aussi des traces d'influence géologique du soubassement latéritique (présence de nodules ferrugineux et diverses concrétions).

L'étude du potentiel hydrogène des matériaux des couches superficielles des dunes montre des variations non seulement locales mais aussi régionales. Ainsi, les valeurs du pH dans les principaux paysages dunaires étudiés montrent une variation d'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud du pH dans les couches superficielles des dunes. Plus les dunes sont proches des milieux hyperarides plus elles ont une tendance basique et inversement acide. L'étude de l'évolution de la matière organique dans les couches superficielles des dunes montre une faible teneur en matière organique brute dans l'ensemble des dunes des bassins sédimentaires étudiés (< 2%). Néanmoins, une abondance relative en matière organique est observée dans les dunes du bassin des Iullemenden par rapport à celles du bassin du Lac Tchad. La matière organique se minéralise très rapidement dans ces milieux dunaires.

L'étude des indices d'allochtonie et d'autochtonie des matériaux sédimentaires à la surface des dunes montre un apport externe proximal et parfois distal en minéraux et substances organiques dans les dunes situées au sud du Sahara. L'étude des indices d'altération chimiques des matériaux superficiels des dunes montre que les dunes du bassin des Iullemenden subissent une altération chimique très faible à nulle. Celle-ci est encore moins prononcée, voire nulle dans les dunes du bassin du Lac Tchad. Ce qui signifie qu'elles subissent une très faible activité pédogénétique. L'analyse de la qualité chimique des matériaux à travers les éléments traces métalliques (ETM), montrent un risque de pollution environnementale relativement élevé en raison d'une teneur au-delà des normes souhaitées (67/548/CEE) en éléments Cr (6,5mg/kg contre une valeur moyenne de plus 20 mg/kg observée), Ni (7 mg/kg contre plus de 8mg/kg observés) et Cu (9,5 mg/kg contre des valeurs maximales de plus de 19 mg/kg observée).

L'évaluation de la possibilité de régénération des dunes dégradées est menée sur la base des caractéristiques des organisations pelliculaires et micro-organisations de surface des sols. Ainsi, l'analyse micromorphologique de ces organisations, montre que trois types de croûtes se forment à la surface des dunes : les croûtes de type biogénique (type 1/BC), les croûtes de type minéral (type 2/MC) et les croûtes de type mixte à la fois biogénique et minéral (type 3/B-MC). Ces micro-organisations de surface sont capables d'évoluer en micro-horizons pédologiques

pouvant régénérer et stabiliser les sols des dunes actuellement dégradées. Ces croûtes contribueraient ainsi à l'installation de la végétation (par succession) après une phase de dégradation. Cependant, qu'elles soient d'origine biologique et/ou physique (minérale), les croûtes peuvent aussi favoriser la dégradation des sols surtout quand elles sont de type 2/MC le plus susceptible à un encroûtement dégradant dans certaines conditions.

Concernant l'évolution des paysages dunaires, les résultats des analyses des dépôts sédimentaires du lac de Guidimouni (carotte de 70 cm) ont mis en évidence des variations environnementales intervenues dans la région au cours des 100 à 120 dernières années. En effet, les informations environnementales enregistrées dans ces sédiments montrent à travers les analyses stratigraphiques et polliniques, qu'une végétation de type savane sahéenne ouverte à *Acacia*, *Balanites*, *Bauhinia*, *Combrétacée*, *Maerua* et *Mitragyna* avait prévalu. Relativement aux impacts humains sur les milieux, la pratique agraire des brûlis demeure encore un outil agricole très utilisé (défrichage par le feu) ; car dans l'ensemble de la carotte, on remarque une présence massive des particules microscopiques de charbon de paille et de bois (très peu). En outre, dans la partie centrale de la carotte des traces d'assèchement ou d'un très faible niveau du plan d'eau du lac ont été décelées. Celles-ci indiqueraient bien les sécheresses des années 70/80. Ces résultats montrent que les milieux lacustres fonctionnent bien comme une archive sédimentaire et la présence ubiquiste des particules de charbon observée dans l'ensemble de la carotte pousse à considérer ce dernier (charbon) comme un élément fiable pour mener des investigations palaeo-environnementales et l'histoire de l'occupation humaine dans un milieu bien donné.

- A quoi peuvent servir les conclusions de l'étude et quelle perspective offre-t-elle?

A l'issue des différentes conclusions tirées sur la base des résultats acquis dans ce travail, il apparaît indispensable d'initier des recherches futures orientées vers les processus actifs qui animent les échanges directs entre les parties superficielles des sols et sédiments dunaires et le substratum sableux subjacent. Elles doivent être aussi orientées sur le rôle actif des croûtes dans les processus de pédogenèse afin d'évaluer les potentialités de régénération des milieux dunaires dégradés. Il serait de ce fait très important d'étudier la chrono-stratigraphie des croûtes sur les dunes jugées « stables » et sur les jeunes édifices de remobilisation issus de l'érosion des dunes fixés. Enfin, pour mieux comprendre la dynamique de la végétation dans les paysages dunaires, des études doivent être entreprises pour la compréhension des mécanismes in situ de transfert de l'eau et des nutriments dans les couches superficielles des dunes d'une part et d'autre part, les mécanismes de transfert des eaux de pluies dans les corps dunaires. Car c'est de ces deux mécanismes que les nappes phréatiques qui assurent la survie de la végétation sur les dunes se rechargent

Sur le plan utilitaire, les conclusions de ce travail pourraient bien servir dans le contexte actuel des discussions sur les milieux dunaires sahéens. Elles pourraient surtout soutenir les activités de lutte contre la désertification, la protection, la régénération et la récupération des terres dégradées initiées par les pays du Sahel. Ces conclusions pourraient ainsi être appliquées dans le cadre des activités du « pharaonique » projet international visant la construction d'une « Grande Muraille Verte » le long des bordures sahélo-sahariennes car elles sont essentiellement dominées par les paysages dunaires fixés par la végétation. Ainsi, les résultats obtenus pourraient contribuer à l'établissement des bases de réflexions prospectives des conditions de succès et de suivi scientifique des activités dans la partie nigérienne du projet. Cette étude montre que les écosystèmes dunaires changent et possèdent encore des capacités exceptionnelles à s'auto-régénérer si l'on contrôle les influences humaines. Celles-ci (activités humaines) constituent en effet, des facteurs plus dégradants que les conditions climatiques. Les capacités exceptionnelles des croûtes à fixer et à enrichir les sols sont de bases pouvant assurer la succession des sols et de la végétation sur les dunes dégradées.

Zusammenfassung

Auf Grund ihrer heutigen klimatischen und ökologischen Bedingungen sind die Dünensysteme des Sahel ein beliebtes Forschungsobjekt zu den Fragen von Erosion und/oder Degradation. Internationale Projekte gegen Desertifikation und Land-Degradation basieren zumeist auf Wiederaufforstungsmaßnahmen oder der erneuten Nutzung des degradierten Bodens, mit dem Ziel der Regeneration der Ökosysteme. Ein geradezu „pharaonisches“ Projekt der Sahelländer soll dabei den „Vormarsch der Wüste“ mit Hilfe einer „Großen Grüne Mauer“ entlang der Südgrenze der Sahara ab Mauretanien bis Djibouti aufhalten. Dieses Projekt konzentriert sich hauptsächlich auf die durch eine Pflanzendecke fixierten Dünenlandschaften.

Hauptobjekt vieler Forschungsprojekte in Dünengebieten sind Erosionsprozesse, die aber selten unter den durchaus vorhandenen positiven Aspekten der Erosion betrachtet werden. Der Begriff der Degradation steht zumeist im Vordergrund und eine Regeneration der Dünengebiete wird unter den Aspekten der künstlichen Refixierung oder Stabilisierung betrachtet ohne auf die natürlichen Faktoren einzugehen, die zu einer Festigung der Dünenoberflächen durch die Vegetation in situ führen.

Die vorliegende Arbeit will zum grundsätzlichen Verständnis der aktuellen Degradation von Dünenlandschaften beitragen und die Rolle der Vegetation beleuchten, die die Stabilisierung der Dünen unterstützt, sowie Prozesse aufzeigen, die zu deren natürlicher Regeneration beitragen.

Mehrere Fragen stellen sich dazu:

- Welches sind die Prozesse der Degradation im Dünenmilieu und welche Rolle können sie für die Regeneration spielen?
- Wie kann man sie messen, welches Modell empfiehlt sich dazu?

Die Antworten auf diese Fragen werden in der Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf die Charakteristika der geomorphologischen Einheiten sowie zu den geochemischen, geophysikalischen und mikromorphologischen Gegebenheiten der Dünenoberflächen bzw. oberflächennahen Bereiche (0-20 cm Tiefe) gesucht.

- Doch zunächst: Wo befinden sich die untersuchten Dünensysteme?

Sie liegen im semiariden Gebiet des Sahels (>300 mm Niederschlag/Jahr) sowie im hyperariden Milieu der Sahara (< 10mm Niederschlag/Jahr) des Niger, in dem sie einen großen Teil der Landesfläche einnehmen. Sie sind der Erosion und der Degradation unterworfen, welche zum einen durch natürliche Faktoren bedingt sind (Abnahme der Niederschläge und gehäufte Dürreperioden mit starker Windaktivität) und zum Anderen auch vom Menschen verursacht (Ausdehnung des Ackerlandes, Abholzung, Überweidung im Zuge des Bevölkerungswachstums).

Diese Situation macht die Dünenlandschaften sehr empfindlich gegenüber der Erosion/Degradation, wobei die einstmals durch Vegetation fixierten Dünen und die darauf entwickelten Sandböden am stärksten beeinflusst sind.

- Welches Ziel hat die vorliegende Arbeit angesichts dieser Problematik?

Sie soll zu einem Funktionsmodell der aktuellen Dynamik der Dünenlandschaften führen. Grundlage dazu ist die Charakterisierung der dünenstabilisierenden Pflanzendecke, deren Beschaffenheit von der Wasserverfügbarkeit im Boden und der lokalen Geomorphologie abhängt.

Ebenso wichtig sind die geophysikalischen, geochemischen und mikromorphologischen Charakteristika der obersten Lagen (20 cm) der fixierten Dünen.

Bei den geophysikalischen Analysen steht die Granulometrie durch Siebung und Lasermessung im Vordergrund. Mikromorphologische Untersuchungen zur Struktur und Mikrostruktur des Materials wurden mit der Lupe und unter dem Mikroskop durchgeführt. Farben wurden mit dem Munsell Code ermittelt. Bei den geochemischen Untersuchungen wurde

der pH-Wert mit der Wasserstoff-Elektrode bestimmt. Minerale und Hauptelemente des Dünenmaterials wurden mit Hilfe der Röntgen-Diffraktometrie, der Röntgenfluoreszenz und durch CNS-H- sowie ICP-OES-Spektrometrie untersucht. Dazu kommen thermogravimetrische Analysen. Diese Untersuchungen sollen die Charakteristika der Oberflächenablagerungen klären und Prozesse der Regeneration der degradierten Dünenböden erläutern. Darüber hinaus wurde ein Bohrkern im See von Goudimouni (SE-Niger) gezogen, der zur Abklärung der jüngsten Umweltänderung im Dünenbereich beitragen soll. Er wurde stratigraphisch, mikromorphologisch und pollenanalytisch bearbeitet.

- Wie ist die vorliegende Arbeit konzipiert und auf welchen Maßstabsebenen wurde sie durchgeführt?

Sie ist multidimensional angelegt und beruht auf Geländeanalysen, Probennahmen und Laboruntersuchungen. Sie arbeitet mit nichtzerstörenden und zerstörenden Standard-Labormethoden und kann somit die Einzelanalysen in den Originalzusammenhang stellen.

Geländebeobachtungen und Probennahmen erfolgten entlang zweier Transsekte: West-Ost in den vegetationsfixierten Dünengebieten des Sahel und Nord-Süd in den mobilen Dünengebieten der Sahara. Diese Transsekte liegen in zwei verschiedenen Sedimentationsbecken: im Becken von Iullemeden (B.IU) in West- und Südwest-Niger und im Tschadbecken (B.LT) im Osten des Niger. Im Einzelnen sind es die vegetationsfixierten Dünen des Ader-Doutchi-Manga (ADM 05°03'-05°40' E und 14°09'-14°39' N,) sowie des Goulbi (Gl 07°03'-07°15' E und 13°09'-13°20' N) im Iullemeden-Becken und die ebenfalls vegetationsfixierten Dünen in Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E und 13°30'-14°05' N) und im Manga (Mg 11°10' -12°03'E und 13°10'-13°35' N), jeweils im Tschadbecken gelegen. Die mobilen Dünen des Ténéré, die als Referenz dienen, liegen ebenso im Tschadbecken, allerdings in dessen hyperaridem Nordteil.

- Welche Resultate wurden erzielt und was beweisen sie?

Anhand der Geländebefunde wurden die Mechanismen der aktuellen Degradation der Dünen ebenso wie die Prozesse einer Regeneration der degradierten Böden auf diesen Dünen identifiziert. Die Degradation der Dünenlandschaft wird maßgeblich vom Zustand der Vegetation bestimmt, der wiederum von den jahreszeitlichen und interannuellen Variationen des Niederschlags und des Wasservorrats im Dünenkörper abhängt. Im Einzelnen sind dies saisonale und interannuelle Schwankungen des Niederschlags, die verschiedenen Vegetationstypen (Holz- und Krautvegetation, ephemere, annuell oder permanent), das Wurzelsystem in Dichte, Form und Tiefe, die Grundwassertiefe (oberflächennah, mit geringer Tiefe, tief oder sehr tief) und die lokale Geomorphologie, so die unterschiedliche Position in Dünendepressionen und auf Dünenrücken. Neben diesen natürlichen sind es auch anthropogene Faktoren, vor allem in Abhängigkeit von der Zunahme der Bevölkerung und des Viehbesatzes und der daraus resultierenden Übernutzung und der Ausdehnung der Anbaugelände, der Abholzung und der Überweidung.

Generell sind im Sahel die Dünenrücken von einer Gras- und Kraut-reichen Savanne mit einer lichten Baumschicht aus *Acacia albida*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Ziziphus spinachristi*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Boscia senegalensis*, *Acacia nilotica* und *Acacia seyal*. Entlang der Wasserläufe und in den Dünendepressionen ist die Vegetation sehr viel dichter und stabiler: Dünendepressionen tragen dichte Bestände von *Hyphanea thebaica* und *Phoenix dactylifera*, mit einer Krautschicht aus Kompositen.

Im saharischen Bereich wird die Vegetation durch folgende Elemente charakterisiert: Akazien (*A. erhenbergiana*, *A. radiana*, *A. nilotica*), Palmen (*Phoenix dactylifera*, *Hyphanea thebaica*) und Tamarisken. In der Krautschicht sind es Süß- und Sauergräser: *Aristida* spp., *Cyperus conglomeratus*, *Panicum turgidum* sowie *Impérata cylindrica*. Entscheidend aber ist die Verteilung der Pflanzendecke: Hier gelten die beiden Modi « kontrahiert » und « diffus » - limitierender Faktor ist unter diesen hyperariden Klimabedingungen die Wasserverfügbarkeit.

Ausdauernde Vegetation ist deshalb nur in Depressionen oder entlang kurzer Wasserläufe (Koris) zu finden. Allerdings gibt es kurzzeitige Regenfloren (achabs), die weite Gebiete einnehmen können und die wesentlich zur Stabilisierung der mobilen Dünenkörper beitragen können. Der Südrand der Sahara ist von einem schmalen Gürtel der oben genannten Vegetationselemente in diffuser Verbreitung bedeckt und entspricht damit einer Savanne, welche die Dünen sehr wohl stabilisieren kann. Prozesse und Beginn einer solchen Stabilisierung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht.

Die Resultate der Laboranalysen der Oberflächensedimente (Granulometrie, Farbanalyse, Struktur und Mikrostruktur, die mineralogische Zusammensetzung sowie Thermographie und pH-Bestimmung) zeigen eine größere Heterogenität der Oberflächensedimente und intensivere pedogenetische Prozesse bei den Dünen des Iullemeden-Beckens als bei denen des Tschad-Beckens. Letztere sind auch im sahelischen Teil des Tschadbeckens quasihomogen und in ihrer Textur gleichen sie den mobilen Dünen des Ténéré. Der Anteil des Feinmaterials in den Oberflächensedimenten der Dünen des Iullemeden ist sehr viel höher als in denen des Tschadbeckens. Graduelle Farbunterschiede beruhen auf lokalen Faktoren, so Vegetation, Lithologie, und Klima. Struktur und Mikrostruktur folgen dem geologisch-/landschaftsgeschichtlichen strukturellen Aufbau beider Dünenlandschaften. In den Oberflächenlagen der Dünen im Becken von Iullemeden zeigt sich hier ebenfalls eine verstärkte Heterogenität. Die pH-Werte variieren sowohl im lokalen als auch im regionalen Maßstab. So lässt sich ein West-Ost-Wandel und auch ein Nord-Süd-Wandel erkennen. Insgesamt lässt sich eine Zunahme der Basizität mit der Aridität erkennen und umgekehrt eine steigende Azidität mit humideren Bedingungen.

In den Oberflächenlagen aller untersuchten Dünengebiete ist der Gehalt an organischer Substanz sehr gering (< 2%). Dennoch sind die Dünen des Iullemeden etwas reicher an organischer Substanz als die des Tschad-Beckens. Organisches Material mineralisiert sehr rasch in den Dünen. Untersuchungen zur Autochtonität/Allochtonität der Sedimente in den Oberflächenlagen zeigen sowohl einen Nah- als auch Ferneinfluss in den Dünen südlich der Sahara. Die Dünen des Iullemeden zeigen minimale Anzeichen chemischer Verwitterung, die des Tschad Beckens sind fast frei davon. Das zeigt eine sehr geringe Bodenbildung. Chrom (Cr), Kupfer (Cu) und Nickel (Ni) erreichen nach den ETM-Untersuchungen höhere Werte als die Umwelt-Grenzwerte (67/548/CEE): Cr (6,5mg/kg gegen einen Durchschnittswert mehr als 20 mg/kg, der beobachtet ist), Ni (7 mg/kg gegen einen Durchschnittswert mehr als 8 mg/kg) und Cu (9,5 Mg/kg gegen Maximalwerte über 19 mg/kg) es vorschlagen, welches auf ein Belastungsrisiko für die Umwelt und für die Bevölkerung hinweist.

Die Bewertung der Regenerationschancen der Dünen erfolgt auf der Basis mikromorphologischer Untersuchungen der pelliculären Mikroorganisation der Dünen-Oberflächen. Dabei konnten drei Typen unterschieden werden: Biogene Krusten (Typ 1/BC), mineralische Krusten (Type 2/MC) und eine biogen-mineralische Mischform (Typ 3/B-MC).

Diese oberflächlichen Mikroorganisationen bilden pedogene Feinlagen, welche die Oberflächen binden und einen ersten Schritt hin zu Stabilisierung/Regenerierung ermöglichen. Sie ermöglichen darüber hinaus die Besiedlung durch Pflanzen nach Phasen der Degradation. Jedoch können diese Krusten umgekehrt auch zur Degradation beitragen, besonders im Typ 2 /MC, die als Oberflächenkrusten eine pedogene Weiterentwicklung behindern können.

Was nun die landschaftsgeschichtliche Entwicklung dieser Regionen angeht, so gibt der Bohrkern von Guidimouni wertvolle Informationen über die Entwicklung der letzten ca. 100-120 Jahre. Eine Sequenz von 70 cm konnte im Flachwasser erbohrt werden. Stratigraphische, sedimentologische, mikromorphologische und pollenanalytische Untersuchungen ergaben die Persistenz einer offenen mittelsahelischen Savanne, gekennzeichnet durch Acacia, Balanites, Combretaceae, Maerua und Mitragyna neben der Vorherrschaft von Süß- und Sauergräsern. Die Hauptaussage jedoch liegt im massiven Gehalt an Kohlefaltern – neben wenigen Holzkohlen hauptsächlich Graskohlen. Sie stimmen mit der noch heute betriebenen Praxis einer Feldbestellung und Landgewinnung durch Feuer überein. Damit kann diese Sequenz auch als

Erklärungsmodell für viele andere Abfolgen dienen. Der mittlere Abschnitt dieses Kerns zeigt Zeichen einer weitgehenden Austrocknung des Sees, welche der Dürreperiode der 1970-1980 Jahre zugeordnet werden kann. Es zeigte sich darüber hinaus, dass generell auch Flachwassersedimente als Umweltarchive dienen können.

Auf der Grundlage der Schlussfolgerungen sollten sich zukünftige Forschungen um die aktiven Prozesse kümmern, welche den direkten Austausch zwischen den oberflächennahen Partien des Bodens und der Dünensediment und dem unterliegenden sandigen Substrat beeinflussen. Dabei sollte die aktive Rolle der Oberflächenkrusten auf die Bodenbildung stärker berücksichtigt werden, um die Regenerationsmöglichkeiten in degradierten Dünensystemen beurteilen zu können. Besonders wichtig ist dabei die Chronologie stabiler Dünen und junger Sandkörper, die sich aus dem erodierten Material fixierter Dünen gebildet haben. Zum besseren Verständnis der Vegetationsdynamik sollten sich weitere Arbeiten einerseits auf den in situ-Transfer von Wasser und Nährstoffen in den Oberflächenlagen der Dünen konzentrieren und andererseits die Transfer-Mechanismen des Regenwassers im Dünenkörper behandeln. Schließlich erneuern sich aus diesen Vorgängen die Grundwasservorräte, welche für das Überleben der Pflanzendecke auf den Dünen wichtig sind.

Insgesamt soll diese Arbeit zur Diskussion um die aktuelle Situation der sahelischen Dünen beitragen. Durch den Nachweis der immanenten Selbstregeneration in den ersten Schritten kann sie in der Debatte um den Kampf gegen die « Desertifikation » und für den Schutz und die Regeneration degradierter Gebiete hilfreich sein. Somit hat sie ihre Bedeutung vor dem Hintergrund des « pharaonischen » Projekts der « Großen Grünen Mauer » im internationalen Maßstab, da diese Aufforstungsmaßnahme im saharo-sahelischen Übergangsbereich und somit im Bereich der fixierten Dünen erfolgen soll. Ebenso kann sie zur Beurteilung von Erfolgchancen von Projekten in Niger und zu deren wissenschaftlicher Begleitung dienen. Sie zeigt die immer noch bestehende Kapazität der Eigen-Regeneration der Dünen-Ökosysteme – wenn man die zunehmende Nutzung durch den Menschen beherrschen kann. Diese wiegt als Degenrationsfaktor schwerer als die klimatischen Faktoren. Die Prozesse der Eigen-Regeneration durch Krustenbildung können somit eine Sukzession von Boden und Vegetation in den degradierten Dünengebieten initiieren und absichern.

Summary

The current climatic situation and the ecological conditions of the Sahelian zones are the subject of several studies. Actions on an international scale are undertaken in order to reduce the phenomena of lands' degradation and fight against the desertification. Presently, a "Pharaonic" project is introduced by the Sahelian countries for the so-called goal to stop „the desert encroachment " by the construction of a green great wall along the south fringes of Sahara from Mauritania to Djibouti. This " Green Great wall " crosses mainly the domain of the dune landscapes fixed by the vegetation. Actions of regeneration of lands are planned through trees planting and degraded lands recovery. This study would like to contribute to supply some basic elements for the understanding of mechanisms entering in the current dynamics of degradation of dunes, vegetation which is supposed to assure their stability and the processes which can drive their natural regeneration.

However, the dune landscapes which concern this study, were the object of several researches on the palaeo-environments and on the erosion processes as a whole but few or no research at all was performed on the positive impact of these erosion processes, which, anyway should normally occur. Besides, the notion of degradation is appreciated always vaguely and that of the regeneration of the degraded dune landscapes is every time discussed in term of fixing or stabilize them, without understanding how dunes are naturally fixed by the vegetation and the in situ factors. This study would be willing to supply some avenues on the parameters which enter in the processes of natural regeneration of dunes in degraded zones.

- How do the processes of degradation appear in the dune zones and which roles do they play in the processes of regeneration?
- How to measure them?
- Which model can be suggested?

So many questions which can found answers through the vegetation study on the behavior geomorphologic units characteristics, the geochemical, geophysics and micromorphological characteristics of superficial layers of dunes materials.

- Where are they located?

Niger dune landscapes under study are located in the hyperarid zones of the Saharan zones (10 mm / year) and the semi-arid zones of Sahelian zones (> 300 mm / year). These occupy a wide part of the country. They are however, confronted to erosion phenomena of and degradation, the causes of which are at the same time of a natural origin (intense, recurring reduction in the precipitation and the droughts wind activities) and anthropogenic (population growth, cultures lands extension, deforestation, overgrazing). This situation makes these dune landscapes very vulnerable to the dynamics of erosion-degradation among which dunes formerly fixed by the vegetation and the sandy soils are the most affected.

This study intends to contribute to the establishment of a functioning model of the degradation dynamics of dune landscapes. The study is based on the characterization of the vegetation which fixes dunes according to the availability of ground water, and the local geomorphology. It is also based on the geophysics, geochemical and micromorphological characteristics of the superficial layers materials (0-20 cm) dunes fixed by the vegetation. This intended to identify the processes which would participate to the regeneration of the degraded dune soils. Besides, to understand the last environmental modifications having intervened in the Sahelian dune zones these last 100 - 120 years, a core was drilled in the lake of Guidimouni and stratigraphical and pollen analyses of the sedimentary recordings of the lake were made.

Due to the diversity of acting factors, the work is based on multi-scales approach which proceeds to the field observations, samplings and laboratory analyses. The field observations and the samplings of materials are made according to two (2) transects: the West-East for dunes fixed by the vegetation in Sahelian zones and north-south for the dunes mobile located in

Saharan zones. Thus, this transects is made on various dune landscapes of Niger located in two (2) various sedimentary basins: the Basin of Iullemeden (B.IU) and that of the Lake Chad (B.LT). The exactly concerned dune landscapes are fixed dunes by the vegetation of Ader-Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40'E and 14°09'- 14°39'N) and of Goulbi (Gl 07°03'- 07°15'E and 13°09'- 13°20'N) located in the B.IU and those of fixed dunes by the vegetation of Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21'E and 13°30'- 14°05'N), of the Manga (Mg 11°10'-12°03'E-12°03'E and 13°10'-13°35'N) located in the B.LT. Concerning that of Ténéré, considered as reference dune landscape (TEN Ref. 10°34'-10°50'E and 18°22'-18°38'N), is also localized in the B.LT but in hyperarid zones (still mobile dunes).

The results of the field observations allowed to identify useful parameters to understand entering mechanisms in the current dynamics of degradation of dunes and the processes which can contribute to the regeneration of the degraded dune soils. Indeed, the study shows that the degradation of the dune landscapes is intrinsically connected to the state of the plant cover; it is much influenced by the natural factors through the seasonal and interannual variations of rains and humidity in the dune bodies. Factors are the seasonal and inter-annual variations of the regimes the pluviometry (dry seasons and wet seasons, dry and wet years), types of plant cover, the type of roots system (density, shape or depth of implanting), the depth of the groundwater (superficial, little deep, deep or very deep) and the local geomorphology (dune summits or interdune depressions). Except these natural factors, the degradation of the dune landscapes is also influenced by human factors the most important of which are population growth and livestock, the consequences of which are the overexploitation and the extension of farmlands, deforestation and overgrazing. So the plant cover of the studied dune landscapes is more long-lived along the seasonal streams (koris) and in the wet zones. Indeed, the general observations made on the vegetation, shown in the Sahelian part, the dune summits are covered with a Sahelian savanna of *Acacia albida*, *Leptadenia pyrotechnica*, *Tamarindus indica*, *Adansonia digitata*, *Ziziphus spinachristi*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia Senegal*, *Acacia seyal*, *Boscia senegalensis*, *Acacia nilotica*. The interdune depressions are densely covered by *Hyphanea thebaica*, and *Phoenix dactylifera* and with, stratum of composites herbaceous. In the Saharan parts, the vegetation is essentially composed of Acacias trees (*A. Erheinbergiana*, *A. Radiana*, *A. Nilotica*), of palm trees (*Phoenix dactylifera*, *Hyphaena thebaica*) and tamarisks. The herbaceous vegetation is essentially dominated by *Aristida* spp, *Cyperus conglomeratus*, *Panicum turgidum*, *Imperata cylindrica*.

What is important to know about this plant cover it is its extraordinary adaptation to extreme weather conditions (desert) where the water is a limiting factor and also its distribution method which is or "contacted" either "diffuse" in the depressions or along the seasonal and temporary streams (koris). However, there are floral species which push just after a shower of very short duration (achab) and cover big areas and are capable of stabilizing the mobile dunes. The south ends of Sahara are covered by a diffuse band of this genre of vegetable which is very capable of fixing dunes but processes and at the beginning of such stabilization are in study). What is about laboratory analyses?

Concerning analyses of superficial dunes materials made in the laboratory, they concern the grain size spectra (granulometry by mechanic and laser sieving methods), the chromatic spectra (Standard International Munsell), the structure and the microstructure (microscopy), the mineralogy (spectrometry), the state and the evolution of the organic matter (thermogravimetry), the acidity-basicity (pH-meter). The grain size analyses show that the materials of the superficial layers of the dunes of the basin of Iullemeden are more heterogeneous (more intense pedogenetic activities) than those of the basin of the Lake Chad which are quasi-homogeneous and whose textural characteristics are close to those of the mobile reference dunes of Ténéré. The superficial layers of the dunes of the basin of Iullemeden are richer in silt and clay materials than those of the basin of the Lake Chad. The color of materials did not fundamentally change. The structure and the microstructure of the superficial layers of dunes also follow the textural logic observed in the various dune landscapes. The dunes of the basin of

Iullemeden present a structure more heterogeneous than those of the basin of the Lake Chad which, sometimes present of layering features that are characteristic of the mobile dunes of the hyperarid regions. The dunes of the basin of Iullemeden also present traces of geologic influence of the base lateritic (ferruginous and diverse presence of nodules concretions). The study of the pH of the superficial layers of dunes materials, shows a not only local but also regional variation. The more dunes are closed to hyperarid zones the more they have a basic trend and conversely acids. The study of the evolution of the organic matter in the superficial layers of dunes shows a weak organic matter content in the whole dunes of the studied sedimentary basins (2 %). Nevertheless, a relative abundance is observed in the dunes of the basin of Iullemeden with regard to those of the basin of the Lake Chad. The organic matter mineralizes very quickly in these dune zones. The study of the indications of allochthony and autochthony of the sedimentary materials on the surface of dunes shows an external proximal contribution and sometimes distal in minerals and organic substances in dunes located in the South of Sahara. The study of the chemical indications of change of the superficial materials of dunes shows that the dunes of the basin of Iullemeden undergo a very weak chemical change. This one is even less pronounced, even zero in the dunes of the basin of the Lake Chad. This means that they undergo a very pedogenetic low activity. The analysis of the chemical quality of the materials of the superficial layers of dunes, through the analysis of heavy metals (ETM), shows a relatively high environmental risk of pollution because of a content beyond the standards wished in elements Cr, Cu and Ni. The evaluation of the possibility of regeneration of the degraded dunes is led on the basis of the micro-organizations of surface of dunes. So, the micromorphological analysis of these organizations, shows three types of crusts form on the surface of dunes: biogenic crusts type type 1 / BC), mineral crusts type (type 2 / MC) and biogenic and mineral type 3 / B-MC). These micro-organizations of on dunes surface are indeed, capable of evolving in pedological micro-horizons which can regenerate and stabilize degraded dunes. These crusts would also contribute to the installation of the vegetation after a phase of degradation. However, they can also favor the degradation of soils when they are of type 2 / MC.

Concerning the evolution of the dune landscapes, the analyses of the sedimentary deposits of the Guidimouni lake (core of 70 cm) highlighted environmental variations having intervened in the region the last 100 - 120 years. Indeed, the environmental information recorded in these sediments shows through stratigraphy and pollen analyses that an open vegetation of type Sahelian savanna of Acacias, Balanites, Bauhinia, Combretaceae, Maerua and Mitragyna had prevailed. The agrarian practice of slash-and-burn fields remains till nowadays as agricultural usage (clearing by fire). Because, in the whole core, we notice a massive presence of the microscopic charcoal particles. Besides in the central part (party) of the core traces of drying out or of very low water level of the lake was revealed. These would perhaps indicate the droughts years that occurred in 70/80. So, these lake materials can be considered as a functional sedimentary archive and the presence of the charcoal particles in the whole core can also be considered as a reliable element to lead palaeo-environmental investigations and human activity.

At last, from the utilitarian point of view, the conclusions of this work could well serve in the current context of the discussions about the Sahelian dune zones. Especially the combat against desertification, the protection, the regeneration and the recovery of the degraded lands in Sahel. These conclusions could also serve in the International project aiming to construct a «green great wall» along the sahelo-Saharan borders that are essentially dominated by the dune landscapes fixed by the vegetation. So, according to the diverse observations and the analyses of the characteristics in situ sedimentary materials, the obtained results could contribute too to set up forward-looking reflections bases and the scientific monitoring in Niger part of the project. Because this study shows that the dune ecosystems experienced several modifications and exceptional capacities to auto-regenerate without human influences. These (human influences) constitute, indeed, more degrading factors than the natural weather conditions. The

exceptional capacities of crusts of fixing and enriching soils have to be considered because they can maintain soils or vegetation succession on degraded dunes.

Liste des figures et illustrations

Liste des cartes

- Carte n°1: Zone d'étude dans les paysages dunaires Quaternaire du Niger.
 Carte n°2: Variation topographique et model numérique de terrain du Niger.
 Carte n°3: Vue d'ensemble des deux grands bassins sédimentaires où se trouvent les zones étudiées.
 Carte n°4: Limite les bassin sédiemntaires du Niger étudiés.
 Carte n°5: Situation climatique synthétique des zones d'étude.
 Carte n°6: Reconstruction de la vegetation du Nord et de l'Ouest Africain Mi-Holocène (8000BP).
 Carte n°7: Végétation actuelle de l'Afrique Sahélo-Saharienne.
 Carte n°8: Modèle cartographique actuelle de la végétation sahélo-saharienne (Niger).
 Carte n°9: Localisation du lac de Guidimouni et points de prélèvement de la carotte.
 Carte n°10: Extension passée du Sahara.

Liste des croquis

- Croquis n°1: Coupe schématique des principaux dépôts sédimentaires.
 Croquis n°2: Structure sédimentaire verticale des paysages dunaires au Sahel (Est-Niger).
 Croquis n°3: Modèle simplifié des profils verticaux des sols dunaires fixées par la végétation.
 Croquis n°4: Modèle de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par végétation en saison des pluies. I.
 Croquis n°5: Modèle de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par végétation en saison sèche II.
 Croquis n°6: Modèle de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par la végétation en fin de saison sèche. III.
 Croquis n°7: Dynamique saisonnière de la végétation en milieux dunaires (Niger-SE).
 Croquis n°8: Dynamique saisonnière de la végétation herbacée sur les dunes.
 Croquis n°9: Système racinaire et dynamique saisonnière de la végétation ligneuse sur les dunes.
 Croquis n°10: Modèle de la variation saisonnière de la couverture végétale dans les paysages dunaires dégradés.
 Croquis n°11: Etats de la végétation et dégradation des dunes.
 Croquis n°12: Point d'échantillonnage (PE) en fonction de la morphologie générale des paysages dunaires.
 Croquis n°13: Représentation schématique des différences majeures entre les premiers horizons de surface des dunes.
 Croquis n°14: Aperçu synthétique des microstructures des mico-couches superficielles des dunes fixées par la végétation.
 Croquis n°15: Caractéristiques et structures sédimentaires de la carotte de Guidimouni.

Liste des graphiques

- Graphique n°1: Variabilité climatique globale des précipitations dans les régions ouest et centre sahéliennes.
 Graphique n°2: Pulvérisation-homogénéisation des échantillons (granulométrie au laser).
 Graphique n°3: Précision des mesures et calibration des analyses élémentaire ICP-OES.
 Graphique n°4: Exemple de distribution granulométrique suivant la géomorphologie des dunes.
 Graphique n°5: Variations régionales et locales des fractions granulométriques des matériaux dunaires étudiés.
 Graphique n°6: Variation des teneurs en fractions granulométriques très fines de quelques échantillons analysés (<63µm).
 Graphique n°7: Variation spatiale de l'U-Ratio dans les différents paysages dunaires.
 Graphique n°8: Variations locales et régionales du pH dans les couches superficielles des sols dunaires.
 Graphique n°9: Evolution locale et régionale des valeurs moyennes des LOI, TC, TOC et TIC dans les zones étudiées.
 Graphique n°10: Corrélation et variabilité régionale *in situ* de la teneur en LOI, TC, TOC et TIC dans les zones étudiées.
 Graphique n°11: Variabilité spatiale de la teneur en carbonates (%) des matériaux dunaires dans les zones d'étude.
 Graphique n°12: Analyse quantitative du fer total (Fe T) dans les sols et sédiments des couches superficielles.
 Graphique n°13: Variabilité spatiale des indices d'allochtonie-autochtonie du rapport Fe_T/TIC .
 Graphique n°14: Variabilité régionales des indices d'allochtonie-autochtonie du rapport Ti_T/TIC .
 Graphique n°15: Variation du rapport C/N et TOC/TN dans les couches superficielles des dunes étudiées.
 Graphique n°16: Dispersion des valeurs des différents indices d'altération chimique appliqués aux échantillons.
 Graphique n°17: Ecart par rapport à la moyenne et fiabilité statistique des indices d'altérations chimique testés.
 Graphique n°18: Corrélation linéaire du STI de l'ensemble des échantillons analysés.
 Graphique n°19: Corrélation linéaire du CIW de l'ensemble des échantillons analysés.
 Graphique n°20: Corrélation linéaire du CIA de l'ensemble des échantillons analysés..
 Graphique n°21: Variations locales et régionales des teneurs en ETM des couches superficielles des dunes des différents paysages dunaires étudiés
 Graphique n°22: Variation du coefficient de ruissellement et de l'intensité d'érosion en fonction des types d'occupation des sols au Sahel.
 Graphique n°23: Rapport Ca/Mg. potentiel à l'encroutement.
 Graphique n°24: Variation du taux de carbone, d'azote, du phosphore et du potassium dans les matériaux des croûtes biogéniques
 Graphique n°25: Variation du taux de, de silicium et d'aluminium dans les matériaux des croûtes biogéniques.
 Graphique n°26: Diagramme pollinique de la carotte de Guidimouni.

Liste des photos

- Photo n°1: Diaporama illustratif des phénomènes de dégradation des dunes jadis fixées par la végétation au Niger.
 Photo n°2: Activités humaines et dégradation des dunes fixées par la végétation.
 Photo n°3: Variation latitudinale de la végétation Sahélo-saharienne.
 Photo n°4: Couverture végétale saisonnière des dunes selon leur degré de dégradation.
 Photo n°5: Etat de la végétation dans le paysage duanire du Niger SE (11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N).
 Photo n°6: Variation saisonnière de la végétation dans le paysage duanaire du Niger-Centre-W.

- Photo n°7: A: Etat de la végétation sur les sommets dunaires du Damagaram-Mounio.
 Photo n°8: Etat de la végétation du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) en saison sèche.
 Photo n°9: Exemples d' couches superficielles des sols et sédiments dunaires ayant fait l'objet d'étude.
 Photos n°10: Les différents types d'échantillons collectés.
 Photo n°11: Différentes étapes de l'analyse granulométrique au laser des échantillons.
 Photos n°12: Pulvérisation-homogénéisation des échantillons analysés en laboratoire.
 Photo n°13: Dispositif d'analyse ICP/OES.
 Photo n°14: Dispositifs et outils d'analyse RFA.
 Photo n°15: Diffractomètre (RDA).
 Photo n°16: Dispositif de détermination de la matière organique et des carbonates.
 Photo n°17: Dispositif de H.Wolsthoff pour la détermination du carbone inorganique (Carmograph C-16).
 Photo n°18: Préparation des échantillons (en haut) et dispositif d'analyse CNS automatisé (en bas).
 Photo n°19: Dispositif de mesure du potentiel-Hydrogène des échantillons (pH-mètre WTW InoLab 7110).
 Photo n°20: Etapes et dispositif technique pour la réalisation des lames mince des échantillons.
 Photo n°21: Microstructure des matériaux des horizons de surfaces des dunaires des paysages dunaires étudiés.
 Photo n°22: Coupe transversale d'une dune jadis fixée par la végétation mais en dégradation.
 Photo n°23: Exemple de croûtes biogénétiques non dégradées colonisant les surfaces des dunes étudiées.
 Photo n°24: Caractéristiques macroscopiques des matériaux sableux couverts de croûtes biogénétiques non dégradées.
 Photo n°25: Exemple de croûtes dégradées à la surface des dunes.
 Photo n°26: Caractéristiques macroscopique des matériaux sableux sous-jacents des croûtes biogénétiques dégradées.
 Photo n°27: Microstructure des dunes développées sur les plateaux latéritiques de l'Ader-Doutchi-Maggia.
 Photo n°28: Microstructure des dunes du paysage dunaire du Goulbi.
 Photo n°29: Microstructure des dunes du paysage dunaire du Damagaram-Mounio.
 Photo n°30: Microstructure des dunes du paysage dunaire du Manga.
 Photo n°31: Exemple de croûte biogénique (algue bleu-vert) se développant à la surface des dunes.
 Photo n°32: Développement des algues filamenteuses à la surface des épanchements sableux dunaires.
 Photo n°33: Exemples de croûtes biogénétiques non altérées piégeant les particules de poussières.
 Photo n°34: Vue microscopique des deux types algues colonisant les sols sableux du Sahel.
 Photo n°35: Exemple de croûte biogénique type 1.
 Photo n°36: exemple de jeune croûte minérale de type 2 à assemblage GS-fabric.
 Photo n°37: Exemple de croûte de type d'encroûtement d'origine minérale de type 2 à surface des dunes.
 Photo n°38: Exemple de croûte de type 3 présentant une alternance de microcouches biogénétiques et microcouche minérale.
 Photo n°39: Exemples de micro-organisation des croûtes de type 3.
 Photo n°40: Encroûtement et différents facteurs de cimentation des matériaux dunaires.
 Photo n°41: Développement des horizons à la surface des dunes.
 Photo n°42: Exemple de formation de micro-horizon pédologique sur épandage dunaire encroûté dans le paysage dunaire de l'ADM.
 Photo n°43: Couche de type 3 (B-MC). Vue microstructurale des microcouches pédologiques dans les horizons de surface des matériaux dunaire.
 Photos n°44: Végétation secondaire (2) sur un sol dégradé des épandages dunaires.
 Photo n°45: Particules microscopiques de charbon dans les sédiments du lac de Guidimouni.

Liste des schémas

- Schéma n°1: Organisation des échelle d'analyse spatiale de la problématique de dégradation et de régénération des dunes.
 Schéma n°2: Les principales phases sédimentaires ayant intervenues dans les bassins sédimentaires des zones d'étude.
 Schéma n°3: Mosaïque de succession végétale des milieux dunaires sahéliens vers les milieux dunaires sahélo-sahariens.
 Schéma n°4: Modèle simplifié de la répartition et de l'organisation spatiale de la végétation ligneuse dans les paysages dunaires étudiés.
 Schéma n°5: Organigramme schématisé des processus d'encroûtement.

Liste des tableaux

- Tableau n°1: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones du Sud Sahel.
 Tableau n°2: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones du Nord Sahel.
 Tableau n°3: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Ader-D-Maggia.
 Tableau n°4: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Goulbi.
 Tableau n°5: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Damagaram-Mounio.
 Tableau n°6: Caractéristique spécifique des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Manga.
 Tableau n°7: Caractéristiques synthétiques de la végétation et son occupation humaines dans les zones étudiées.
 Tableau n°8: Précision des mesures et calibration des analyses élémentaires ICP-OES.
 Tableau n°9: Tri granulométrique et indice d'homogénéité/hétérogénéité des matériaux dunaire dans les différents paysages dunaires étudiés.
 Tableau n°10: variation locales et régionales des couleurs de quelques matériaux dunaires étudiés.
 Tableau n°11: Variations locales et régionales des valeurs maximale, minimale et moyenne des pH dans les zones étudiées.
 Tableau n°12: Valeurs limites pour l'interprétation des valeurs des indices calculés.
 Tableaux n°13: Variations régionales des indices d'altération chimique appliqués aux sols et sédiments des couches superficielles des dunes étudiées.
 Tableau n°14: Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de l'ADM.
 Tableau n°15: Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire du Gl.
 Tableau n°16: Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de DM.
 Tableau n°17: Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire du Mg.
 Tableau n°18: Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de TEN Réf.
 Tableau n°19: Genèse synthétique des différentes modifications ayant intervenues dans les paysages dunaires.

Plan de la thèse

Le travail est structuré sur 9 chapitres repartis en 5 parties illustrées par 45 photos, 26 graphiques, 10 cartes, 19 tableaux, 15 croquis et 5 schémas et en annexe par 2 photos, 9 graphiques, 1 carte et 2 tableaux. Le travail est résumé après les remerciements. La première partie concerne l'introduction générale et le contexte de l'étude. La deuxième partie traite du cadre général de l'étude. La troisième partie présente les rapports entre la géomorphologie locale, la végétation, le climat, les activités humaines et la dynamique de dégradation des écosystèmes dunaires. La quatrième partie concerne la méthodologie de collecte, d'analyse et de traitement des données effectués en laboratoire. Les résultats des analyses sont présentés dans la cinquième partie dans des chapitres distincts. Sont présentés à la fin du document, la conclusion générale et perspectives de recherche, les références bibliographiques et les annexes.

Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Hauptabschnitte mit insgesamt neun Kapiteln. Sie wird illustriert durch fünfundvierzig Fotos, fünfundzwanzig Graphiken, zehn Karten, neunzehn Tabellen, fünfzehn Skizzen und fünf Schemata sowie durch einen Anhang mit zwei Fotos, neun Graphiken, einer Karte und zwei Tabellen ergänzt. Eine Zusammenfassung der Arbeit erfolgt vor dem ersten Teil. Der erste Teil dient der generellen Einführung und der Einordnung der Dissertation in den wissenschaftlichen Kontext. Der zweite Teil beschreibt die generelle Zielrichtung. Im dritten Teil werden Zusammenhänge zwischen der lokalen Geomorphologie, der Vegetation, dem Klima, der menschlichen Einflussnahme und der Dynamik der Degradation von Dünen-Ökosystemen aufgezeigt. Der vierte Teil befasst sich mit der Methodik der Probennahme und der laboranalytischen Bearbeitung. Die Resultate werden in den Kapiteln des fünften Teiles präsentiert und ausgewertet. Zu Ende der Arbeit folgen eine generelle Schlussfolgerung und Perspektiven für die Forschung, sowie die Bibliographie und der Anhang.

Première partie

1. Introduction générale et contexte de l'étude

1.1. Introduction générale

Pays sahélo-saharien, le Niger a une superficie de 1267000 km² dont 75% de sa partie Nord sont occupés par une vaste zone désertique. Avec une population de plus de 17.000.000 d'habitants, près des ¾ de celle-ci sont concentrées dans le ¼ Sud du territoire où les conditions climatiques et édaphiques sont plus ou moins favorables aux activités agricoles et pastorales desquelles dépendent absolument cette population en majorité rurale (79%). Avec un taux d'accroissement naturel dépassant les 3,5% l'an, divers problèmes de disponibilité, d'usages et de gestion des ressources naturelles se posent (INS 2013). Cette situation s'est compliquée surtout après les dernières sécheresses des années 1970 et 1980 qui ont occasionné une forte réduction de la couverture végétale et conduit notamment à une dégradation des écosystèmes des milieux dunaires jadis fixés par la végétation (MONOD 1973). Cette dynamique est accentuée par la pression démographique sur les ressources naturelles illustrée par la réduction des périodes de jachère, l'utilisation croissante des terres marginales, le déboisement et le surpâturage (INS 2013). De ce fait, les terres de cultures posent une problématique complexe aux dimensions à la fois socio-économiques et environnementales. Tous ces phénomènes interactifs, ont des incidences pédo-écologiques et sociales bien constatées (HERMANN 2009 et 2007, CASENAVE & VALENTIN 1990 et 1998, AMBOUTA 1994).

Les phénomènes de dégradation dunaire sont observables partout au Niger. Ils le sont particulièrement dans les régions du Damagaram-Mounio (Gouré) et du Manga (Mainé Soroa) où l'évolution actuelle des paysages dunaires laisse croire que d'importants changements écologiques sont en cours. Les phénomènes de dégradation des dunes y sont très remarquables par la formation de nouvelles dunes mobiles (photo n°1), l'ensablement des terres de cultures, la baisse voire même la disparition totale du couvert végétal protecteur contre l'érosion et d'autre part le maintien de leur stabilité. Certains relient cette situation non seulement aux modifications climatiques naturelles, mais surtout aux actions abusives de l'homme sur le milieu naturel. **Quelle définition alors donner aux phénomènes de dégradation dans ces régions, si celle-ci est mue par une dynamique binomiale nature-homme?**

Selon la FAO (2015), au sens général du terme, le phénomène de dégradation des dunes est « un changement dans l'état de santé du sol qui entraîne une diminution de la capacité de l'écosystème à fournir des biens et services pour ses bénéficiaires » En outre, elle assimile aussi ce phénomène de dégradation dans les milieux dunaires, au phénomène de désertification qui, est considéré comme une « dégradation des terres dans les zones arides » et / ou un « changement irréversible de la terre jusqu'à un point tel qu'elle ne peut plus être récupérée pour son usage originel ». Cependant, cette vision globale du concept de dégradation des sols ou de désertification ne s'attarde pas sur les caractéristiques spécifiques locales et *in situ* des sols dans les milieux dits dégradés. Elle ne prend pas non plus en compte, les capacités de résilience des paysages dunaires en terme de régénération des sols. **Comment le concept de dégradation est-il perçu dans le cadre de cette étude ?**

La dégradation est toujours liée au processus normal de sédimentation qui est caractérisé par des phases successives d'érosion-transport-dépôt **qui, influencent positivement ou négativement le développement des sols**. Mais ce processus de dégradation normale des dunes est spécifique à chaque région. Pour le cas des sols sableux dunaires (objets de cette étude), le concept de dégradation est perçu suivant l'interaction de plusieurs facteurs et les indicateurs directement ou indirectement observables dont:

- les variations interannuelles et saisonnières de la pluviométrie (pluie irrégulière),
- la réduction du couvert végétal qui favorise à son tour une dégradation facile et accélérée des dunes,
- la baisse du niveau de la nappe phréatique qui assure la survie de la végétation ligneuse pendant la saison sèche,
- la constante remobilisation des dunes par les phénomènes d'érosion éolienne (déflation, ensablement) et parfois hydrique (ravinement, ensablement),
- le départ des particules fines (argiles et limons) considérés comme un facteur de perte de la fertilité des sols et en aval de leur rendement potentiel,

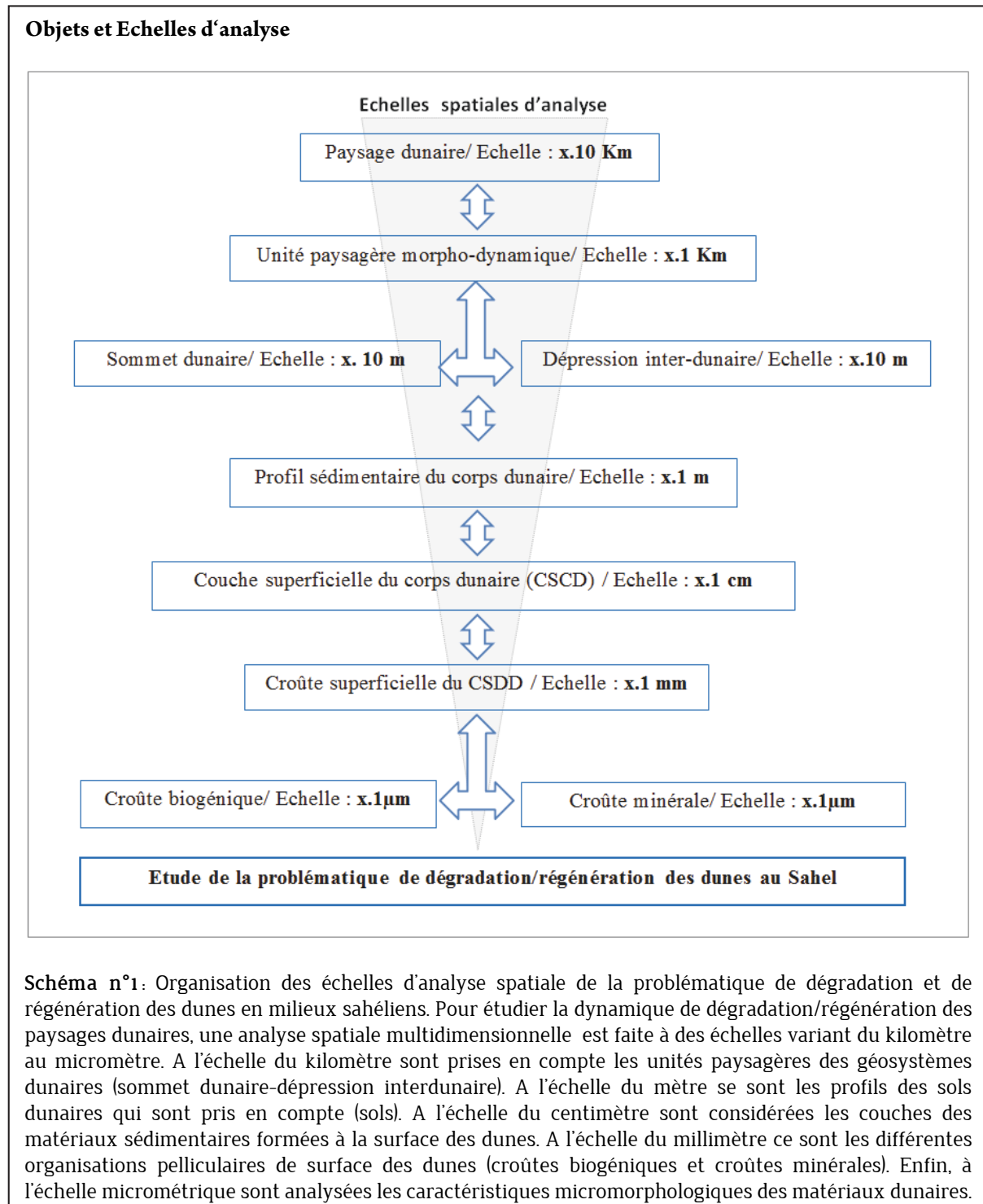


Photo n°1: Diaporama illustratif des phénomènes de dégradation des dunes jadis fixées par la végétation au Niger. Dans les paysages dunaires du Damagaram Mounio situés entre $09^{\circ}20'-10^{\circ}21'$ E et $13^{\circ}30'-14^{\circ}05'$ N (B, C et D) et dans les paysages dunaires du Manga situé entre $11^{\circ}10' -12^{\circ}03'E$ et $13^{\circ}10' -13^{\circ}35'$ N : (A, E, F et G). Sur les différentes images (A à G) on distingue nettement de nouvelles dunes mobiles qui se forment sur les sols dunaires. Des reliques de végétation sont encore visibles sur les parties non encore ensevelies par les nouveaux édifices sableux dunaires meubles.

- l'intensification des activités humaines telles l'agriculture, l'élevage, le déboisement,
- la réduction voire la perte de capacité de charge des sols.

1.2. Questions générales de recherche

Pour estimer les phénomènes de dégradation-régénération des paysages dunaires, une étude multiscalaire a été faite. Elle est menée à l'échelle des paysages à travers la dynamique de la végétation sur les unités géomorphologiques caractéristiques des paysages dunaires (système dunes-dépressions interdunaires) et à l'échelle des matériaux des couches superficielles des sols



dunaires (schéma n°1). Les questionnements suivants vont servir de guides pour la compréhension des paramètres entrant en jeu dans la dynamique de dégradation et de régénération des paysages dunaires du Niger.

- Quels impacts peuvent avoir les différents facteurs de dégradation sur le développement actuel et la capacité de résilience et de régénération des paysages dunaires ?
- Comment se présentent les processus de régénération des dunes dégradées ?
- Quels sont les impacts des changements saisonniers (saison des pluies, saison sèche) sur les dunes fixées par la végétation ?
- Comment la végétation fixe-t-elle les dunes ?
- Quelles sont les caractéristiques particulières des couches superficielles des sols sur dunes ?
- Quels sont les processus visibles et favorables à la régénération des dunes dégradées ?
- Comment la régénération des paysages dunaires est-elle possible dans les conditions naturelles ?
- Comment ont évolué les milieux dunaires au cours de leur histoire récente ?

Le schéma n°1 suivant définit synthétiquement les objets et les échelles horizontales d'analyse permettant de tenter de répondre aux différentes questions posées.

1.3. Motivations et point sur les recherches antérieures

Au regard de la place qu'occupent les paysages dunaires dans les espaces agro-pastoraux au Niger, cette étude voudrait apporter sa contribution scientifique relative à la question de régénération et/ou de régénération des sols dunaires dans le contexte actuel de dégradation et de « désertification ». Les investigations sur cette problématique des paysages dunaires sont motivées d'une part, par les « vides » scientifiques sur la dynamique de régénération des sols sableux dunaires dégradés, leur comportement et leur capacité d'adaptation aux modifications des conditions climatiques et environnementales.

D'autres parts, l'inspiration émane de la multitude de travaux de recherche sur les milieux hyperarides sahariens ; particulièrement sur les sédiments paléo-lacustres, la paléo-végétation et les paléo-sols qui sont présentés comme témoins de passés plus humides de ces milieux actuellement désertiques. Ces travaux de recherche ont été surtout menés sur les sédiments paléo-lacustres (BRAUNECK 2010, BAUMHAUER et al 2009), la paléo-végétation (QUEZEL 1965 ; MONOD 1958 ; SCHULZ 2009, 1988 ET 1981), les paléosols (FELIX-HENNINGSSEN 2009, VÖLKELE 1989) , sur les dunes actives et les dunes fixées (IBRAHIM 2009, MAINGUET 1996 et 1991), sur les plateaux dégradés et les changements des états de surface des sols et érosions diverses (HERRMANN 2009 et 2000 ; AMBOUTA 1996 ; CASNAVE & VALENTIN 1998, 1990 et 1989, OUSSEINI 1987), sur les croûtes minérales et biologiques (MALAM ABDOU 2014, MALAM ISSA 2009, HAHN & KOUSSEROW 1998) . Tous ces travaux ont ouvert d'importantes pistes de recherche qui ont mis en exergue l'édaphologie des écosystèmes, les états de surface des sols et de la végétation, les dynamiques érosives et l'évolution des paysages et des milieux écologiques de la période Holocène à la période actuelle. Ils ont ainsi, fourni des indicateurs pédologiques et sédimentologiques très pertinents sur les changements écologiques des milieux actuellement arides et hyperarides. Ces résultats ont servi de points de repères très importants pour mieux mener cette étude.

Ainsi, en s'appuyant sur ces diverses études des sédiments des sebkhas, de paléosols et dunes en milieux sahariens et sahéliens, les investigations menées ici tentent de tisser un fil conducteur à une meilleure connaissance des comportements *in situ* des processus actuels de l'évolution des dunes en milieux sahéliens. Notamment des dunes anciennement fixées par la végétation sur lesquelles nos recherches ont été centrées.

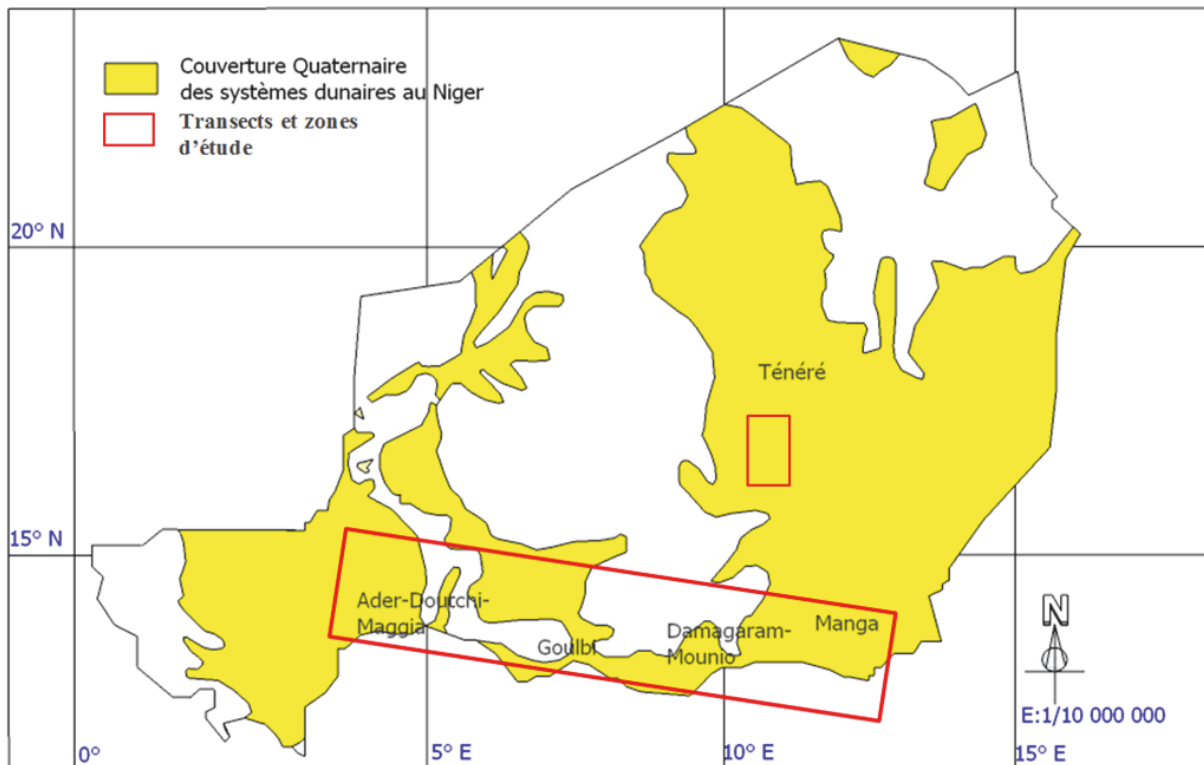
D'autre part, de nombreuses investigations paléo-environnementales ont été réalisées au cours de ces dernières années sur les paysages lacustres des milieux arides et semi-arides. La majorité de ces recherches concernent les zones du Lac Tchad, du Fleuve Niger, de l'Air, du Djado, du Manguéni et du Kaouar. Ces recherches sont pour la plupart centrées sur l'évolution des sédiments lacustres et paléo-lacustres, dans le but de reconstituer pour comprendre les principales variations environnementales intervenues au cours de la période Holocène à la celle actuelle. Elles ont été menées précisément dans des systèmes de sebkhas et cuvettes dans des lacs salés, des lacs d'eau douce et des mares (BRAUNECK 2010 ; BAUMHAUER. et al 2009 ; ABICHOU 2009 et 2002; SCHULZ et al 2002 ; SALZMANN & WALLER 1998; THIEMEYER 1992; HUBERT, CARBONNEL & CHAOUCHE 1989 ; ROGNON 1989 ; OUSSEINI 1987; SERVANT 1983 ; PASTOURET et al., 1978; SERVANT et al., 1973). Les sebkhas et les cuvettes, qui sont les plus étudiées, sont dans de nombreux cas, le produit de l'évolution des lacs d'eau douce des zones jadis semi-arides. Leurs sédiments constituent dans ce cas, des archives très particulières qui enregistrent les apports sédimentaires d'origines hydriques et/ou éoliennes. Les travaux des différents auteurs cités plus haut ont ouvert ainsi des pistes de recherche sur l'évolution des paysages et environnements morpho-pédologiques au Niger. Ils offrent un capital de résultats scientifiques pouvant éclairer les recherches sur l'évolution des environnements et les processus morpho-pédologiques actuels au Sahel, en relation avec l'évolution du climat, les activités humaines et leurs conséquences sur la pédogénèse.

Sur un autre plan, les discussions actuelles sur les changements des états de surface des sols et la régénération des écosystèmes sahéliens (HERRMANN et al. 2009 ; POMEL 2008 ; HAHN & KOUSSEROW 1998 ; AMBOUTA 1996 ; CASENAVE & VALENTIN 1989 et 1990) ont provoqué des questionnements sur l'évolution actuelle des paysages dunaires au Niger. Ces auteurs ont en effet, souvent abordé les processus de dégradation et régénération des écosystèmes et surtout de néoformation des sols superficiels à travers des mesures et observations de terrains. Au Niger particulièrement, la question de dégradation ou de régénération des sols est d'actualité. Cependant, les études sont peu diversifiées sur cette question. Les travaux de recherche relatifs aux sols du Niger sont pour la plupart orientés vers la fertilité, l'érosion et les actions de récupération et de protection. D'autres sont centrés surtout sur l'évolution du climat, de la végétation et des ressources en eau (DESCROIX 2007 ; ALI et al. 2005 ; DAI et al., 2004 ; CHAPPELL & AGNEW 2004 ; OZER & ERPICUM 2003 et 1995, OZER et al. 2003 ; OUSSEINI 2002; L'HOTE et al. 2002 ; AMBOUTA 1996 ; BENDER et al. 1991). En revanche, ils le sont moins sur l'évolution de ces sols et les interactions possibles avec celle du climat, de la végétation et des activités anthropiques.

Concernant cette étude, les activités de recherche sont orientées sur l'état de la végétation actuelle des dunes et sur l'évolution des matériaux des couches superficielles des sols entre 0 et 20 cm. Elle vise à identifier et comprendre les changements ou fluctuations morphogénétiques *in situ* qui se produisent à la surface des différentes unités paysagères des paysages dunaires. A cet effet, des observations et des séries d'échantillonnages sont réalisés sur cinq (5) principaux paysages dunaires des régions sahélo-sahariennes du Niger. Ce sont :

- 1) le paysage dunaire sahélien fixé sur les plateaux latéritiques de l'Ader- Douchi-Maggia (ADM, 05°03' à 05°40' E et 14°09' à 14°39' N),
- 2) le paysage dunaire sahélien fixé du Goulbi (Gl, 07°03' à 07°15' E et 13°09' à 13°20' N),
- 3) le paysage dunaire sahélien fixé du Damagaram-Mounio (DM, 09°20' à 10°21' E et 13°30' à 14°05' N),
- 4) le paysage dunaire sahélien fixé du Manga (Mg, 11°10' à 12°03' E et 13°10' à 13°35' N),
- 5) et le paysage dunaire saharien de référence vif du Ténéré (TEN : Réf., 10°34' à 10°50' E et 18°22' à 18°38' N).

Ces paysages sont choisis suivant deux transects orientés Est-Ouest dans les régions sahéliennes et Nord-Sud dans la région saharienne de référence (carte n°1).



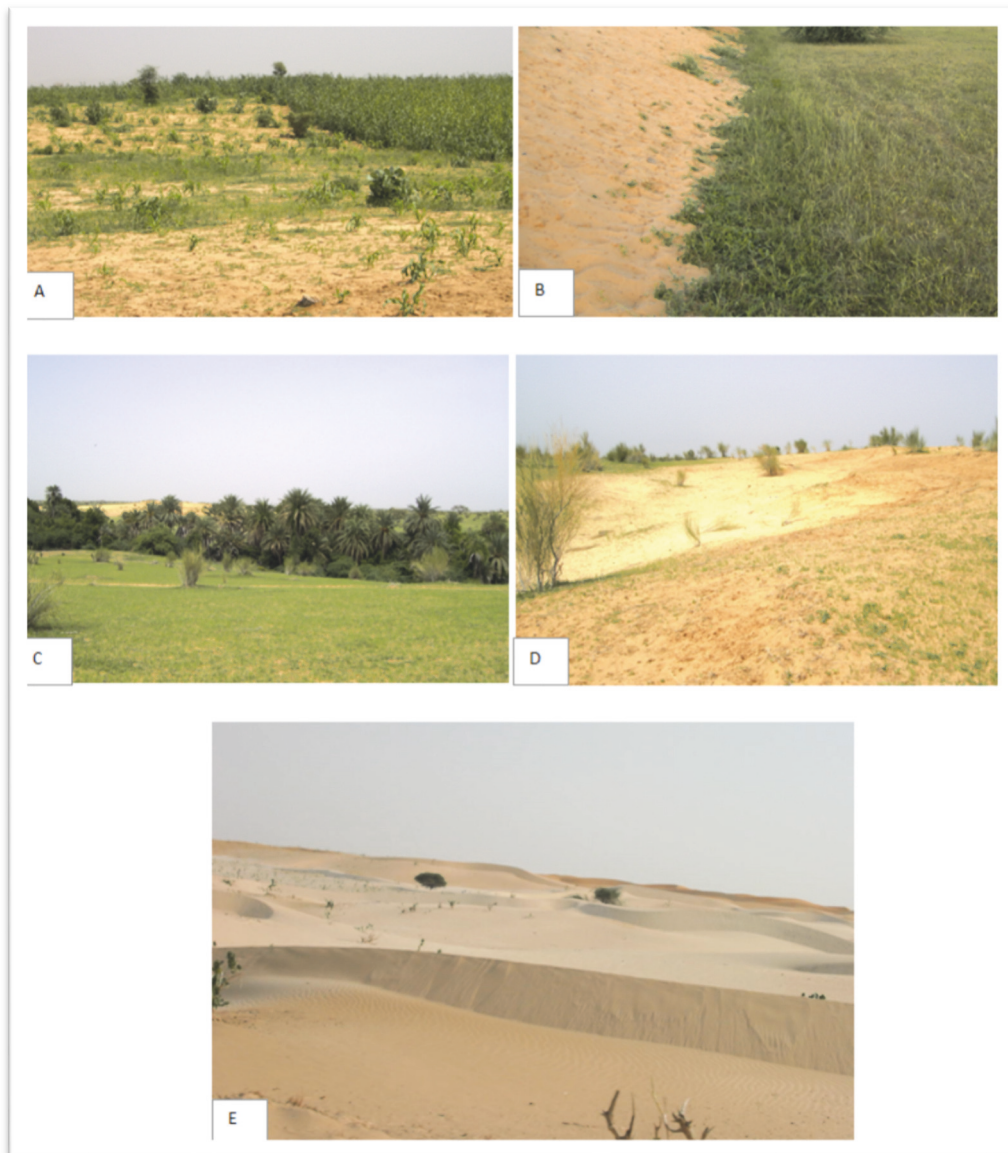
Carte n°1 : Zones d'études dans les paysages dunaires Quaternaires du Niger/Basées de données : Carte Géologique et Principaux Minéraux de l'Afrique (BRGM 2004).

1.4. Contexte actuel des milieux dunaires au Niger

Le Sahel connaît une surexploitation des terroirs du fait d'une forte croissance démographique sur des sols fragiles et peu fertiles. En outre, dans ces milieux, les sols se dégradent, s'encroûtent et provoquent un accroissement des ruissellements des eaux de pluies et des débits des cours d'eau, malgré la pluviosité généralement déficitaire (AMOGU et al., 2010 ; ALBERGEL 1987; DESCROIX et al., 2009). Au Niger, entre les isohyètes 300 et 500 mm, les sols dunaires sont exposés aux mêmes problèmes dont les plus actuels sont : la perte de fertilité, l'érosion par l'eau et/ou le vent et bien entendu les activités humaines diverses qui souvent, aggravent d'avantage les effets des agents naturels d'érosion. Ainsi, dans les zones étudiées, on assiste à **des changements écologiques dont les effets observables sont de nouveaux jeunes édifices dunaires qui se forment sur des dunes anciennement fixées par la végétation**. En effet, les sommets dunaires s'érodent, les sédiments sont remaniés et forment des buttes sableuses (photos n°2B, 2D et 2E). En dehors des sommets dunaires, les phénomènes érosifs sont aussi observables dans les cuvettes interdunaires sur les sols à texture limoneuse parfois argileuse. Dans ces parties, les signes de dégradation se constatent par le « comblement » de ces cuvettes par des apports massifs de sables provenant soit directement des sommets les surplombant ou par apports distaux de matériaux transportés le plus souvent par le vent et/ou par les eaux de ruissellement. Certaines activités humaines telles que l'élevage, l'agriculture jouent aussi un rôle catalyseur non moins négligeable dans ces processus érosifs.

En effet, la perte des terres arables et de la fertilité des sols est une problématique majeure au Sahel (HERRMANN 2000, TODERI 1991, DUDAL 1982 in BASSO et al 2002). Au Niger, le phénomène érosif des formations dunaires s'observe dans presque l'ensemble du pays (photo n°2). Cette problématique de **dégradation est particulièrement accentuée dans les paysages dunaires qui sont des écosystèmes très fragiles, en raison du caractère sableux et faiblement cohérent de leurs sols dunaires mais surtout en raison de la faible couverture**

végétale protectrice. Quels sont alors les signes caractéristiques de la dégradation des paysages dunaires ?

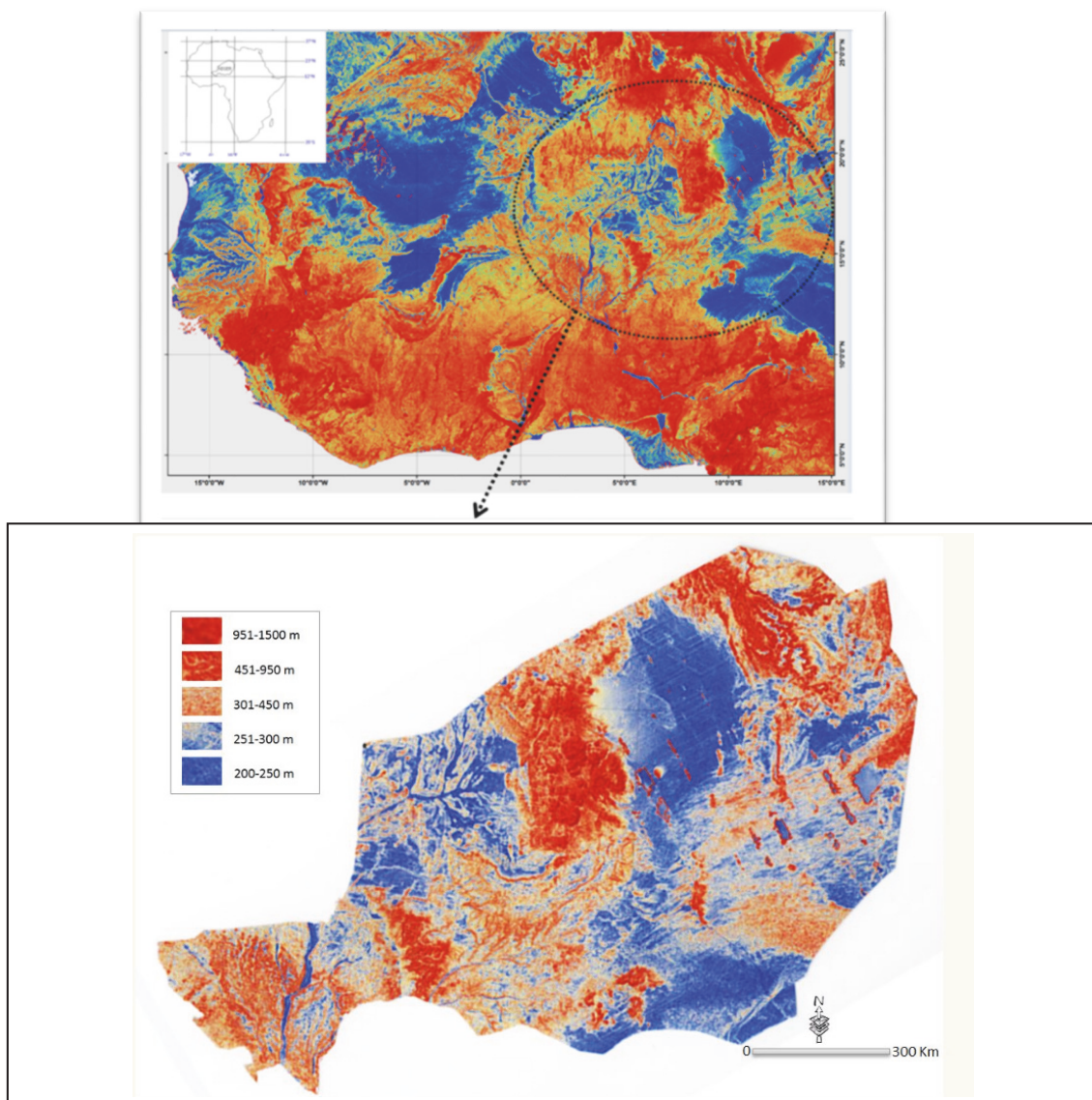


Photos (diaporama) n°2 : Activités humaines et dégradation des dunes fixées par la végétation. A : champ cultivé sur les sommets dunaires dans un terroir villageois du paysage dunaire du Damagaram- Mounio ($09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$). Les techniques de culture utilisées (défrichage et labour à la hilaire) expose les dunes à la déflation éolienne pendant la saison sèche car la végétation naturelle des ligneux (*Acacias*, *Calotropus procera* et de *Leptadenia pyrotechnica* qui protègent les dunes est détruite pour avoir assez d'espace cultivable (champ de mil) et la végétation herbacée (principalement *Cenchrus biflorus*) quant à elle est totalement rasée pour éviter qu'elle concurrence les cultures. Les espaces claires sur la photo témoignent de l'ampleur de cet impact humain. B : phénomène d'ensablement dans les paysages dunaires par des jeunes édifices de remobilisation. Cette photo montre le front d'une dune récemment dégradée envahissant une dépression interdunaire en saison des pluies ($DM09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$). C : phénomène de dégradation des dunes dans les paysages dunaires du Damagaram-Mounio ($DM 09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$). En arrière plan d'une dépression interdunaire un sommet dunaire dégradé (en jaune clair). D : dégradation des dunes dans les paysages dunaires du Damagaram-Mounio $DM 09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$. Caoudeyre sur un sommet dunaire. Dans les parties dégradées, on observe une très faible couverture végétale très peu de végétation poussent dans les parties érodées (Jaune clair). Les parties non encore érodées sont couvertes de végétation herbacée et principalement d'arbustes (*Leptadenia pyrotechnica*). E : paysages dunaires très dégradés dans le Manga ($Mg 11^{\circ}10' - 12^{\circ}03' E$ et $13^{\circ}10' - 13^{\circ}35' N$). On remarque sur la photo que des arbres verts sont noyés par des sables récemment remobilisés. En effet, la végétation est détruite par ensevelissement par des jeunes édifices dunaires issus de la remobilisation des matériaux des dunes dégradées.

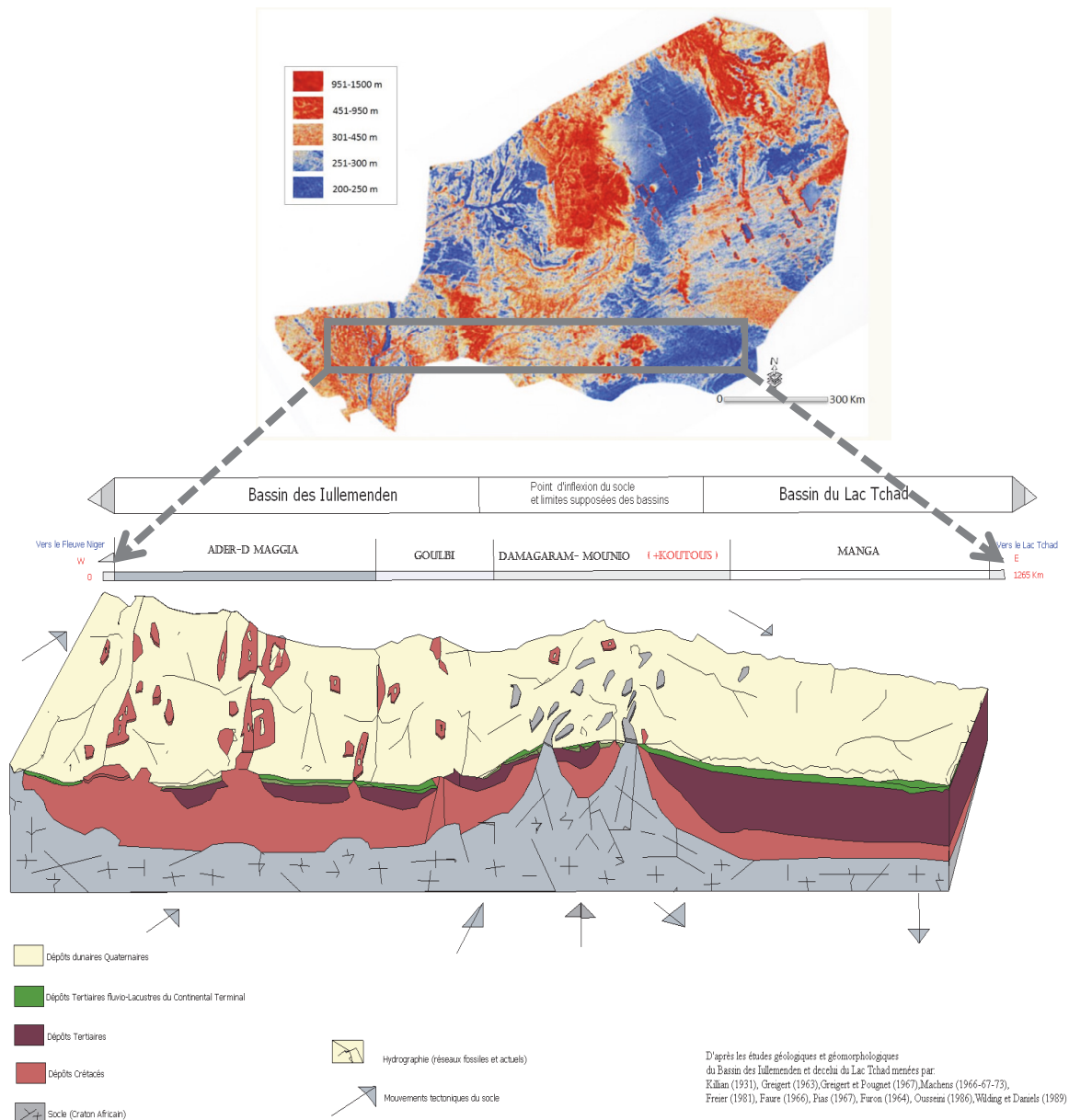
2. Cadre général de l'étude

2.1. Localisation des zones d'étude

Les zones étudiées sont choisies entre les latitudes 13°/ 18°N et les longitudes 5°/12°E dans 2 principaux bassins sédimentaires : le bassin sédimentaire des Iullemenden (paysages dunaires de l'Ader-Doutchi-Maggia et du Goulbi) et le bassin sédimentaire du Lac Tchad (paysages dunaires du Damagaram-Mounio, du Manga et le paysage dunaire de référence du Ténééré (cartes n°2, n°3, n°4 et croquis n° 1).



Carte n°2 : Carte altimétrique du Niger : Variation topographique et model numérique de terrain du Niger Les variantes de couleurs en bleues représentent des altitudes comprises entre 250 et 300 m et les variantes de couleurs rouge à orange des altitudes comprises entre 301 et plus de 1500 m. Les couleurs bleues représentent les zones les plus basses du Pays. (Carte établie à partir des images SRTM de l'USGS ,2004).



Croquis n°1: Coupe schématique et synthétique des principaux dépôts sédimentaires caractéristiques des deux bassins sédimentaires comprenant les zones étudiées.

2.2. Caractéristiques spécifique des bassins sédimentaires des Iullemeden et du Lac Tchad

2.2.1. Le Bassin des Iullemeden

Situé entre 1°-8° E et 10°-21° N, le bassin des Iullemeden couvre de larges parties centre nord et de l'Ouest du Niger. Il occupe aussi le sud de l'Algérie et de faibles portions du Mali, du Benin et du Nigéria (carte n°3 et n°4). Il s'étend en effet, du Nord au Sud sur 1100 Km et 800Km d'Est en Ouest (DIDIER & SAINT-ARMAND 1969). La partie nigérienne de ce dernier concerne cette étude. Dans son ensemble, ce grand bassin a connu plusieurs phases de remplissage marins et une alternance des phases humides et arides au cours de son histoire sédimentaire (BERGOEING & DORTHE-MONACHON 1997 ; SPONHOLZ 1989 ; VÖLKELE 1989 ; OUSSEINI 1986 ; LEPRUNT 1979 ; GREIGERT & PUGNET 1967 ; GAVAUD 1966).

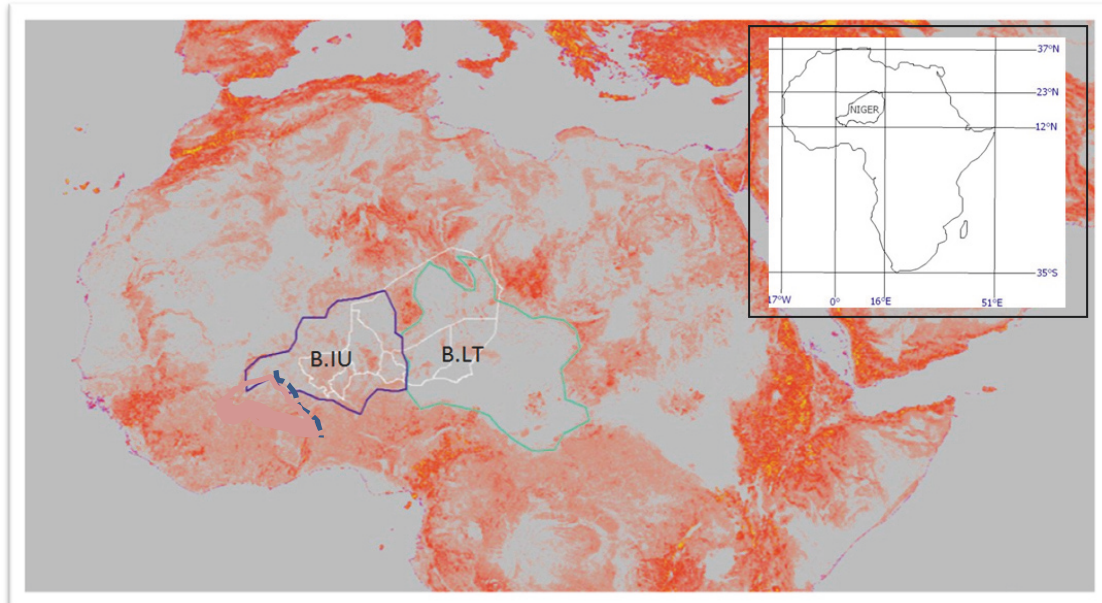
Selon des études géologiques réalisées par GREIGERT (1963) l'histoire géologique du bassin des Iullemenden remonte à la période Paléozoïque, pendant laquelle un golf l'aurait envahi et rempli ses limites Nord, au Sud des massifs de l'Air et des Ifforas et serait couvert des dépôts jusqu'à ses limites sud. Toujours selon GREIGERT (1963), pendant les périodes Mésozoïque et Tertiaire, suite au recul du Bouclier Ouest Africain, le bassin a ensuite connu des phases successives de transgressions marines qui l'on comblé mais faiblement dans sa partie Sud où les séries présentent un caractère continental. En effet, la forme actuelle du bassin des Iullemenden selon GREIGERT & POUGET (1967), est née des suites de soulèvements successifs ayant commencé au début de la période Eocène Moyen. Ce qui a par la suite, occasionné une autre dynamique sédimentaire caractérisée par son comblement par des séries continentales fluvio-lacustre sous forme d'un grand delta intérieur (la présence des oolithes ferrugineuses dans ces séries sédimentaires selon GREIGERT & POUGET (1967) caractérise cette phase. Et les conditions climatiques tropicales humides régnant pendant cette phase sédimentaire, ont occasionné l'altération ferrallitique des dépôts mis en place et en conséquence une accumulation résiduelle des oxydes de fer (Leprunt (1979). Selon BERGOEING & DORTHE-MONACHON (1997) ; VICAT et al (1994) ; SPONHOLZ (1989) ; OUSSEINI (1986) ; MAINGUE (1977) et GAVAUD (1966), des fluctuations climatiques arides de la période Pléistocène ont complètement modifiées ses dépôts sédimentaires. Des phases arides consécutives ont provoqué à leur tour « l'induration et le scellage » des surfaces riches en fer des dépôts des phases humides tropicales antérieures (ce qui est à l'origine des terrasses et plateaux cuirassés actuels). Et aussi assiste t- on à des dépôts dunaires pendant ces périodes arides. Toujours selon ces mêmes auteurs, ces surfaces de dépôts sédimentaires indurés et/ou couvert de sables éoliens (« transgressions dunaires ») des phases arides, sont ensuite « retravaillées » par les réseaux fluviaux des phases humides consécutives (toujours Pléistocène) et ont permis la configuration et les caractéristiques géomorphologiques actuelles caractérisant l'ensemble du bassin : un réseau de plateaux indurés entaillés par des vallées dans lesquelles actuellement, à la suite des pluies saisonnières coulent périodiquement des cours d'eau plus ou moins grands (maggia, koris et ravins). Sur les plateaux et le long de leurs escarpements subsistent encore des formations dunaires anciennes plus ou moins remaniées par les eaux de ruissèlement des pluies, par les vents et les activités humaines. Ce sont ces formations sédimentaires dunaires actuellement observables sur les plateaux, dans les vallées, les chenaux d'écoulement, les cônes de déjection et dans les lacs et mares actuels, qui, sont l'objet de ce travail de recherche.

2.2.2. Bassin du Lac Tchad

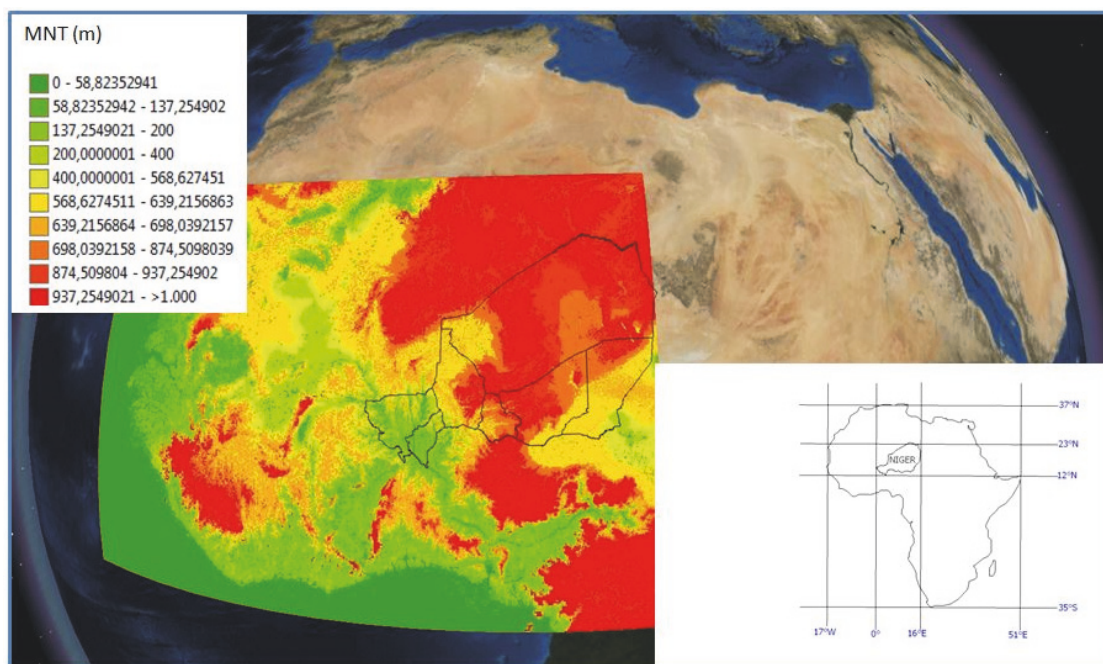
Situé entre 8°-24° E et 6°-24° N, le bassin du Lac Tchad quant à lui, couvre la moitié du Niger, presque l'ensemble du Tchad, la partie Sud- Est de l'Algérie, une petite portion Sud de la Lybie, une partie Nord-Est du Nigéria, Nord du Cameroun, Nord de la Centre Afrique et Ouest du Soudan (carte n°3 et n°4). De multiples travaux des auteurs et institutions de recherche sur la reconnaissance géologique du bassin du Lac Tchad dans les années 1952-53 ont permis d'établir les premières cartes de synthèse géologique au 1/2000000 (travaux de GERARD 1953, WACREMIER 1953, VINCENT 1952). Par la suite dans les années 1960-70, des travaux hydrogéologiques ont aidé à établir des cartes au 1/500000 (BONNET 1995 ; WOLFF & SCHNEIDER 1992 ; DURANT & MATHIEU 1979 ; SERVANT & MALEY 1973 ; LOUIS 1970 ; PIAS 1970 ; FAO & PNUD 1967-73 ; ORSTOM 1965 ; BRGM 1962). Ces études ont statué sur les conditions de sédimentation et hydrologie dans le bassin.

Ainsi, le bassin du Lac Tchad (bassin dit synéclyse) est né de l'affaissement du socle précambrien (LOUIS 1970). Le fossé ainsi créé est par la suite comblé (pendant les périodes Jurassique supérieur-Crétacé inférieur) par des séries sédimentaires continentales essentiellement fluvio-lacustres. Ces formations sédimentaires ont en effet connues des phases de transgressions lacustres pendant les phases humides (avec dépôts sédimentaires fins) et des phases de transgression dunaires éoliennes lors des phases arides (avec des dépôts de sables

dunaires). Selon LOUIS (1970), ces successions de dépôts tant en phases humides qu'en phases arides ont provoqué la subsidence du bassin (tectonique). Ainsi, de la période Crétacé à la période Quaternaire, les dépôts sédimentaires nés des fluctuations ou alternances des phases climatiques humides et arides ont eu pour conséquence la mise en place des dépôts évoluant entre un pôle sableux fluviatiles ou éoliens ou bien de sables purs et un pôle argileux de néoformation ou d'argile kaolinique. Ce sont ces dépôts éoliens qui concernent cette étude.



Carte n° 3: Vue d'ensemble des deux grands bassins sédimentaires. Les paysages dunaires de l'Ader Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N) et du Goulbi (Gl 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N) sont localisés dans le Bassin des Iullemenden (B.I.U). les paysages dunaires du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N), du Manga (Mg 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N) et de la zone de référence saharienne du Ténéré (TEN Réf. 10°34'-10°50' E et 18°22'-18°38' N) sont localisés dans le Bassin du Lac Tchad (B.L.T). (Etablie sur la base des images SRTM de l'USGS, 2004).



Carte n° 4: Limites des bassin sédimentaires du Niger élaboré à partir de 10 classes altimétriques du MNT (modèle numérique de terrain). Sources : BD/ USGS, 2004).

2.3. Matériaux géologiques de base des zones d'ergs étudiées

Selon GREGERT & POUGET (1967) ; KING (1967) ; FURON (1964) se référant à KILIAN (1931) : trois (3) principaux ensembles sédimentaires d'âges géologiques variés caractérisent les deux bassins sédimentaires dans lesquels se trouvent les zones étudiées. Les formations dunaires Quaternaires reposent sur ces ensembles qui sont : le Continental Terminal, le Continental Intercalaire et le Continental de Base (schéma n°2 ci-dessous). Toutes ces séries présentent des accumulations ferrugineuses mais surtout sont très riches en kaolinite, argile issue des processus de ferrillitisation sous climat Intertropical très humide (MILLET 1964). Selon KING (1967) deux grandes séries sidérolithiques caractérisent ces dépôts gréseux: les séries sidérolithiques Africain I (début Tertiaire) et Africain II (fin Tertiaire). Celles-ci sont caractérisées par une sédimentation entrecroisée de sables contenant des lentilles d'argile kaolinique et des concrétions ferrugineuses.

Mais ce sont surtout les affleurements plus récents du Continental Terminal (schéma n°2) qui influencent les sols actuels (DIDIER & SAINT- ARMAN 1969). En effet, dans les cuirasses formées au cours des processus pédologiques on note la présence d'oolithes d'origine géologique. Dans les sols, la migration du fer en profondeur a occasionné la cimentation des oolithes qui sont très stables. Selon KILIAN (1931), KING (1967), les différentes séries sédimentaires continentales du Continental Terminal (Numulitique/Néogène) sur lesquelles reposent les dunes actuelles sont largement répandues en Afrique et particulièrement au Niger. Dans les paysages dunaires étudiés, les dépôts dunaires Quaternaires sont mis en place sur soit les Continental Terminal (CT) ou sur le Continental Intercalaire (CI). Ce dernier est plus remarquable dans le bassin du Lac Tchad à l'Est ; alors que dans le bassin des Iullemeden le CT est dominant. Selon Didier & Saint-Arman (1969), l'érosion et le remaniement des séries CT/CI ont beaucoup influencé les sols dunaires et les conditions de pédogenèse actuelle. En effet, le soulèvement du bassin des Iullemeden puis l'abaissement de celui du Lac Tchad pendant la période Tertiaire a favorisé l'attaque par l'érosion de ces différents dépôts continentaux.

Dunes quaternaire	Séries dunaires (Pléistocène- Holocène)
Continental Terminal (CT)	Remaniement Néogène du grès Crétacé (Tertiaire)
	Série marine 2 (Secondaire)
Continental Intercalaire (CI)	Grès de Nubie (Secondaire)
	Série marine 1 (Primaire)
Continental de base (CB)	Grès Cambro-Ordovicien (Primaire)

Schéma n°2 : Les principales phases sédimentaires ayant intervenues dans les bassins sédimentaires des Iullemeden et du Lac Tchad avant la mise en place Quaternaire des paysages dunaires dans les zones d'étude. D'après GREGERT & POUGET (1967) ; KING (1967) ; FURON (1964) GREIGERT (1963); KILIAN (1931).

2.4. Héritages sédimentaires et pédologiques immédiats des sols dunaires étudiés

D'après GAVAUD (1967) les caractéristiques générale des sols sableux à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest proviennent du fait qu'ils sont principalement développés sur des Ergs récents constitués de 95% de fractions granulométriques $> 50 \mu\text{m}$ et sur des ergs anciens constitués à 85% de fractions granulométriques $> 50 \mu\text{m}$ et de sable argileux dominés à 61% par les fractions granulométriques $> 50 \mu\text{m}$. Ainsi, ces sols dunaires sont dans leur grande majorité de type sols brun-rouge et sols ferrugineux tropicaux non ou peu évolués. Ils présentent des horizons A, B et C et sont très pauvres en matière organique qui est bien minéralisée, leur pH est bas et leur rapport carbone total et azote total (C/N) varie très peu. Selon toujours cet auteur, les sols dunaires au Niger sont spécifiquement influencés par l'histoire géologique et climatique et ont majoritairement un caractère polygénique. Ils sont tantôt développés sur un matériel originel sableux ou sur un matériel non différencié dont des cuirasses ferrugineuses ou aluminiques. Cet auteur a différencié trois principales grandes familles de sols spécifiques aux paysages dunaires. Celles-ci dépendent fortement de la topographie locale et sont:

- les sols ferrugineux tropicaux aux horizons A,B et C différenciés. L'horizon B est généralement textural. Ils sont sableux en surface, de couleur terne (ferralitiques), très riche en argile kaolinique et à faible capacité d'échange cationique (CEC).
- Les sols tropicaux brun-rouges (châtains) subarides et arides qui sont formés sur des sédiments meubles et sur des cuirasses. De couleur généralement brune, ils sont plus riches en minéraux altérables que les sols ferrugineux tropicaux
- Et les sols hydromorphes ou sols jeunes d'apport que l'on trouve dans les dépressions. Leur texture est sableuse en surface.

Ces types de sols présentent une pédogenèse variée et des remaniements multiples. Ceci fait qu'il est aussi généralement très difficile de distinguer les pédogenèses actuelles des anciennes surtout si on intègre aussi les modifications climatiques, les conditions locales de drainage, d'apports divers et de migrations possibles dans les profils.

2.5. Caractéristiques générales actuelles des sols des milieux dunaires

D'après les travaux de FELIX-HENNINGSSEN (2010) et VÖLKE (1989), dans les zones étudiées, les sols dunaires sont principalement dépendants de la topographie locale (couple sommets dunaires-dépressions interdunaires). Ils appartiennent dans leur grande majorité au groupe des sols brun-rouge subarides et lithosols. Les sols développés dans les massifs dunaires fixés par la végétation présentent presque les mêmes caractéristiques de profils du point de vue structural. Ils ont cependant chacun des variantes dues aux multiples remaniements qu'ils subissent à cause des phénomènes érosifs d'origines variées. Les horizons A des sols dunaires sont dans la plupart des cas constamment remaniés (FELIX-HENNINGSSEN 2009 et VÖLKE 1989). Ces différentes caractéristiques des sols dunaires sahéliens sont résumées dans les tableaux n°3, n°4, n°5 et n°6. Mais les dunes de référence du Ténéré qui sont mobiles et constituées uniquement de sables meubles, constamment remaniés, ne sont pas représentées ici. Cependant les paléosols de leur zone de localisation présentent presque les mêmes caractéristiques verticales que les profils des sols dunaires sahéliens (croquis n°3 et tableau n°1 et n°2)

Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière Organique (%)	Autre
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-20	Bv Ah	7.5YR 6/6	Non consolidé	<10	> 50	> 40	< 5	-	> 7	-	-	> 0,4	Litière, racines récente, excréments secs, terriers, bioturbation
20-65	Bv1	7.5YR56	Consolidé	> 15	> 45	> 35	< 5	-	< 5	-	-	0,3	Lézardes de dessiccation, peu de racines sub-récente,
65-110	Bv2	7.5YR 5/6	Consolidé	>20	> 45	>30	< 5	-	> 5	-	-	< 0,2	Racines sub-récentes
110-150	Bv3	5YR 6/8	Consolidé	< 20	< 45	< 30	< 5	-	< 5	-	-	< 0,1	Peu de racines
150-200	BvC1	5YR 6/6	Consolidé	< 25	<50	> 30	< 5	-	> 5	-	-	-	Peu de racines, faible lessivage,
200-240	BvC2 Cv	5YR 6/6	Consolidé	< 20	>45	>30	<5	-	> 6	-	-	-	Litage centimétrique
240-300	BvC2 Cv	5YR 6/6	Consolidé	>15	>50	<35	<2	-	> 6	-	-	-	Litage centimétrique

Tableau n°1 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones du Sud Sahel : (Chromi-Cambic-Arenosol ; d'après FELIX-HENNINGSEN 2009)

Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière organique (%)	Autre
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-20	f Ah	-	Peu consolidé	> 10	> 30	> 50	< 10	-	< 8	-	-	> 0,4	racines terriers, bioturbation
20-65	fBv1	-	Consolidé	> 15	> 25	> 45	> 10	-	>7,5	-	-	0,3	Peu de racines
65-110	fBv2	-	Consolidé	< 15	< 25	>45	< 15	-	> 7,5	-	-	< 0,2	Très peu de racines,
110-150	fBv3	-	Consolidé	< 15	< 20	>45	> 15	-	>7,5	-	-	< 0,1	-
150-195	fBvC	-	Consolidé	< 10	< 30	> 50	> 10	-	> 7,5	-	-	-	Discontinuité
195-220	iIC1	-	Consolidé	< 10	<25	>50	>15	-	> 7,5	-	-	-	-

Tableau n°2 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones du Nord Sahel (Paléosol TEN.Réf. d'après FELIX-HENNINGSEN 2009)

Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière Organique (%)	Autre
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-20	Al	7.5YR 5/8	Cohérente	> 5 - 10	> 40	> 45	< 5	-	> 7	-	0,1	0,4	tronqué
20-80	Bv	7.5 YR 6/8	Cohérente	5 - <10	> 40	> 45	< 5	-	< 7	-	0,1	0,3	
80-100	IC	7.5YR 7/8	Cohérente	>15	25	>50	>10	Grès	6,5	-	0,1	< 0,2	Remaniement du sable dunaire
120-140	IIIC	7.5YR 7/6	Cohérente	>15	25	>50	>10	Grès	6	-	0,1	< 0,1	Croûte ferrugineuse

Tableau n° 3 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Ader-D-Maggia (d'après VÖLKELE 1989)

Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière organique (%)	Autres
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-10	Ah	7.5YR 6/4	Cohérente	15	25	55	5	-	4,5	-	0,1	0,4	Racines, sable dunaire peu consolidé
10-30	Al	5 YR 5/6	Cohérente	15	25	< 55	> 5	-	> 5	-	0,1	> 0,3	Racines,
30-100	Bt	2.5YR 8/6	Cohérente	>25	> 15	> 55	5	-	> 4	-	0,1	> 0,3	Remaniement du sable dunaire
100-180	ICv	2.5YR 6/8	Cohérente	>15	< 50	35	< 5	-	< 4	-	0,5	< 0,1	Riche en Fe (d) > 1%

Tableau n° 4 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Goulbi (d'après VÖLKELE 1989)

Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière Organique (%)	Autre
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-25	Ah	7.5YR 5/4	Cohérente, homogène	> 5	> 40	> 45	< 5	-	> 7	-	0,1	0,3	Racines, terriers,
25-100	Bv	5 YR 5/8	Friable, homogène	> 7	> 40	> 45	< 5	-	< 7	-	0,1	0,3	Racines, bioturbation
100-160	Cv	5YR 6/8	Cohérente		25	>50	>10	Grès	6,5	-	0,1	< 0,2	

Tableau n° 5 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Damagaram-Mounio (d'après VÖLKELE 1989)

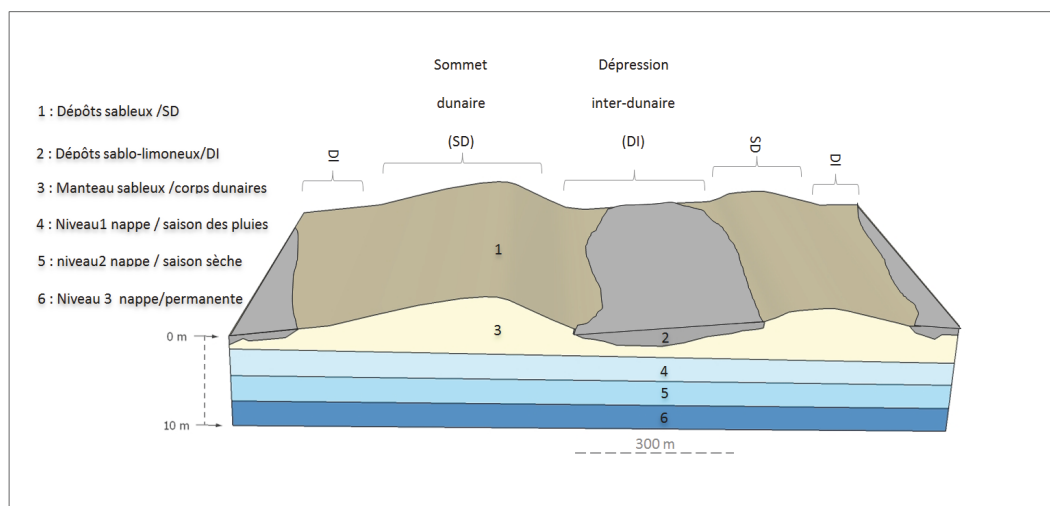
Prof. (cm)	Horizon	Couleur	Structure	Texture(%)					pH	Carbonates (%)	Sel (%)	Matière Organique (%)	Autre
				Argile & Limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers	Squellette					
0-20	Ah	7.5YR 5/6	Cohérente, lamellaire		> 75	> 45	< 5	-	> 7	-	-	0,4	Sable dunaire remanié meuble, Litage partie
20-40	Bv	-	consolidée	-	-	-	-	-	-	-	-	-	consolidée, racines, fissure verticale, bioturbation
40-140	C	7.5YR 8/4	Cohérente, lamellaire		< 80	> 45	< 5	-	< 7	-	-	0,3	Litage, racines, pas de fissures verticales, bioturbation

Tableau n° 6 : Caractéristiques spécifiques des profils verticaux des sols dunaires des zones d'étude/ Manga (d'après VÖLKELE 1989)

Synthétiquement, les tableaux concernant les Régions du Damagaram-Mounio et du Manga montrent que les dunes localisées dans ces paysages sont très pauvres en argiles et limons (parfois nul) du fait d'une intense mobilisation éolienne alors que les dunes localisées dans les paysages dunaires du Goulbi et de l'Ader-Doutchi-Maggia présentent une tendance au lessivage entre les horizons A et B.

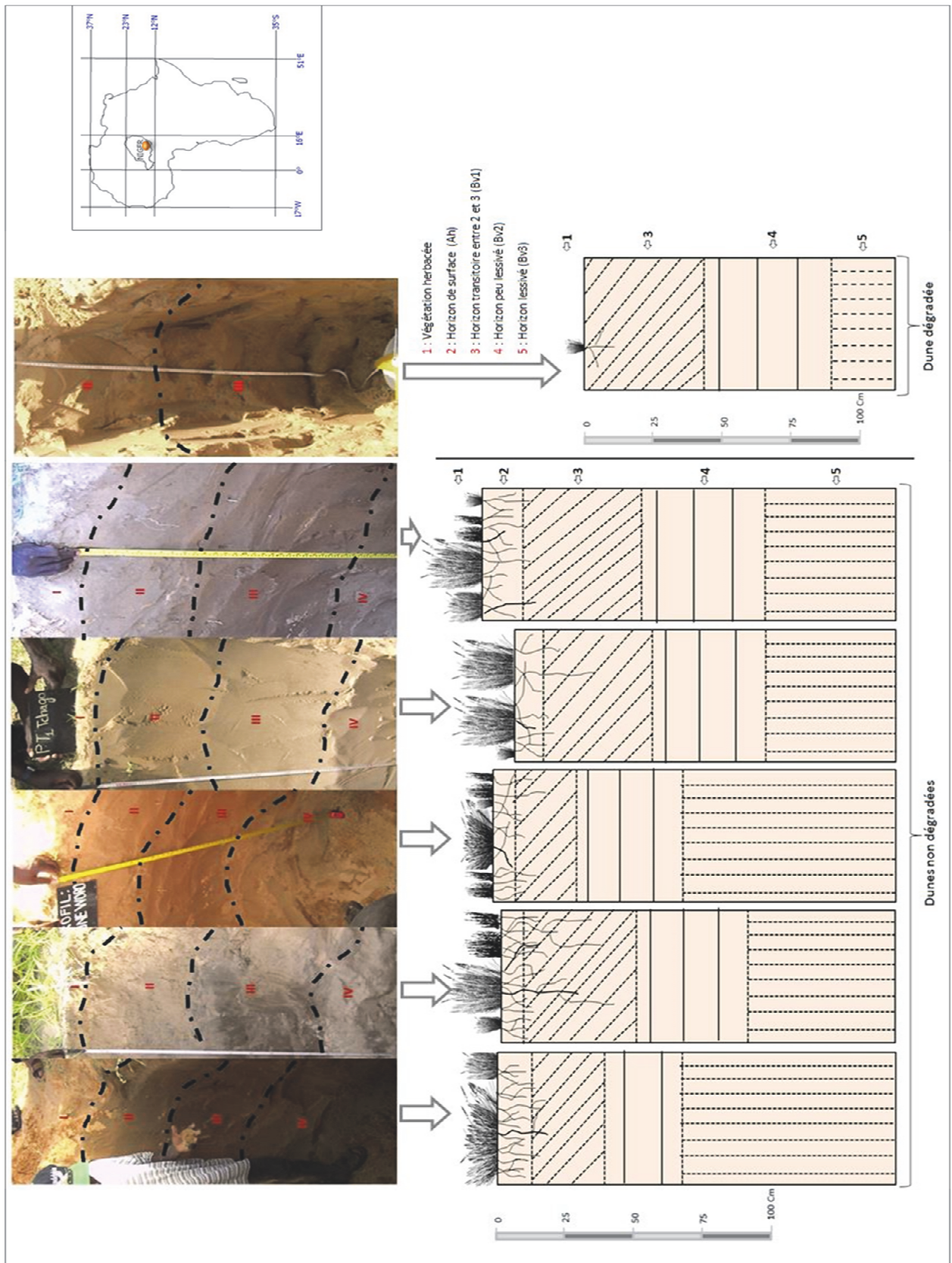
2.6. Les caractéristiques géomorphologiques et profils des édifices dunaires

La répartition de ces sols et leurs caractéristiques spécifiques obéissent aussi à la topographie locale. Au Sahel comme dans le Sahara, les dunes sont organisées en général en des ensembles dunaires relativement homogènes appelés ergs. L'erg est selon MAINGUET ET CALLOT (1978) une « concentration étendue d'édifices sableux, de formes homogènes ou non, jointifs ou juxtaposés, selon des degrés divers d'organisation ». C'est de ce fait un désert de sable, produit final de l'érosion des reliefs, constitué par un ensemble étendu de dunes sans cesse remodelées par le vent. Dans les régions sahéennes où la pluviométrie est relativement abondante, les ergs sont fixés par la végétation. Dans les régions sahariennes et plus sèches, par contre ceux-ci sont vifs et sont en perpétuel remaniement du fait de l'absence de la végétation pour les fixer mais aussi de la fréquence et régularité des vents. En général, la morphologie des ergs est caractérisée par une succession des dunes de formes variables. Néanmoins elles présentent en général chacune, deux unités géomorphologiques majeures : un sommet dunaire et une dépression inter-dunaire dont les caractéristiques sédimentaires sont très variables et fortement influencées par la configuration de la topographie (croquis n°2). Les profils des sols, particulièrement des sommets dunaires sont de texture essentiellement sableuse. Le manteau sableux constituant le corps dunaire est généralement « stabilisé » par les systèmes racinaires de la végétation. La densité de la couverture végétale et du réseau racinaire (surtout de la végétation herbacée) dépend du degré de dégradation des dunes (croquis n°1).



Croquis n°2. Structure sédimentaire verticale des paysages dunaires au Sahel (Est-Niger).

1 : A la surface, les sommets dunaires (SD) sont couverts de dépôts essentiellement sableux qui sont généralement couverts et fixés par la végétation herbacée et quelques rares ligneux hauts si ceux-ci trouvent des conditions d'humidité favorables. 2 : dans les dépressions inter-dunaires (DI) par contre, les dépôts sédimentaires sont généralement limoneux-argileux (à faciès parfois d'hydromorphie). La végétation ligneuse y est pour la plupart concentrée en raison de la proximité de la nappe phréatique. 3 : le manteau sableux dunaire est généralement lessivé car c'est une zone de transit des eaux de pluie qui rechargent progressivement la nappe phréatique (4, 5 et 6) dont les niveaux varient en fonction de l'importance de la précipitation en saison pluvieuse et au cours de l'année.



Croquis n°3 : Modèle simplifié des profils verticaux des sols dunaires fixés par la végétation. (A) dunes non ou moins dégradées et (B) dunes dégradées. Les niveaux 2 (Ah) et 3 (Bv1) constituent les parties objets de cette étude (0-20 cm).

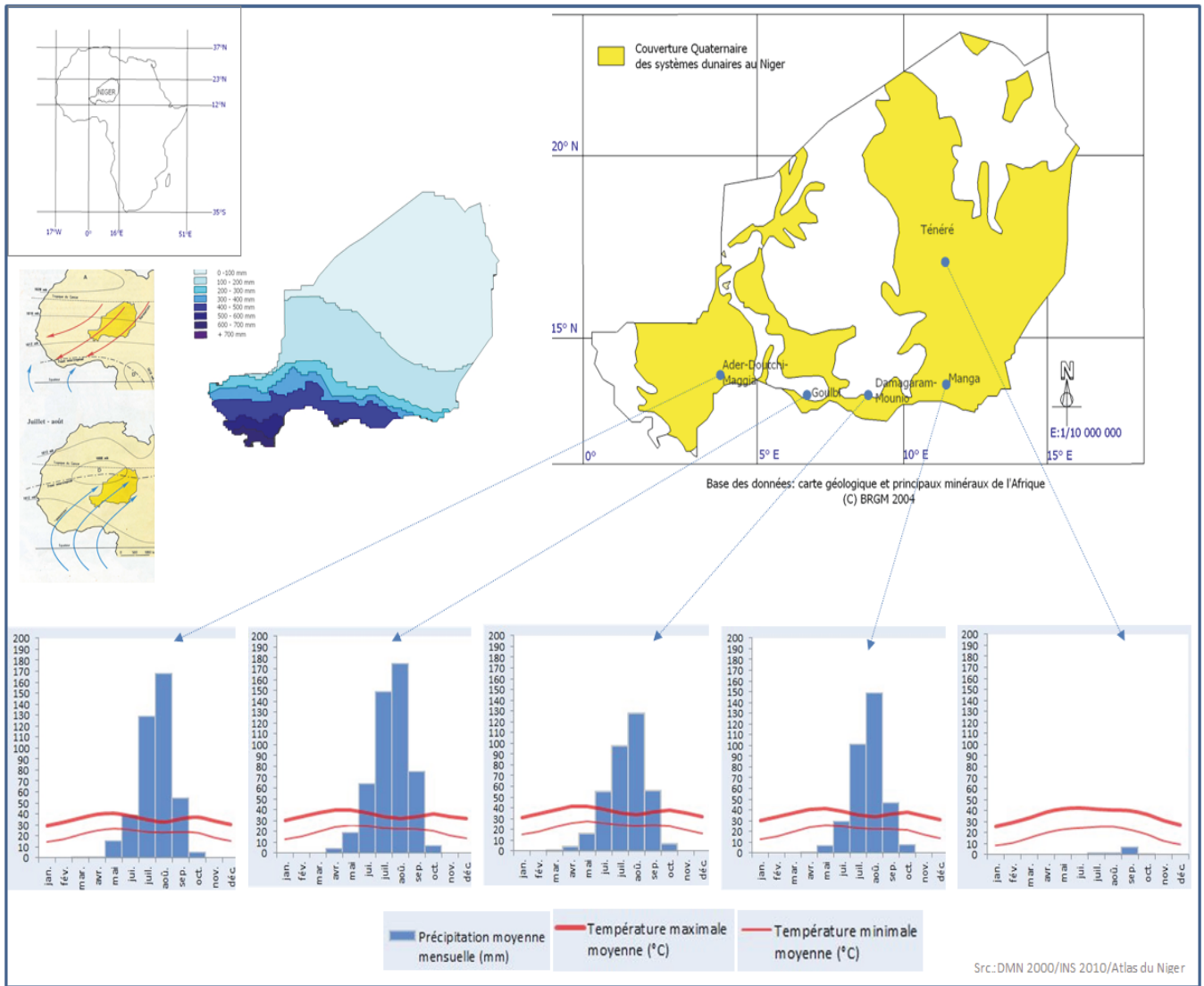
2.7. Influences climatique et humaine sur les paysages dunaires

La situation climatique des zones d'étude est caractérisée par des précipitations intenses mais irrégulières et de courte période de pluie (3 à 4 mois) et une longue saison sèche (8 à 9 mois). Les moyennes pluviométriques annuelles sont comprises entre 300 et 500 mm, les températures moyennes maximales dépassent parfois les 40°C et les moyennes minimales comprises entre 20 et 30 °C. L'évapotranspiration est très élevée (1500-2000 mm /an). Les vents dominants sont l'Harmattan orienté du NE vers le SW en saison sèche et la Mousson orientée du SW vers le NE en saison des pluies (carte n°5, graphique n°1).

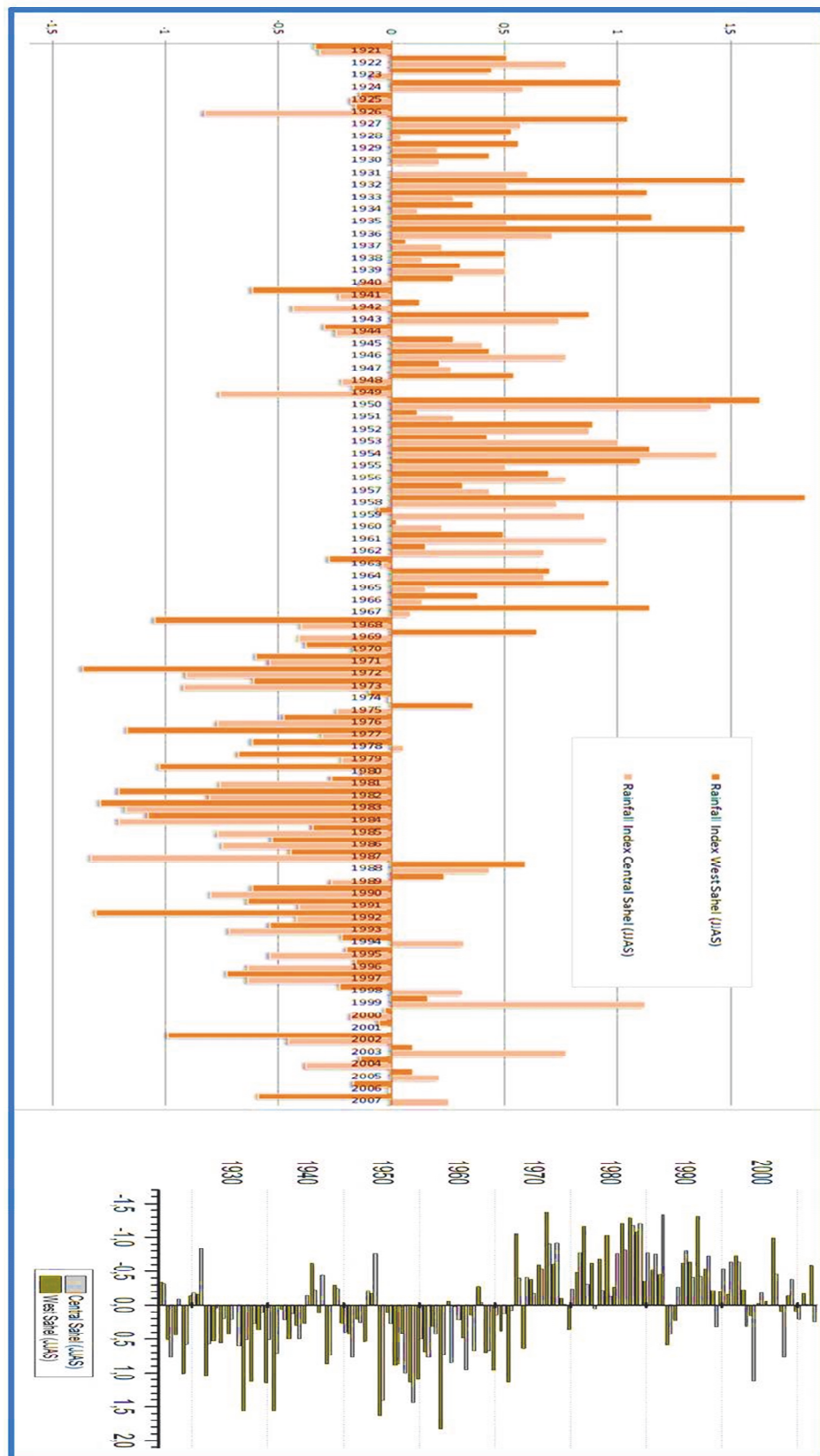
2.7.1. Influences climatiques : variations saisonnières et interannuelles

Les influences du climat sur les milieux dunaires sont multiples. D'une part, il y a des périodes de sécheresses marquées par des baisses drastiques de la pluviométrie. Pendant ces périodes il y a une perte de la couverture végétale et une hausse de la déflation éolienne qui contribuent à la dégradation des dunes fixées. Les conséquences sont la remobilisation et le remaniement des sédiments et matériaux dunaires qui sont réédifiés en de nouvelles dunes. D'autre part, il y a des périodes de hausse relative des pluies qui alternent avec celles sèches pendant lesquelles les dunes sont « stabilisées » et « refixées » par la végétation saisonnière qui s'y développe suite aux apports d'humidité qui l'entretiennent. Au cours des périodes pluvieuses les dunes peuvent subir aussi localement de fortes érosions hydriques par décapation, ravinement ou sapement des dunes fixées. Par ailleurs ces variations saisonnières et interannuelles des régimes des pluies caractéristiques des zones sahélo-sahariennes favorisent le développement des croûtes suite à l'alternance saison sèche et saison humide. On observe ainsi la formation de croûtes minérales, biogéniques ou la combinaison des deux. Ces processus d'encroûtement jouent des rôles parfois paradoxaux et influencent favorablement (régénération) ou négativement (dégradation) les processus dynamique des sols développés sur les dunes. Ce travail de recherche se focalise principalement sur les impacts positifs possibles des phénomènes d'encroûtement sur la régénération des sols dunaires dégradés.

Ainsi, pendant toutes les saisons de l'année, les milieux dunaires restent exposés aux érosions éoliennes et hydriques. En effet, comme toutes les régions du Sahel, la zone concernée par cette étude est caractérisée par une courte saison de pluie et une longue saison sèche : soit, trois (3) à quatre (4) mois de saison irrégulière de pluie (de juin à septembre) et huit (8) à neuf (9) de saison sèche (octobre à mai). Les vents soufflent pendant toute l'année. En saison des pluies c'est la Mousson qui domine et les vents les plus forts sont observés pendant cette période. Ce sont les vents liés aux lignes de grains générant localement les orages qui accompagnent les précipitations. Pendant la saison sèche, le vent dominant est l'Harmattan. Il souffle le plus fortement entre les mois de décembre et février.



Carte n°5: Situation climatique synthétique des zones.



Graphique n°1: Variabilité climatique globale des précipitations dans les régions ouest et centre sahéniennes. Les indices d'anomalie pluviométrique montrent les différentes fluctuations climatique (périodes sècheresse et périodes humides) intervenues en zone sahénienne entre 1921 et 2007. (d'après Fink et al. , 2010).

2.7.2. Influences de l'occupation humaine : usage et vulnérabilité des paysages dunaires

L'occupation humaine joue un grand rôle dans la dégradation des milieux dunaires qui sont déjà fragilisés par les facteurs climatiques analysés ci-dessus. Ces influences humaines sont surtout liées à l'accroissement de la population qui conduit à une extension des espaces agro-pastoraux et l'usage massif des ressources végétales comme source d'énergie notamment. Mais il faut noter que cette extension de l'occupation est aussi une forme d'adaptation des populations locales (très pauvres) aux changements des conditions climatiques et socio-économiques. Elle se caractérise par une surexploitation des terres (agricoles et pastorales), par de nouvelles friches soit par brûlis et par abattage d'espèces adaptées tels *Leptadenia pyrotechnica* et *Hyphaene thebaica* qui colonisent respectivement les sommets des dunes et les dépressions interdunaires. L'importance du cheptel favorise ainsi le surpâturage de la végétation herbacée annuelle qui prolifère en saison pluvieuse. Les piétinements des animaux favorisent aussi la dégradation de ces dunes qui, en saison sèche, étant sans couverture végétale protectrice, sont d'avantage exposées à la déflation éolienne (IBRAHIM 2009, IBRAHIM 2005, OZER 2000). Cette dynamique d'occupation des terres s'accompagne aussi d'une réduction et dans certains sites d'un manque total de la mise en jachère qui, était une technique séculaire de régénération et de gestion de la fertilité des sols.

2.8. Usages des paysages dunaires

Les formes d'usage agricole ou pastoral des sols dans les régions arides et semi-arides en général et dans la zone sahélienne en particulier sont fonction du gradient pluviométrique. A l'Est et au Sud-Est de la zone étudiée, respectivement dans les paysages dunaires du Manga et du Damagaram-Mounio, les sols dunaires sont utilisés à des fins pastorales et agro-pastorales. Dans ces deux régions, les activités agricoles sont entreprises essentiellement dans les dépressions interdunaires ou dans les vallées. Mais depuis les sécheresses des années 70 et 80, on assiste à des changements d'usage des sols dunaires dans ces régions. Après la sécheresse de 1984, ils sont en effet, de plus en plus utilisés à des fins agricoles par les populations (OZER et al 2009, GRAEF & HAIGIS 2001). Selon les populations, en cas de faible pluviométrie, les sols dunaires restituent relativement plus d'eau (utiles aux plantes) que ceux des dépressions interdunaires et produisent mieux (REENBERG et al 1998, REENBERG, 1994). En plus, ils sont les plus répandus et offrent une gamme de possibilités d'adaptation aux conséquences des changements climatiques (stratégie d'adaptation à la baisse de la pluviométrie). Ils sont aussi une alternative face à l'augmentation croissante de la population qui accroît les besoins d'espace pour les cultures de subsistance : mil, sorgho, niébé (ISSOUFOU 2013, BEAUVILAIN 1989 a et b, GADO 1980, SEIGNOBOS 1979).

Par contre dans la partie Centre et Centre-Ouest du Niger de la bande étudiée, respectivement la région du Goulbi, l'Ader-Doutchi-Maggia, les sols dunaires sont utilisés essentiellement à des fins agricoles. L'élevage est pratiqué sur des terres marginales ou des espaces officiellement classés aires pastorales. Dans ces régions, les sols dunaires sont fortement remaniés par les eaux de pluies et fortement modifié par les activités agricoles. Les principales cultures sont le mil le sorgho, le niébé et l'arachide. La pression démographique est plus importante que dans les régions du Manga et du Damagaram-Mounio. La plus forte densité d'occupation humaine est d'ailleurs observée dans la partie Centre du Niger (région de Maradi). Les sols sont surexploités et connaissent rarement de jachères. L'usage des engrais chimiques dans ces zones devient plus progressif afin d'accroître les rendements des cultures vivrières afin de nourrir les populations de plus en plus nombreuses.

2.9. Vulnérabilité des paysages dunaires

L'usage intensif et continu des ressources des paysages dunaires n'est pas sans conséquences sur les phénomènes de dégradation des sols et de la végétation dans les régions étudiées. En effet, les sols ces régions se dégradent facilement en raison de leur texture essentiellement sableuse et de leurs taux très pauvres en matière organique. Ils sont aussi exposés à une forte érosion éolienne dont les signes de remobilisation sous forme de dunes sont constatables par la caudérisation (désagrégation des dunes fixée par la déflation éolienne) des sommets dunaires et le comblement des dépressions interdunaires par les matériaux sableux remobilisés par le vent. Dans ce contexte de variations périodique saisonnière et spatiale des conditions climatiques et des impacts anthropiques, les sols et la végétation dunaires sont très sensibles. Ils subissent en plus, les effets saisonniers ponctuels, à court, moyen et long termes de tous ces facteurs. Ainsi, si la pluviométrie est excédentaire, les sols se lessivent davantage, se ravinent (effet de ruissellement) et produisent moins. Si la pluviométrie est déficitaire ils perdent leur structure et s'érodent facilement par déflation éolienne. En outre, quand la pression du cheptel dépasse les capacités de charge des ressources, elle favorise leur dégradation par le piétinement et par la réduction du couvert végétal (surpâturage) qui les protège de l'érosion. Quand la population est très nombreuse, ils sont surexploités et cela réduit les possibilités de jachère et conduit à une baisse des rendements. **Globalement toutes les tendances actuelles de l'occupation humaine réduisent en conséquence les capacités de résiliences des écosystèmes dunaires.**

2.10. Conclusion partielle

Les zones étudiées sont localisées dans deux bassins sédimentaires présentant des caractéristiques communes mais aussi des différences notables (bassin des Iullemenden et bassin du Lac Tchad). Les paysages dunaires des zones étudiées ont en commun des modes de sédimentation qui sont marqués tantôt, par des phases marines reprises par des phases fluvio-lacustres, tantôt par des phases climatiques humides succédant à des phases arides. D'une certaine manière, toutes les différentes phases climatiques ont contribué au façonnement des paysages et à la mise en place des caractéristiques sédimentaires et pédologiques des sols dunaires. Ces milieux dunaires sahélo-sahariens ont en effet, connu au cours de leur histoire Quaternaire des alternances de phases humides et sèches. Pendant les phases humides les climats tropicaux plus humides étaient accompagnés par l'installation d'une végétation plus dense, d'une forte altération et érosion des roches dont le manteau d'altération a constitué la cuirasse ferrugineuse ou alumineuse et façonné les faciès des sols actuels. Pendant les phases sèches ses milieux se sont dégradés et cela a occasionné des changements écologiques divers qui expliquent l'extension des limites du Sahara plus au sud de sa position actuelle. Les signes de ces basculements sont les dunes actuellement fixées par la végétation au Sud du Sahara actuel. Ces dunes qui sont l'objet de la présente étude sont présentement confrontées à des situations plus ou moins ambiguës caractérisées par l'érosion et la remobilisation des matériaux érodés qui sont tantôt « refixés » pendant la saison des pluies et parfois « réactivés » en saison sèche. Les activités humaines accélèrent les processus de dégradation et réduisent les capacités de résilience des écosystèmes dunaires. **Comment la végétation se comporte elle dans ces milieux dunaires affectés par l'homme et la nature?**

Deuxième partie

3. Caractéristiques particulières de la végétation sahélo-saharienne

Ce chapitre sur l'évolution de la végétation, revêt un intérêt capital pour mieux comprendre la dynamique actuelle de dégradation des paysages dunaires dans les zones sahéliennes en général et au Niger en particulier. En effet, la stabilité des écosystèmes dunaires actuels du Niger dépend de l'état et du type de couverture végétale qui assure indéniablement la fixation et la protection contre l'érosion. Quelle est l'évolution spatio-temporelle de cette végétation dans les paysages dunaires?

3.1. Evolution spatio-temporelle de la végétation Sahélo-Saharienne

L'histoire de la végétation et des changements écologiques intervenus dans les paysages dunaires sahélo-sahariens est établie sur la base de multiples recherches palynologiques de SCHULZ (2009, 1991, 1988) en Libye, au Mali et au Niger mais aussi de plusieurs autres travaux dont principalement MONOD (1986, 1954) ; BARRY et al 1986 ; HAGEDORN 1985 ; GIESSNER 1988 ; BARRY 1982 ; CAPOT REY 1953). Il s'est aussi basé sur les récits et travaux de BARTH (1857-1858), NACHTIGALL (1879), TILHO (1910, 1911-1914). Ainsi, la végétation des milieux dunaires sahélo-sahariens a connue d'importants bouleversements au cours de l'histoire environnementale de ces entités écologiques.

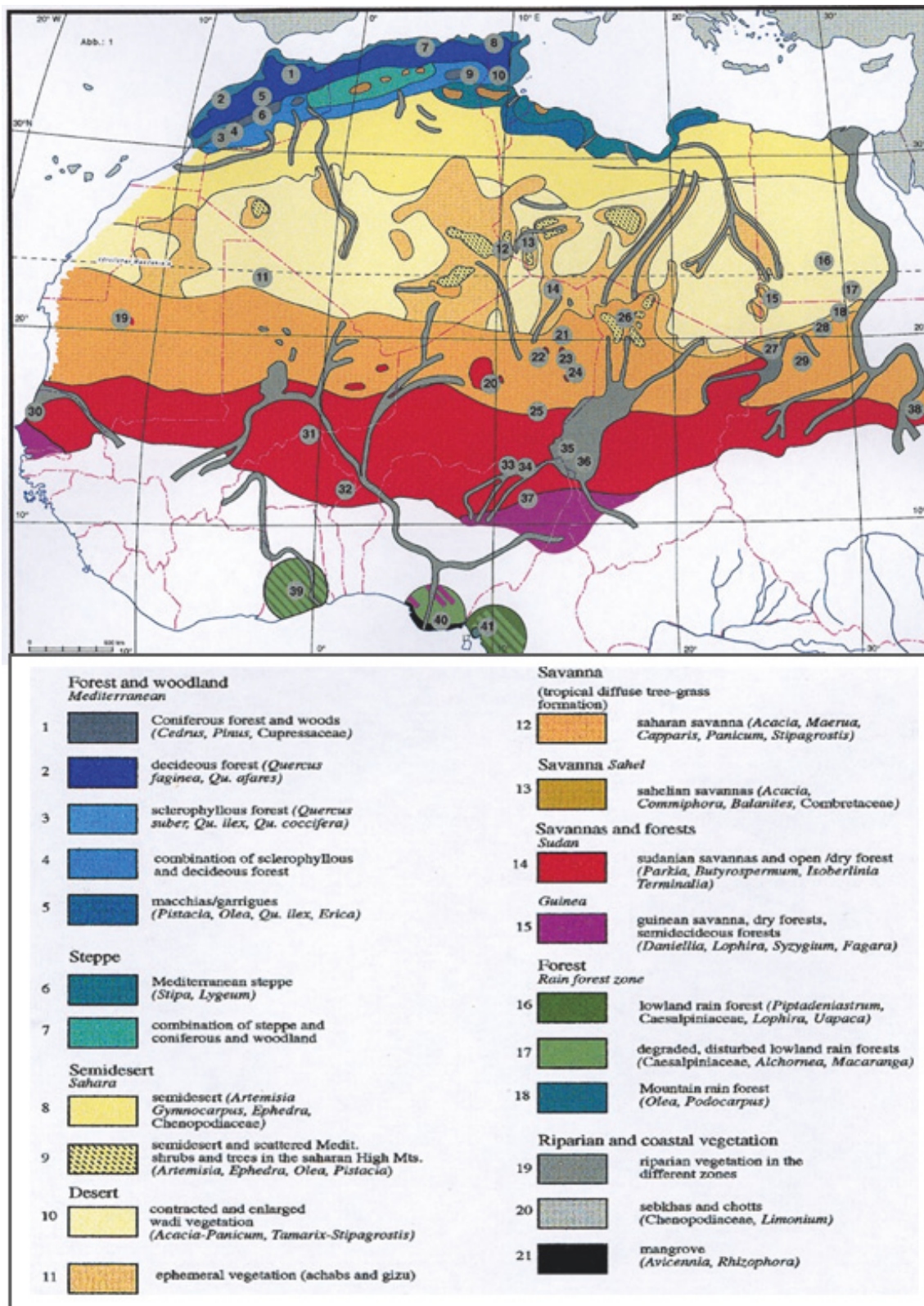
En effet, entre 10.000-9500 BP (Pleistocène Supérieur- mi-Holocène), pendant la période très humide, le Sahara actuel était couvert d'une végétation de type savane saharienne jusqu'à 20° N (SCHULZ et al 2009, SCHULZ et al 2000 ; SALZMANN & WALLER 1998). Dans ces conditions de pluviométrie élevée, les sols se sont bien développés au Sud, au Centre et dans la partie Est du Sahara nigérien et des lacs et mares sont formés (BAUMHAUER et al 2009 ; BAUMHAUER et al 2004; FELIX-HENNINGSSEN 2004). Vers 8000 BP, les zones sahariennes étaient encore couvertes d'une végétation de type savane saharienne à *Acacias*, *Maerua*, *Panicum* et les limites actuelles des zones sahéliennes sont dominées par une végétation de type savane soudanienne. Vers 6500 BP, c'est la fin de la période très humide. Avec cette modification climatique, correspondent aussi les impacts anthropiques sur la végétation ont commencé au début du Néolithique. Cela est traduit par la présence de charbon de bois et de graminées, dans les archives sédimentaires. Pendant cette période on assiste plus au Sud, à une modification de la savane de type soudanienne à la savane de type sahélienne (SCHULZ 2004 ; SCHULZ 2002 ; SCHULZ & MERKT 1996 ; BALLOUCHE & NEUMANN 1995 ; KUSSEROW 1994; REICHELT et al 1992 ; SCHULZ 1980).

Entre 6000 et 4000 BP la végétation connaît à ces latitudes d'importants changements en passant d'une végétation de type savane saharienne à une végétation de type contractée saharienne. En conséquence, la végétation de type savane soudanienne se retire vers le Sud. Vers 2000 BP des conditions extrêmes d'aridification s'accroissent et les bases de la dégradation des écosystèmes naturels des paysages dunaires s'installent suite à ce changement d'état de la couverture végétale qui fixait les dunes et assurait sa protection contre l'érosion éolienne. Pour ce qui concerne le Niger particulièrement, les cartes de la végétation établies par Schulz (2000) résument cette évolution pour la période Holocène (carte n°6) et celle de la végétation actuelle (carte n°7). En effet, selon ces données entre 8000 et 6000 BP les latitudes 19° N étaient dominées par une végétation de type savane soudanienne. Pendant ce temps, les régions sahariennes actuelles (22°N) étaient couvertes d'une végétation de type savane d'*Acacia-Panicum*. Ce même type de végétation s'observe actuellement dans les régions sahélo-sahariennes du Mali (CELLES et MANIERE 1983).

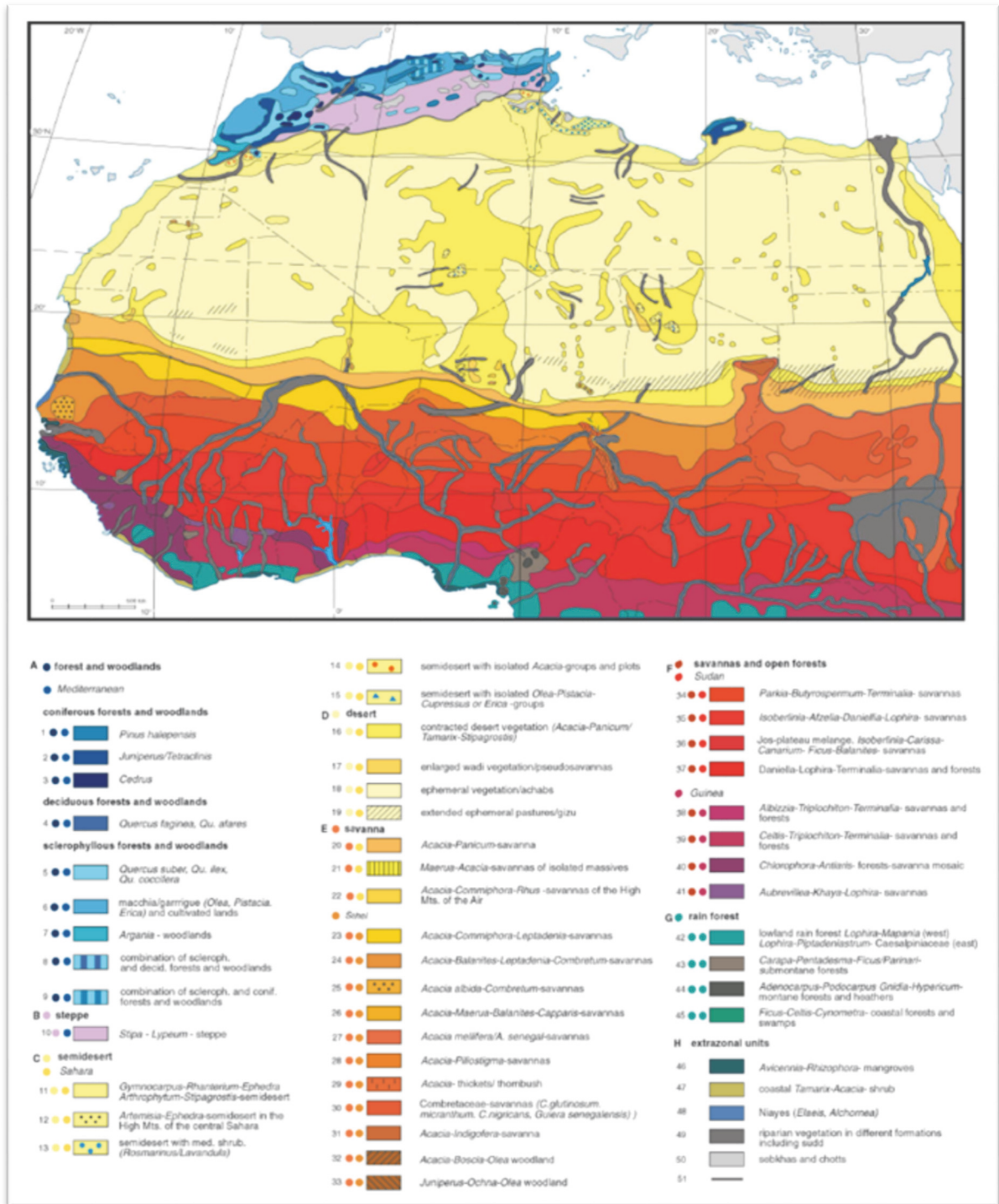
Avec les fluctuations climatiques actuelles caractérisées par des périodes humides entrecoupées de périodes de sécheresses quasi cycliques (BOUDET 1972,) et une forte influence

des activités humaines telles l'agriculture, l'élevage, les usages de la végétation comme source d'énergie et de bois d'œuvre, viennent accélérer les processus de dégradation de la végétation. En conséquence, la dégradation des dunes qui ne sont plus protégées par la végétation et les processus de désertification deviennent de plus en plus inquiétants, menaçant l'existence même des populations sahélo-sahariennes (pénurie alimentaire pour les hommes et manque de pâturage pour leurs animaux).

Les premières alarmes sur cette problématique de la dégradation et de désertification au Sahel furent déjà lancées par STEBBING (1935), AUBREVILLE (1949 et 1973). Actuellement des discussions scientifiques sur la dégradation et la régénération de ces paysages dunaires sont en débat et diverses actions de protection et de régénération de ces écosystèmes sahélo-sahariens sont en voie de réalisation. En effet, un important projet de lutte contre la désertification est engagé avec la fameuse « Grand Muraille Verte » qui vise à créer une barrière verte (plantation d'arbres) contre l'« avancée du désert » vers les zones sahélo-sahariennes (FAO, OSS, Wikipedia). D'autre part certains auteurs dont particulièrement REIJ (2011) affirment d'un « reverdissement » du Sahel. Car selon cet auteur, il y a 20 ans on comptait 2 ou 3 arbres par hectare, mais aujourd'hui avec une « régénération...spontanément à partir de systèmes racinaires souterrains ou de graines retenues dans la couche arable » on pourrait compter entre 40, 60 voire 100 arbres par hectares ! ».



Carte n°6 : Reconstruction de la végétation du Nord et de l'Ouest Africain en pendant la période Mi-Holocène (8000BP)/D'après SCHULZ et al (2000)



Carte n°7 : Végétation actuelle de l'Afrique Sahélo-Saharienne d'après SCHULZ et al (2009)

3.2. Modèle cartographique régional de la végétation des milieux dunaires sahélo-sahariens : typologie

D'après les descriptions de la végétation sahélo-saharienne de CELLES et MANIERE (1983), QUEZEL (1965), MONOD (1958), et les multiples travaux de Schulz (2009, 1988, 1981), celle-ci varie en fonction du gradient pluviométrique Sud-Nord et des conditions hydrologiques locales. Sur la base de ces critères, elle se présente du Sud (Sahel) vers le Nord (Sahara) selon la typologie suivante synthétisée par sur le schéma n°3 et carte n°8 et illustrée par les photos n°3 suivants. Ainsi, du sud vers le nord on a :

- A. Savane arborée sahélienne à *Faidherbia albida* et *Maerua crassifolia*. Elle est formée de flore exclusivement sahélienne : *Hyphaene thebaica*, *Faidherbia albida*, *Salvadora persica*, *Boscia senegalensis*, et *Maerua crassifolia*. La strate herbacée est très dense pendant la saison des pluies. Elle est dominée par les graminées sahéliennes. Avant la disparition des habitudes pastorales ancestrales, selon CELLES et MANIERE (1983), le tapis de ces graminées servait de ressources fourragères importantes aux éleveurs du Gourma. Mais à la suite des sécheresses récurrentes, une sédentarisation accélérée et un transfert de propriété du cheptel, des nomades aux citadins a conduit à une surexploitation de la biomasse herbacée. Ceci a eu pour conséquence l'érosion et la remobilisation par le vent des alluvions limoneuses superficielles.
- B. Dans la partie nord de cette zone c'est plutôt une savane arborée sahélienne à *Acacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Leptadenia pyrotechnica* et *Cenchrus biflorus* qui domine. C'est cette savane arborée qui fixe les dunes du Quaternaire. La végétation herbacée domine selon CELLES et MANIERE (1983) et est riche en *Cenchrus biflorus* ou cram-cram. La présence de ces espèces est favorisée par la nature du sol (meuble), la proximité de la nappe phréatique et les faibles (150 mm/an) mais régulières pluies de la saison humide.
- C. Plus à l'est à la même latitude, au nord de la ligne Gourma-Rharous-Bourem (dans le Sud-Est du Mali), c'est une savane arborée sahélienne à *Leptadenia pyrotechnica* et *Euphorbia balsamifera*. Les cordons dunaires sont moins élevés, ce qui est allié à un enrichissement relatif des horizons de surfaces en argile rubéfiée expliquant la présence d'*Euphorbia balsamifera* caractéristique des zones nord sahéliennes. C'est une espèce qui s'adapte bien aux conditions de sécheresse par la chute annuelle de l'ensemble de son feuillage.
- D. Savane sahélienne à *Indigofera semitrijuga* et *Cyperus conglomeratus* : plus on monte vers le nord plus la végétation devient de plus saharienne. C'est-à-dire non pas par un changement de flore sahélienne mais par un changement de sa densité, une réduction de la biomasse et un éclaircissement de la couverture arbustive. Les acacias et les balanites subsistent uniquement dans les dépressions interdunaires et les graminées se raréfient. La même flore sahélienne reste présente mais de nouvelles espèces apparaissent : *Indigofera semitrijuga* et *Cyperus conglomeratus*.
- E. Savane de transition à *Stipagrostis pungens* et éphémérophytes sahariens : situé plus au nord, cette formation végétale marque la zone de transition entre le milieu saharien et le milieu sahélien. Les arbustes n'existent plus à ce niveau le long des réseaux hydrographiques. *Indigofera semitrijuga* et *Cyperus conglomeratus* jalonnent le paysage et *Stipagrostis pungens* forment çà là des touffes et marque l'entrée en zone saharienne. La savane sahélienne à *Indigofera semitrijuga* et *Cyperus conglomeratus* et la Savane de transition à *Stipagrostis pungens* et éphémérophytes sahariens forment une zone constante de transition allant du Sahara méridional (MONOD 1958) et au sud du Tibesti (QUEZEL 1965).
- F. Le complexe de transition : complexe de végétation où se côtoient les espèces végétales des zones sahéliennes et celles des zones sahariennes. Dans les zones

sableuses la couverture végétale est essentiellement composée des populations d'*Acacia ehrenbergiana* et de *Panicum turgidum*. Les populations sporadiques de *Stipagrostis ciliata* colonisent les massifs, celles de *Fagonia bruggieri* et *stipagrostis acutiflora* sur les plaquages sableux des hauts interfluves, dans les rigoles des arènes granitiques au sol épais *Cymbopogon schoenanthus*. On retrouve *Acacia radiana* et *Panicum turgidum* le long des oueds et une savane de graminée (*Eragrostis pilosa* et *Schoenefeldia gracilis*) dans les zones d'épandage des oueds à texture sablo-limoneuse.

- G. Savane arborée saharienne à *Acacia radiana*, *Acacia ehrenbergiana* et *Panicum turgidum* : cette formation typiquement saharienne est entretenue par un système hydrologique engendré par un relief modeste favorisant un inféro-flux suffisant pour entretenir une végétation arbustive. Les zones d'épandages sont colonisées par une crucifère (*Schouwia perpurea*). Les espèces caractéristiques sont : *Acacia radiana*, *acacia ehrenbergiana*, *Panicum turgidum*, *Aristida adscensionis*, *Pulicaria crispa*.
- H. La végétation hyperaride : La végétation y est de type contractée et sporadique. Les espèces se répartissent soit sous forme de colonies ou bien d'individus dispersés. Selon CELLES et MANIERE (1983), seulement trois espèces vivaces se maintiennent dans les régions hyperarides. Ce sont : *Cornulaca monacantha* (had), qui colonise les micro-dépressions à sable relativement grossier, *Panicum turgidum* (morka) qui vie dans les zones ensablées et *Stipagrostis pungens* (sbot) qu'on retrouve dans les zones des ergs et elbs à dunes mobiles. Ces trois espèces vivaces se maintiennent dans ces conditions hyperarides en développant une importante et démesurée rhizosphère et une faible surface foliaire. En plus de ces espèces vivaces, des éphémérophytes poussent dans ces milieux hyperarides, à la suite de pluies hasardeuses. Ce sont : *Stipagrostis plumosa*, *Fagonia olivieri*, *Fagonia bruggieri*, *Farcetia ramosissima*, *Aerva javania* (Barry 1982).

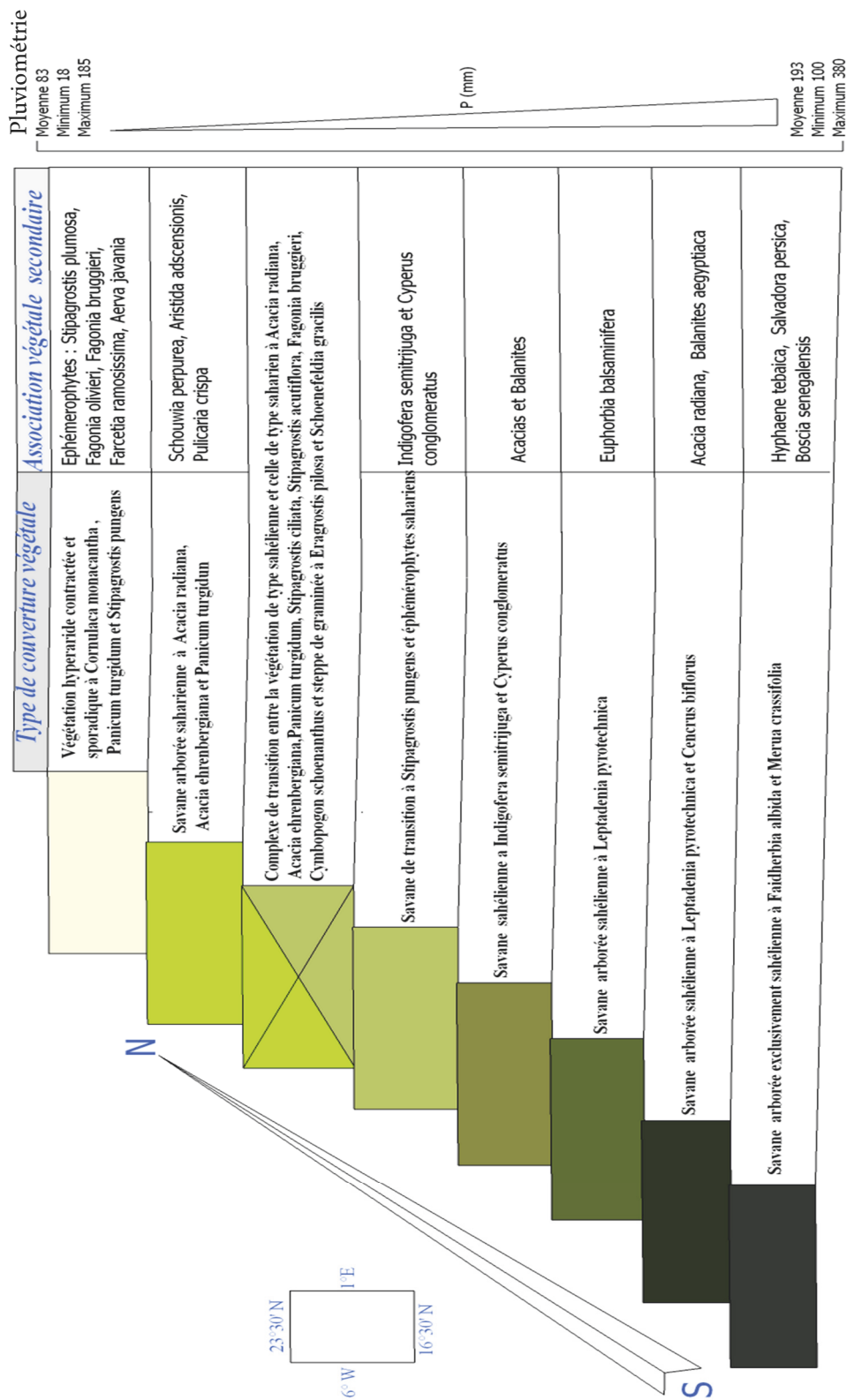
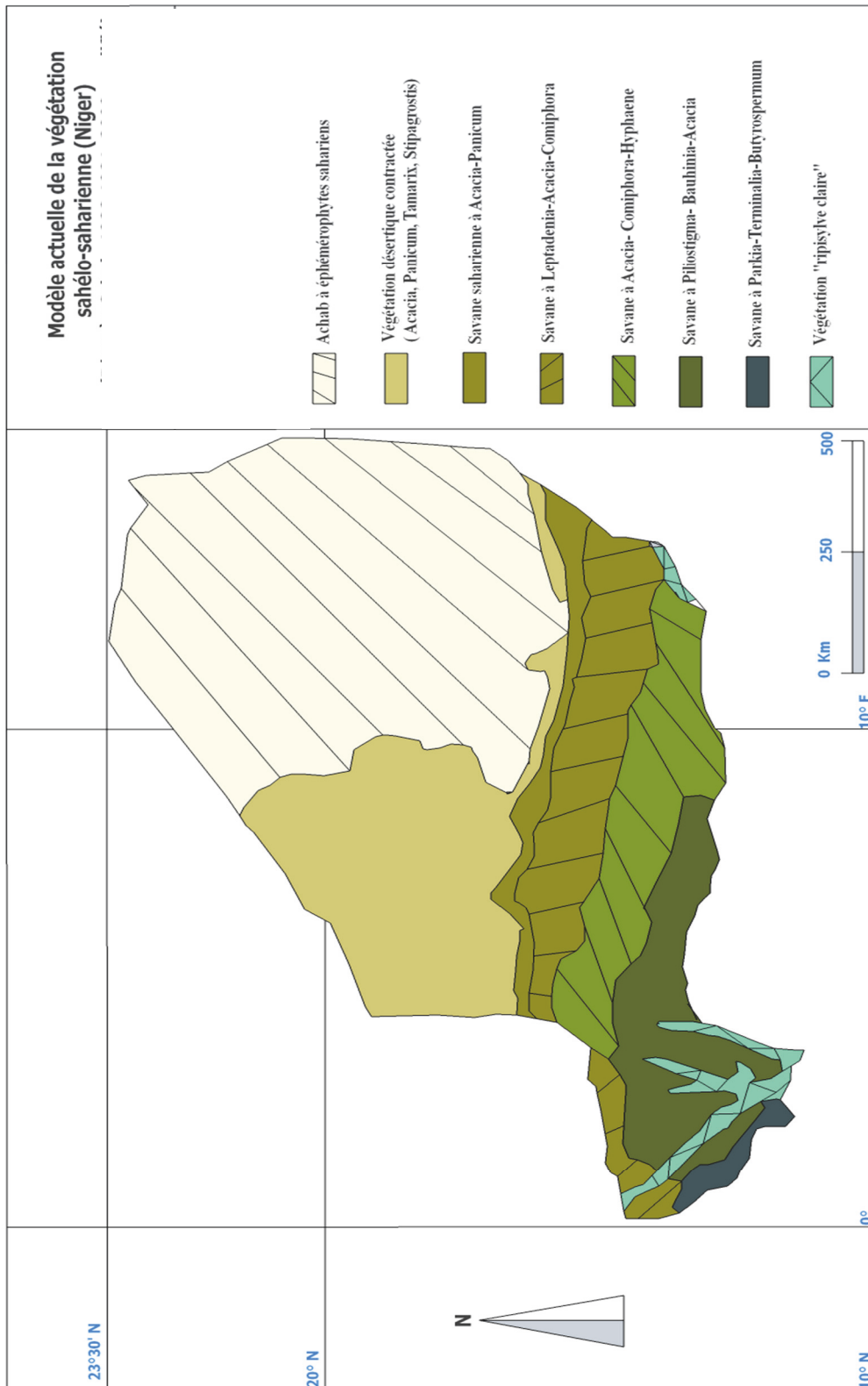


Schéma n°3 : Mosaïque de successions végétales des milieux dunaires sahéliens (16°30'S) vers les milieux dunaires sahariens (23°30'N). Les types de végétation sont fonction du gradient pluviométrique et des conditions hydrologiques et topographiques locales. D'après une synthèse de la carte botanique du Nord Mali établie par Celles et Riser 1983



Carte n° 8 : Modèle cartographique actuelle de la végétation sahélo-saharienne (Niger). (D'après Schulz 1988,1981, 2009 modifié).

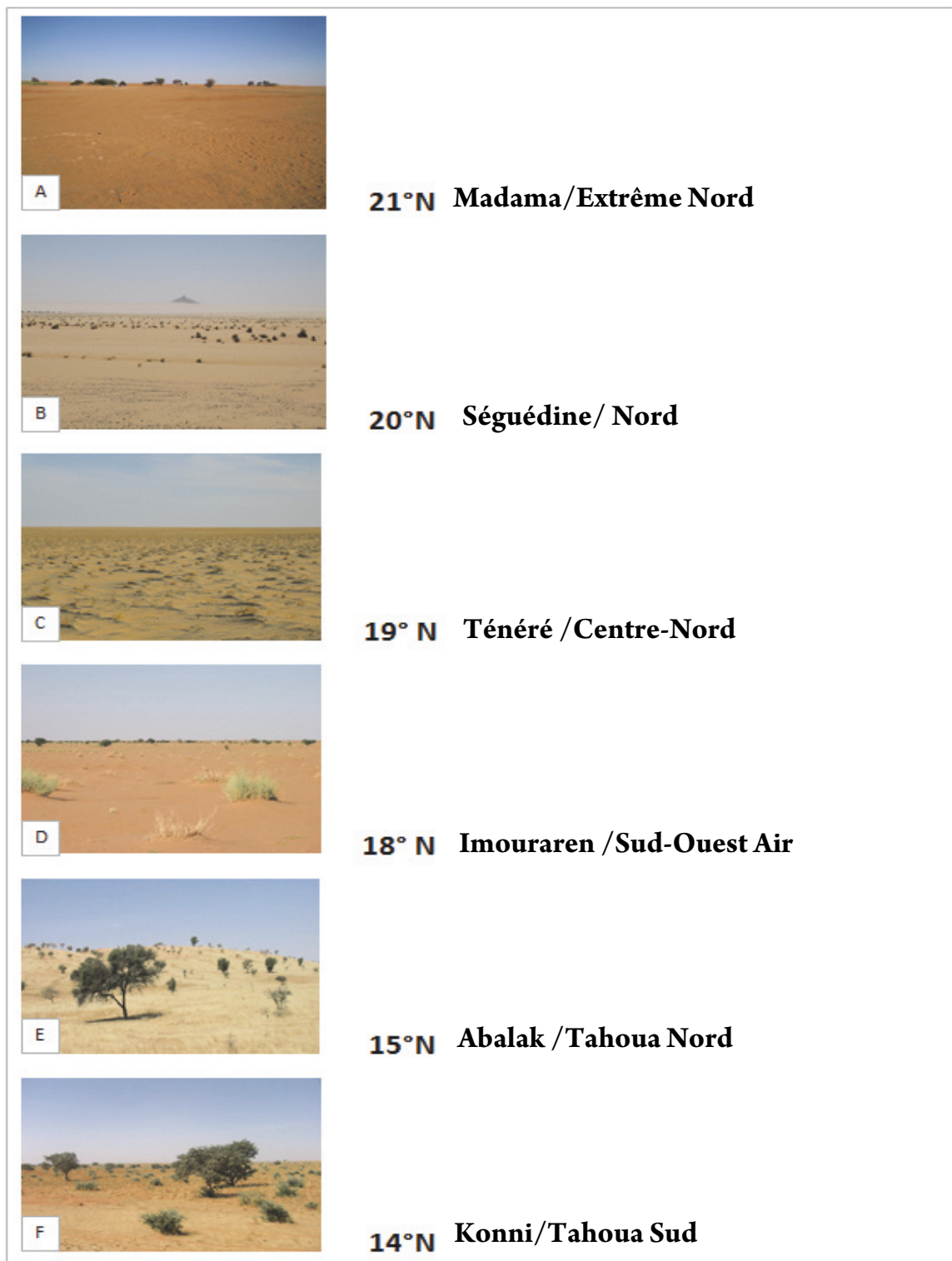


Photo n°3 : Variation latitudinale de la végétation Sahélo-saharienne. **Zone sahariennes** : A = Agadez extrême Nord/Madama. B = Agadez Nord/Séguédine. C = Agadez Centre-Nord/Ténéré. D = Agadez/S-W Air. **Zones sahéliennes** : E = Tahoua Nord /Abalak. F = Tahoua Sud /Konni. La photo montre que la végétation des latitudes sahélo-saharienne varie et change d'état presque chaque degré de latitude. Mais cela n'est qu'un modèle : dans la zone du Ténéré (19°N) les dunes n'ont aucune couverture végétale. Dans l'ensemble des paysages dunaires, la végétation dépend toujours du gradient et du régime pluviométrique.

3.3. Caractéristiques de la végétation des paysages dunaires étudiés

La végétation des zones étudiées est essentiellement caractérisée par une formation herbeuse ouverte, parsemée de quelques strates ligneuses. La strate arborée est dominée principalement par des acacias, des euphorbiacées et des combrétacées. Ces espèces ont généralement un faible développement aérien mais un système racinaire souterrain très bien développé. Quant au couvert végétal herbacé, il est particulièrement dominé par des graminées. Ces recouvrements végétaux (ligneux et herbacés) varient en fonction de la topographie et des activités humaines dans l'ensemble des sites étudiés. La densité moyenne est de 1 à 6 arbres sur un cadrat de 50 m x 50 m (1/4 ha) sur les dunes et 5 à 50 arbres dans les cuvettes interdunaires. Le recouvrement herbacé quant à lui varie de 1 à 30% sur les sommets des dunes et de 20 à 70% dans les dépressions interdunaires. La végétation des zones étudiées présente les spécificités suivantes (voir photos n°4, schéma n°4 et tableau n°7 ci-dessous). En effet, le schéma n° 4 présente un modèle d'organisation spatiale de la végétation ligneuse des paysages dunaires étudiés. Ce modèle montre comment la végétation ligneuse couvre les dunes. Dans les systèmes dunaires du bassin des Iullemenden (1. ADM et 2. Gl) celle-ci est plus ou moins diffuse, alors que dans les paysages dunaires du bassin du Lac Tchad (3. DM et 4. Mg), elle est concentrée principalement dans les dépressions interdunaires.

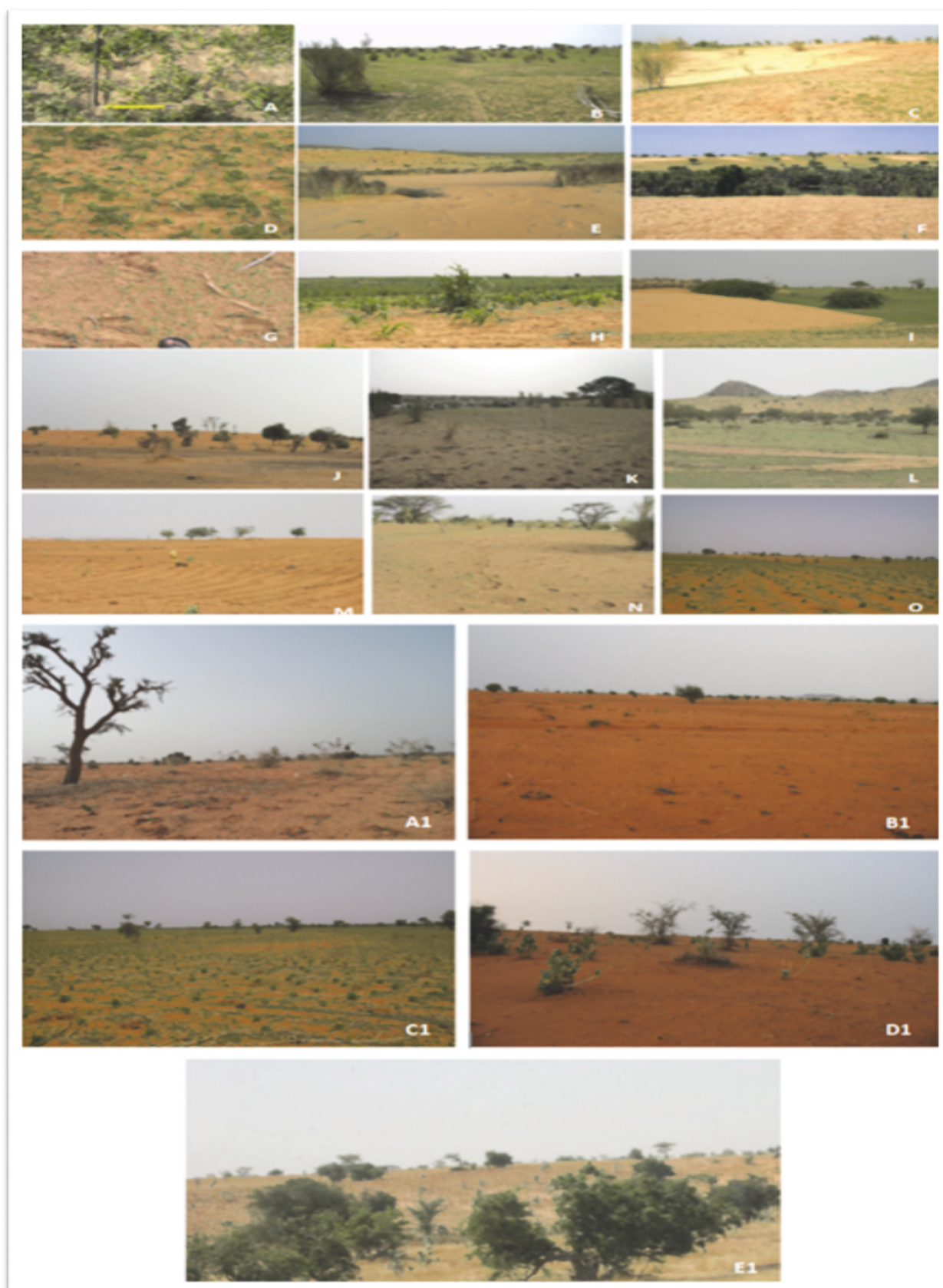


Photo n° 4. Couverture végétale saisonnière des dunes selon leur degré de dégradation. Dans les paysages dunaires de l'Ader Doutchi-Maggia (J,M,B1 et D1) et dans les paysages dunaires du Goulbi (O, A1, C1 et E1) en début de saison des pluies (mai-juin) Dans les paysages dunaires du Damagaram-Mounio (A,B,C,D,E,F,H,I et L) et dans les paysages dunaires du Manga (G,K et N) en pleine saison des pluies (juillet-aout).

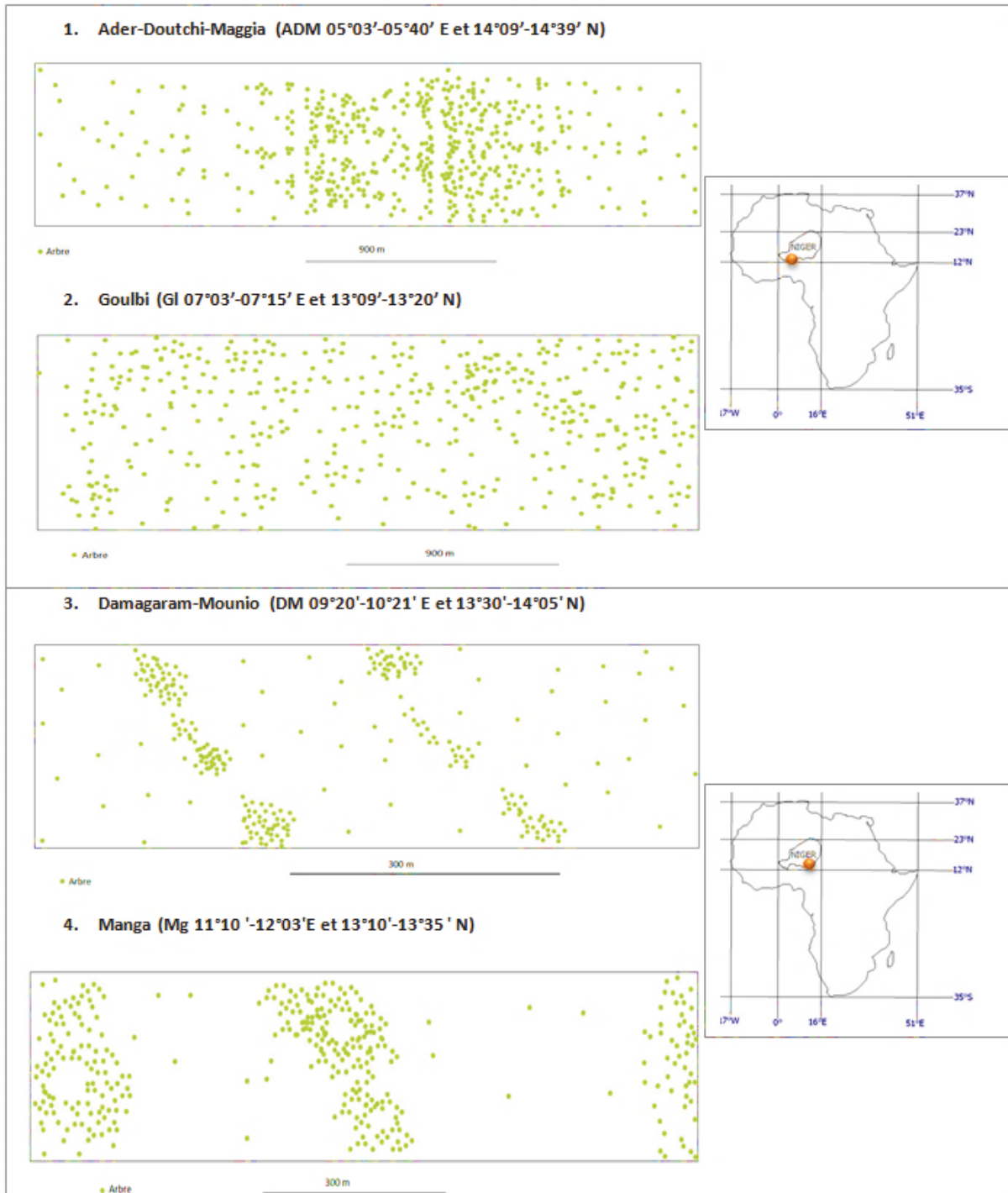


Schéma n° 4 : Modèles simplifiés de la répartition et de l'organisation spatiale de la végétation ligneuse dans les paysages dunaires étudiés. (Établi à partie des images © GoogleEarth 2013).

Zone d'étude	Composition floristique ligneuse des paysages dunaires étudiés	Végétation herbacée annuelle et influences humaines
ADM	<i>Acacia albida, Acacia radiana, Acacia senegal, Acacia seyal, Acacia nilotica, Piliostigma reticulatum, Combretum glutinosum, Guera senegalensis, Sclerocarya birrea, Maerua crassifolia, Bauhinia rufescens, Bossia senegalensis Calotropis procera, Prosopis juliflora, Combretum glutinosom, Combretum micrantum, Ziziphus mauritiana</i>	Les dunes sont couvertes principalement par des graminées et les cultures en saison des pluies. La strate arborée est clairsemée. La végétation est fortement influencée par les activités agricoles et pastorales. Les dunes sont relativement érodées et sont très influencées par l'apport des sédiments ferrugineux provenant des sols ferrugineux sur lesquels elles reposent. La végétation ligneuse est beaucoup utilisée comme une source d'énergie
GI	<i>Adansonia digitata, Acacia albida, Acacia radiana, Hyphaena thebaica, Calotropis procera, Balanites aegyptiaca Pilstyigma reticulatum, Acacia senegal, Guera segalensis, Combretum glutinosum, Combretum micrantum, Ziziphus mauritiana</i>	La végétation est dominée par les graminées et les espèces cultivées en saison des pluies. Les dunes sont fortement exploitées à des fins agricoles et pastorales. La pression agricole est très forte. La végétation ligneuse est aussi très utilisée comme une source d'énergie
DM	<i>Hyphaena thebaica, Acacia radiana, Acacia albida, Balanithes aegyptiaca, Leptadenia pyrotechnica, Prosopis juliflora (anthropique), Ziziphus mauritiana, Sclerocarya Birrea, Acacia sénégal, Salvadora persica, Calotropis procera</i>	Les espèces herbacées annuelles couvrent les dunes en saison des pluies. La végétation est essentiellement dominée par les graminées. Les dunes sont moyennement exploitées à des fins agricoles, mais la pression pastorale est intense. On constate une intense dégradation du couvert végétal et aussi l'érosion des dunes. Le phénomène de remobilisation s'installe.
Mg	<i>Hyphaena thebaica, Acacia radiana, Acacia albida, Balanithes aegyptiaca, Calotropis procera, Leptadenia pyrotechnica, Prosopis juliflora (anthropique), Ziziphus mauritiana Acacia senegal, Salvadora persica,</i>	Le tapis des herbacées annuelles en saison des pluies est dominée par des graminées. Les dunes sont faiblement marquées par les activités agricoles. Il y a une moyenne à forte pression pastorale et une très forte dégradation de la végétation suivi d'une érosion très poussée des dunes suivie de l'ensablement des cuvettes interdunaires.
TEN.Réf.	<i>Acacia ehrenbergiana, Acacia radiana, Acacia nilotica, Phoenix dactylifera, Hyphaena thebaica, Tamarisc indica</i>	Zone désertique, dunes longitudinales mobiles et fortement déflatées par des vents constants et efficaces. Végétation à <i>Aristida spp, Cyperus conglomeratus, Panicum turgidum et Impérata cylindrica</i>

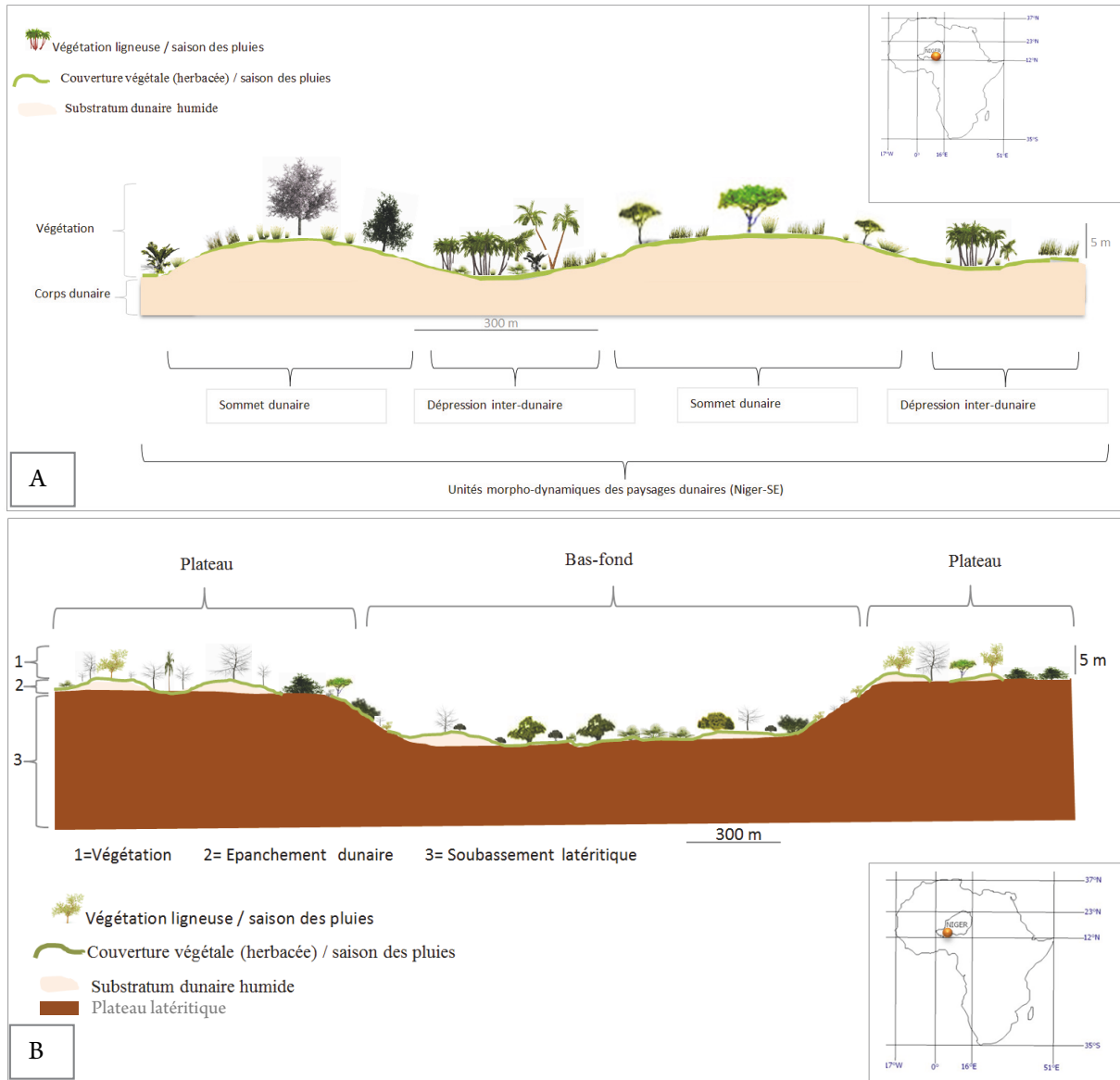
Tableau n°7 : Caractéristiques synthétiques de la végétation et son occupation humaine dans les zones étudiées.

3.4. L'état de la couverture végétale perçu comme facteur clé de la stabilité des dunes

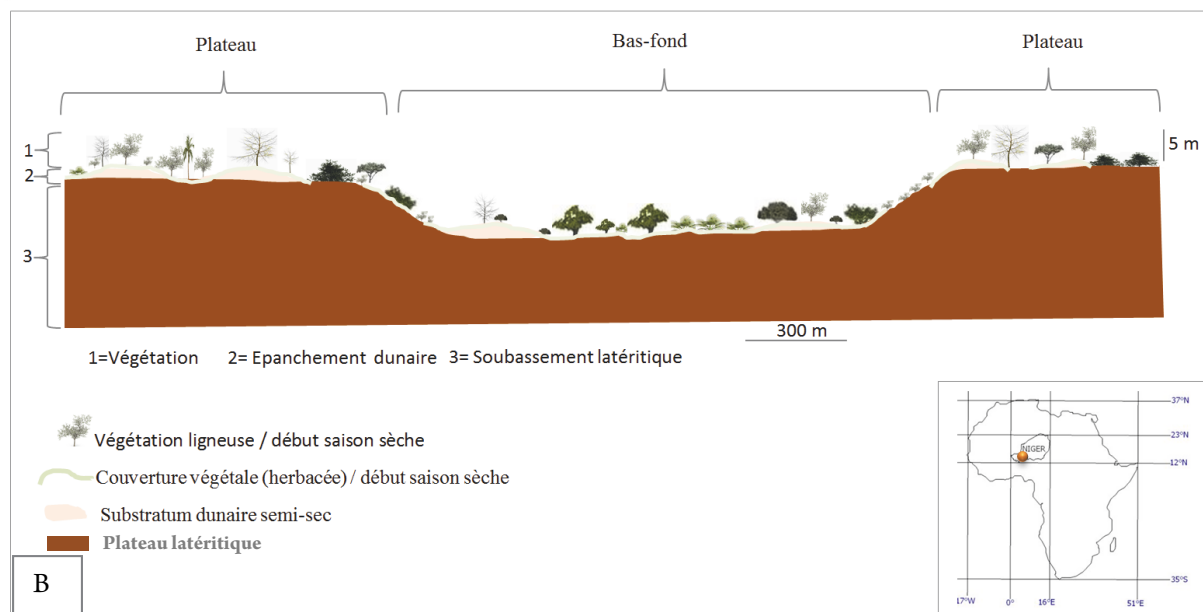
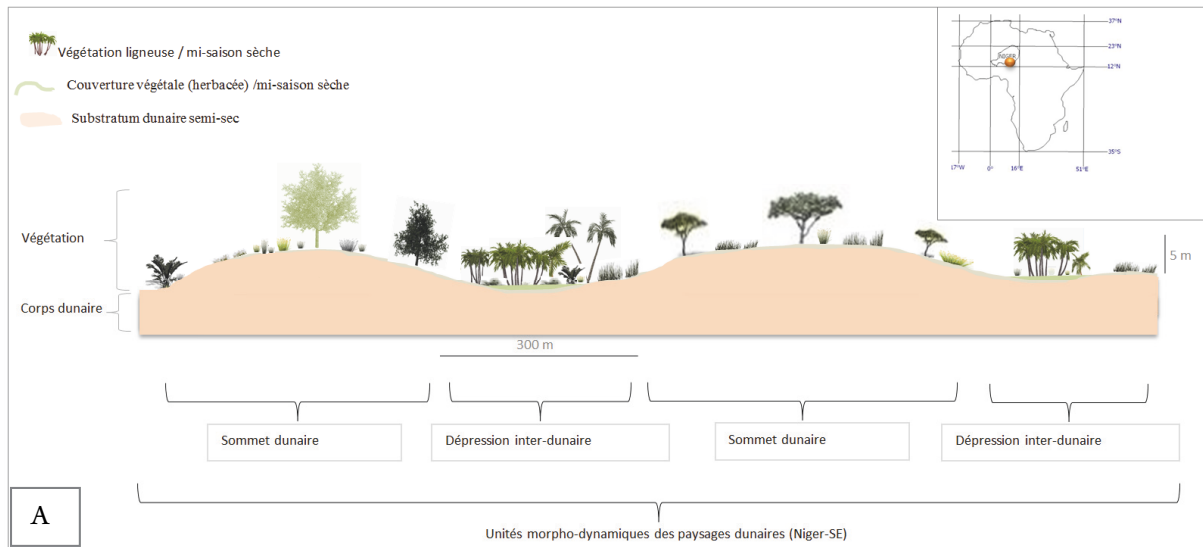
3.4.1. Dynamique et changement saisonnier de la végétation

Dans les conditions naturelles, la végétation des paysages dunaires varie en fonction de la topographie locale et des variations saisonnières des pluies (photos n°5, n°6, n°7 et n°8). Sur les sommets dunaires la strate ligneuse haute est éparse dans son ensemble. En effet, pendant la saison des pluies la végétation ligneuse éparse couvrant les sommets des dunes, reprend sa vigueur après une longue saison sèche de 8 à 9 mois. Dans les espaces non anthropisés, le houppier des ligneux hauts augmentent d'envergure et les ligneux bas et herbacées colonisent les espaces libres laissés par les ligneux hauts. La strate ligneuse basse est relativement plus répandue. En saison des pluies, la strate herbacée colonise les dunes si celles-ci ne sont pas très dégradées. Par contre, dans les sites de dépressions interdunaires marquées, les strates ligneuses et herbacées sont plus concentrées et relativement dense. Dans les dépressions interdunaires la végétation ligneuses couvre une large partie de l'espace et les herbacées colonisent densément les espaces libres nom occupées par les strates ligneuses (croquis n°4). Ainsi, si les conditions pluviométriques sont relativement bonnes, la végétation herbacée couvre bien les dunes pendant cette saison et la végétation ligneuse est plus luxuriante. Celle-ci est surtout mieux développée dans les dépressions interdunaires et les bas-fonds.

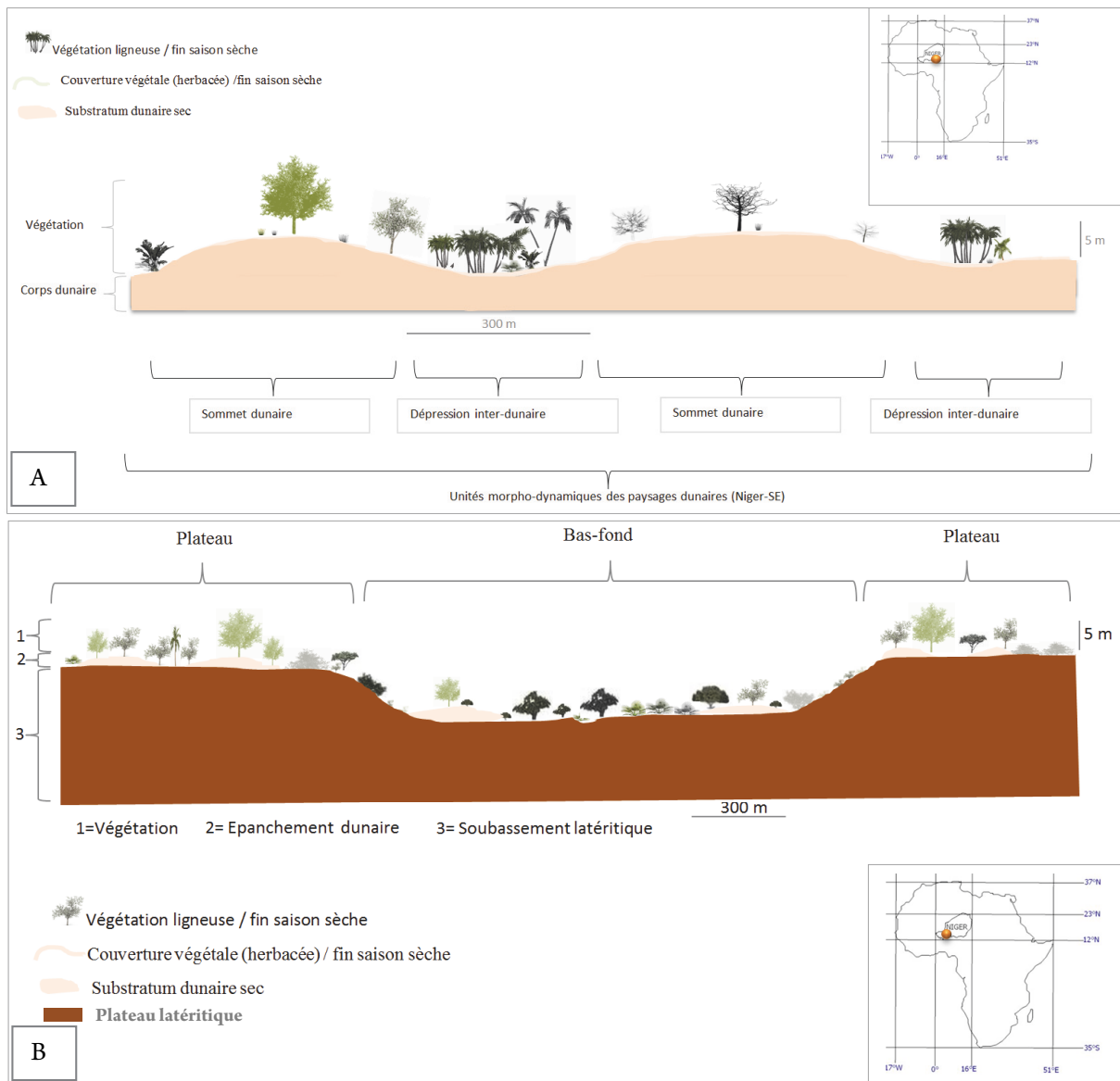
A la fin de la saison des pluies et pendant la saison sèche, par contre, la plupart des espèces végétales perdent leurs feuillages et des espèces annuelles, il ne subsiste que les restes de tiges, de feuilles sèches et des racines mortes enfouies dans les horizons superficiels des dunes. Certaines espèces pérennes telles *Adropogon gayanus*, *Pergularia tomentosa*, *Leptadenia pyrothechnica* perdent leurs parties aériennes afin de réduire l'évapotranspiration et résister ainsi au manque d'eau de la saison sèche en attendant l'arrivée des pluies saisonnières. Les espèces à systèmes racinaires pouvant atteindre la nappe sont moins affectées par ce changement de saison. Celles-ci entretiennent une stratégie de survie en développant un réseau de systèmes racinaires qui est profondément enfoui dans le corps dunaires jusqu'à atteindre la nappe phréatique (ex. *Leptadenia pyrotechnica*, *Acacia albida*). C'est grâce à celle-ci que ligneux hauts et ligneux bas survivent pendant la longue saison sèche. Ainsi, en début de la saison sèche, la végétation herbacée commence à disparaître des plateaux et des sommets dunaires. Quant à la végétation ligneuse, elle reste vivante mais perd de plus en plus sa vigueur. (croquis n°5). Et en saison sèche, la végétation herbacée disparaît parfois totalement des sommets dunaires et des plateaux sauf les espèces pérennes. Dans les bas-fonds et les dépressions interdunaires celles-ci disparaît aussi. Seule la végétation ligneuse reste vivante et sa vigueur dépend de la disponibilité en eau dans les nappes phréatiques. C'est pendant cette période que les dunes sont plus exposées à la dégradation surtout dans les zones à forte influence humaine (croquis n°6).



Croquis n°4: Modèles de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par la végétation en **saison des pluies**. A : dans le bassin du Lac Tchad (Damagaram-Mounio, Manga). B : dans le bassin des Iullemenden (Ader Doutchi-Maggia, Goulbi).



Croquis n°5: Modèles de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par la végétation en **début de la saison sèche**. A : dans le bassin du Lac Tchad (Damagaram-Mounio, Manga). B : dans le bassin des Iullemenden (Ader Doutchi-Maggia, Goulbi).



Croquis n°6 : Modèles de répartition spatiale de la couverture végétale dans les paysages dunaires fixés par la végétation en **fin de la saison sèche**. A : Niger-SE dans le bassin du Lac Tchad (Damagaram-Mounio, Manga). B : Niger-Centre-W dans le bassin des Iullemenden (Ader Doutchi-Maggia, Goulbi).

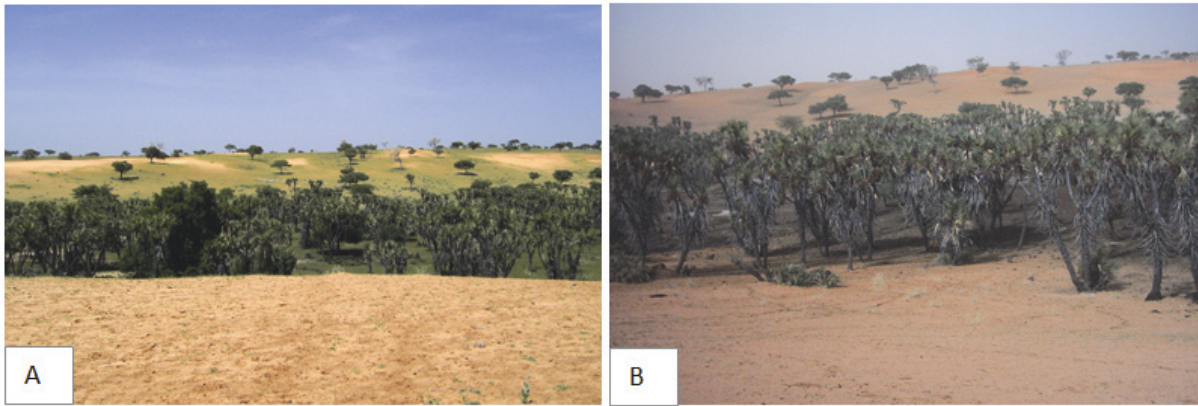


Photo n°5 : Etat de la végétation dans le paysage duanire du Niger SE (11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N). A : en **saison des pluies** ; les tâches claires sont des parties de dune dégradée par les activités d'élevage caractéristiques de la zone. La végétation ne pousse plus sur ces parties et les phénomènes d'ensablement des dépressions interdunaires s'aggravent davantage car le substrat dunaire n'est plus fixé par la végétation et est exposé à une déflation éolienne pendant toutes les saisons. B : en **saison sèche** ; la végétation herbacée est quasi absente, même à l'état sec du fait de la pression pastorale. Quant à la végétation ligneuse, pour la plupart concentrée dans les dépressions interdunaires, elle est fortement exploitée par les éleveurs qui coupent les branches vertes afin de nourrir leur bétail.

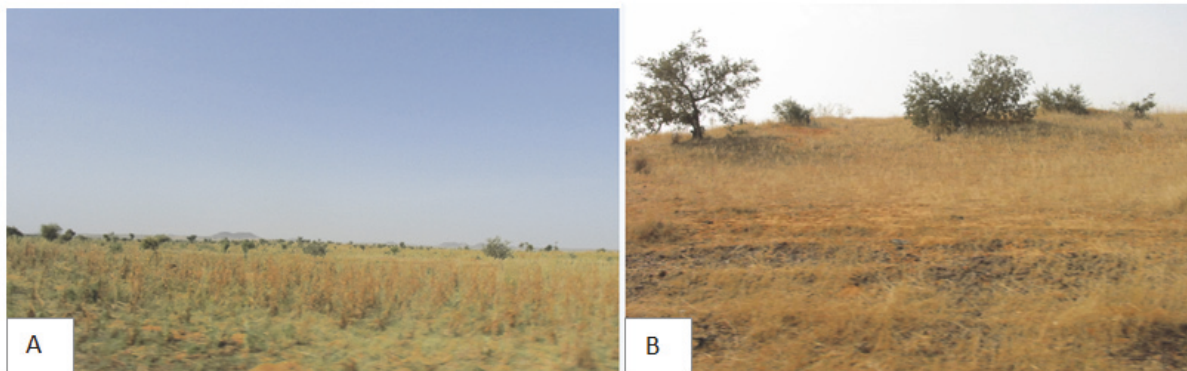


Photo n°6 : Variation saisonnière de la végétation dans le paysage dunaire du Niger-Centre-W. A : champs de mil en fin de saison des pluies sur épandage dunaire sur plateau latéritique de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). L'espace est fortement anthropisé mais la végétation est sous forme de parc très aéré entretenu par les agriculteurs. Elle est essentiellement composée de combretacée, d'Acacias sp., de Calotropis procera. B : Etat de la végétation en saison sèche sur les épandages dunaires sur plateaux latéritiques de l'ADM en saison sèche. La végétation ligneuse est dominée par les combretacées (*Combretum glutinosum*) et *Acacia sp.* La végétation herbacée est essentiellement dominée par *Cenchrus biflorus*. La couverture herbacée protège les dunes de l'érosion et assure le maintien de leur stabilité. Si par contre elle est surpâturée ou cultivée les dunes deviennent plus vulnérables à l'érosion.

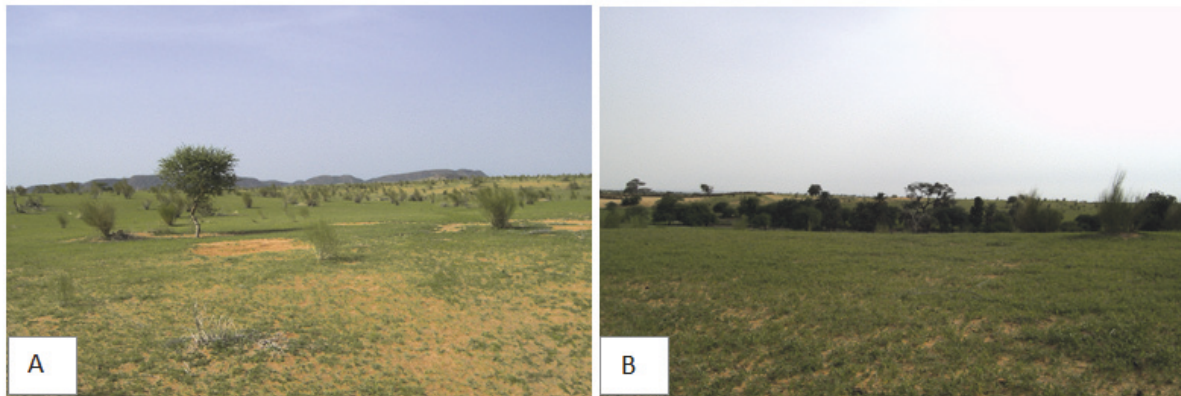


Photo n°7 : A : Etat de la végétation sur les sommets dunaires du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) en saison des pluies. Un tapis herbacé (principalement *Cynchrus biflorus*) couvre les dunes. Par endroits des places sans végétation (espaces claires) commencent à se former et c'est le point de départ de la dégradation des manteaux dunaires. La végétation ligneuse est essentiellement dominée par *Leptadenia pyrotechnica* et d'*Acacia sp.* La végétation devient de plus en plus éparse et les grands arbres disparaissent aussi en raison de la baisse de la pluviométrie et du niveau de la nappe phréatique qui l'entretient en saison sèche. L'influence humaine n'est pas à exclure car la pression devient de plus en plus importante (surpâturage, cultures vivrières, bois d'œuvre et bois-énergie). B : Etat de la végétation dans les dépressions interdunaires du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) en saison des pluies. La végétation est plus dense et est composée de *Hyphaena thebaica*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia sp.*, *Prosopis juliflora*, *Leptadenia pyrotechnica* et *Phoenix dactylifera* qui est pour la plupart introduit par l'homme. Les dépressions interdunaires ou cuvettes interdunaires sont de plus en plus exposées au phénomène d'ensablement et à une baisse du niveau de la nappe phréatique qui contribuent aussi à la dégradation voire la disparition totale de la végétation.

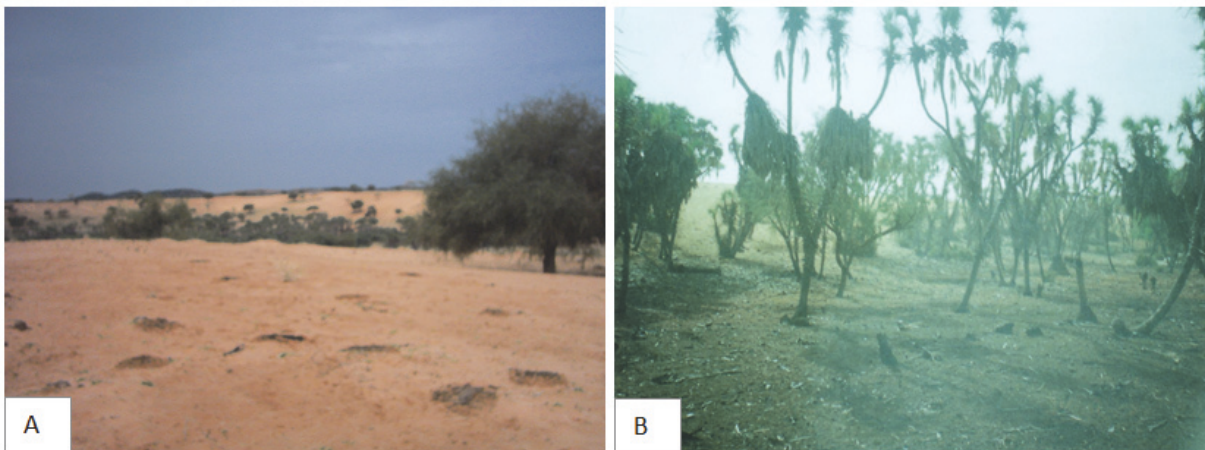
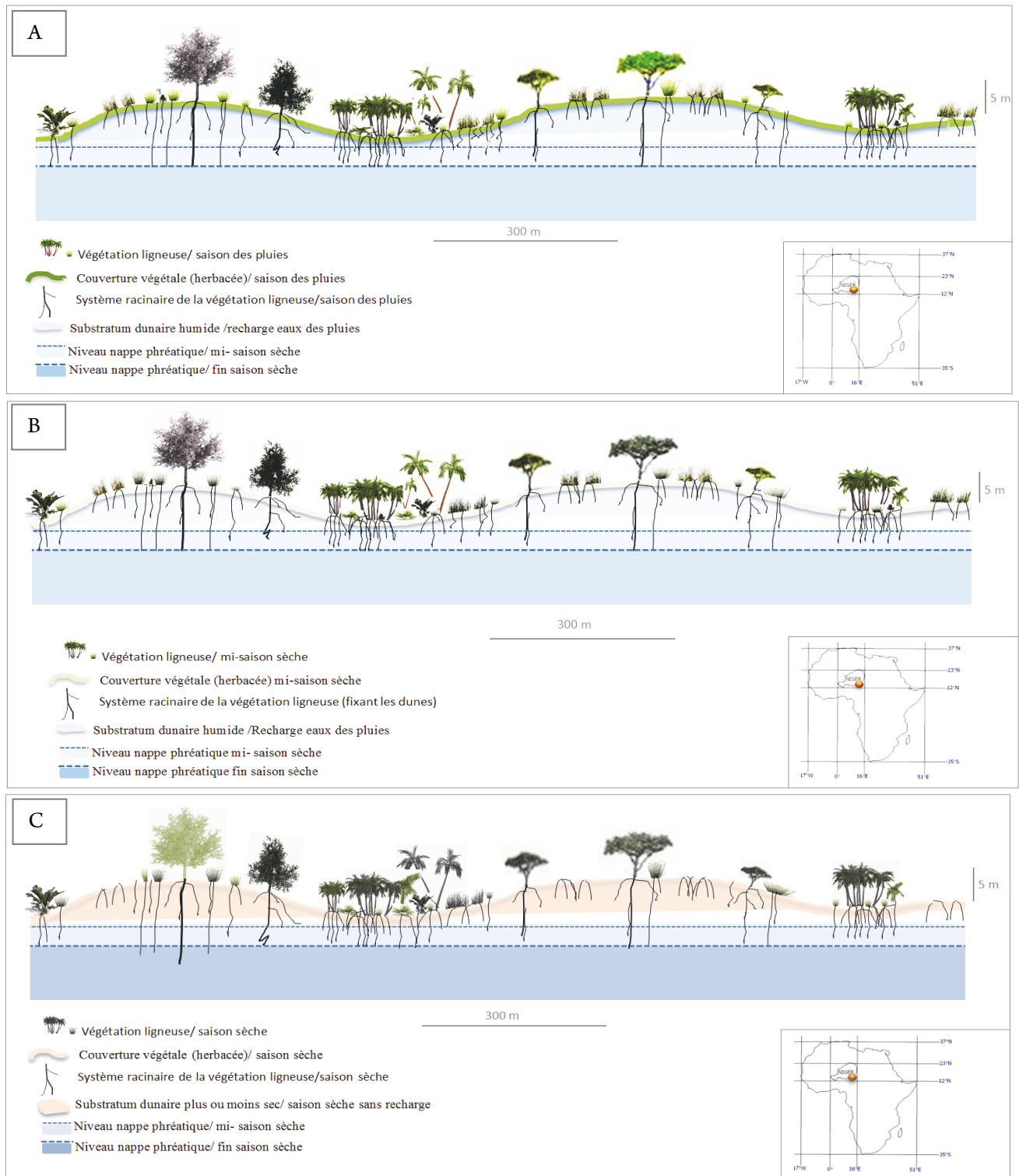


Photo n°8 : Etat de la végétation du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) en saison sèche . A : sur les sommets dunaires. B : dans les dépressions interdunaires.

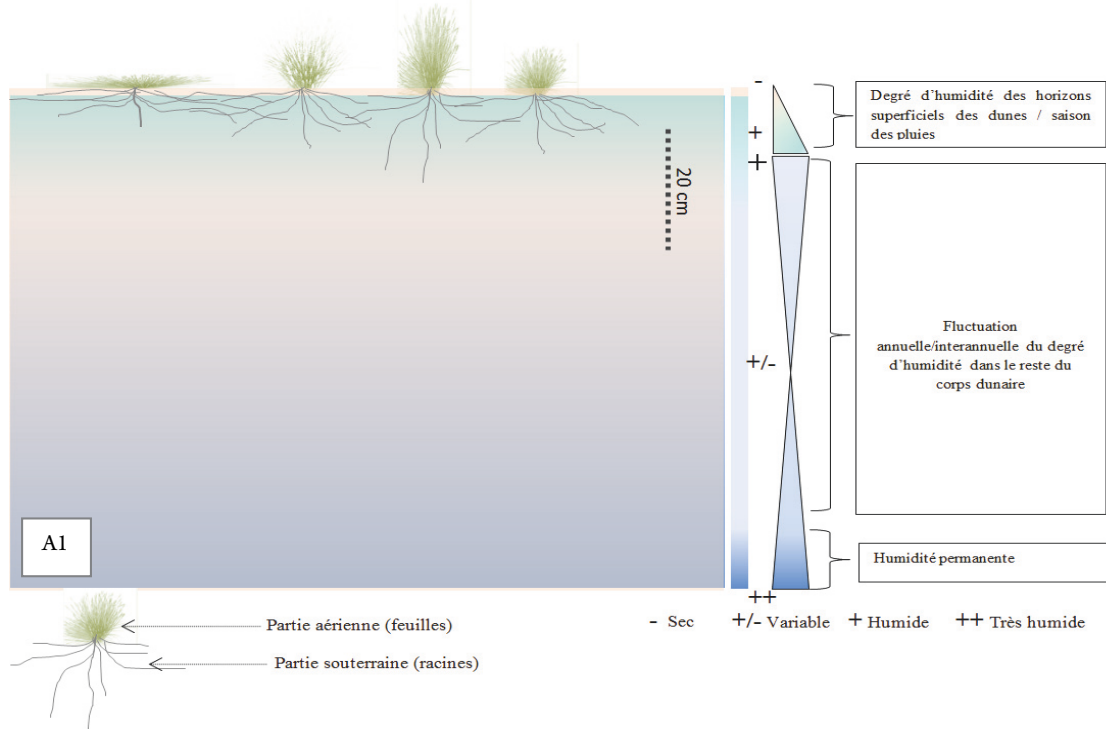
3.4.2. Rôle de fixation et comportement de la végétation dans les paysages dunaires

Bien que dépendant des conditions climatiques (de la pluie surtout), le couvert végétal joue un rôle de premier plan dans le processus de stabilisation et de fixation des paysages dunaires. Cette fonction de protection dépend essentiellement des caractéristiques de couverture végétale (stratification, densité) et de la morphologie des systèmes racinaires propres à chaque espèce végétale (profondeur d'enracinement, organisation des réseaux racinaires) (croquis n°7, n°8 et n°9). Cela dépend aussi de la géomorphologie locale c'est-à-dire de la topographie des paysages dunaires qui présentent pour la plupart un relief ondulé caractérisé par le couple dune-dépression interdunaire, en dénivellations fortes ou faibles. En outre, l'efficacité de ce rôle de fixation de la végétation dépend aussi de la granulométrie du corps dunaire (sables grossiers, fins, argiles et limons), de la profondeur de la nappe phréatique (superficielle, peu ou très profonde). La végétation des paysages dunaires change d'état en fonction des saisons et de sa position par rapport à la configuration des topo-séquence paysagère locales. Sur les sommets dunaires, la couverture végétale se présente soit éparse et diffuse et dans les dépressions interdunaires elle est par contre relativement dense et très groupée. Cette couverture varie aussi en fonction du type et d'espèce de végétation. Ainsi, le croquis n° 7 le modèle graphique montre les relations entre la topographie, système racinaire de la végétation ligneuse et profondeur de la nappe phréatique. Sur le croquis n° 8, le modèle montre que le rôle de fixation de la végétation varie en efficacité selon la nature de l'organisation de son système racinaire (densité et longueur) et de la disponibilité en eau du corps dunaires. Ainsi, si l'humidité des parties superficielles des dunes baisse, la végétation régresse aussi et les expose à la dégradation en même temps que les sols deviennent moins cohérents. Le croquis n°9 enfin explique la dynamique saisonnière de la végétation ligneuse sur les dunes en fonction des types de végétation et de la morphologie de son système racinaire.

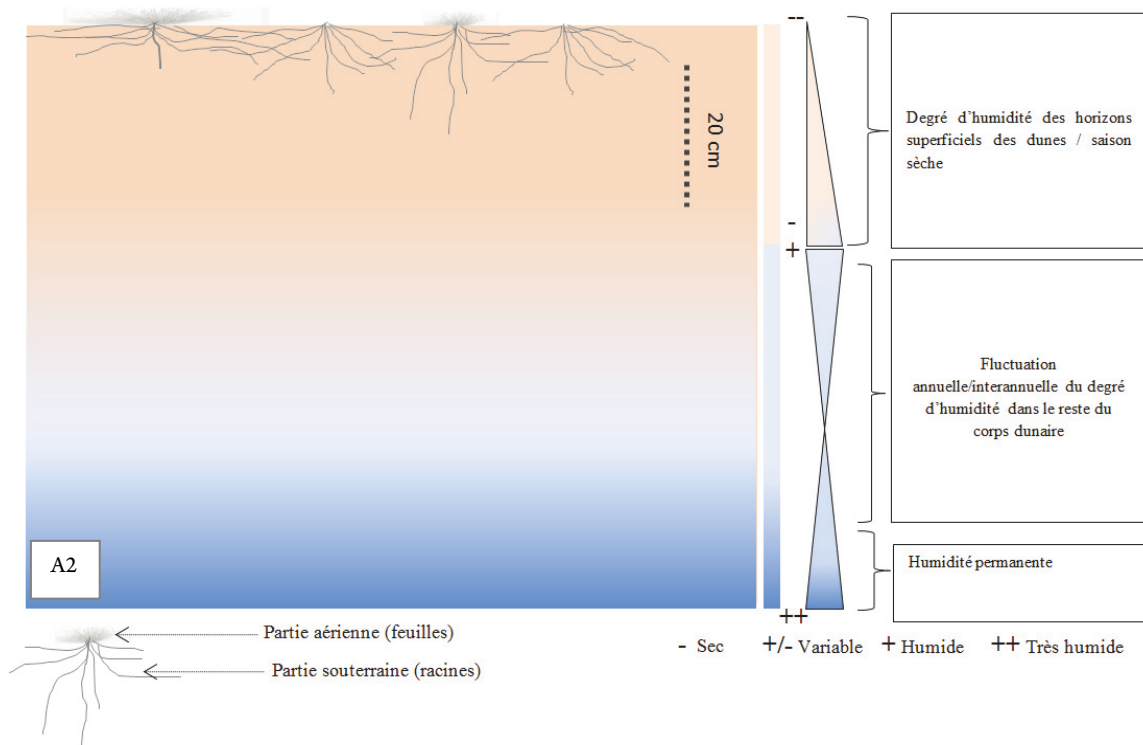


Croquis n°7 : Dynamique saisonnière de la végétation en milieux dunaires (Niger-SE). A : en saison des pluies. B : au début de la saison sèche. C : en fin de la saison sèche.

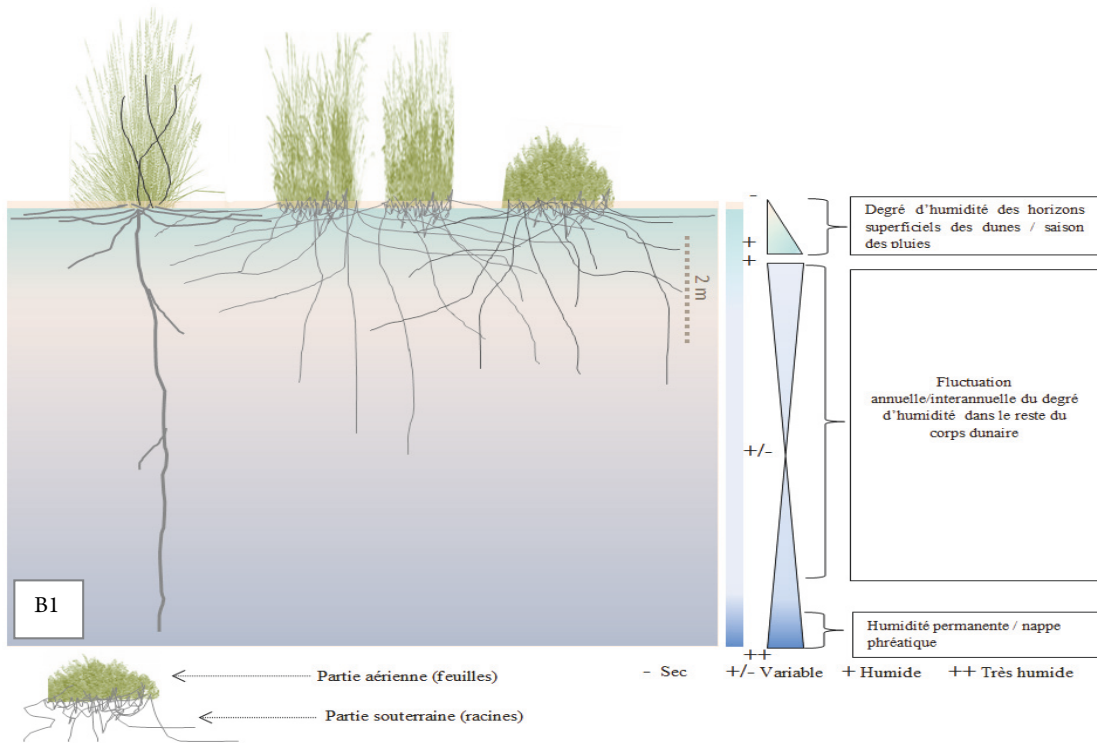
En saison des pluies



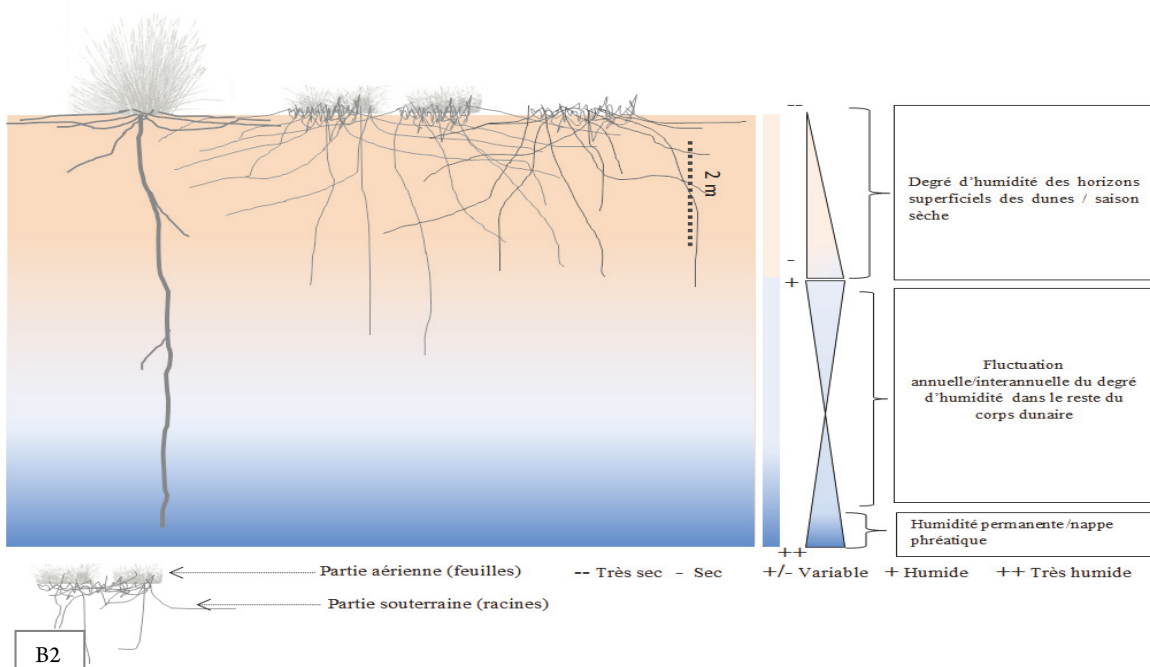
En saison sèche



En saison des pluies

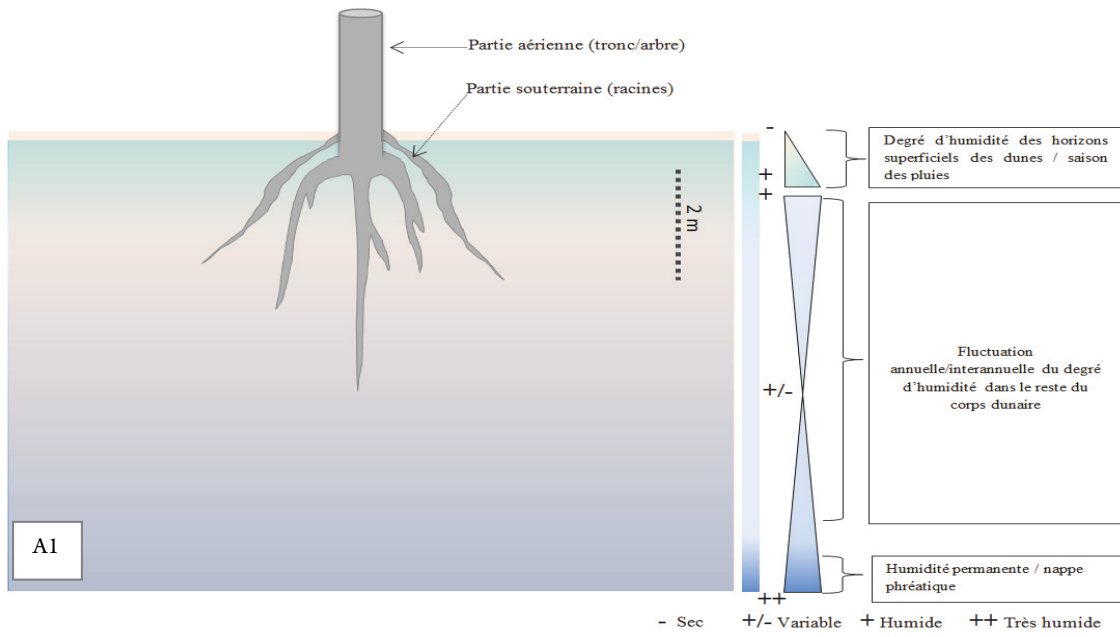


En saison sèche

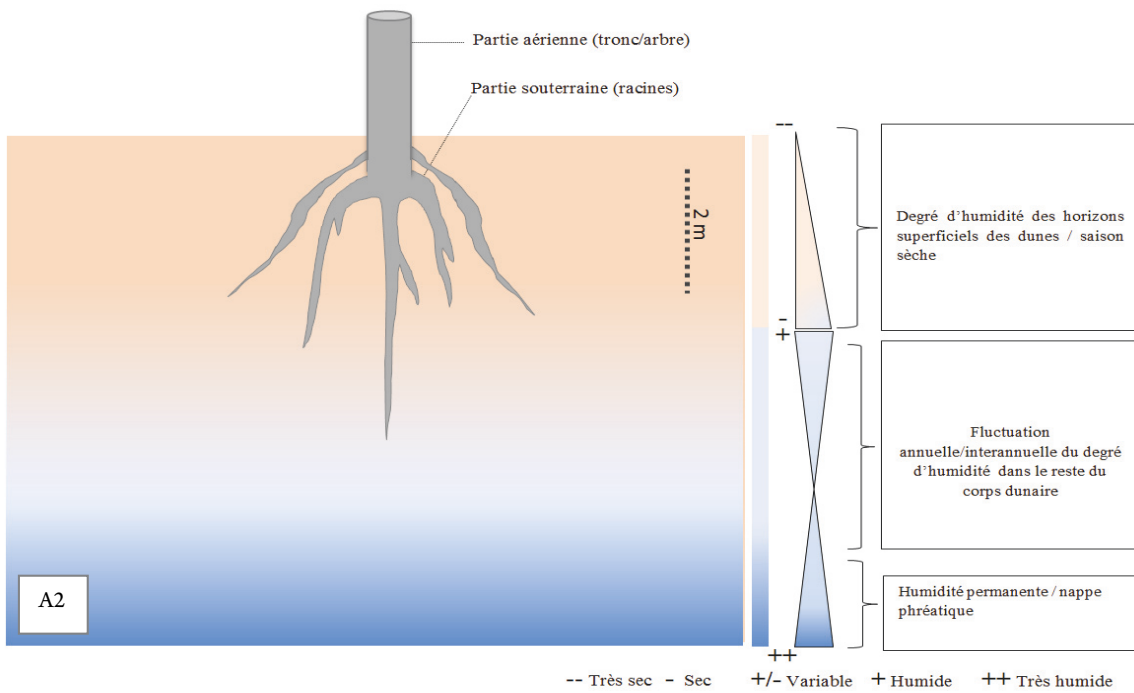


Croquis n° 8. Dynamique saisonnière de la végétation herbacée sur les dunes. A1 : Végétation des herbacées annuelles en saison des pluies. A2 : Végétation des herbacées annuelles en saison sèche. B1 : Végétation des herbacées pérennes en saison des pluies. B2 : Végétation des herbacées pérennes en saison sèche.

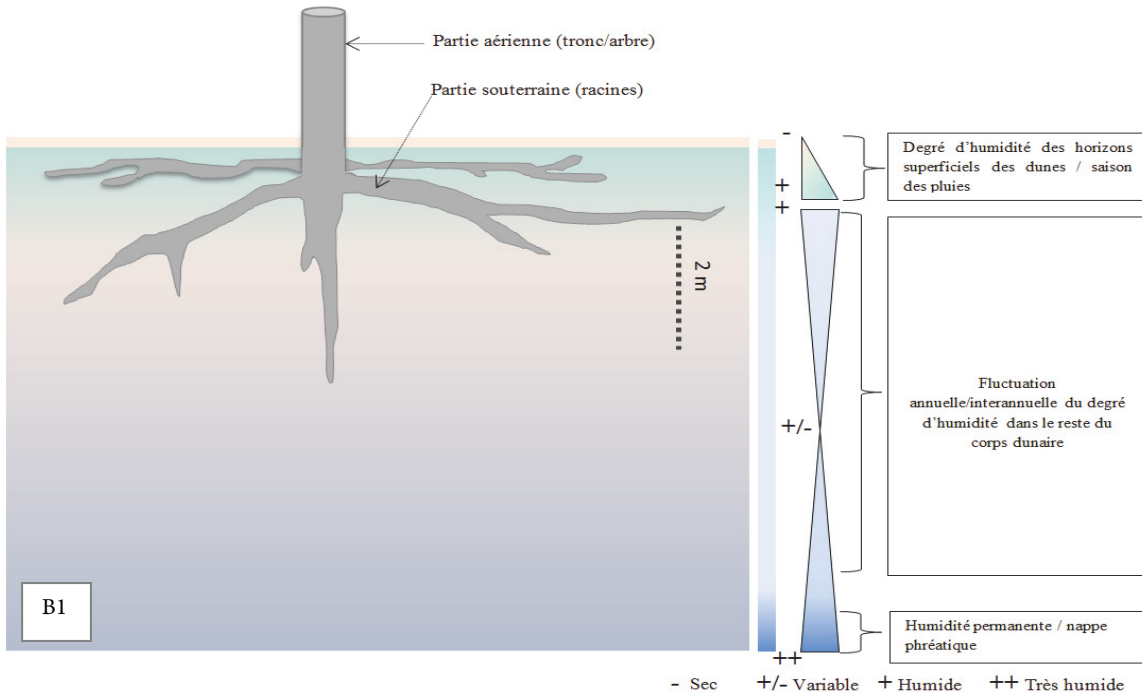
En saison des pluies



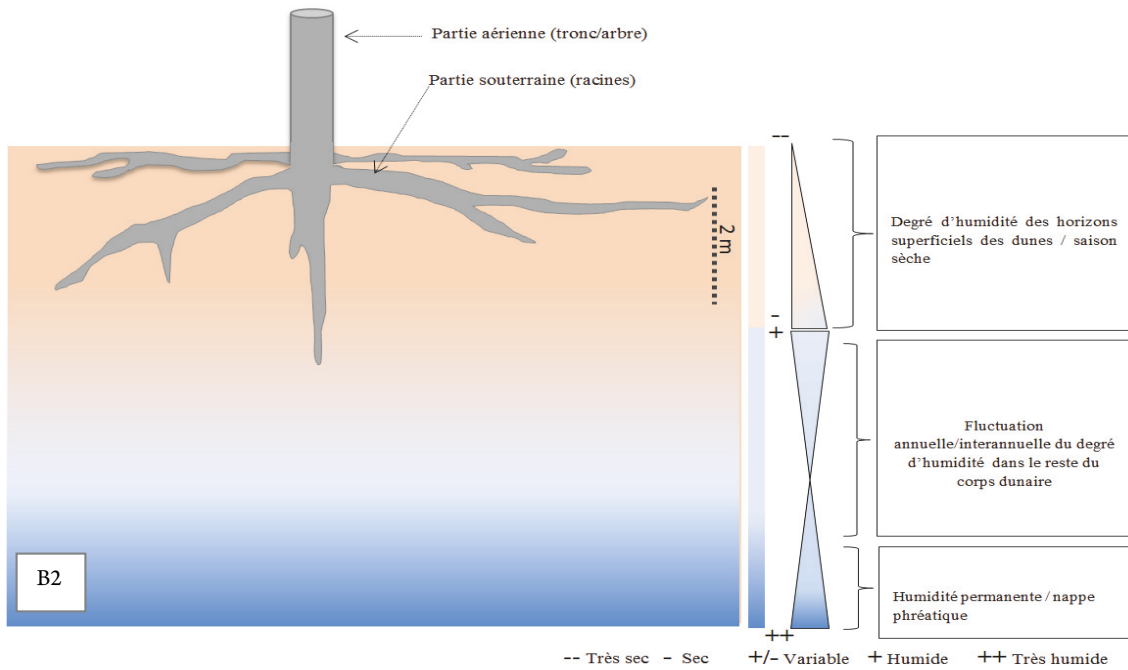
En saison sèche



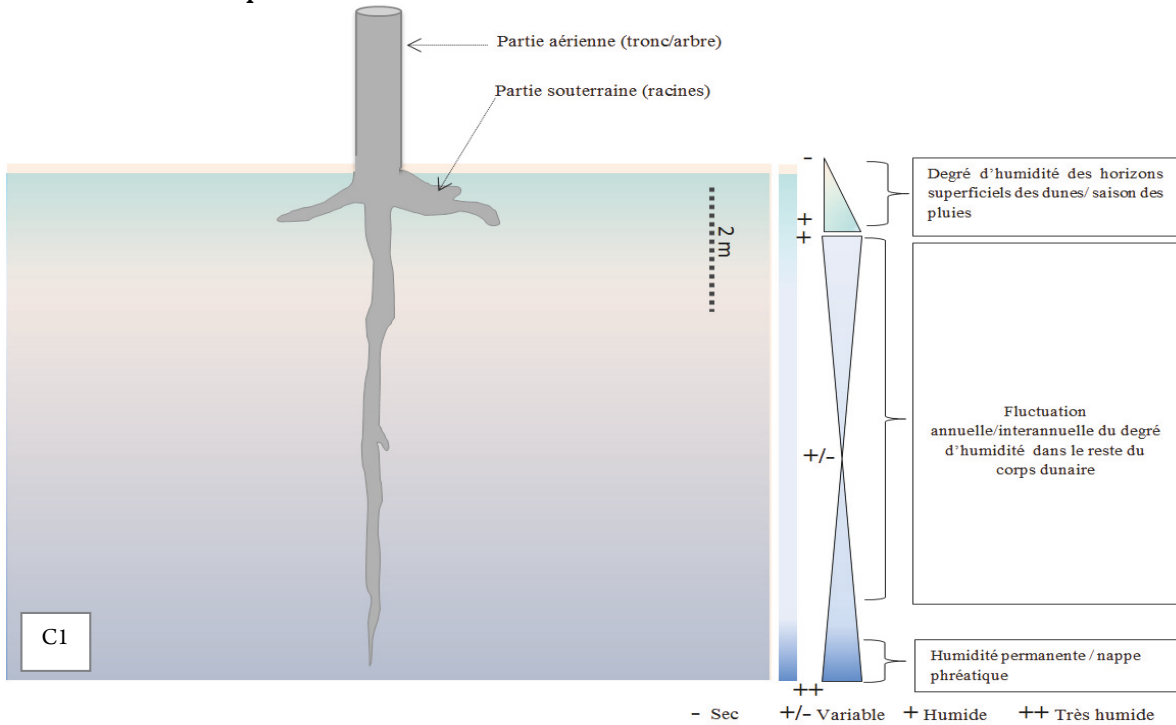
En saison des pluies



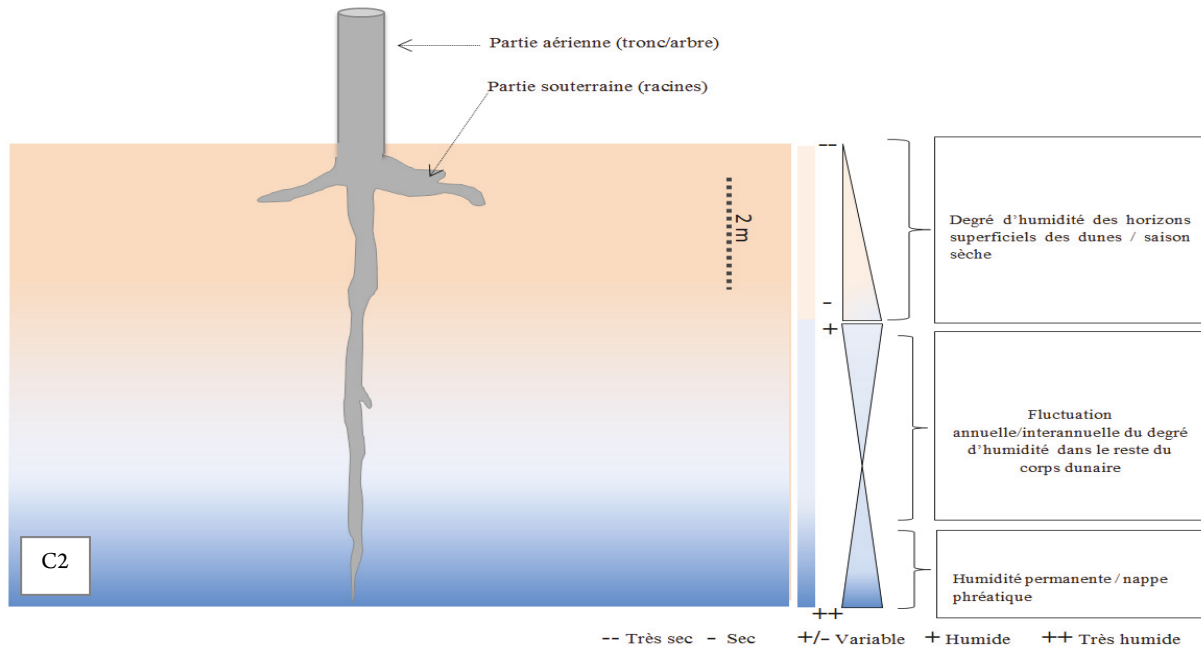
En saison sèche



En saison des pluies



En saison sèche

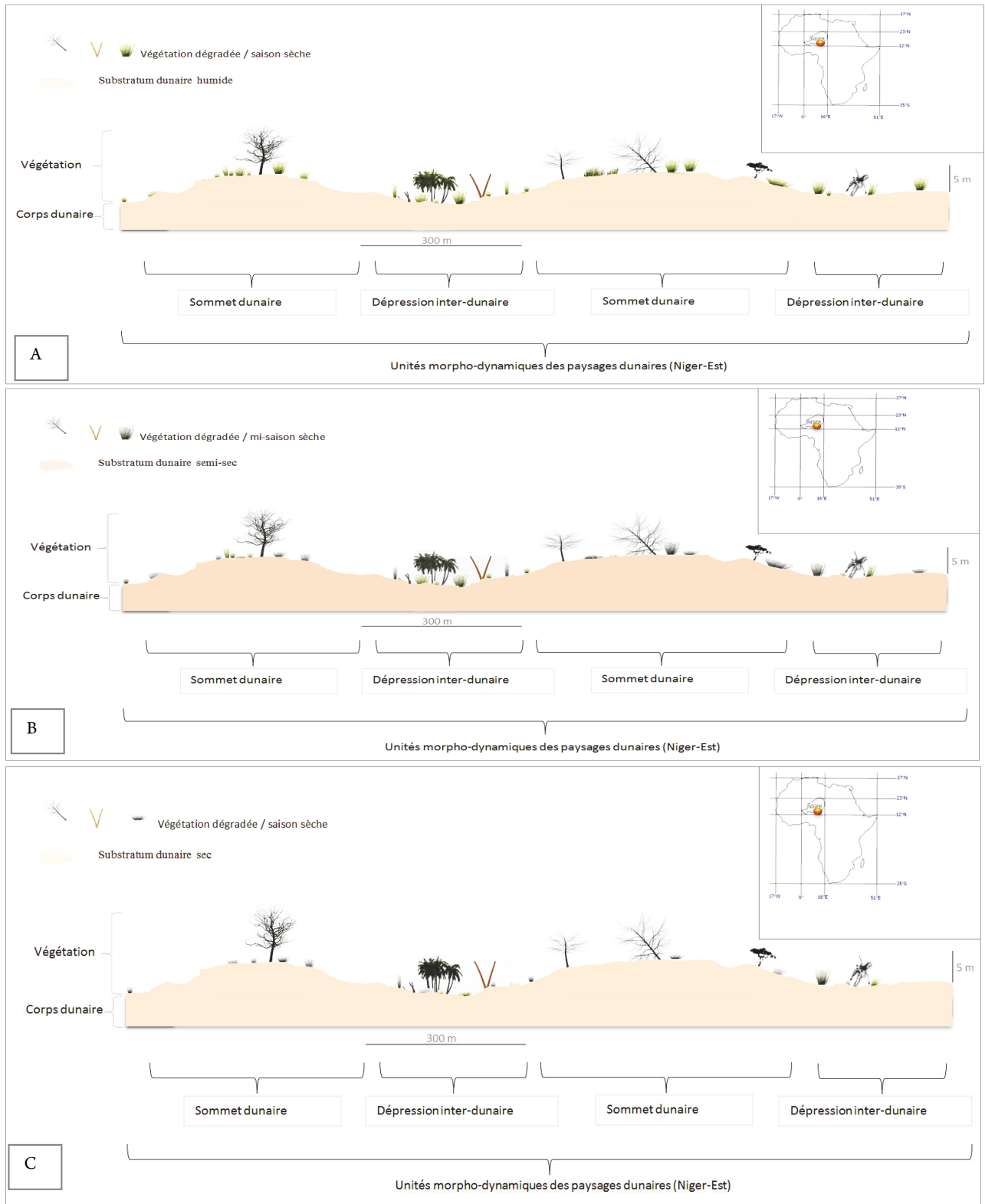


Croquis n°9 : Système racinaire et dynamique saisonnière de la végétation ligneuse sur les dunes. A : arbre à système racinaire latéral et central (ex. *Balanites*). B : arbre à système racinaire latéral (ex. *Maerua*). C : arbre à système racinaire central pivotant (ex. *Acacia*). 1 : en saison des pluies et 2 : en saison sèche. Ce modèle montre que les arbres de type A et B sont plus exposés à la baisse des pluies et du niveau de la nappe phréatique en saison sèche que ceux de type C. Ainsi, les dunes recouvertes par ces types (A et B) peuvent facilement perdre leur couverture et leur fonction protectrice et peuvent se dégrader aussi facilement.

3.4.3. Influences humaines sur la dégradation des dunes

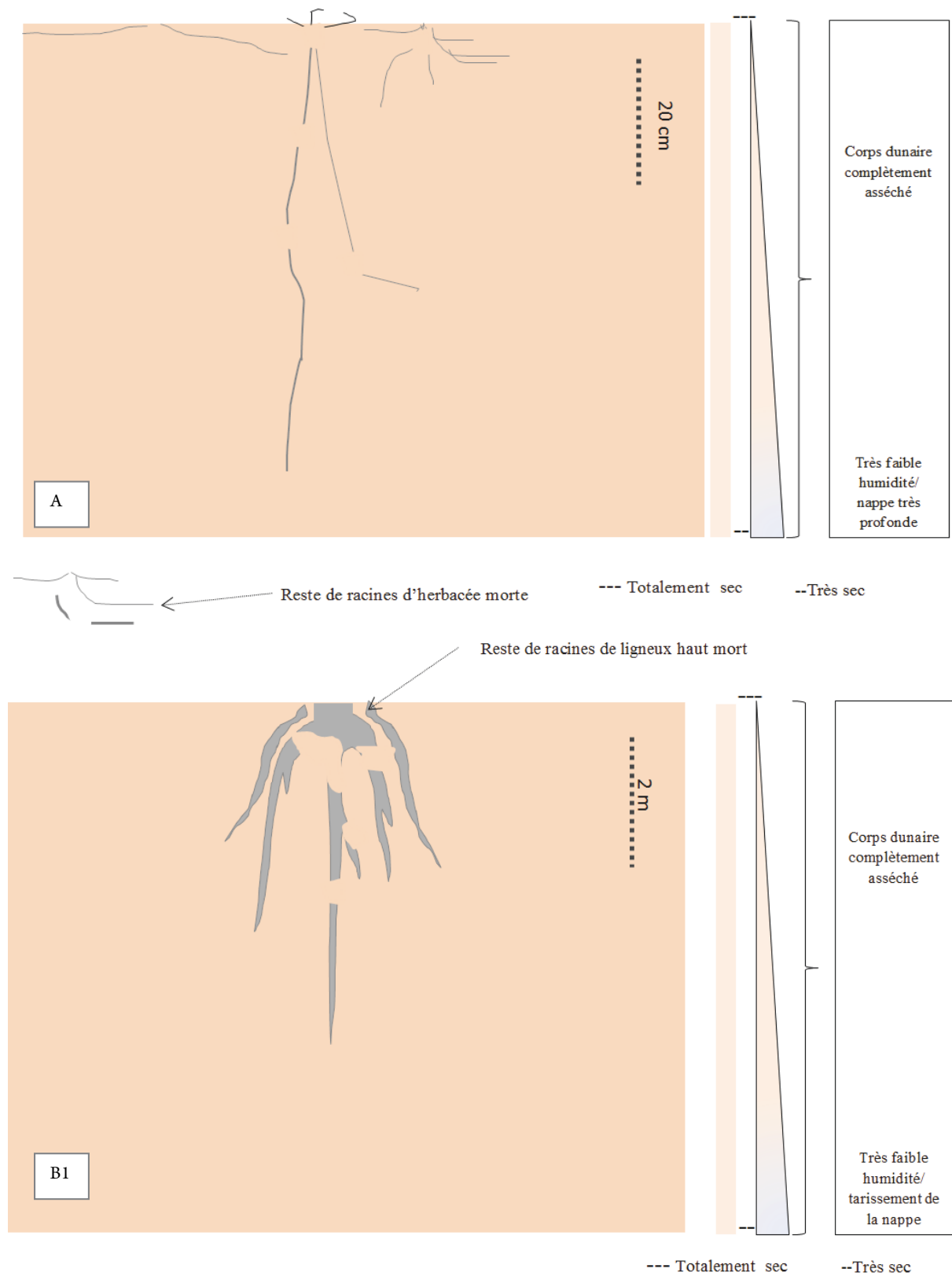
Les activités humaines dont l'agriculture et l'élevage sont les principaux facteurs humains de dégradation des dunes. La croissance démographique joue une fonction d'accélérateur des processus érosifs par la forte demande en espaces à cultiver pour nourrir la population. La pression du cheptel joue aussi la même fonction à travers le nombre croissant des animaux à nourrir. En effet, dans les paysages dunaires fortement anthropisés, particulièrement dans les zones cultivées (champs), les arbres sont élagués, certains sont coupés pour avoir plus d'espace à cultiver. L'activité de labours conduit à l'élimination de la végétation, particulièrement celle de la couverture herbacée considérée comme « mauvaises herbes » pour les cultures vivrières. Cette végétation herbacée est ainsi détruite en faveur des cultures.

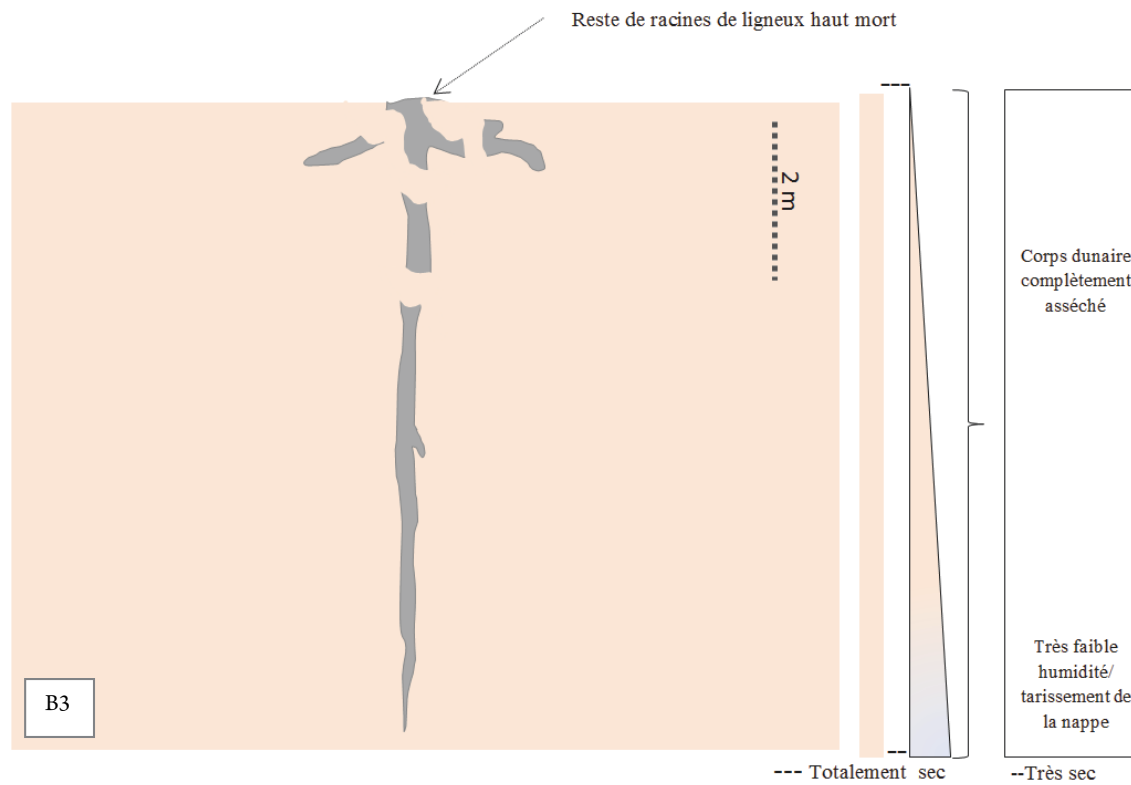
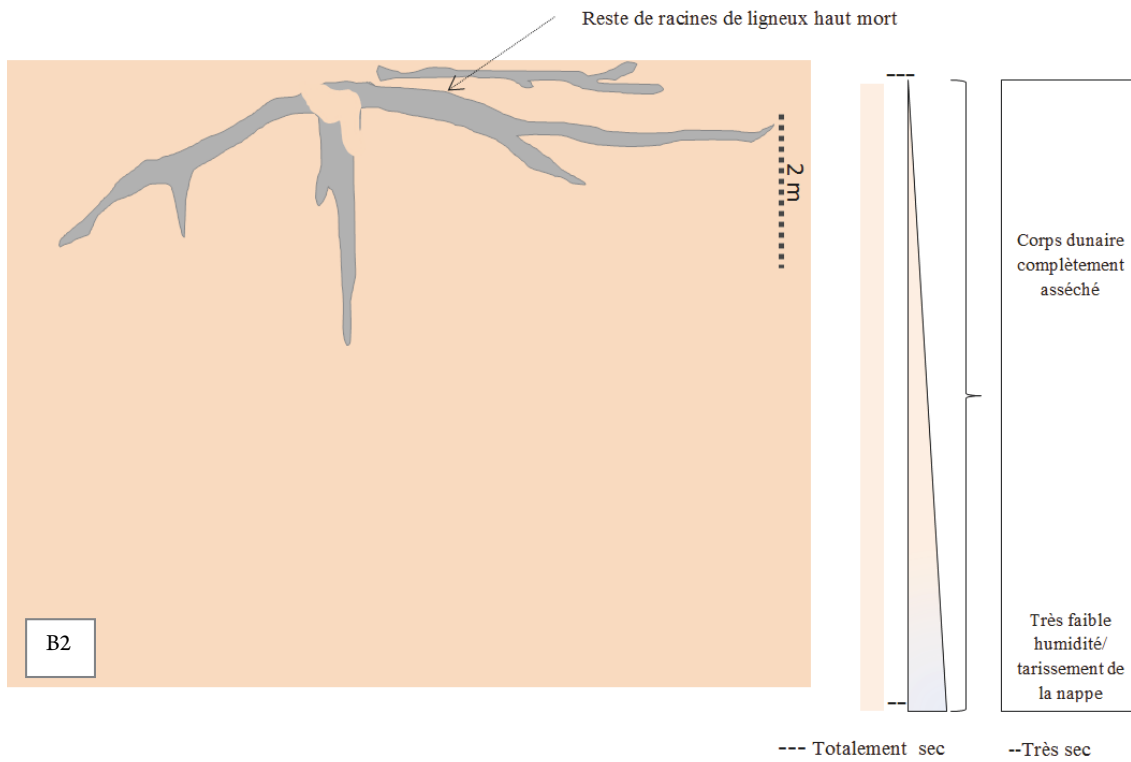
Dans les zones dominées par les activités pastorales dominantes, la végétation est aussi détruite dès les premières pousses après les premières pluies. Celle-ci est en effet, sitôt broutée par les animaux qui, après la longue saison sèche sans pâturages verts, n'ont pas le choix d'attendre que les jeunes pousses grandissent pour être mangées. Ainsi, si les effectifs du cheptel sont très élevés, cela crée une surcharge supplémentaire qui entrave la reconstruction et la régénération du couvert végétal pouvant protéger les dunes de l'érosion. En outre, en saison sèche, par manque de fourrage pour leurs animaux, les éleveurs nomades coupent régulièrement certaines espèces vivantes (vertes) pour nourrir leur bétail. Par ailleurs les animaux mangent aussi les restes de herbes sèches et mortes pour passer la période de dite de « soudure ». Si cette situation se combine aux mauvaises conditions climatiques (faible précipitation ou sécheresse). Ainsi, la combinaison de ces différents facteurs liés aux activités humaines fragilise la couverture végétale des paysages dunaires et les expose à la dégradation. Elle réduit aussi ses capacités de régénération naturelle et rend les écosystèmes des paysages dunaires peu ou non résilient. Cela conduit souvent à une dégradation irréversible si bien que même en cas de bonne pluviométrie, la végétation n'arrive plus à s'installer sur les dunes très fortement dégradées (croquis 10) et le cercle vicieux de la désertification s'installe. Ainsi, au fil du temps, cette végétation adaptée aux conditions climatiques et la disponibilité en eau des pluies et de la nappe phréatiques meurent, puis les systèmes racinaires se détériorent (croquis 11) et enfin les dunes restent à la merci des processus érosifs.



Croquis n°10 : Modèle de la variation saisonnière de la couverture végétale dans les paysages dunaires dégradés A : en pendant la saison des pluies. B. en début de la saison sèche. C : en fin de la saison sèche.

Les croquis A, B1, B2 et B3 ci-dessous montre un modèle de dégradation des dunes. . Ce modèle montre que la baisse de l'humidité dans les corps dunaires et la baisse du niveau de la nappe phréatique entraînent la mort des arbres et la destruction des systèmes racinaires qui fixent les dunes.





Croquis n° 11: Etats de la végétation et dégradation des dunes. A : végétation herbacée. B1, B2 et B3 : végétation ligneuse.

3.5. Conclusion partielle

La végétation des paysages dunaires est influencée par les facteurs topographiques et les facteurs climatiques. Sur le plan spatial, la position topographique influence la couverture végétale. Sur le plan temporel, les variations saisonnières et interannuelles influencent les changements d'état de la couverture végétale. Les différentes observations effectuées sur le terrain synthétisées sous la forme de simples modèles graphiques montrent que la dégradation des paysages dunaires est intrinsèquement liée à l'état de la couverture végétale. Celle-ci est aussi influencée par des facteurs naturels et humains. Les facteurs naturels sont les variations saisonnières et interannuelles des régimes de la pluviométrie (saisons sèches et saisons humides, années sèches et humides), le type de couverture végétale (herbacée ou ligneuse, annuelle ou pérenne, éphémère), le type de système racinaire (densité, forme ou profondeur d'enracinement), la profondeur de la nappe phréatique (superficielle, peu profonde, profonde ou très profonde) et la géomorphologie locale (sommets dunaires ou dépressions interdunaires). Quant aux facteurs humains, les plus importants sont la densité de la population et du cheptel dont les conséquences sont la surexploitation et l'extension des terres agricoles, la déforestation et le surpâturage. Ces influences humaines contribuent à l'accélération de la dégradation des dunes, réduisent les capacités de résilience des paysages dunaires et cercle vicieux de la désertification s'installe.

Troisième partie

4. Méthodologie d'échantillonnage, d'analyse et d'interprétation des matériaux des sols dunaires

4.1. Transects d'échantillonnage et choix des échantillons

4.1.1. Transects

Les deux transects représentatifs des zones étudiées sont le T1 (800 km) et le T2 (40 Km) (se référer à la carte n°1 Chap. 1. Partie 1.). Ceux-ci ont été effectués lors de plusieurs campagnes de terrain (2006, 2007, 2011 et 2012). Ainsi, plus de 318 échantillons ont été prélevés le long de ces transects, sur des couches superficielles des dunes entre 0-20 premiers centimètres des corps dunaires fixés en milieux semi-arides (T1). Les échantillons de référence considérés, proviennent des milieux hyperarides des systèmes dunaires vifs du Ténéré (T2). Le transect T1 orienté Est-Ouest est fait dans la partie sahélienne où les dunes sont fixées par la végétation et dont une partie est en constante dégradation du fait de plusieurs paramètres et un autre transect T2 orienté Nord-Sud est effectué dans la partie saharienne où les dunes sont mobiles et sans aucune végétation. Le T1 de la partie sahélienne, il a été utilisé les données et les échantillons collectés lors de plusieurs campagnes sur le terrain (2004, 2005, 2007, 2011 et 2012). Au cours de ces campagnes des échantillonnages des sols et de croûtes superficielles des dunes fixées ont été fait. Quant au T2 a été effectué lors d'une campagne de recherche paléo-environnementale dans le Sahara organisée par la DFG (Universités de Würzburg, FU Berlin, Giessen et Niamey) en 2006. Mais pour des raisons sécuritaires il n'a pas été possible d'effectuer des campagnes de vérification et de collecte des informations complémentaires utiles à la vérification des hypothèses et des réponses aux questions posées. Ainsi, ce sont seulement les échantillons des dunes mobiles collectés pendant cette saison qui ont fait l'objet d'analyse (croquis n°12).

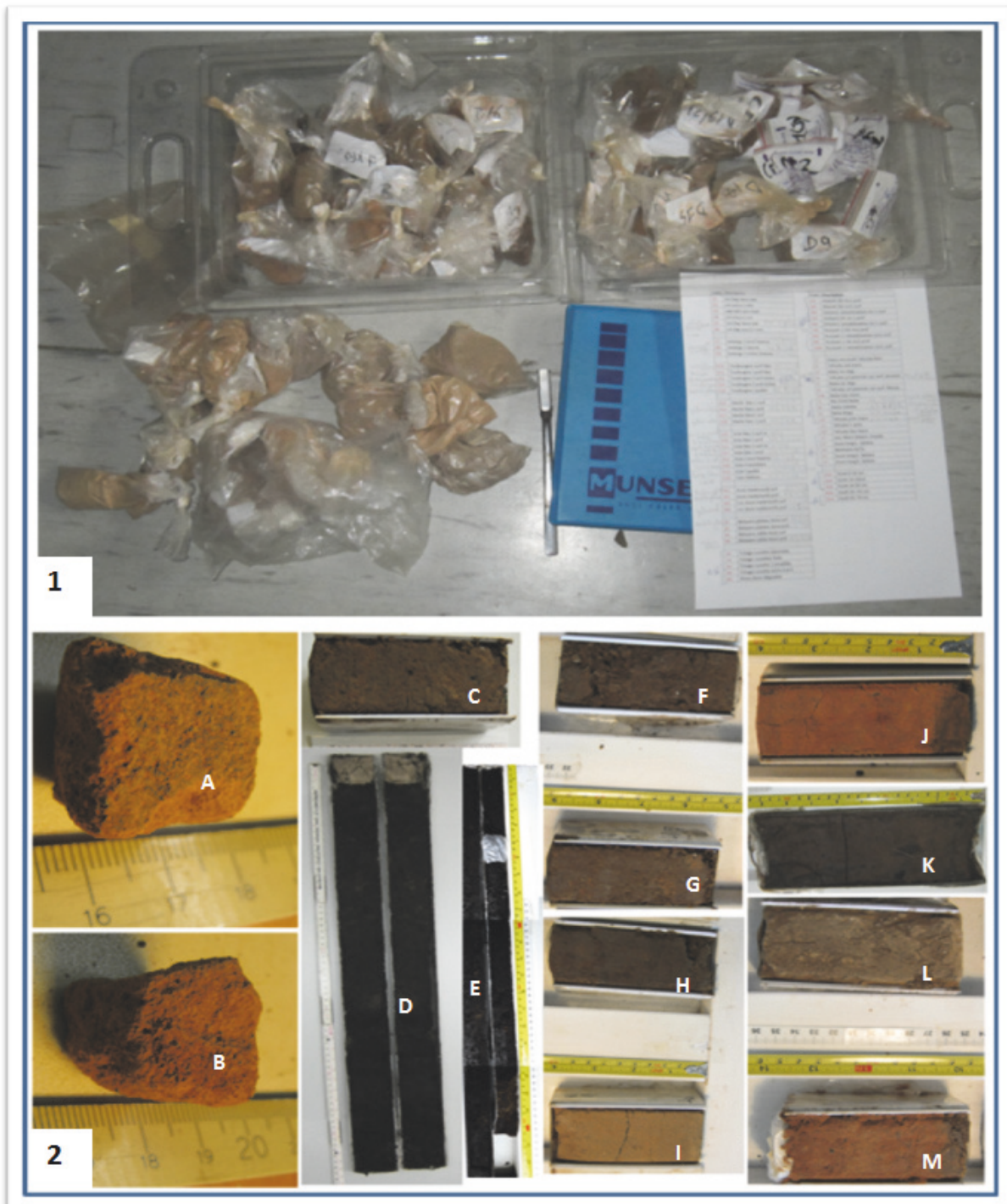
4.1.2. Echantillonnage

Après la caractérisation des paysages locaux sur la base des observations de terrain, un échantillonnage a été fait sur les deux transects suivant la géomorphologie spécifique à chaque paysage dunaire (croquis n°12). L'échantillonnage est fait sur divers matériaux à la surface des dunes et dans les dépressions interdunaires des paysages dunaires étudiés. Il concerne en effet, les vieux édifices éoliens non remaniés, les jeunes édifices éoliens de remobilisation, les sols dunaires développés sur plateaux latéritiques, les formations et organisations pelliculaires de surface des dunes (croûtes diverses), les sédiments lacustres des dépressions interdunaires fixées par la végétation. Les échantillons collectés ont été analysés en laboratoire en vue de l'évaluation et la comparaison des caractéristiques des matériaux des couches superficielles des dunes. Les analyses effectuées sont relatives à leurs caractéristiques physiques, géochimiques et micromorphologiques. Ainsi, les matériaux prélevés et analysés sont:

- les matériaux dunaires consolidés ;
- les matériaux dunaires meubles ;
- les croûtes biogéniques ;
- les croûtes minérales ;
- et les sédiments lacustres (Photos n°9 et n°10 ci-dessous)



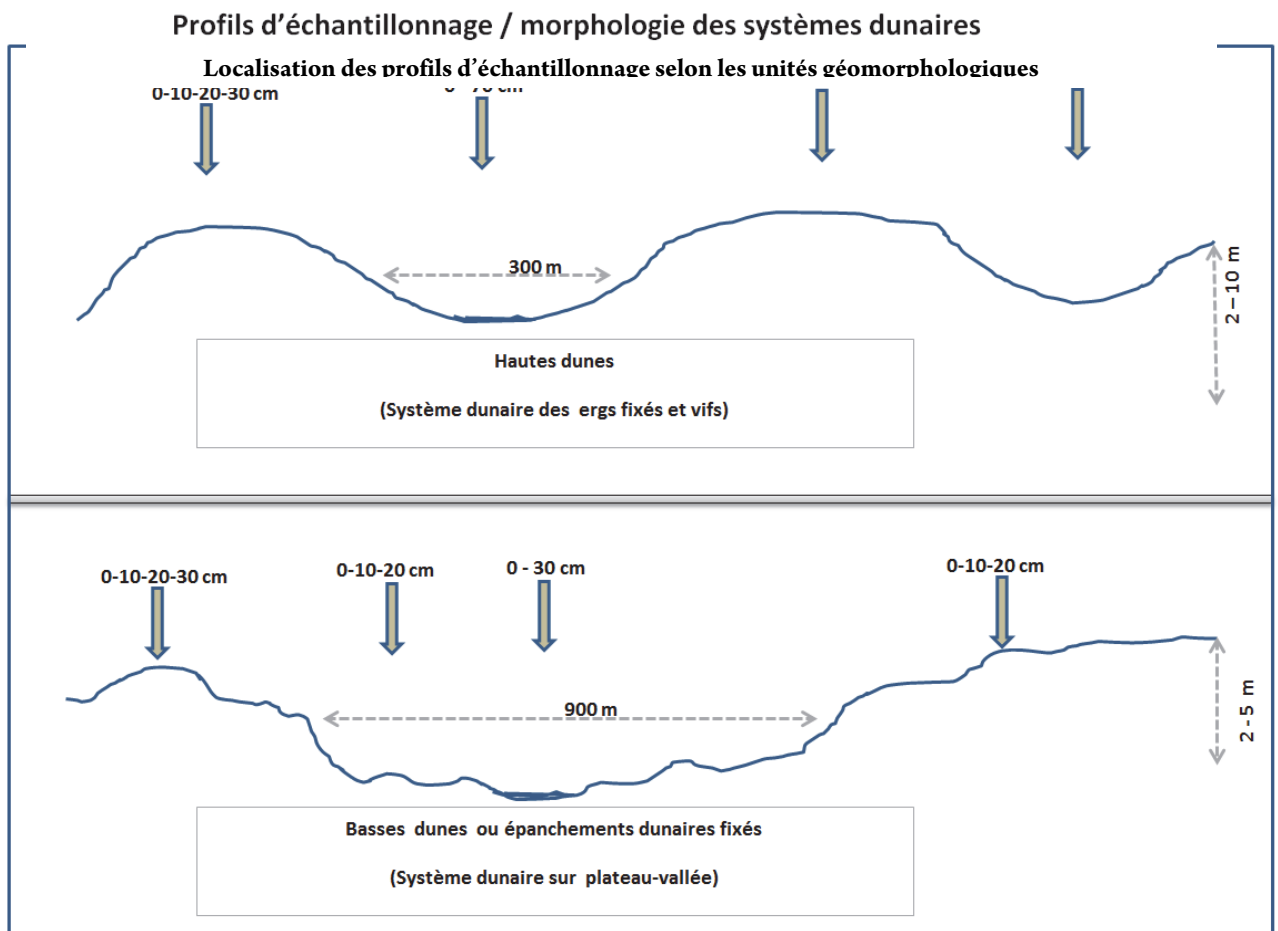
Photo n°9 : Exemples de couches superficielles des sols et sédiments dunaires ayant fait l'objet d'étude. A et B : dunes ADM ($05^{\circ}03' - 05^{\circ}40'$ E et $14^{\circ}09' - 14^{\circ}39'$ N). C : dunes G1 ($07^{\circ}03' - 07^{\circ}15'$ E et $13^{\circ}09' - 13^{\circ}20'$ N). D : dunes Dm ($09^{\circ}20' - 10^{\circ}21'$ E et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05'$ N). E et F : dunes Mg ($11^{\circ}10' - 12^{\circ}03'$ E et $13^{\circ}10' - 13^{\circ}35'$ N).



Photos n°10 : Les différents types d'échantillons collectés. 1: matériaux dunaires de différents paysages dunaires étudiés (ADM= $05^{\circ}03' - 05^{\circ}40' E$ et $14^{\circ}09' - 14^{\circ}39' N$; Gl= $07^{\circ}03' - 07^{\circ}15' E$ et $13^{\circ}09' - 13^{\circ}20' N$; DM= $09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$; Mg= $11^{\circ}10' - 12^{\circ}03' E$ et $13^{\circ}10' - 13^{\circ}35' N$ et TEN :Réf.= $10^{\circ}34' - 10^{\circ}50' E$ et $18^{\circ}22' - 18^{\circ}38' N$). 2: exemple de carottes prélevées et de matériaux dunaires encroûtés (A et B). 2C et 2F (sur des dunes ADM), 2D et 2E (dans un lac DM/ lac Guidimouni), 2G et 2H (sur des dunes Gl) 2I et 2 M (sur des dunes DM), 2J et 2L (sur des dunes Mg) et 2K (dans une mare ADM).

Répartition des échantillons par transect et par site.

Transects et sites	Localisation		Nbr PE (point d'échantillonnage)	Nbr Echant.
	Long	Lat		
Ader-Douchi-Maggia(ADM)	05°03'-05°40'	14°09'-14°39'	6	30
Goulbi(Gl)	07°03'-07°15'	13°09'-13°20'	4	12
Damagaram-Mounio (DM)	09°20'-10°21'	13°30'-14°05'	5	42
Manga (Mg)	11°10' -12°03'	13°10'-13°35'	10	33
Ténéré (TEN Réf.)	10°34'-10°50'	18°22'-18°38'	4	8



Croquis n°12 : répartition des points d'échantillonnage (PE) selon la morphologie générale des paysages dunaires

4.2. Choix des échantillons analysés

Les échantillons collectés ont d'abord subi les analyses granulométriques (fractions 2000 μm et $> 63 \mu\text{m}$) par tamisage. Mais en raison des coûts et du temps, ce sont seulement les échantillons considérés représentatifs qui ont été sélectionnés sur la base de l'indice de tri de Trask utilisé par RIVIERE (1977) et CAILLEUX & TRICART (1959) et aussi sur la base de la variance des spectres granulométriques des échantillons des différents profils (Var.P). Les échantillons choisis, ont subi des analyses géophysique et géochimique. Pour les analyses géophysiques, il a été procédé à l'analyse granulométrique aux tamis et au laser. La structure et la microstructure des matériaux sont analysées à la loupe et au microscope et le spectre chromatique déterminé au Code Munsell (Standard International des couleurs des sols). En ce qui concerne les analyses géochimiques, la concentration en ions hydrogène des matériaux dunaires (pH) a été déterminée

au pH-mètre électronique, la détermination des minéraux et des éléments majeurs des matériaux dunaires est faite par diffractométrie aux rayons X, fluorescence aux rayons X et par spectrométrie CNS-H et ICP-OES. D'autres analyses élémentaires ont été aussi faites par thermogravimétrie. Concernant les sédiments lacustres, ils ont subi des analyses stratigraphiques et palynologiques.

4.3. Préparation préliminaire des échantillons

La collecte des échantillons est faite par prélèvement direct des matériaux et par carottage. Pour ce qui concerne le carottage, des fosses de 10-30 cm de profondeur sont creusées sur le manteau dunaire et un tube en plastique rectangulaire de 20 cm de longueur (un des deux coté est coulissant) et 5 cm de largeur (les deux bases sont ouvertes) est enfoncé transversalement et très lentement dans le corps dunaire à l'état humide. Pour éviter de détruire la structure des croûtes, les matériaux dunaires extérieurs (gauche, droit et en dessous du tube) sont désagrégés au moyen d'un couteau afin d'éviter la résistance au retrait du carottier. La partie coulissante est ensuite remise et les deux cotés ouverts sont sitôt fermés. Les parties supérieures des carottes prélevées sont renforcées et amorties au moyen des sachets en plastique pliés afin d'éviter d'altérer leur structure et surtout celle de la croûte de surface qui généralement est très fragile et dépasse rarement 2 cm d'épaisseur. Le tout est ensuite immédiatement emballé pour faciliter le transport. Ainsi les échantillons gardent plus ou moins leur structure d'origine. Les échantillons sont enfin séchés, triés par paysage dunaire et par types de croûtes recouvrant la partie supérieure de chaque corps dunaire. Ceux jugés pertinents et représentatifs sont stabilisés dans du plâtre pour la fabrication des lames minces.

4.4. Description des méthodes et outils d'analyse

4.4.1. Analyses granulométriques /mécanique et laser

Avant de procéder à l'analyse granulométrique proprement dite des échantillons, ils sont d'abord débarasés des carbonates et les échantillons très carbonatés sont discriminés lors des analyses, afin d'affiner la description des principaux spectres granulométriques. Ainsi, deux types de méthodes d'analyses ont été utilisées : le tamisage mécanique aux colonnes de tamis ISO 3310-1 et l'analyse au laser des particules (photo n°11). Bien que moins précise, la première est moins couteuse mais nécessite beaucoup d'efforts physiques et de temps. Elle permet d'analyser un grand nombre d'échantillons et une large classe granulométrique ($> 2\text{mm} - > 40\mu\text{m}$). Quant à la deuxième, plus aisée, elle est plus précise et demande relativement peu de temps. Son inconvénient est qu'elle est très couteuse. Son avantage, c'est que malgré qu'elle n'utilise que les fractions de $< 2\text{ mm} - 0,04\ \mu\text{m}$, elle permet l'analyse d'un large spectre des particules ultrafines des limons et argiles.

4.4.1.1. Analyse granulométrique aux tamis

Pour les analyses mécaniques, 100 g de sédiments dunaires sont préalablement pesés. Ils sont pour une première fois passé au tamis $< 63\ \mu\text{m}$ et tamisés à l'eau pour séparer les fractions des argiles et limons de celles des sables fins, moyens et grossiers. Après les avoir débarrassés de leur matière organique, les échantillons sont ensuite séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Ils sont après cela, passé dans une colonne de tamis (ISO 3310-1) et tamisés à la secoueuse électrique. Ainsi, les proportions des poids relatives à chaque tamis permettent de déduire les

différents spectres granulométriques et d'établir les courbes de fréquences relatives et cumulées et les principaux quartiles, modes et moyennes granulométriques.

4.4.1.2. Analyse granulométrique au laser

L'échantillon à analyser subit d'abord une opération de quartage visant à lui assurer une certaine représentativité. L'opération est faite progressivement jusqu'à ce que le dernier quart de l'échantillon ait un poids de plus ou moins deux grammes (2g). Il est ensuite passé respectivement aux tamis 2 mm et 1 mm (ISO 3310-1) pour éliminer les fractions de gravier. Après la séance de tamisage, l'échantillon est traité au peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 à 35%) pendant vingt-quatre heures (24h) à 50°C pour éliminer la matière organique. Il subit ensuite un traitement à l'acide chlorhydrique (HCl à 9,9%) pour détruire les carbonates. Il est centrifugé pendant 10 minutes à 4000 tours /seconde. L'opération se poursuit 2 à 3 fois en y ajoutant chaque fois de l'eau déminéralisée et en mesurant le pH jusqu'à ce que l'acide utilisé soit complètement éliminé. On remplit ensuite l'éprouvette contenant l'échantillon de 30 ml d'eau distillée dans laquelle on introduit du pyrophosphate de sodium à 98% ($Na_4P_2O_7$) qui est un dispersif permettant de casser les liaisons entre les sédiments les plus fins. Le mélange est doucement remué au moyen d'un homogénéisateur pendant 72 heures à 70 tours/minute. Après, l'échantillon est passé aux ultrasons pendant 2 minutes pour disperser d'avantage les particules. Il est ensuite passé dans un dispositif de quartage à 10 flacons rotatifs. On choisit enfin, deux flacons aux positions opposées contenant chacun une partie de l'échantillon quarté. Ceux-ci sont ensuite passés à l'analyseur laser des particules (Beckman Coulter LS 13320 Laser Diffraction Particule Size Analyser) pour la détermination de la granulométrie complète de l'échantillon (photo n°11). Deux mesures différentes sont faites pour les besoins de calibration.

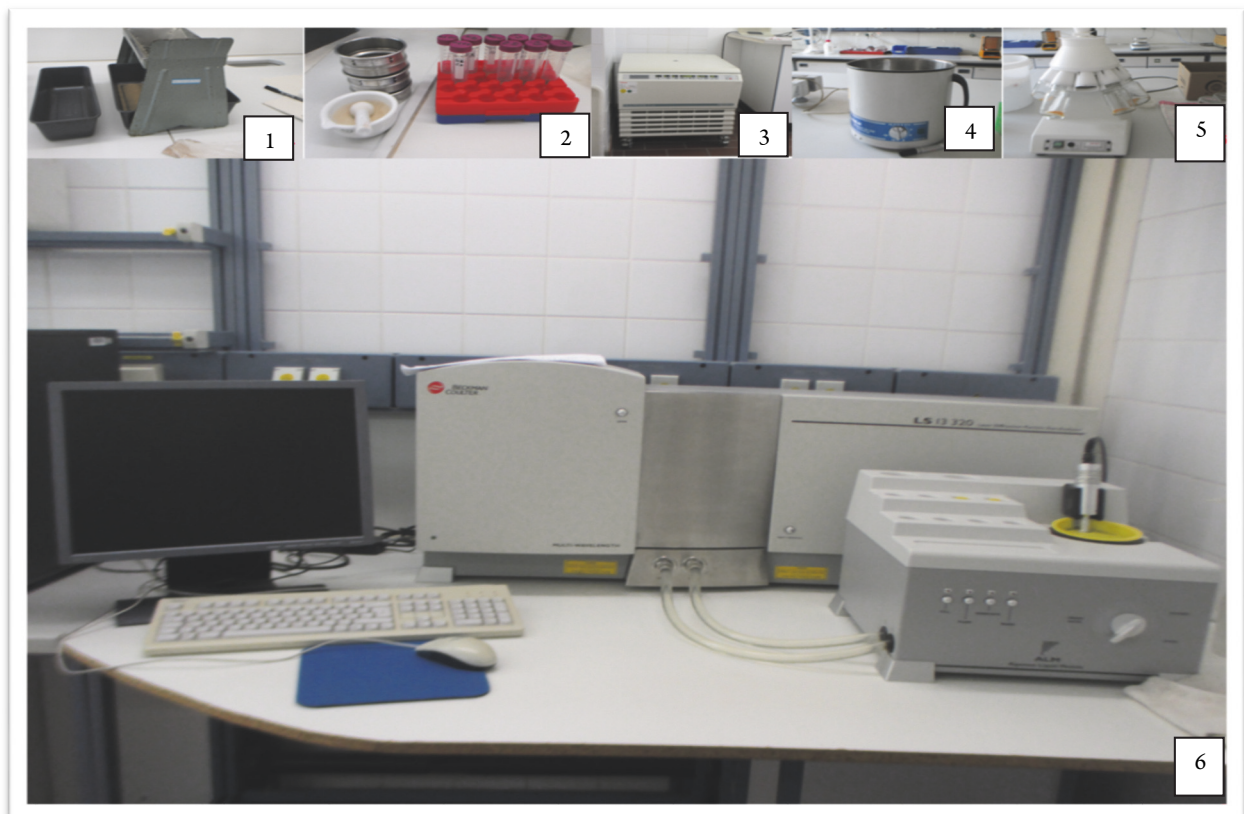


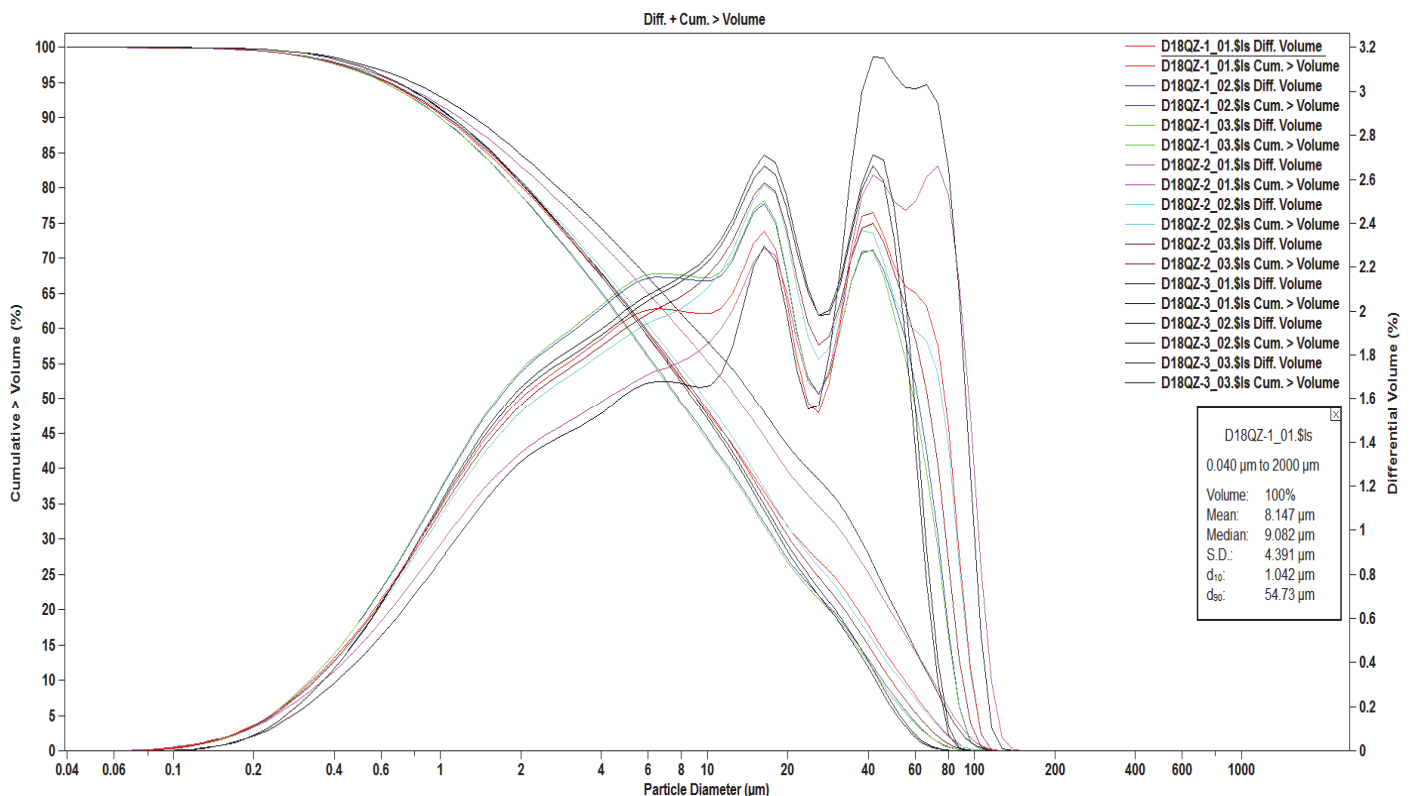
Photo n°11: Différentes étapes de l'analyse granulométrique au laser des échantillons : quartage de l'échantillon brut (1), désagrégation et tamisage mécanique (2), centrifugation (3),

désagrégation aux ultrasons (4), 2^e quartage (5) et dispositif d'analyse au laser (6). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

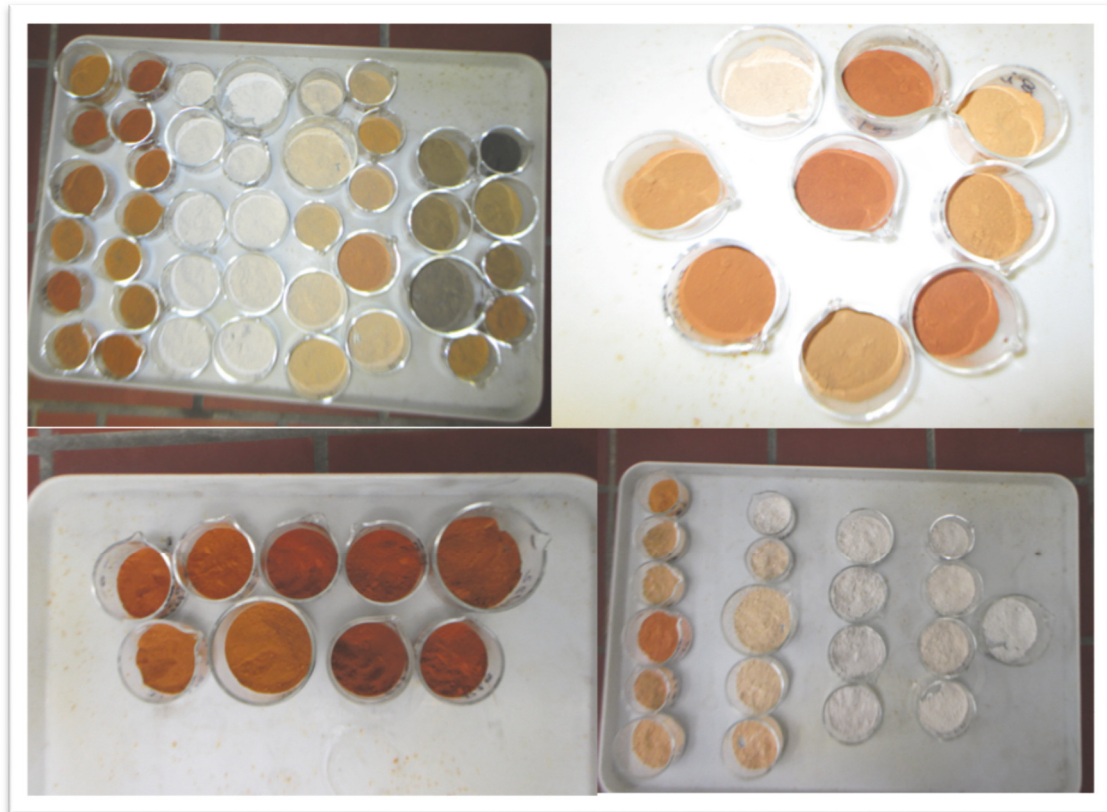
4.4.2. Analyse élémentaire et minéralogique

Les éléments majeurs et les éléments traces métalliques (ETM) sont importants pour la caractérisation des matériaux des couches superficielles des dunes. Ils permettent la détermination de la composante minérale des matériaux dunaires analysés permettant de déterminer leurs caractéristiques géochimiques spécifiques. Ainsi, les échantillons de chaque paysage dunaire ont été soumis à différentes analyses basées sur les méthodes de description et de caractérisation des spécificités propres à chaque élément minéral (RUDOLF 2003, ANTHONY 1992). Pour cela, une diversité d'analyses et d'instruments de mesures ont permis d'évaluer les contenus en éléments spécifiques aux matériaux. Ces analyses sont: la spectrométrie (ICP-OES, CNS), la diffractométrie et la fluorescence aux rayons « X » (RDA, pRFA) et la thermogravimétrie. Avant de passer aux analyses des différents échantillons, ils ont d'abord subits les phases préliminaires suivantes :

- **Homogénéisation** : les échantillons sont d'abord pulvérisés (réduits en poudre très fine (1-100 μ m) au moyen d'une meule électrique rotative. La taille moyenne des grains est de 8 μ m, la médiane de 9 μ m et l'écart type de 4 μ m (graphique n°2 et photo n°12).
- **Pesée** : 5 grammes de chaque échantillon sont pesés à l'aide d'une balance (Sartorius CP 64), précision : 1/10000 g.
- **Séchage** : les 5 g prélevés de chaque échantillon sont mis à l'étuve à 105 \pm 5°C pendant 24h pour les débarrasser de l'eau cristalline.



Graphique n°2: Courbes de fréquences simples et cumulées de quelques échantillons homogénéisés



Photos n°12 : Pulvérisation-homogénéisation des échantillons analysés en laboratoire (ce sont des artefacts des échantillons prélevés dans les couches superficielles des dunes entre 0 et 20 cm). Ceux-ci sont réduits en poudre pour le besoin des analyses géochimiques et minéralogiques.

4.4.2.1. Analyse élémentaire par spectrométrie d'émission optique (ICP-OES)

Environ 1000 mg de chaque échantillon, sont préalablement homogénéisés (pulvérisés) et séchés à l'étuve à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Ils sont ensuite dissous à l'eau régale pour être minéralisés. Pour cela, la poudre de chaque échantillon est mise dans une éprouvette en verre dans 2 ml d'eau distillée, 2 ml de l'acide nitrique (HNO_3) à 65% et 6ml de l'acide chlorhydrique (HCL) à 32%. Le mélange est ensuite uniformément chauffé au microonde pendant une vingtaine de minutes afin de faciliter la minéralisation. Refroidi, le mélange est préalablement filtré avec 100ml d'eau distillée pour éliminer et rincer les résidus des matériaux non ou peu dissous (surtout les silicates !). Les filtrats (ou minéralisats) sont ensuite dilués avec de l'eau distillée dans des bouteilles en plastique numérotées puis analysés au spectromètre ICP-OES (type PerkinElmer OPTIMA 2100 DV). Celui-ci est relié à un ordinateur qui évalue automatiquement les signatures spectrales (longueurs d'onde) des éléments minéraux détectés dans chaque échantillon. Ici sont déterminés les spectres atomiques des éléments suivants : Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Sr Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Al, Si.

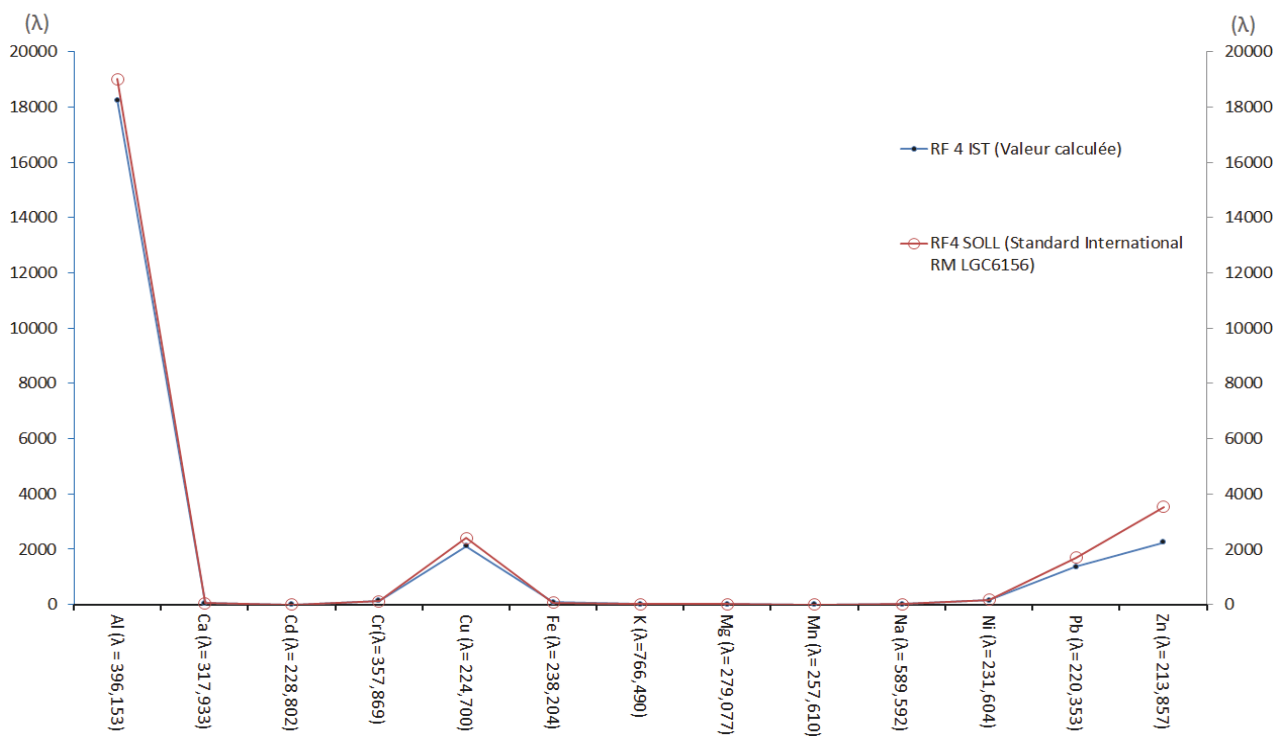
Précision et erreur des mesures ICP-OES:

Les analyses ICP-OES sont pour l'instant l'une des mesures les plus précises en matière d'analyse élémentaire dans les laboratoires de recherche. Celles-ci sont basées sur l'identification des éléments minéraux par leurs caractéristiques atomiques individuelles et plus spécifiquement leurs longueurs d'ondes spécifiques (graphique n°3 et tableau n°8). Ainsi, les valeurs mesurées (RF 4 IST) au spectromètre PerkinElmer OPTIMA 2100 DV (photo n°13) sont calibrées en référence à une base de données Standard International de référence (RF 4 SOLL RM LGC6156) qui est un standard international établi à partir des mesures effectuées avec différents types de

spectromètres et dans différents laboratoires. Néanmoins, il faut noter que la quantification des éléments silicium (Si) et Aluminium (Al) présentent quelques soucis de précision dus à la résistance des silicates à la dissolution par l'eau régale (mélange chimique de dissolution au HNO_3 , HCl , H_2O -Dist.). en effet, une partie de ces éléments pourrait être retenue dans les résidus des silicates non totalement minéralisés. Pour réduire les marges d'erreur, d'autres analyses complémentaires par fluorescence et diffractométrie aux Rayons-X sont nécessaires.

	Al ($\lambda = 396,153$)	Ca ($\lambda = 317,933$)	Cd ($\lambda = 228,802$)	Cr ($\lambda = 357,869$)	Cu ($\lambda = 224,700$)	Fe ($\lambda = 238,204$)	K ($\lambda = 766,490$)	Mg ($\lambda = 279,077$)	Mn ($\lambda = 257,610$)	Na ($\lambda = 589,592$)	Ni ($\lambda = 231,604$)	Pb ($\lambda = 220,353$)	Zn ($\lambda = 213,857$)
RF 4 IST (Valeur calculée)	18240	45,04	2,746	141,8	2101	73,16	5,137	8,722	0,492	19,5	154,3	1371	2242
RF4 SOLL RM LGC6156 (Standard International)	19000	43	2,9	111	2400	72	5,46	9,42	0,553	20,1	161	1685	3530

Tableau n°8 : Précision des mesures et calibration des analyses élémentaires ICP-OES



Graphique n°3 Précision des mesures et calibration des analyses élémentaire ICP-OES

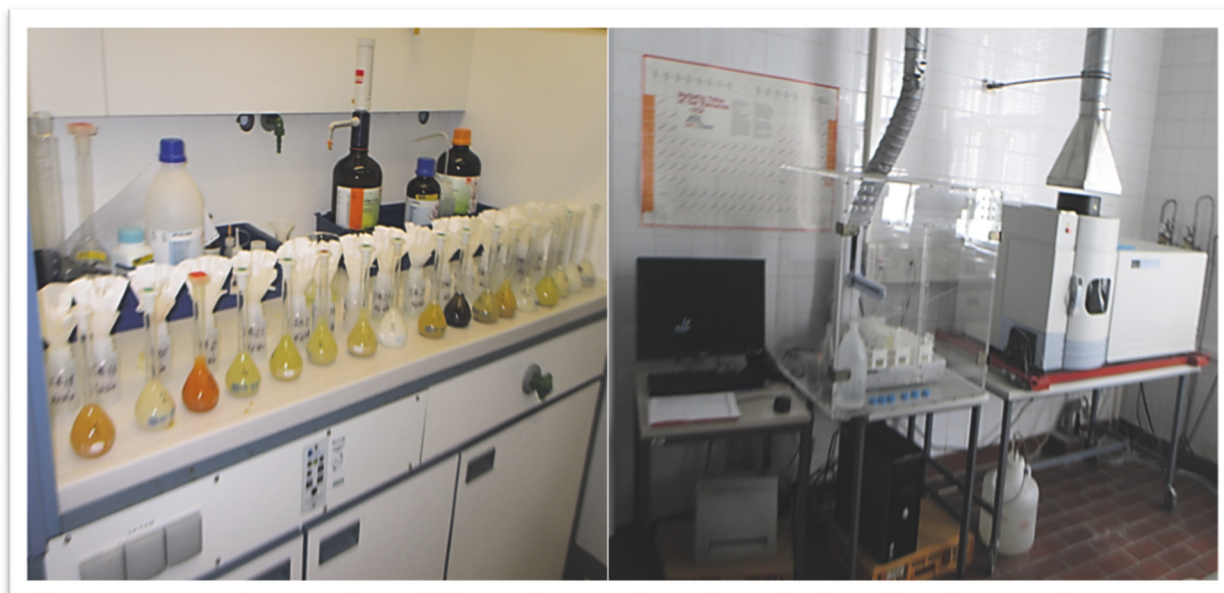


Photo n°13 : Dispositif d'analyse ICP/OES : dissolution des échantillons à l'eau régale (à gauche) et dispositif automatisé d'analyse par analyseur ICP-OES (à droite). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.2.2. Analyse élémentaire par fluorescence aux rayons-X (RFA)

Concernant cette analyse, les échantillons sont aussi homogénéisés par pulvérisation. Ils sont en suite, séchés puis mis dans une petite boîte circulaire de 2,5cm de diamètre et 2 cm hauteur. Un des deux côtés ouverts est fermé avec un fin film circulaire en polypropylène de 2 μ m d'épaisseur (FluXana T-F 240-255) spécialement conçu pour les analyses aux rayons-X. Quelques 2000 milligrammes de la poudre de l'échantillon y sont versés, puis recouverts d'un disque en papier spécial. L'espace restant est rempli de fibre de polyester pour affermir le contact entre le film et la poudre de sédiment. La partie ouverte est ensuite fermée avec un bouchon sur lequel l'échantillon est identifié. Pour le besoin de l'analyse, la partie au film translucide du contenant de l'échantillon, est placée au-dessus de la source de radiation de l'analyseur (poly-cristallin) par fluorescence aux Rayons-X -NITON XL3t GOLDD (photo n°14). Mais avant, ce dernier est préalablement calibré selon les besoins de l'analyse. Les résultats sont ensuite traités à l'aide d'un logiciel (NITON Data Transfert NDT 7.1) qui analyse les différents spectres (4) de chaque élément minéral contenu dans l'échantillon, selon l'intensité de la radiation par fluorescence des éléments minéraux (qui composent l'échantillon) après leur bombardement aux rayons X. On pourrait ainsi identifier les éléments chimiques contenus dans chaque échantillon sur la base de leurs caractéristiques atomiques. Les pics ou signaux sont automatiquement établis proportionnellement aux caractéristiques de l'énergie en électro-kilovolt (eKv) libérée par fluorescence des électrons de l'élément bombardé aux rayons X par unité de temps. Ainsi, malgré l'effet de matrice, chaque élément est détecté dans la poudre de l'échantillon. Il faut noter que pour des raisons de protection contre les radiations, la lentille et la camera de visualisation du détecteur de l'analyseur sont placées sous l'orifice d'un boîtier de protection. Sinon il est aussi possible d'utiliser l'appareil portable sans boîtier. Les résultats obtenus, pour un souci de précision, sont aussitôt calibrés à ceux des analyses ICP-OES reconnues plus exactes.

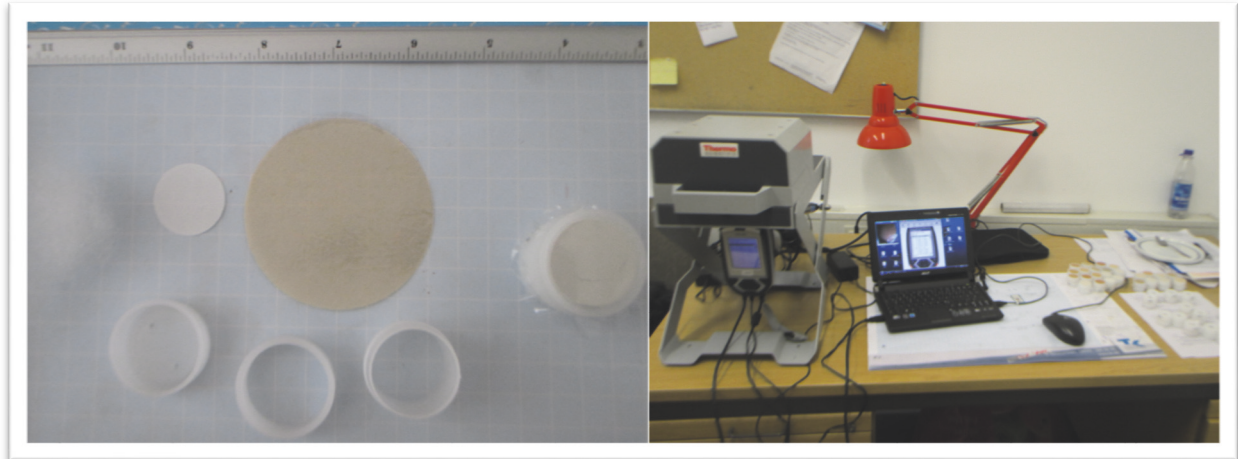


Photo n° 14: Dispositifs et outils d'analyse RFA. A gauche : préparation échantillons (contenant d'échantillon /FluXana T-F 240-255). A droite, dispositif d'analyse échantillons (NITON XL3t GOLDD). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.2.3. Analyse géochimique par diffractométrie aux rayons-X (RDA)

Les caractéristiques géochimiques et minéralogiques des échantillons sont aussi déterminées par la méthode de diffractométrie aux rayons X. Elles sont faites à l'analyseur RIGAKU Miniflex600 (photo n°15). Le mode opératoire d'analyse consiste d'abord à homogénéiser préalablement l'échantillon par pulvérisation. Ensuite, quelques milligrammes (+/-200 mg) sont mis sur un petit disque creux de 2,5 cm de diamètre puis mis dans la chambre de diffractométrie de l'analyseur. Celui-ci fonctionne comme une chambre dotée d'un émetteur de source de rayons X émis et précisément canalisés et suivant un angle bien connu, sur le disque contenant la poudre de l'échantillon à analyser. Une fois émis, ce rayonnement est diffracté au contact de la surface de la poudre l'échantillon puis réorienté vers une fenêtre de lecture équipée de filtres et de système de détection, de comptage et de décryptage des propriétés atomiques spécifiques à chaque minéral contenu dans la poudre analysée. L'analyseur est connecté à un ordinateur qui enregistre les données décryptées. Celles-ci sont par la suite traitées et analysées au moyen d'un logiciel spécial (X'Pert HighScore). L'identification des minéraux est faite à l'aide d'une base de données PDF du « International Center for Diffraction Data » (RUDOLF 2003, ANTHONY 1992, ICDD-PDF2). L'objectif de cette analyse est de déterminer les différentes combinaisons minéralogiques qui constituent les matériaux analysés.



Photo n°15 : Diffractomètre (RDA). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.3. Thermogravimétrie

4.4.3.1. Analyse de la matière organique et des carbonates

Pour déterminer la teneur en matière organique et en carbonates des échantillons, ils sont successivement chauffés à 105°C, 550°C et 950°C durant respectivement 12, 4 et 2 heures. Ces processus respectifs de chauffage consistent d'abord à éliminer l'eau de l'échantillon en le chauffant à l'étuve à 105°C pendant 12 heures. Après cela, l'échantillon est ensuite chauffé à 550°C dans un four (photo n°16) pendant 4 heures afin de provoquer l'oxydation de la matière organique qu'il contient. Elle est ainsi transformée en CO₂ et en cendres. Enfin, le même échantillon est chauffé à 950 °C afin d'évacuer les carbonates en produisant des oxydes. Ainsi, les teneurs en matières organiques et carbonates de chaque échantillon sont simplement déduites par les différences de poids. Les équations suivantes utilisées par divers auteurs (MOURIER 2008 et HEIRI et al. 2001) permettent de faire ces déductions.

Pour la détermination de la teneur en matière organique :

$$\text{LOI 550} = \left[\frac{(P_{105} - P_{550})}{P_{105}} \right] \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

Pour la détermination de la teneur en carbonates des échantillons :

$$\text{LOI 950} = \left[\frac{(P_{550} - P_{950})}{P_{105}} \right] \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

, où

P105= poids sec initial avant la combustion du carbone organique

P550= poids sec après combustion à 550 °C

P950= poids sec après combustion à 950 °C



Photo n°16 : Dispositif de détermination de la matière organique et des carbonates (le four à gauche) et chambre à combustion des échantillons (à droite). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.3.2. Détermination du carbone inorganique : TIC

Pour déterminer le carbone inorganique des échantillons, +/-100 mg (200 ou 300 mg selon la précision recherchée) de chaque échantillon sont préalablement pulvérisé (homogénéisé) et passés au dispositif de mesure de Wölsthoff Carmhograph C-16 (photo n°17). Avec ce dispositif, tout d'abord, une série de mesures de calibration (2 au moins) sont faites au carbonate de calcium pur (CaCO_3) afin d'étalonner les mesures des échantillons réels. Ainsi, 6mg de CaCO_3 pur sont mis dans le circuit du dispositif en y ajoutant 6 ml d'acide phosphorique (H_3PO_4) à 42,5%. Le CaCO_3 est chauffé à 800°C et décomposé (CaO et libération du CO_2). Au passage du CO_2 libéré, dans la solution de soude caustique (1 mole de NaOH), il change sa conductivité. A partir de ce changement, on détermine le nombre d'atomes de carbone inorganique libérés grâce à un compteur électronique. Ce dernier indique les valeurs sur un écran LCD. Mais avant de commencer l'analyse des échantillons proprement dits, il est préférable d'attendre jusqu'à l'affichage de la valeur 0 sur l'écran du compteur, ou bien quand une valeur relativement stable s'affiche. Après cette opération d'étalonnage, 100 mg de sédiments pulvérisés et 6 ml du H_3PO_4 sont introduit dans le dispositif. Doivent être exactement notés : le poids de l'échantillon initialement mesuré, les chiffres indiqués (A) sur l'écran du compteur avant de commencer la

mesure. Deux (2) à trois (3) minutes après l'introduction de l'échantillon dans le circuit, il faut noter les chiffres indiqués (B) et ainsi de suite jusqu'à la fin des opérations de mesure. Les valeurs obtenues par l'opération « B » moins (-) « A » sont rapportées au poids de départ de l'échantillon et ensuite calibrées aux valeurs de l'Echantillon-Etalon de CaCO_3 .



Photo n°17 : Dispositif de H.Wölsthoff pour la détermination du carbone inorganique (Carmhograph C-16). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.3.3. Détermination du carbone organique total (TOC) et de l'azote total (TN)

Le taux du carbone organique total (TOC) des échantillons est calculé après avoir estimé leurs taux respectifs en carbone inorganique total (TIC) et leurs taux respectifs du carbone total (TC). Ainsi, pour évaluer le TC, 100 mg de matériaux échantillonnés sont préalablement homogénéisés (pulvérisés) et séchés à $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Ils sont pesés et numérotés. En plus, 100 autre mg d'échantillons de calibration (EDTA, 308 et 309) dont les valeurs sont connues, sont aussi pesés 2 fois chacun. Tous sont enroulés dans du papier aluminium fin et sont introduits dans le spectromètre analyseur /LECO TruSpec CHN+S (Photo n°18) qui, analyse et calibre automatiquement (l'analyseur est relié à un ordinateur) et en même temps les valeurs de chaque échantillon en TC et TN. Pour calculer la teneur des échantillons en TOC on soustrait simplement le TIC du TC ($\text{TOC} = \text{TC} - \text{TIC}$).

4.4.3.4. Analyses CNS complémentaires

Celles-ci sont faites pour les échantillons à très faibles teneurs en carbone et azote. Ainsi, 15g de chaque échantillon sont introduits dans un analyseur automatique de très haute précision : le Vario el Cube. L'appareil peut détecter aux IR (rayons infrarouges) les teneurs les plus infimes en carbone (C) et en azote (N) de divers types de sédiments. Ainsi, dans les échantillons de sol il peut mesurer des valeurs de 6,69 % +/- 0,002 % pour le C et 0,027% +/- 0,007% pour le N. Dans les sédiments éoliens, il peut mesurer des valeurs de 1,51% +/- 0,001 pour le C et 0,030% +/- 0,007% pour le N. Pour bien affiner les précisions, chaque échantillon est analysé 3 à 4 fois. Les valeurs réelles, les moyennes et les écart-types correspondants sont directement affichés.



Photo n°18 : Préparation des échantillons (en haut) et dispositif d'analyse CNS automatisé (en bas). ©Matériels de l'Université Libre de Berlin.

4.4.4. Détermination du potentiel-Hydrogène (pH au CaCl₂)

Le pH des différents matériaux sédimentaires dunaires a été mesuré au moyen d'un pH-mètre électronique de type WTW InoLab 7110 (photo n°19). C'est un appareil d'une très haute précision utilisé dans les mesure de routine. Les matériaux sédimentaires séchés sont en effet trempés dans une solution neutre de CaCl₂ (10%). Ceci pour éviter les cations (H⁺) et les évacuer du complexe d'échange du Calcium. La mesure du pH-CaCl₂ a été choisie en raison de sa stabilité par rapport à celle du pH-eau très variable (FAO 1999 et 1990, <http://cfppah.free.fr/sol.htm#ph>).

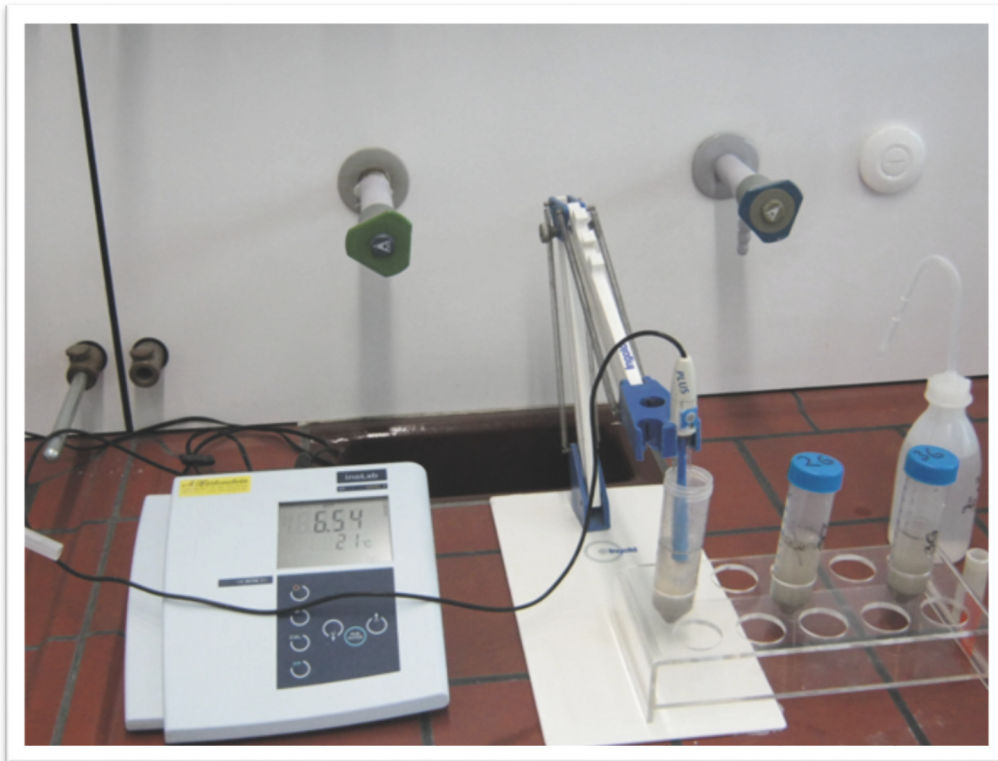


Photo n°19 : Dispositif de mesure du potentiel-Hydrogène des échantillons (pH-mètre WTW InoLab 7110). ©Matériels de l'Université de Würzburg.

4.4.5. Analyses micromorphologiques par microscopie optique

Pour réaliser les analyses micromorphologiques des couches superficielles des dunes, des séries de carottage sont faites à des profondeurs comprises entre 0-20 cm, 0-30 cm, 0-50 cm et 0-70 cm, en fonction des différents points d'échantillonnages considérés représentatifs de chaque paysage dunaire. Les portions de profils choisies sont transformées en lames minces pour des observations microscopiques.

4.4.5.1. Fabrication des lames minces

Pour la confection des lames minces, les échantillons sont imprégnés et mis sous vide dans un mélange chimique aux fonctions durcissantes (Araldite AY 103-1 et REN HY 956). Le séchage se fait à 54 °C pendant 5 à 12 heures à +/- 0,5 bar (400 mm Hg) afin de les débarrasser de l'eau et de l'air occupant les pores et micro-pores qui, sont par la suite remplis par les agents durcissants qui, assureront le maintien de la structure naturelle des échantillons. Après la phase de déshydratation, de dégazage et de stabilisation des échantillons (imprégnation), des plaquettes sont produites. Une partie est ensuite débitée et placée sur des lames de verre d'un (1) mm d'épaisseur dont un côté est rodé au disque diamanté afin de réduire la réflectance et la diffusion intense de la lumière lors des observations au microscope optique. Elles sont ensuite collées aux lames de verres à chaud à 54°C pendant 5 heures. Les tranches de plaquettes débitées sont arasées à environ 1mm au moyen d'un disque rotatif (500 t/mm) à plaque diamantée. Les plaquettes arasées sont encore rectifiées à environ 50 µm et enfin rodées dans du carbure de silicium (SiC) jusqu'à atteindre une épaisseur de 30 µm, épaisseur à laquelle les matériaux sont observables au microscope. Après l'arasage, un contrôle de qualité est chaque fois effectué au microscope d'essai. En définitive, la lame mince produite est protégée en la recouvrant d'une lamelle de verre collée sur la partie arasée. Ces lamelles couvre-échantillons sont collées aussi à

la même température (54°C) pendant 5 heures. Les photos n°20 (20.1 à 20.9) suivantes, illustrent les différentes étapes et les matériels techniques utilisés pour la réalisation des lames minces des matériaux des horizons superficiels des dunes des paysages dunaires étudiés.

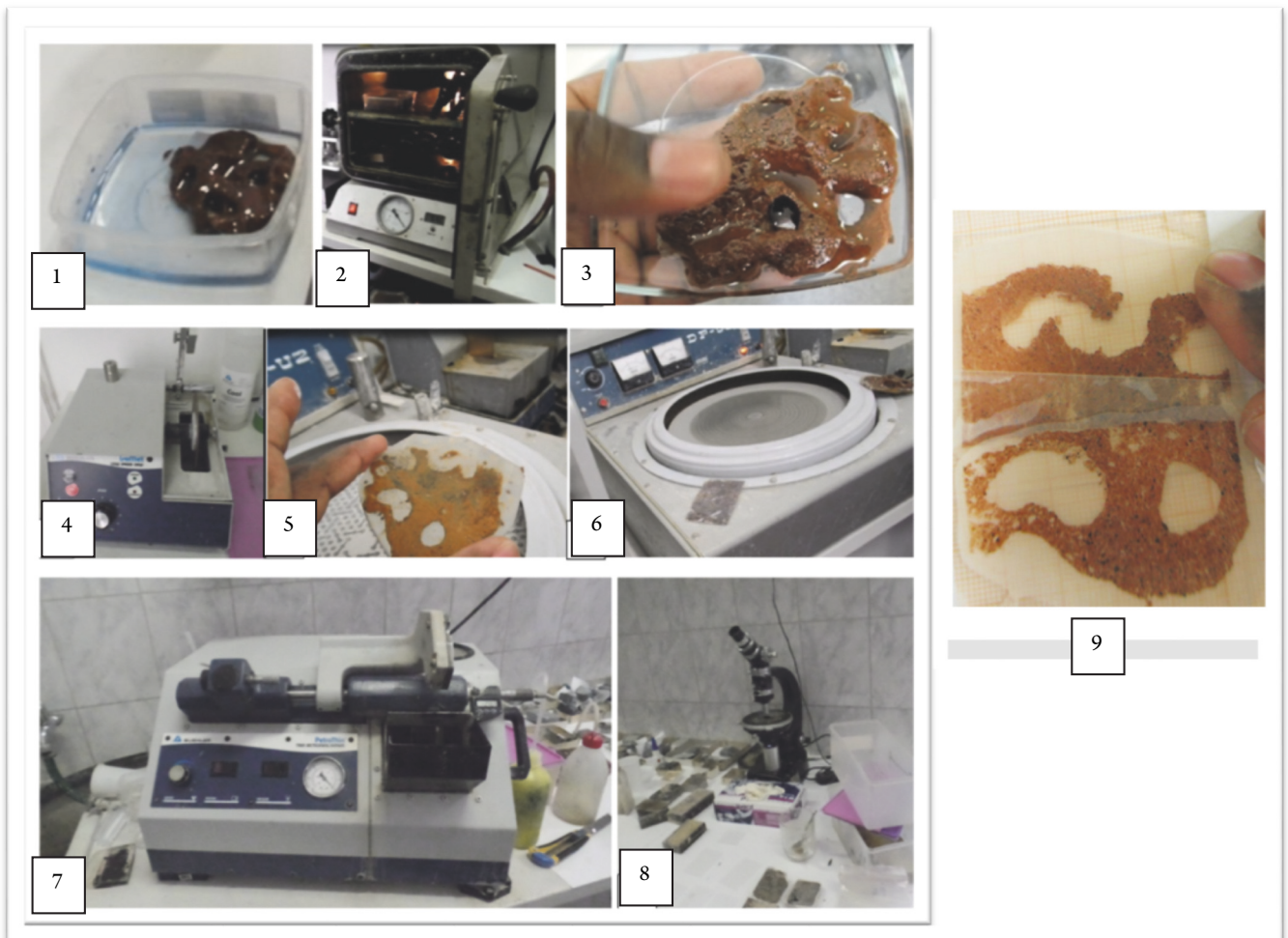


Photo n°20 : Etapes et appareillage pour la réalisation des lames minces des échantillons de croûtes des sols et des sédiments dunaires. 1 : imprégnation. 2 : séchage. 3 : sucette. 4 : scie à débitage. 5 : débitage de la sucette. 6 : Rodage. 7. Rodage de rectification (précision au μm). 8. Contrôle de qualité optique. 9 : Lame mince prête pour l'analyse ©Matériels techniques du laboratoire de Minéralogie, Pétrologie et Géochimie de l'Université de Szeged (Hongrie).

4.4.5.2. Difficultés

Ce qui a plus posé de difficulté dans l'élaboration de ces lames minces, c'est le caractère particulier des couches superficielles des dunes qui, sont constituées de matériaux peu cohérents à l'opposé des roches qui sont relativement mieux consolidées. La fragilité des croûtes est aussi un grand handicap car elles se cassent très facilement et leur rodage relève d'un grand défi exigeant une très grande expérience dans le domaine. Pour le cas de cette étude, la fabrication des lames minces des couches superficielles des dunes fixées et des croûtes variées, a été réussie grâce à la grande expérience des opérateurs du laboratoire l'université de Szeged (Hongrie). En dehors du procédé de fabrication, les croûtes des surfaces dunaires sont bien difficiles à caractériser à cause de leur fragilité qui les rend très délicates à d'une part et d'autre part de la difficulté à monter sur des lames minces en vue d'observations microscopiques. L'échantillonnage est déjà aussi une difficulté car il n'y a pas d'outil standard d'échantillonnage, elles ont pour la plus part, de dimensions millimétriques à centimétriques et leur structure

s'endommagent facilement. Ceci est particulièrement préoccupant dans le cas des croûtes qui sont d'origine non biologique (croûtes de battance pluviale et éolienne).

4.4.6. Définition des concepts de base en vue de l'analyse micromorphologique

La description micromorphologique est faite sur la base de l'étude des organisations microstructurales générées par la juxtaposition dans les matériaux sédimentaires, des complexes organiques et minéraux (sesquioxides et microcristaux), de la présence ou non des concrétions, de la forme et des états de surface des grains. Les critères d'analyses ont été utilisés par plusieurs auteurs dont : BRAUNECK et al (2012), THIEMEYER (2009), ABICHOU (2009 et 2002), SCHULZ (2009), SPONHOLZ (2009, 1994, 1989), BAUMHAUER & JÜRGEN (2009), POMEL (2008) LAMOUREUX (1972), BREWER (1964). Ces critères sont :

- La nature du squelette sédimentaire (grains grossiers)
- La nature du plasma sédimentaire (grains fins et ultrafins)
- La nature des espaces intra-granulaire (pores et cavités divers)
- La dominance et la séparation plasmique (homogénéité des matériaux)
- Le contact entre les grains (remplissage et disposition des matériaux)

Les principales clés de description des échantillons utilisées ici sont inspirées des travaux de POMEL (2008), de BREWER (1964) et de SPENCER (1963). Les travaux de ces auteurs sont jugés adaptables à ce contexte. Ainsi, la description micromorphologique des matériaux sédimentaires de POMEL (2008) est basée sur:

- a) les types d'**agrégation du plasma** du sol qui, « représente le degré de cohésion et les mécanismes de déplacement des fractions fines du sol ».
- b) Les types d'**arrangement du plasma** qui, « reflètent les processus hydriques de mise en place des éléments fins du sol ».
- c) Les types d'**assemblages du plasma** du sol qui, sont des indicateurs « de fonctionnement des argiles en fonction des conditions hydro-climatiques et édaphiques ».
- d) Les types de **distribution du plasma et du squelette** du sol. Ils « reflètent les types de relations qui existent entre le plasma et le squelette du sol ». La distribution « est un indicateur des circulations hydriques ».
- e) Les types de **microstructures du sol** qui, « sont des indicateurs des vides du sol, de la densité, de la porosité et de la capacité de rétention en eau et de l'aération du sol ».
- f) Les types de **vides dans le plasma** des sols qui, « sont des indicateurs de la porosité et de l'aération du sol ».
- g) Les **nodules** concentriques, les nodules à Fe/Mn et à carbonates sont aussi « des indicateurs des apports minéralogiques dans les profils pédologiques ».

Quant aux descriptions micromorphologiques de BREWER (1964) et de SPENCER (1963), les concepts suivants sont pris en compte dans cette étude. Les appellations originales anglo-saxonnes ont été maintenues. Ce sont:

- 1) **GS-fabric (grain supported- fabric)**: les grains sont majoritairement grossiers (squelette pédologique). Ils se supportent entre eux. Un ciment quelconque (oxydes, argiles et limon fins et autres matériaux d'origine organique ou minérale diverses) assure la liaison entre ces grains, ou bien des micro-fragments de roches et certains nodules assurent le remplissage des interstices intra-granulaires.
- 2) **F-fabric (floating-fabric)**: les grains grossiers (squelette) sont noyés dans une matrice fine et ne se supportent pas entre eux et dont la majorité de la partie squelettique (grains grossiers) est supérieure à 5 % de la composition. Les traces de dissolution sont observables autour des grains grossiers. Dans ce cas d'organisation, les matériaux

détritiques microcristallins sont dominants. Ainsi, les grains squelettiques sont abondants mais noyés dans une matrice à prédominance de détritiques microcristallins.

- 3) **M-fabric (matrice-fabric)** : les grains grossiers sont inférieurs à 5% et présentent généralement une structure massive avec ou sans nodules. Il y a peu de grains grossiers-squelettiques dans la matrice fine qui est aussi composée de détritiques microcristallins.
- 4) **C-fabric (conglomératique)** : composé essentiellement de matériaux détritiques à dominance de conglomérats parfois de pierre de tailles supérieures à 4 mm. Il peut dans ce cas y avoir une agrégation des nodules de sesquioxydes et concrétions diverses formant parfois la F-fabric.

4.4.7. Traitement et signification statistique des données analysées

Les logiciels Excel Office 2010 et OriginPro 9.1 G. ont été utilisés pour le traitement et l'interprétation des données statistiques. Le choix des échantillons représentatifs à analyser a été fait sur la base des variances des valeurs des données analysées au sein des populations d'échantillons (Var.P) de chaque zone d'étude et aussi en fonction des variances des données analysées au sein de chaque échantillon (Var.S). De façon précise, les valeurs statistiques des Var.P sont obtenues à partir d'un calcul chiffré de la variance des données analysées, fondé sur l'ensemble de la population des échantillons tandis que les Var.S constituent une estimation chiffrée de la variance des données analysées fondée sur l'échantillon lui-même. Ceci a permis de caractériser la dispersion des variables analysées dans un échantillon d'une part et dans l'ensemble des échantillons de chaque site étudié d'autre part. Cette dispersion a permis de voir comment les séries de données analysées se dispersent autour des moyennes respectives. Ainsi, plus Var.S ou Var. P est très faible (très proche de zéro), plus les données se rapprochent. Si Var.S ou Var.P est égale à zéro cela veut dire que toutes les valeurs sont identiques. Et si par contre Var.S ou Var. P est supérieure à 1 les valeurs sont très dispersées et les données présentent des caractéristiques différentes. Ainsi, une très faible variance (de Var.S ou de Var.P) est signe que les valeurs sont proches les unes des autres alors qu'une variance élevée est signe que celles-ci sont très dispersées et donc que la comparaison linéaire est non, peu ou pas du tout significative.

Quatrième partie

5. Caractéristiques et modifications des couches superficielles des dunes

5.1. Choix des paramètres d'analyse

Les sols et sédiments sont des témoins directs de l'évolution actuelle et passée des paysages (POMEL 2008). Ils constituent ainsi, une mémoire interactive des conditions actuelles et passées des environnements dunaires. Ces derniers sont influencés par une multitude de facteurs variés et changeants (climat, végétation, autres sols, topographie, lithologie, activités humaines), dont la compilation est toujours difficile à faire et parfois très discutable. Pour cette raison, la présente étude se focalise simplement sur les composantes organiques et minérales des matériaux qui, sont le produit des interactions entre ces différents facteurs. Dans le cadre cette étude, sont pris en compte, seulement les paramètres jugés relativement « stables » et que plusieurs études, ont considéré comme traceurs pertinents permettant d'évaluer les caractéristiques *syn ou post* sédimentaires des matériaux sédimentés (BAUMHAUER et al 2009 ; HERRMANN et al 2009 ; FELIX-HENNINGSSEN 2009 ; POMEL 2008; MEYERS & LALLIER-VERGES 1999 ; STENGEL 1992 ; WÖLKEL 1986). Les paramètres ici considérées sont d'une part, la texture et la structure des matériaux, la couleurs, le potentiel hydrogène (pH), les carbonates, le carbone total (TC), le carbone inorganique total (TIC) et le carbone organique total (TOC), l'azote total (TN), le taux et le degré d'évolution de la matière organique (TOC/TN) et d'autres parts, le fer total (Fe_t) et le titane total (Ti_t). **Ainsi, sur la base des différents travaux sus indiqués et en fonction de nouvelles méthodes et d'outils d'analyse paléo-environnementales, cette étude tente de reconstituer les modifications probables subies, de caractériser les propriétés géophysiques et géochimiques des couches superficielles (0-20 cm) des dunes et dévaluer leur implication dans les processus et modifications géomorphologiques et pédologiques actuels des sols dunaires fixés par la végétation au Niger.**

5.2. Caractéristiques physiques des couches superficielles des dunes

Les analyses physiques des couches superficielles des dunes se limitent à leurs caractéristiques texturales dont les indices d'homogénéité-hétérogénéité et de pédogenèse, leurs indices d'altération mécanique, leur spectre chromatique et leurs caractéristiques structurales entre 0 et 20 cm.

5.2.1. Caractéristiques texturales

Les caractéristiques texturales des matériaux dunaires étudiés correspondent à la distribution granulométrique des particules indépendamment de leur nature et de leur composition minéralogique. Les classes granulométriques sont définies suivant les limites ci-dessous :

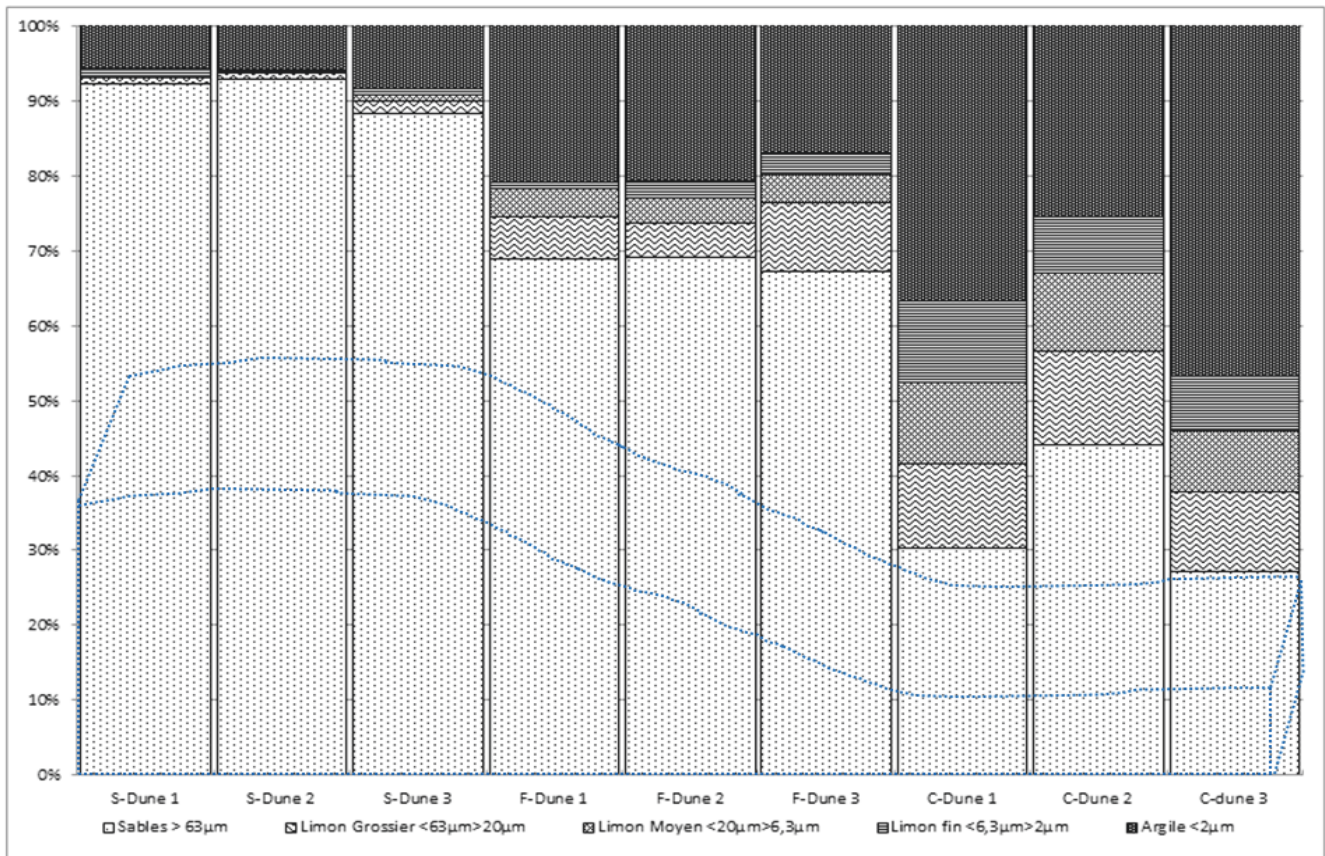
- sables : $> 63 \mu m < 2 \text{ mm}$,
- limons : $< 63 \mu m$ à $> 2 \mu m$ et
- argiles : $< 2 \mu m$,

Les classes des blocs, galets et graviers (diamètre $> 2 \text{ mm}$) n'ont pas fait l'objet de cette étude. Les analyses de ces spectres granulométriques ont ainsi permis d'évaluer la texture et les indices de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité des matériaux dans les différents paysages dunaires étudiés. Ces indices dit de Trask (SO) ont été utilisés par plusieurs sédimentologues dont RIVIERE (1977),

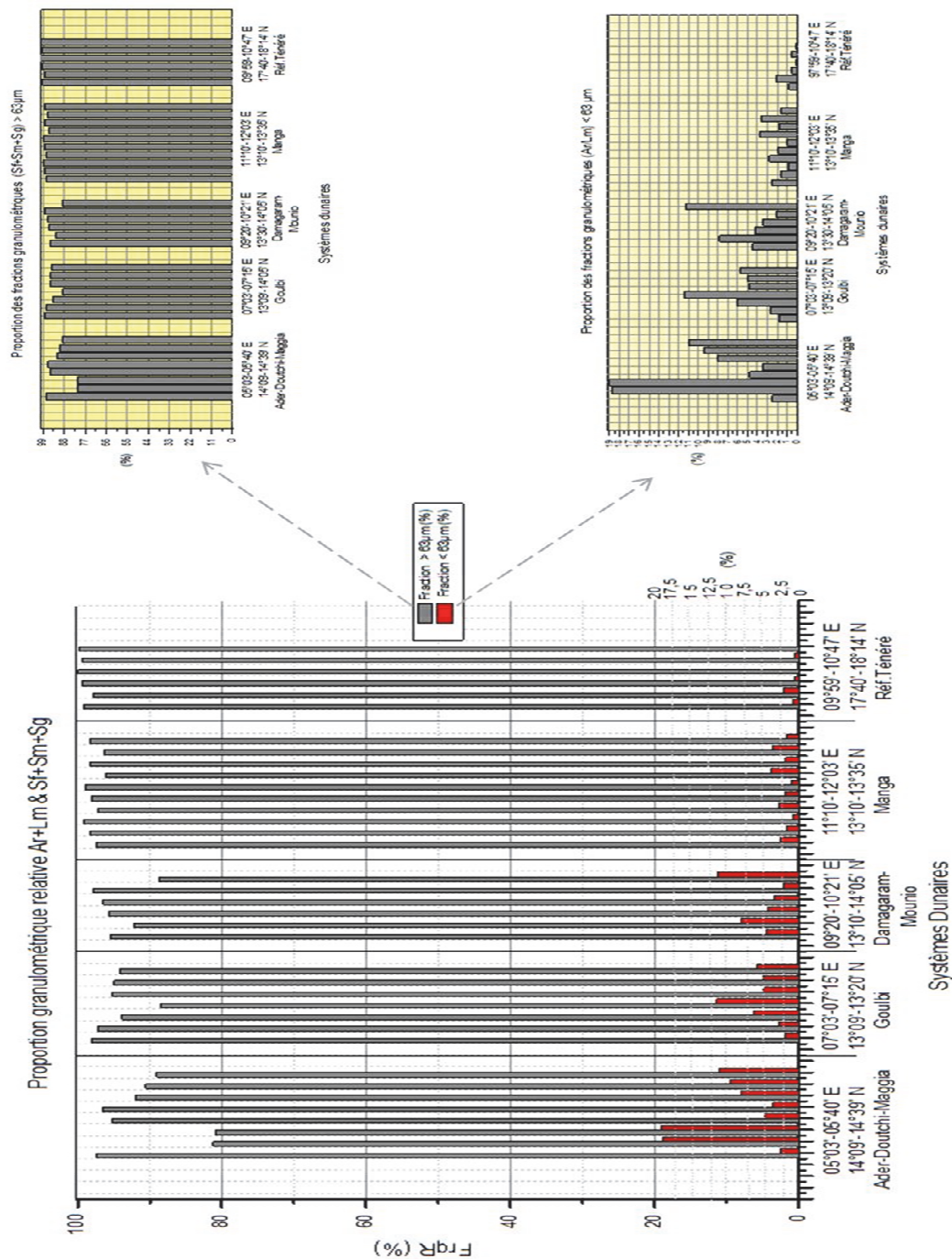
CAILLEUX & TRICART (1959), comme un indice significatif d'évolution granulométrique des matériaux sédimentaires. Pour cela, des courbes cumulatives ont été établies sur une échelle semi-logarithmique suivant les classes granulométriques. Les valeurs des quartiles 25% (Q1) et 75% (Q3) correspondent aux valeurs du diamètre des grains à 25 % de la courbe et 75 % de la courbe.

Ainsi, d'après les résultats de l'étude (graphiques n°5 et n°6 ci-dessous), l'ensemble des échantillons présentent une texture dominée essentiellement par des sables (quartzueux) à des proportions supérieures à 90% dans presque l'ensemble des sites. Ils sont aussi tous très pauvres en argiles et limons (fractions <63µm). Malgré la faible teneur, les fractions granulométriques très fines (limons et argiles) sont relativement plus abondantes dans les matériaux sédimentaires des paysages dunaires du bassin des Iullemenden que dans les paysages dunaires du bassin Lac Tchad. Cette abondance relative en limons et argiles s'expliqueraient selon FELIX-HENNINGSSEN (2014) (communication orale) par une pédogenèse plus poussée dans le bassin des Iullemenden que dans celui du Lac Tchad où les sédiments sont moins anciens et dont les sols sont par endroits, moins développés. Cela pourrait aussi s'expliquer par un départ des fines à cause de l'Harmattan qui est un vent efficace en saison sèche dans la Région (IBRAHIM & OUSSEINI 2009, OZER et al 2005, HERRMANN et al 1999). Ceci indique que les sédiments dunaires gardent encore leurs caractères éoliens hérités malgré les différentes fluctuations climatiques saisonnières et les positions latitudinales et longitudinales variées des dunes des différents sites étudiés. Cela corrobore l'étude de HERRMANN et al (2009) qui a indiqué une faible variation texturale des matériaux dunaires avec des sables dominants à plus de 70%.

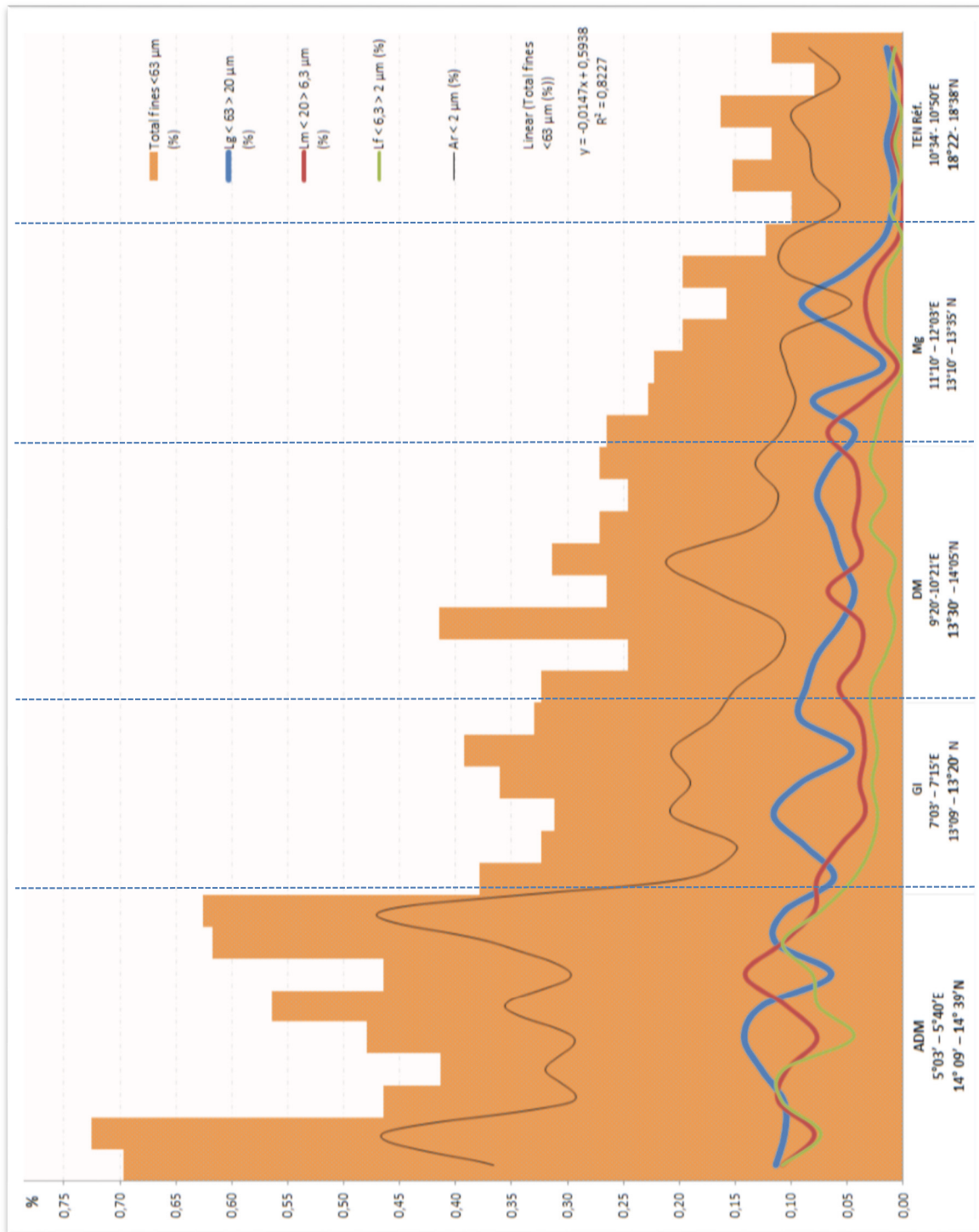
En résumé, les caractéristiques granulométriques des dunes étudiées sont relativement toutes dépendantes de la morphologie des dunes donc des conditions topographiques locales. Tous les échantillons des dunes fixées analysés présentent des spectres granulométriques assez proches. En effet, le graphique n°4 ci-dessous montre nettement que les sommets des dunes sont très pauvres en limons et argiles (moins de 10 %), tandis qu'en contre bas des dunes et dans les dépressions interdunaires les proportions des argiles et limons dépassent parfois les 50 %. Les versants en position intermédiaire présentent près de 30 % de cette classe. Dans cette fraction fine (argiles et limons) qui est utile à la pédogenèse, l'argile est dominante sur l'ensemble des unités géomorphologiques. Les proportions relatives dépassent parfois les 70%. Selon les analyses géochimiques et minéralogiques, des résidus de kaolinite et de montmorillonite sont présents dans l'ensemble des paysages dunaires. Cela s'expliquerait par l'impact des apports éoliens et/ou l'altération des matériaux latéritiques présents dans les dépôts dunaires. De façon détaillée, les graphiques n° 5 et 6 mettent en lumière les variations régionales et locales de la granulométrie des principales couches superficielles des sols et sédiments dans les différents paysages dunaires. Ils montrent clairement une prédominance des fractions sableuses dans l'ensemble des paysages dunaires avec des valeurs comprises entre 80% et 99 %. Quant aux fractions en argiles et limons elles sont en faibles proportions dans la majorité des sols et sédiments des couches superficielles pour l'ensemble des paysages dunaires étudiés. Leurs valeurs sont comprises entre 0,1 % et 20%. On constate néanmoins une certaine hausse des fractions des argiles et limons dans les paysages dunaires de l'Ader-Doutchi, du Goulbi, et du Damagaram-Mounio qui présentent des maximums respectifs de plus de 18%, 10% et 9%. Quant aux paysages dunaires du Manga les valeurs relatives de ces fractions d'argiles et limons sont toutes < 5% comme dans les dunes mobiles de référence du Ténéré où parfois les valeurs sont de moins de 1%. Les analyses statistiques des valeurs spécifiques et les corrélations linéaires des valeurs par paysages dunaires montrent une évolution régionale franchement régressive des teneurs en argiles et limons des sols et sédiments des dunes. Cette variation évolue d'Ouest vers l'Est (graphique n°5 et 6).



Graphique n°4 : Exemple de distribution granulométrique suivant la géomorphologie des dunes (S-Dune= sommet dunaire, F-Dune= flanc dunaire et C-Dune= dépression ou cuvette interdunaire). Ce graphique montre que les matériaux des sommets dunaires sont essentiellement composés de sables moyens à grossiers très pauvres en argiles et limons. Dans les dépressions interdunaires par contre, les matériaux sont plus riches en argiles et fractions ultrafines (limons) mais peu fournies en fractions sableuses.



Graphique n° 5 : Variations régionales et locales des fractions granulométriques des matériaux dunaires étudiés. Ce graphique montre la prédominance des fractions sableuses (entre 80% et 99 %) dans l'ensemble des couches superficielles des sols des différents paysages dunaires. Ils sont par contre très pauvres en argiles et limons dont les proportions dépassent rarement 5%. Des valeurs plus élevées (20%) s'observent dans les paysages dunaire de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM), du Goulbi (Gl), et du Damagaram-Mounio (DM). Quant à ceux des paysages dunaires du Manga (Mg) ils sont très pauvres en ces fractions fines (<5%) et ont des teneurs proches de celles des dunes mobiles de référence du Ténére (TEN Réf.) très pauvre en fines en raison de l'intense et constante déflation éolienne qui caractérise les zones hyperarides du Sahara Central.



Graphique n°6 : Variation des teneurs en fractions granulométriques très fines (<math>< 63 \mu m</math>) de quelques échantillons des dunes dans les différents paysages dunaires étudiés. Le graphique montre une variation décroissante Ouest-Est et Nord-Sud des matériaux ultra fins (argiles et limons) dans les couches superficielles des dunes. Les paysages des dunes de l'ADM et du GI sont plus riches en ces fractions que le reste des systèmes dunaires étudiés (DM, GI et TEN Réf.). Ces variations semblent suivre le gradient pluviométrique. Les dunes de ADM et du GI (localisées dans le Bassin des Iullemenden) sont situées plus au Sud du Sahara que celles du DM et Mg (localisées dans le Bassin du Lac Tchad) sous climat plus sec.

5.2.2. Indices d'homogénéité-hétérogénéité et pédogenèse

En comparant les échantillons des différents paysages dunaires, les résultats fournis par les indices d'homogénéité ou d'hétérogénéité de Trask ou Sorting Index (SO) (tableau n°9) montrent une nette évolution du tri textural des horizons de surface des dunes en fonction du gradient écologique Sahel-Sahara (Sud-Nord). Ainsi, les paysages dunaires ADM et GI (bassin des Iullemenden) sont plus hétérogènes (SO = 2,8 et 3,3) que ceux DM et Mg du bassin du Lac Tchad (SO = 1,8 et 1,3). Le dernier (Mg) est quasi-homogène en comparaison des sédiments de référence des milieux dunaires mobiles typiquement sahariens, non fixés par la végétation (TEN Réf.) dont le SO = 1,2. Ceux-ci présentent une texture presque parfaitement homogène. Ces indices montrent un tri plus poussé des matériaux sableux à mesure que les dunes sont proches des milieux hyperarides sahariens. Ainsi, en se référant aux résultats obtenus relativement aux caractéristiques granulométriques des différents paysages dunaires, les questions suivantes se posent :

1). Les teneurs plus élevées en fractions fines et l'hétérogénéité des matériaux des sols et sédiments dunaires du bassin des Iullemenden traduisent-elles l'ancienneté des dunes ou bien une altération poussée des grains sableux à cause des activités de pédogenèse ?

2). L'homogénéité texturale relative des matériaux des sols et sédiments dunaires du Bassin du Lac Tchad et leurs faibles teneurs en argiles et limons sont-elles à une faible altération des grains, c'est à dire une faible pédogenèse ou bien traduit-elle une forte érosion des dunes et une reprise des processus de désertification car leur indice de classement est proche de celui des dunes mobiles de référence du Sahara ?

3). Bien que ces questions nécessitent encore un effort d'investigation pour être clarifiées, on pourrait aisément retenir la conclusion que la texture pourrait être considérée comme un bon indicateur de l'évolution géomorphologique et pédologique des sols et sédiments dunaires fixées par la végétation au Sahel.

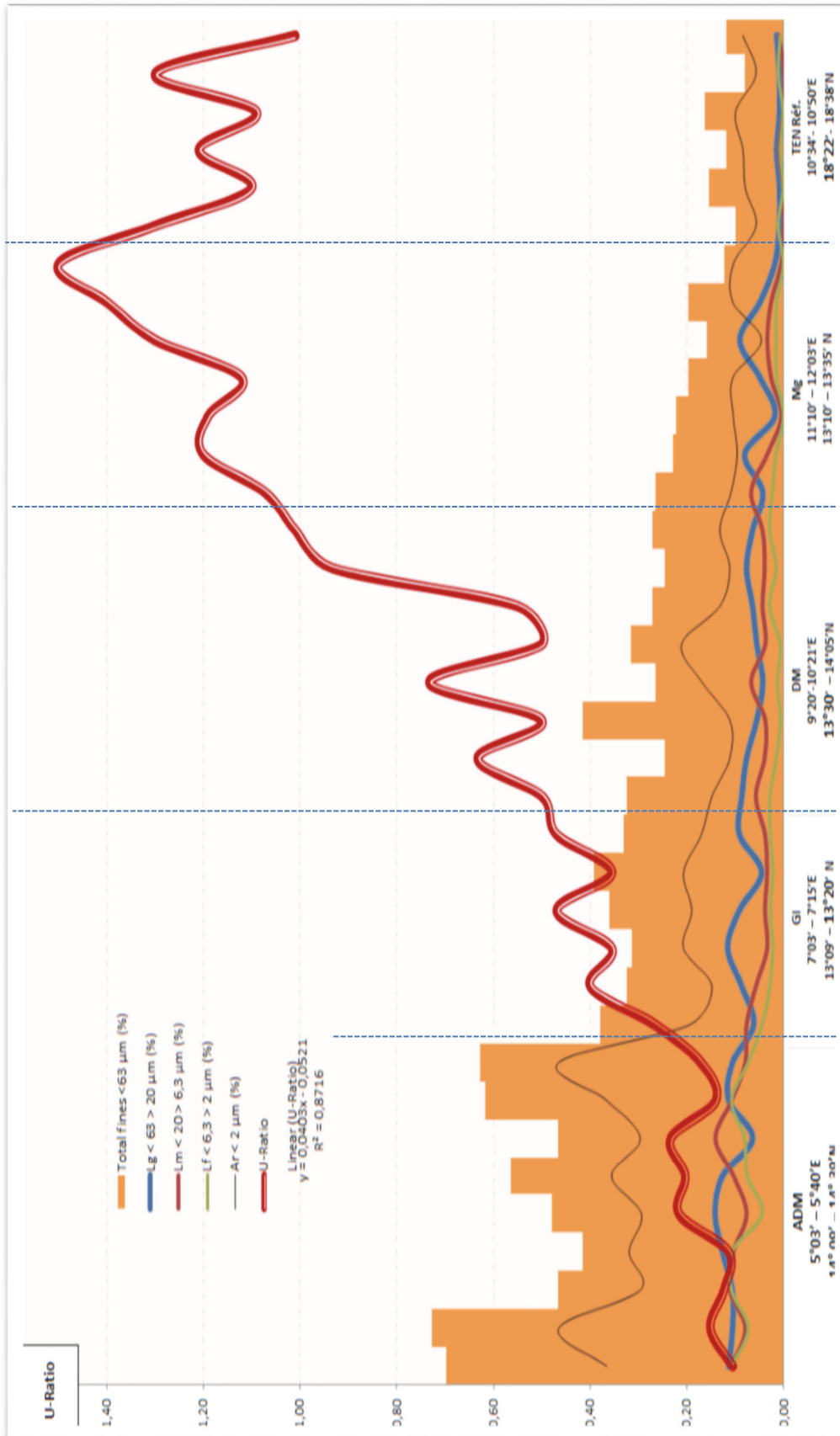
	Ader-D-Maggia	Goulbi	Damagaram- Mounio	Manga	Ténéré-Réf.Sahara
$SO = \frac{\sqrt{Q3}}{\sqrt{Q1}}$ $SO = \sqrt{(P 75 / P 25)}$ ou $(P75 / P 25)^{1/2}$	(ADM) 5°03' - 5°40'E 14° 09' - 14° 39'N	(GI) 7°03' - 7°15'E 13°09' - 13°20' N	(DM) 9°20' - 10°21'E 13°30' - 14°05'N	(Mg) 11°10' - 12°03'E 13°10' 13°35'N	(TEN Réf.) 10°34' - 10°50'E 18°22' - 18°38'N
Sorting-Index de Trask (SO) $(R^2 = 0,2676)$	2,83892429 ±2,8	3,29670004 ±3,3	1,79023807 ± 1,8	1,32285714 ± 1,3	1,15705882 ±1,2
SO = 1 : matériau sédimentaire parfaitement homogène SO < 2 : matériau sédimentaire homogène SO = 2 : matériau sédimentaire peu homogène SO > 2 : matériau sédimentaire hétérogène					

Tableau n°9: Tri granulométrique et indice d'homogénéité/hétérogénéité des matériaux dunaires dans les différents paysages étudiés

5.2.3. Indices d'altération mécanique, U-Ratio et pédogenèse

L'U-Ratio est calculé à partir du rapport entre les limons grossiers sur la somme des proportions des limons grossiers, moyens et fins contenus dans les matériaux dunaires. Cet indice a été utilisé pour apprécier l'état de la pédogenèse dans les couches superficielles des dunes étudiées. Car selon DANIEL et al (2014), l'U-ratio est un excellent indicateur des activités pédogénétiques. Selon cet auteur, si celui-ci est élevé cela indique des conditions peu ou pas favorables à la pédogenèse en raison des conditions arides et de fortes activités éoliennes (vents efficaces). Par contre si l'U-Ratio est bas ou négatif, cela indique des conditions favorables à une pédogenèse et des conditions d'humidité relativement élevée. Ainsi, un U-Ratio bas est bien indicateur de la formation des sols, particulièrement de l'altération *in situ* des sables et des apports allochtones qui favoriseraient la mise en place et le développement des fractions des limons et argiles nécessaires au développement des processus pédologiques dans ces milieux.

Les résultats des analyses montrent (graphique n°7) un U-Ratio croissant d'Ouest vers l'Est. Les dunes de référence TEN.Réf. (Sahara) et les paysages dunaires du Manga ou Mg (Sahélo-Saharien) présentent des U-Ratio très élevés. Ce qui pourrait s'expliquer bien sûr par le caractère hyper-aride de la zone du TEN.Réf et des conditions climatiques peu ou moins favorables à une pédogenèse dans la zone du Mg. Une autre explication pourrait être une dégradation très poussée des dunes fixées du Mg (paysage dunaire du Manga) . Ainsi, on peut conclure que l'analyse et l'interprétation du U-Ratio des horizons des couches superficielles des dunes des différents paysages, révèlent clairement que la pédogenèse est relativement plus poussée dans les paysages dunaires du bassin des Iullemenden (ADM, G1) que dans celui du Lac Tchad (DM, Mg) où les sols sont moins évolués et l'érosion éolienne plus active dans cette partie du bassin. Toutefois on constate que dans certaines parties du Bassin du Lac Tchad situées à l'Ouest (paysage dunaire du Damagaram Mounio), que la pédogenèse est comparable à celles des paysages dunaires du bassin des Iullemenden. Cette logique est aussi fonction de la teneur en fines dans les matériaux des dunes qui font que l'U-ratio décroît d'Est vers l'Ouest du transect avec un R^2 proche de 1. Pendant que les teneurs en fractions fines des matériaux dunaires décroissent d'Ouest vers l'Est (graphique n°7).



Graphique n°7 : Variations spatiales de l'U-Ratio dans les différents paysages dunaires.

5.2.4. Spectre chromatique : couleur des matériaux dunaires

Les résultats de l'analyse des couleurs montrent une diversité des couleurs de dunes. Diversité mise en évidence par FELIX-HENNINGSSEN (2009), VÖLKE (1989). En effet, d'après quelques exemples reportés dans le tableau n°10 : les couleurs des sols et sédiments de surface des dunes de l'ensemble des zones étudiées présentent majoritairement un spectre de couleur variant localement et régionalement entre le rouge, le jaune et rarement du gris à brunâtre probablement à cause du faible taux d'humus (chroma : 7.5 YR 4-5-6-7-8 / 3-4-6-8, puis 5 YR 4-5-6-7/4-6-8 et rarement 2.5 Y 6/1-3) ! Mais les dunes mobiles de référence du Ténéré présentent une couleur plus proche du jaune. On observe cependant quelques variantes locales de couleurs qui seraient dues soit aux conditions géologiques (plateaux latéritiques) et pédologiques locales (héritage des sols brun-rouge subarides, soit dues aux apports allochtones de poussières rouges des plateaux latéritiques et parfois sombres provenant de l'altération des sols et sédiments paléo-lacustres en provenance des zones sahélo-sahariennes qui, viennent sédimenter plus au Sud en milieux sahéliens (OZER 2000, MAINGUET 1996). En effet, les nuances locales (autochtones) des couleurs rouge et jaune des dunes du bassin des Iullemenden pourraient avoir pour origine, la nature géologique des plateaux latéritique (Continental Terminal) sur lequel elles sont mises en place et celles du bassin de Lac Tchad aux nuances de couleurs jaune, rouge et gris qui semblent être influencées par les sédiments lacustres sur lesquels reposent les dunes. Ainsi, l'érosion du substrat sur lequel reposent les dunes, favoriserait le remaniement et l'incorporation des matériaux érodés dans leurs couches superficielles. Par ailleurs, les variations du taux de la matière organique est sans doute aussi la cause de ce changement de couleur. Une autre cause possible de ce changement de couleur pourrait être liée à un phénomène d'allochtonie, car les apports des sédiments paléo-lacustres sahariens généralement de couleur sombre (BRAUNECK et al 2010, BAUMHAUER 1986) sont érodés et transportés par les vents, puis déposés à la surface des dunes en leur imprimant leurs couleurs (HERRMANN et al 2009). Finalement, on remarque que les dunes de référence n'ont pas fondamentalement changé de couleurs. Au total ce sont donc les conditions locales (végétation, lithologie, climat) qui influencent fortement les couleurs des matériaux dunaires étudiés.





































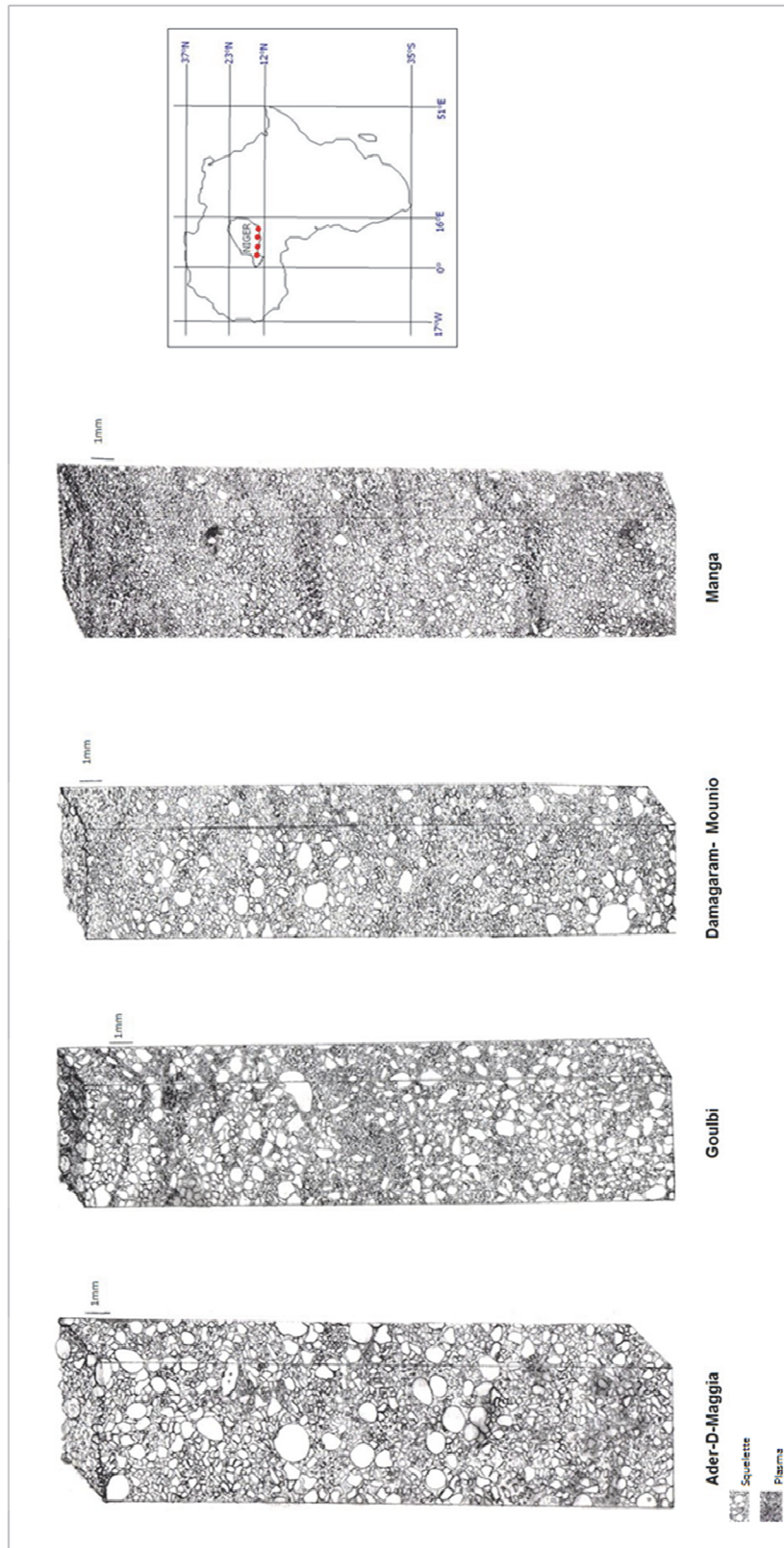
ADM 5°03' - 5°40'E 14° 09' - 14° 39'N	GI 7°03' - 7°15'E 13°09' - 13°20' N	DM 9°20'-10°21'E 13°30' - 14°05'N	Mg 11°10' - 12°03'E 13°10' - 13°35' N	TEN Réf. 10°34'- 10°50'E 18°22'- 18°38'N
 7.5YR 4/4	 5YR 4/6	 2.5Y 6/1	 5YR 6/4	 5YR 5/6
 7.5YR 4/6	 5YR 4/6	 2.5Y 6/3	 5YR 7/6	 5YR 5/8
 7.5YR 5/8	 5YR 4/6	 7.5YR 6/3	 7.5YR 5/4	 7.5YR 6/6
 7.5YR 6/6	 5YR 5/6	 7.5YR 7/1	 7.5YR 5/4	 7.5YR 8/3
 7.5YR 6/8	 7.5 YR 4/4	 7.5YR 7/2	 7.5YR 6/3	 7.5YR 8/4
 7.5YR 6/8	 7.5YR 6/6	 7.5YR 8/3	 7.5YR 6/3	 7.5YR 8/6
 7.5YR 6/8	 7.5YR 6/6		 7.5YR 6/4	
 7.5YR 7/6			 7.5YR 7/6	
			 7.5YR 7/6	

Tableau n°10 : Variations locales et régionales des couleurs de quelques matériaux dunaires étudiés.

5.2.5. Caractéristiques structurales des couches superficielles des dunes

Du point de vue structural, les matériaux des couches superficielles des dunes (0-20 cm) des paysages dunaires du bassin des Iullemenden (Ader-D-Maggia et Goulbi) sont bien différents de ceux du bassin du Lac Tchad (Damagaram-Mounio et Manga). Les premiers sont relativement plus homogènes que les seconds en raison sûrement des conditions édaphiques locales et les influences géologiques locales citées plus haut. Cela est synthétisé sur le croquis n°13 à l'issue de l'interprétation microscopique des lames minces des couches superficielles des dunes (photo n°21). Il y apparaît une nette différence structurale (pour le moins en surface). Les dunes de référence (TEN.Réf.) ne sont pas représentés car les matériaux dunaires sont meubles et ne présentent pas d'horizon pédologique de surface distinctement identifiable. Ainsi, dans les paysages dunaires du ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N) et du GI (07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N) les matériaux dunaires ne présentent pratiquement pas de litage contrairement à ceux des paysages dunaire du DM (09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) et du Mg (11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N) qui, présentent des litages en surface. Cela traduit un degré d'homogénéisation plus poussé des matériaux dans les premiers que dans les seconds. Les matériaux grossiers observés dans les dunes du ADM et du GI sont des concrétions noduleuses de sesquioxides provenant des matériaux latéritiques sur lesquels reposent les dunes (photo n°17 ci-dessous). Par contre ceux observés dans les matériaux des dunes du DM et du Mg sont des sables quartzeux très grossiers.



Croquis n°13: Présentation schématique des différences majeures entre les premiers horizons de surface des dunes des différents paysages dunaires étudiés.

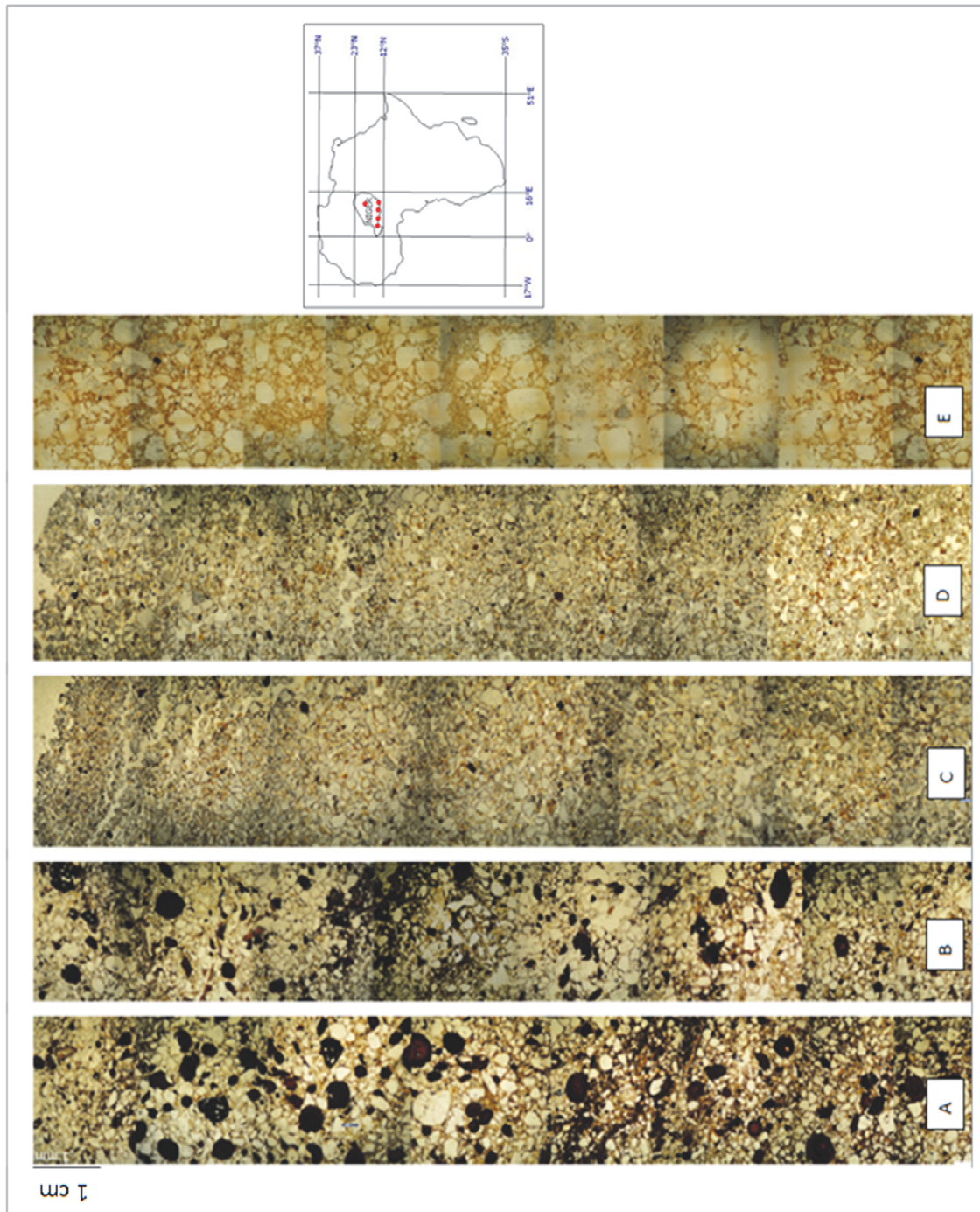


Photo n° 21: Microstructure des matériaux des horizons de surface des dunes des paysages dunaires étudiés : A (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N), B (G1 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N), C (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N), D (Mg11°10' '-12°03'E et 13°10'-13°35' N) et E (TEN.Réf. 10°34'-10°50' E et 18°22'-18°38' N).

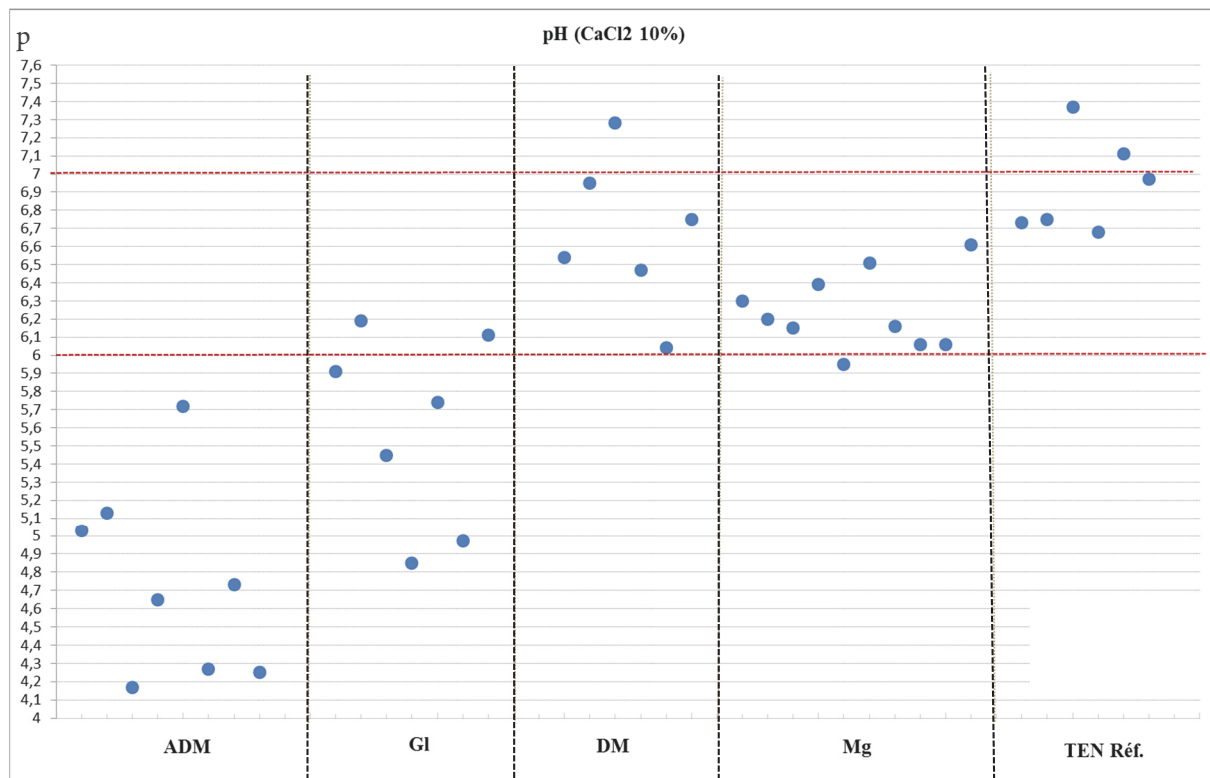
5.3. Caractéristiques géochimiques des couches superficielles des dunes

L'étude des caractéristiques géochimiques des matériaux des couches superficielles des dunes est limitée au potentiel hydrogène (pH), aux caractéristiques particulières de la matière organique et à la détermination du caractère allochtone et/ou autochtone à travers les rapports Ti total /TIC, Fe total /TIC et TOC/TN.

5.3.1. Potentiel hydrogène (pH)

Les résultats de cette étude montrent que les variations du pH des matériaux dunaires se corrélaient aussi aux tendances spatiales des indices de tri granulométrique et à la proximité des paysages dunaires sahéliens par rapport aux milieux sahariens. Ainsi, les sols et sédiments des paysages dunaires du bassin du Lac Tchad présentent un caractère relativement plus alcalin ($\text{pH} > 7$) que ceux du bassin des Iullemenden qui sont relativement plus acides, avec des pH évoluant de 4,5 à 6,5 avec un $R^2 = 0,54$ et une $\text{Var. P} = 0,0074$ à 0,3 (graphique n°8 et tableau n°11). En effet, les couches superficielles des dunes l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM) et celles du Goulbi (GI) sont dans leur grande majorité de tendance acide ($\text{pH} < 6$). Mais les sols et sédiments superficiels de l'ADM sont plus acides que ceux du GI. Les valeurs du pH tournent respectivement autour de 4 à 5 et de 5 à 6. Par contre ceux du Damagaram-Mounio (DM) et du Manga (Mg) sont tous relativement moins acidifiés avec des $\text{pH} > 6$. Il faut noter que les couches superficielles des dunes du DM sont légèrement moins acides que celles du Mg dont les valeurs respectives sont comprises entre 6 et 7,5 contre 6 et 6,5. Enfin, en ce qui concerne les sédiments meubles des dunes vives de la zone de référence du paysage dunaire du Ténéré (TEN.Réf.), ceux-ci présentent un pH presque neutre à basique avec des valeurs comprises entre 6,5 et 7,5. Ainsi, les résultats ci-dessus et la courbe de corrélation linéaire des valeurs du pH dans des principaux paysages dunaires montrent des gradients de variation d'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud du pH dans les couches superficielles des dunes.

Cette variation graduelle Sahel-Sahara du pH dans les milieux dunaires a d'ailleurs été étudiée par plusieurs auteurs dont spécifiquement HERRMANN et al (2009) qui a fait une série de profils en milieux arides (Sahara) et semi-arides (Sahel) dans les sédiments dunaires et paléolacustres. D'après ses travaux, le pH augmente avec l'aridité de la bande Sud du Sahel (> 350 mm/an) vers la bande Nord du Sahara (< 50 mm/an). Il a démontré qu'à 17°N , le pH compris entre 8 et 9,5 (zone de transition entre les sphères de bicarbonates ($\text{pH} > 10$) et les carbonates qui sont caractéristiques et typiques des conditions de l'aridité). Plus au Sud (16°N), il indique que le pH est relativement bas (6,5) et représentent le domaine des silicates. A 15°N , le pH tombe à < 4 et représentent les milieux à sédiments lacustres. En dessous de 14°N (zone sahélienne), les valeurs du pH sont très variées selon lui et dépendant principalement de conditions et paramètres environnementaux divers (topographie, pétrographie locale, végétation, climat). Le graphique n°8 et le tableau n°11 montrent qu'il y a une relative similarité intralocale des pH des matériaux étudiés. Mais sur le plan régional on observe une bonne disparité. Aussi, malgré quelques variantes locales, le pH a tendance à augmenter du sud vers le Nord ($R^2 = 0,5351$) au fur et à mesure que l'on s'approche des zones sahariennes. Au regard de cela, le pH pourrait-il être considéré comme un indicateur des gradients climatiques et des variations des caractéristiques des matériaux dunaires au Sahel?



Graphique n°8 : Variations locales et régionales du pH dans quelques couches superficielles des sols et sédiments dunaires dans les zones étudiées (ADM= 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N ; GI= 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N ; DM= 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N et Mg= 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N)

	pH (ADM) 5°03' - 5°40'E 14° 09' - 14° 39'N	pH (GI) 7°03' - 7°15'E 13°09' - 13°20' N	pH (DM) 9°20'-10°21'E 13°30' - 14°05'N	pH (Mg) 11°10' - 12°03'E 13°10' - 13°35' N	pH (TEN Réf.) 10°34'-10°50'E 18°22'-18°38'N
Moyenne	4,9	5,6	6,6	6,2	6,9
Max	5,7	6,1	7,0	6,3	7,4
Min	4,2	4,9	6,0	6,1	6,7
Var.P	0,2659	0,2295	0,0933	0,0074	0,0987

Tableau n°11: Variations locales et régionales des valeurs maximale, minimale et moyenne des pH dans les zones étudiées.

5.3.2. Caractéristiques et évolution de la matière organique

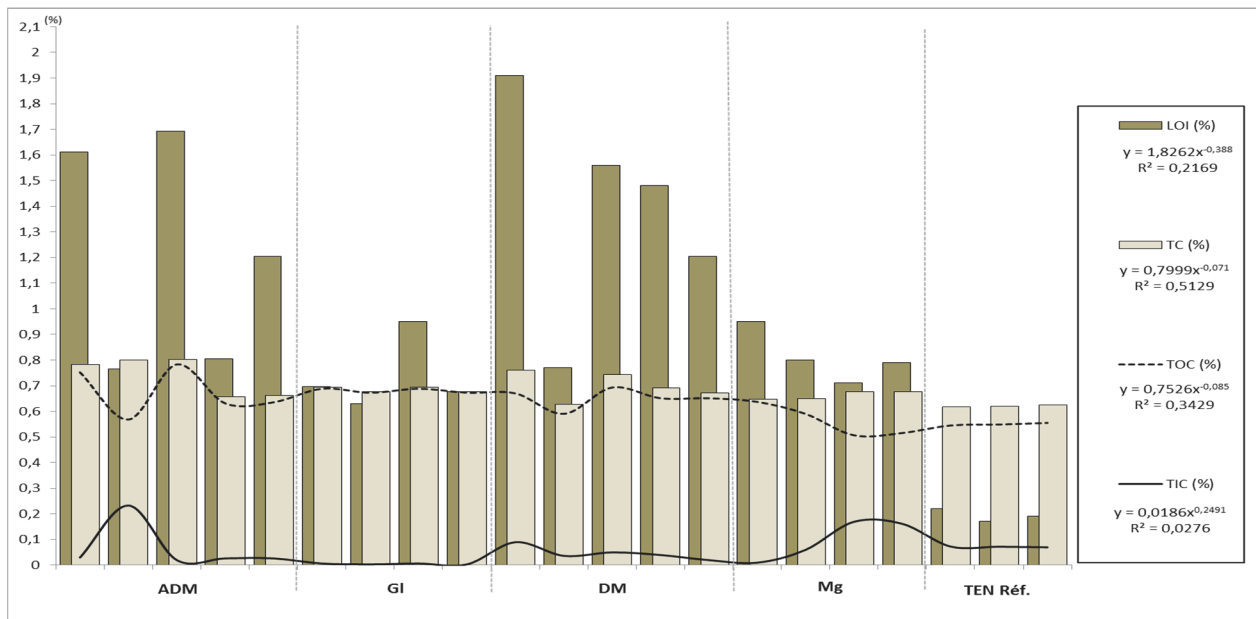
La matière organique est étudiée sous sa forme brute et composite dans les matériaux dunaires. Ainsi, la matière organique totale (TC), le carbone organique total (TOC) et le carbone inorganique total (TIC) ont été analysés afin de déterminer l'évolution la matière organique brute (LOI,TC) , le carbone total du sol mais aussi le carbone inorganique (TIC) provenant des carbonates, bicarbonates et du CO₂ dissout. Le TOC ou carbone organique total, désigne la matière organique naturelle totale (végétation, bactéries, activités métaboliques de différents organismes vivants). Le degré de minéralisation de la matière organique calculé à travers le rapport TOC/TN ou bien TC/TN est utilisé comme paramètre d'évaluation de l'érosion ou de la régénération des couches superficielles des dunes. La transformation de la matière organique joue ici un rôle important quant à la qualité et la stabilité des sols. En effet, selon WISCHMEIER et al (1972), une élévation de 1% du taux de la matière organique réduit de 5% l'érodibilité des sols. Aussi, la minéralisation rapide de la matière organique favoriserait l'exportation des minéraux et la squelettisation des couches superficielles des dunes. En dehors de ce rôle très important de la matière organique

comme facteur réduisant l'érosion, elle est aussi un excellent bio-indicateur des changements environnementaux et des modifications des processus sédimentaires, car elle se préserve très bien et longtemps après la sédimentation (surtout en milieux lacustres). Selon plusieurs études (BRAUNECK et al 2010 ; BAUMHAUER et al 2009 ; POMEL (2008) ; TORSTEN et al 2005 et MEYERS & LALLIER-VERGES 1999), le carbone inorganique total (TIC), le carbone organique total (TOC) et le rapport TOC/TN (azote total), sont de bons indicateurs proxy pour la reconnaissance de l'allochtonie/autochtonie des apports dans les sédiments. Ceux-ci sont aussi des indicateurs d'aridité en raison de leur relative sensibilité aux changements environnementaux. Selon ces différents auteurs, un TIC et TOC/TN bas indiqueraient des conditions d'aridification alors qu'une hausse du TOC et du TIC traduirait des conditions d'équilibre des milieux sédimentaires. Par contre un TIC et un TOC bas traduirait des conditions de dégradation des milieux sédimentaires par apports détritiques (sédiments clastiques). En outre, dans les milieux sédimentaires où le TIC est élevé et le TOC est bas, les conditions de sédimentation seraient mixtes. Tandis que la baisse du TOC/N et la hausse du TOC impliqueraient une faible activité biologique. **Ainsi en raison de la pertinence de ces indicateurs proxy, quelles informations pourraient-ils alors fournir dans le cadre de la présente étude ?**

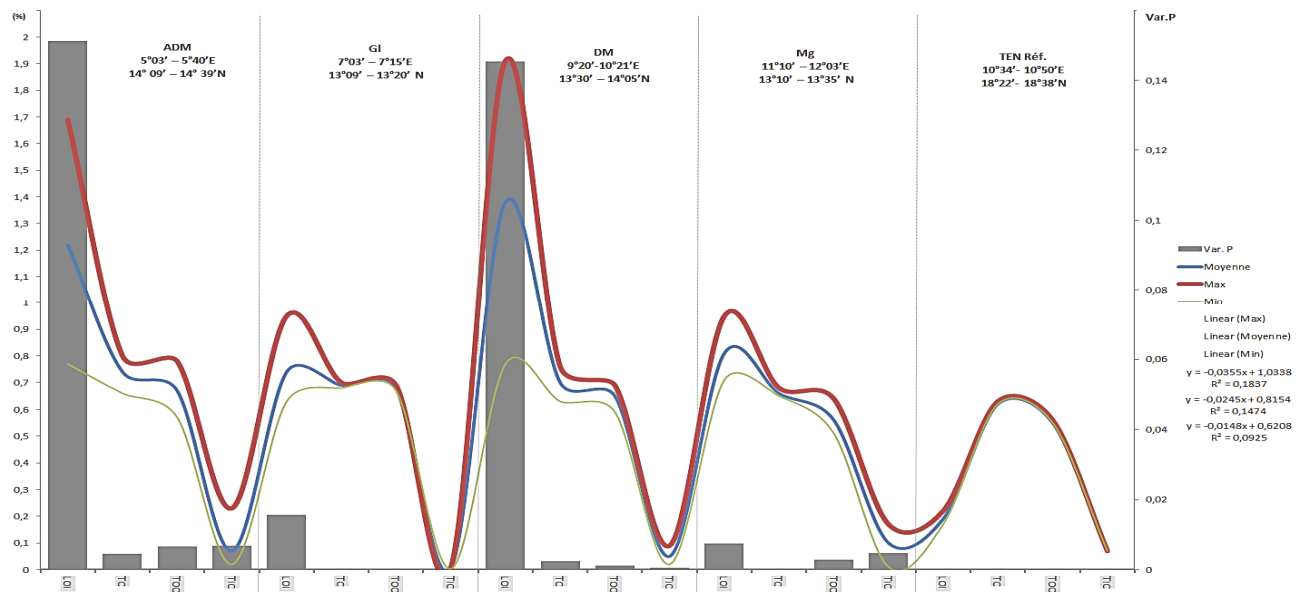
Les résultats de l'analyse des caractéristiques de la matière organique dans les couches superficielles montrent sur les graphiques n°9 et n°10 ci-dessous, une variation régionale du taux de la matière organique dans les différents paysages dunaires étudiés. Ils sont néanmoins pauvres en matière organique (majoritairement < 1 %), les valeurs moyennes tournent autour de 0,25 et 0,75 et les valeurs maximales ne dépassent guère 2 %. Dans les sédiments des dunes mobiles du TEN.Réf., elles sont toutes < 0,2 % voire nulle. Toutefois, les dunes de l'ADM et du DM semblent plus fournies en matière organique malgré les faibles teneurs. Ils présentent des valeurs maximales proches de 2% et des valeurs minimales proches de 0,25%. Quant aux matériaux des couches superficielles des dunes du Mg et du Gl, ils présentent tous une teneur faible en matière organique qui est comprise entre 0,25 et < 1%. Les analyses statistiques des valeurs spécifiques et les corrélations linéaires des valeurs de tous les profils des paysages dunaires montrent une variation régressive d'Ouest vers l'Est de la teneur en matière organique *in situ* des couches superficielles des dunes. Avec quelques exceptions dans le paysage dunaire du Damagaram-Mounio (DM) où certains profils présentent des valeurs relativement proches de celles des paysages dunaires de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM). Cela pourrait s'expliquer par l'abondance de la végétation herbacée qui pousse sur les dunes non dégradées pendant la saison des pluies. Quant aux sédiments meubles des dunes mobiles de la partie saharienne de référence, ils présentent parfois des valeurs nulles. Celles-ci se justifient par l'absence quasi-totale de la végétation dans la zone. Les valeurs observées sembleraient être liées aux apports par le vent ou provenir du matériel organique fossile abondant dans la zone. Les valeurs similaires entre les dunes des paysages dunaires du Goulbi et du Manga s'expliqueraient par le fait que le premier est fortement exploité (agriculture et élevage) et le second présente une couverture végétale très dégradée (dunes en remobilisation et en perte de structure). Car ces dunes sont moins couvertes par la végétation herbacée même en saison de pluie.

Du point de vue interprétatif, on peut remarquer que dans l'ensemble des sites étudiés, les proportions de la matière organique brute (LOI) ne dépassent que rarement le 1% et sont relativement plus abondantes dans les matériaux des paysages dunaires du bassin des Iullemeden où la végétation ligneuse est plus fournie que dans ceux du bassin du lac Tchad. Dans ce bassin elle est en effet essentiellement dominée par des herbacées annuelles et les ligneux dégradés qui se concentrent surtout dans les dépressions interdunaires (notamment dans le Mg). La zone de référence quant à elle, présente des valeurs très faibles. Paradoxalement les échantillons des dunes mobiles du Sahara présentent un taux moyen de carbone total (TC) relativement proche des dunes fixées de la partie sahélienne et ce, malgré une très faible, voire une absence totale de la couverture végétale dans ce milieu hyperaride ($R^2 = 0,5$). Cela pourrait expliquer des apports par les vents de la matière organique provenant de l'érosion des sédiments lacustres ou des oasis verdoyantes ou encore en partie de la végétation qui poussent

extraordinairement sur les bordures sahariennes après les rares et courts événements pluvieux. Quant au carbone organique total (TOC), il présente quelques variabilités locales mais tend à augmenter dans les milieux sahéliens ($R^2= 0,3$). Concernant le TIC enfin, il est plus élevé dans les paysages dunaires proches des zones sahariennes du bassin du Lac Tchad mais un peu plus élevé aussi dans la partie occidentale du bassin des Iullemenden (ADM) qui est une zones où affleurent parfois les formations carbonatées. Leur érosion et dépôt dans les couches superficielles des dunes de ce paysage dunaire influenceraient cette hausse ! Ceci explique le faible coefficient de corrélation ($R^2=0,03$). Le graphique n°9 montre que la teneur en matière organique (LOI) des matériaux dunaires de surfaces est < à 2% dans tous les sites étudiés. Ils présentent dans leur grande majorité des valeurs < 1 %. Dans les sédiments des dunes mobiles du TEN.Réf. ($10^{\circ}34' - 10^{\circ}50' E$ et $18^{\circ}22' - 18^{\circ}38' N$), elle est < 0,2 % (parfois nulle). Toutefois, les dunes de l'ADM ($05^{\circ}03' - 05^{\circ}40' E$ et $14^{\circ}09' - 14^{\circ}39' N$) et du DM ($09^{\circ}20' - 10^{\circ}21' E$ et $13^{\circ}30' - 14^{\circ}05' N$) sont relativement plus riche et présentent des valeurs maximales proches de 2%. Quant aux matériaux dunaires des couches superficielles des dunes du Mg ($11^{\circ}10' - 12^{\circ}03' E$ et $13^{\circ}10' - 13^{\circ}35' N$) et du GI ($07^{\circ}03' - 07^{\circ}15' E$ et $13^{\circ}09' - 13^{\circ}20' N$), ils présentent tous une faible teneur (entre 0,25% et < 1%). Ce indique la variabilité régionale et locale de l'évolution de la matière organique dans les couches superficielles des dunes dans les différents paysages dunaires étudiés. Ici, le carbone organique est utilisé comme un excellent indicateur de la qualité agronomique des sols. Cette variabilité spatiale et locale est fonction des types d'occupation de sol et des saisons climatiques. Selon BERNOUX & CHEVALLIER (2013) par exemple en zone tempérée cette teneur tourne autour de 1-2 % dans les sols cultivés et de 4-5 % dans les sols sous prairie ou sous forêt. Ainsi, la faible teneur en carbone organique pourrait bien traduire une dégradation des sols et une altération des fonctions associées.



Graphique n°9: Evolution locale et régionale des valeurs moyennes des LOI, TC, TOC et TIC dans les zones étudiées.



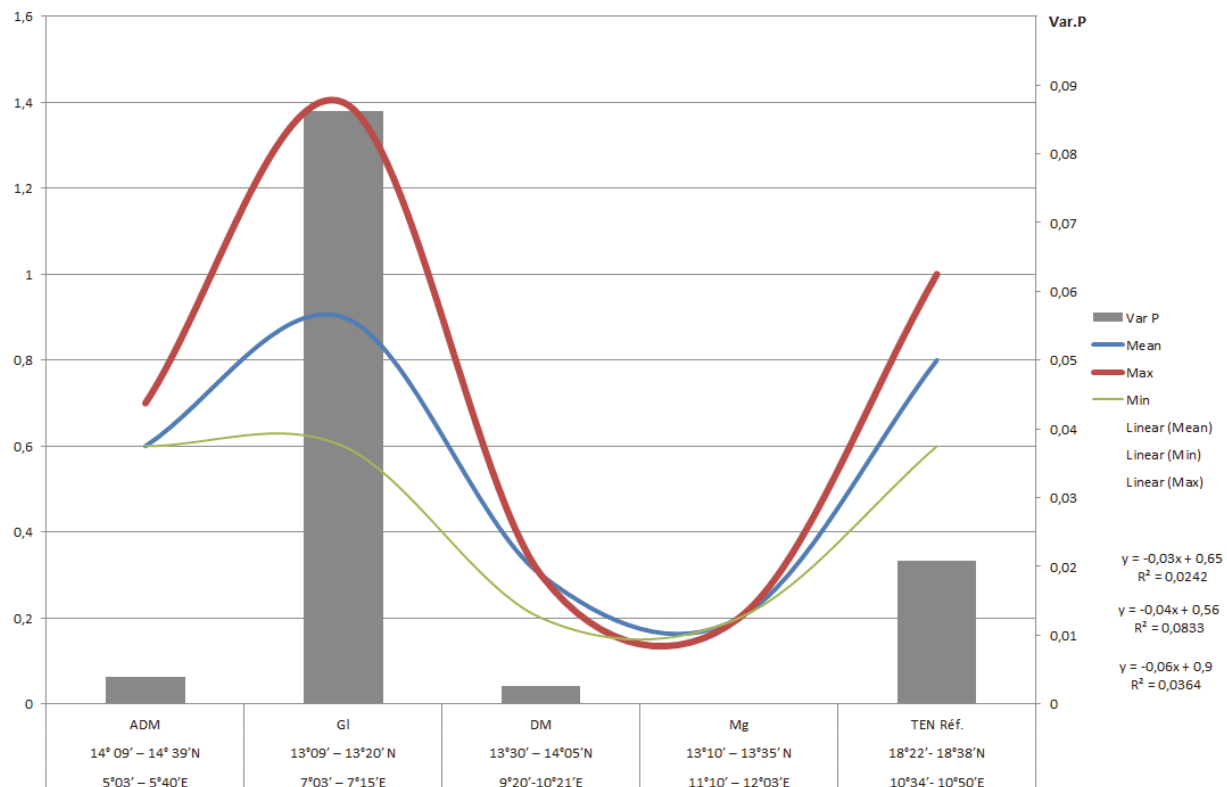
Graphique n°10 : Corrélation et variabilité régionale *in situ* de la teneur en LOI, TC, TOC et TIC dans les zones étudiées. Le graphique présente les analyses statistiques des valeurs spécifiques et les corrélations linéaires des valeurs de LOI, TC, TOC et TIC dans les matériaux des couches superficielles des dunes de l'ADM, du GI, du DM, du Mg et du TEN Réf. Il indique une variation régressive d'Ouest vers l'Est.

5.3.3. Influences des apports allochtones et/ou autochtones sur les dunes

Les indices d'alloctonie ou d'autoctonie sont indirectement évalués à partir des rapports Ti total/TIC, Fe total/TIC et TOC/TN d'après les travaux de TORSTEN et al (2005) et de MEYERS & LALLIER-VERGES (1999). Pour ce faire, le potentiel en carbonates des échantillons a d'abord été évalué, afin de définir les conditions d'alloctonie ou d'autoctonie pouvant regner dans ces milieux dunaires. Cela en raison de leur relative stabilité, de leur faible solubilité dans l'eau et la formation augmente avec la température. Bien qu'en milieu acide, ils soient très solubles, ils servent de bons indicateurs pour la comparaison. Ainsi, l'analyse des carbonates montre que dans l'ensemble des paysages dunaires étudiés, les teneurs respectives dépassent rarement 1%. On constate sur le graphique n°11 ci-dessous, que les teneurs en carbonates des couches superficielles des dunes du ADM, du GI et du TEN.Réf., sont relativement plus élevées que dans les paysages dunaires du DM et Mg avec des valeurs respectives comprises entre 0,6% à 07% , 0,6% à 1,4% et 0,6% à 1%. Les valeurs maximales sont observées dans les dunes du paysage dunaire du Goulbi (GI) avec plus 1% et celui de la zone sahariennes (TEN.Réf.) avec 1% (valeurs optimale entre 1% et 5%). Par contre, la teneur en carbonates des couches superficielles des dunes de DM et Mg est relativement faible. Elle varie de nulle (0) à moins de 0,3%. Les valeurs maximales observées dans les sédiments des dunes mobiles de référence (TEN Réf.) situées en milieu saharien, s'expliqueraient par un apport ou un remaniement probable par le vent des sédiments lacustres fossiles abondants dans les zones hyperarides. Quant aux valeurs relativement très élevées remarquées dans le paysage dunaire du Goulbi (GI), elles semblent être dues aux activités d'origine anthropique (brûlis) car la zone est fortement peuplée, intensément cultivée et beaucoup d'engrais sont utilisés à cet effet. Malgré cela, selon les analyses qualitatives (graphique n°11) on constate nettement une variation régionale régressive d'Ouest vers l'Est de la zone d'étude.

Ainsi, malgré que la plupart des matériaux carbonatés soient autochtones (MIALL 1984), les sources principales du TIC dans les couches superficielles des dunes étudiées proviendraient principalement de la précipitation induite des minéraux carbonatés apportés par le vent depuis les régions sahariennes. En effet, ces régions caractérisées par une abondance de sédiments

paléo-lacustres qui, une fois arrachés par l'érosion éolienne, sont transportés vers les zones sahéliennes plus humides où ils s'intègrent par la suite, dans les processus géomorphologiques et pédologiques locaux (FELIX-HENNINGSSEN 2010 et 2009, HERRMANN 2009).



Graphique n°11 : Variabilité spatiale de la teneur en carbonates (%) des matériaux dunaires dans les zones d'étude. Le graphique montre une relative abondance des carbonates dans les matériaux dunaires du GI et du TEN Réf. contrairement à ceux des paysages dunaires de l'ADM, du DM et du Mg. Ce dernier présente des valeurs inférieures à 0,2%. La valeur proche de 1 de la Var.P des dunes du GI indiquerait une forte influence des activités humaines (brûlis probablement).

5.3.4. Rapports Fe total /TIC et Ti total /TIC

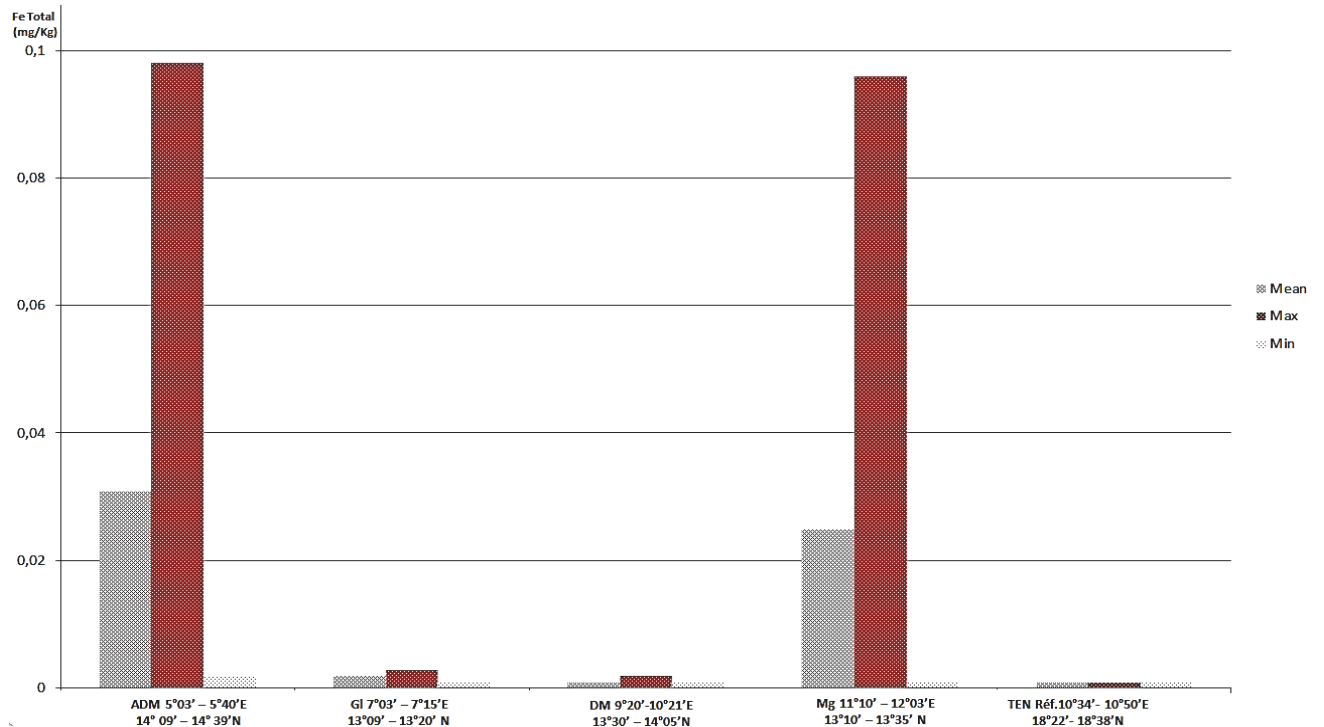
L'étude des rapports entre les éléments minéraux (Fe et Ti) et les TIC, permet d'évaluer les apports externes en minéraux. Par exemple selon HARTMUT (1977) le fer (Fe), est un élément important pour l'étude des sédiments et des conditions de formation des sols. Le fer primaire est directement lié aux silicates alors que le fer secondaire ne se trouve que dans des conditions de « pédogénèse ». Ce dernier est libre dans les hydroxydes où il est amorphe et mobile.

L'analyse des rapports Fe total /TIC, montrent sur le graphique (graphiques n° 12 et n°13) que les dunes du bassin des Iullemenden présentent un Fe total/TIC élevé par rapport aux dunes du bassin du Lac Tchad ($R^2= 0,4$). On observe néanmoins dans les dunes du bassin du Lac Tchad (Mg), une valeur relativement élevée autant que dans les dunes du bassin des Iullemenden (GI et ADM) avec des valeurs respectives des rapports Fe total/TIC (Var.P : 348 contre 5833 et 1442). Sur le graphique n°12, les teneurs en fer total (Fe_t) des matériaux dunaires de l'ADM et du Mg sont plus importantes que celles de ceux du GI, du DM et du TEN Réf. Dans les matériaux de l'ADM cela s'explique par la nature géologique du substratum sur lequel les dunes sont formées (plateau latéritique riche en fer). Concernant la forte teneur en fer des matériaux des couches superficielles des dunes du Mg, elle s'expliquerait par le remaniement des anciennes dunes dont les matériaux sont très riches en fer. Sur le graphique n° 13, on remarque que les matériaux des

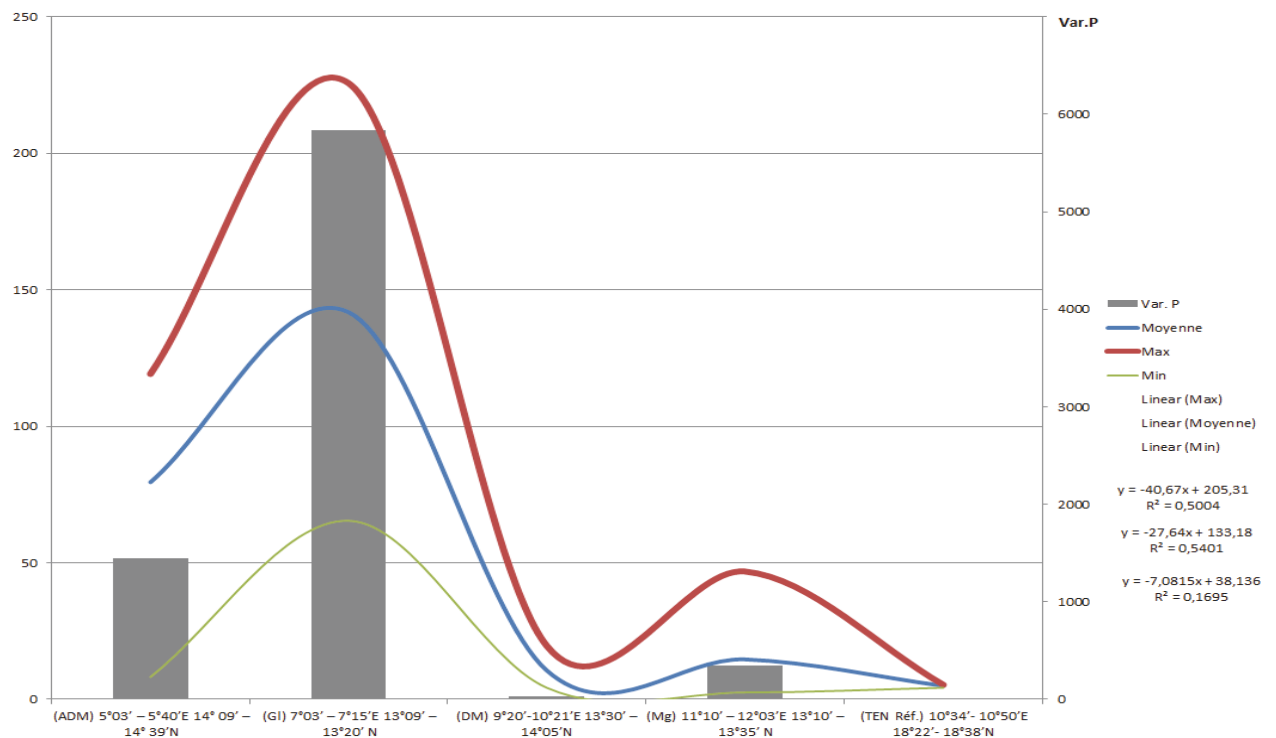
couches superficielles des dunes du ADM et d G1 ont un Fe_t/TIC élevé par rapport à ceux du DM, Mg et ceux de la zone de référence du Ténéré (TEN Réf.). Cela s'expliquerait par l'influence géologique des plateaux latéritiques (grès ferrugineux) sur lesquels ces dunes sont formées. La valeur relativement élevée de la Var.P du rapport Fe_t/TIC indiquerait un apport en fer par érosion et remaniement matériaux des dunes G1 (première génération décrites par Völkel 1989 et Servant 1983 et 1973), de couleur rouge, très riche en oxydes de fer (hérités des sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés et des sols brun-rouge subarides).

Ainsi, dans les sols et sédiments des dunes du Bassin des Iullemenden, cela s'expliquerait par l'influence de l'héritage géologique latéritique des plateaux ferrugineux sur lesquels ces dunes sont formées. Quant aux sols et sédiments des dunes du bassin du Lac Tchad, cela expliquerait probablement une altération et un remaniement des dunes G1 de première génération (décrites par VÖLKELE 1989, Servant 1983 et 1973) qui est de couleur rouge d'oxydes de fer héritée des sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivée et des sols brun-rouge subarides qui sont pour la plupart formés sur le substrat dunaire pendant les différentes phases humides quaternaires (graphique n°13). Cela serait bien possible, car FELIX-HENNINGSEN (2010), HERRMANN (2009), FELIX-HENNINGSEN (2000), HERRMANN (1996), indiquaient que le fer dans les sédiments dunaires est d'origine paléo climatique humide. Une fois ces sédiments érodés par le vent très actif dans les zones, ils sont remobilisés et viennent enrichir les horizons de surface des dunes. Une autre cause possible de cet apport en fer serait : plus au nord les plateaux latéritiques du Koutous qui pourraient être une source d'apports en poussières riches en ce minéral par les courants éoliens favorables. Cette valeur anormalement élevée de Var.P montre qu'il est quasiment impossible de comparer les analyses à l'échelle des paysages dunaires. Néanmoins cela pourrait renseigner sur les influences locales et distales des apports en fer dans les matériaux dunaires.

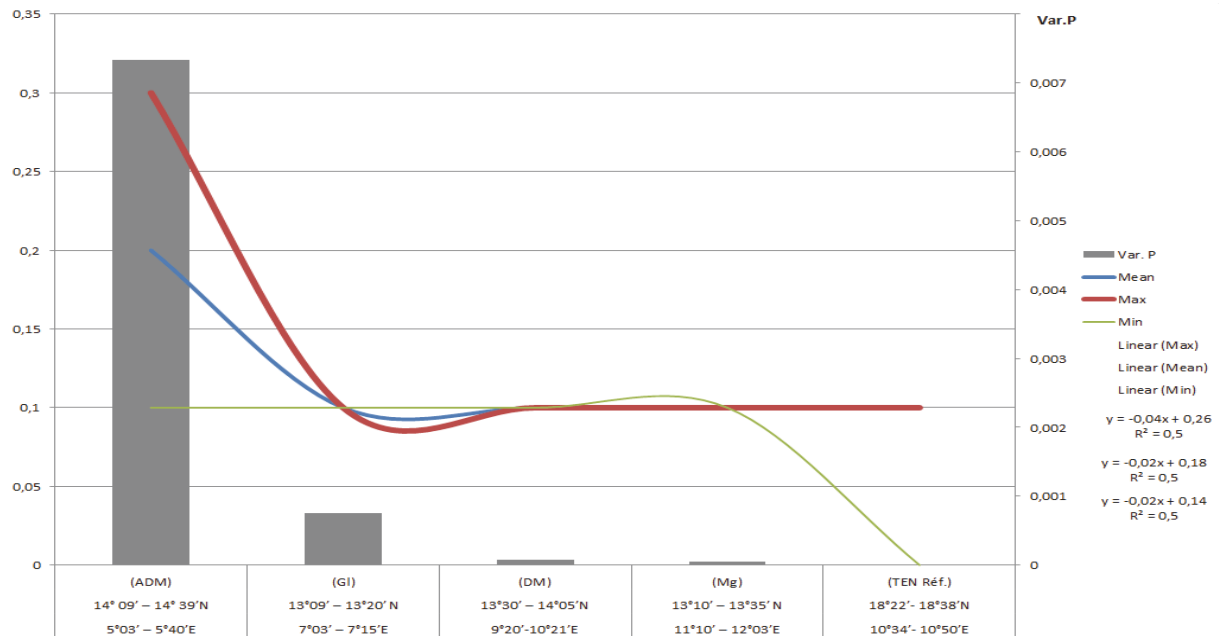
Quant aux rapports Ti total /TIC, ils montrent aussi les mêmes caractéristiques que les rapports Fe total/TIC. Le graphique n° 14 indique que les carbonates inorganiques (TIC) dans les matériaux sédimentaires des couches superficielles des dunes de l'ADM seraient allochtones. Autant que dans ceux du G1. Par contre ceux du DM, Mg et TEN Réf. seraient autochtones car les valeurs de leurs Var.P sont très proches de 0. D'après ce graphique, les rapports élevés dans les paysages dunaires de G1 et ADM et Mg, expliqueraient aussi une forte allochtonie des carbonates et probablement une forte influence des sédiments lacustres transportés par le vent probablement depuis les zones sahariennes. Ces valeurs pourraient aussi provenir de l'érosion locale des matériaux carbonatés provenant soit de la zone de battement de la nappe phréatique soit de l'érosion des affleurements rocheux (calcaire) situés non loin des dunes.



Graphique n°12: Analyse quantitative du fer total (Fe T) dans les sols et sédiments des couches superficielles (0-20 cm) des dunes étudiées.



Graphique n°13: Variabilité spatiale des indices d'allochtonie-autochtonie selon le rapport Fe_T/TIC dans les sols et sédiments des couches superficielles (0-20 cm) des dunes étudiées.



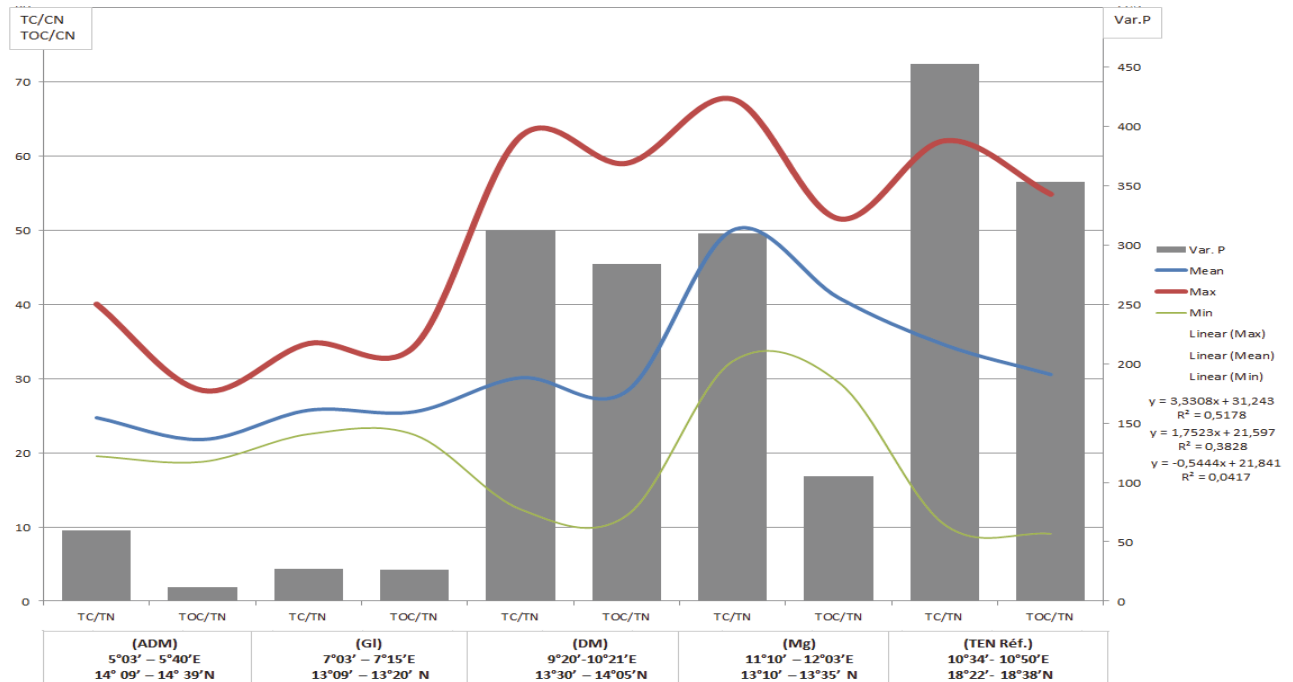
Graphique n°14 : Variabilité régionale des indices d'allochtonie-autochtonie du rapport Ti_t/TIC dans les sols et sédiments des couches superficielles (0-20 cm) des dunes étudiées.

5.3.5. Rapport TOC/TN et influences extérieures des matériaux détritiques

En raison de son caractère post-sédimentaire, le TOC/TN selon TORSTEN et al (2005), MEYERS & LALLIER-VERGES (1999), permettrait d'interpréter les transformations de la matière organique et son degré de minéralisation dans un sédiment. Aussi, selon MICHEL (2002) l'état spécifique de la matière organique et son évolution dans les sols et sédiments « représente l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois de les fonctions environnementales ». Ainsi, le rapport TOC/TN est un indicateur pour juger de la disponibilité de la matière organique dans les couches superficielles des dunes des différents paysages dunaires. De façon chiffrée, le TOC/TN optimal doit être compris entre 9 et 12. (FAO et al 1999). Les résultats des analyses effectuées dans le cas de cette étude, montrent, d'après le graphique n°15, une variabilité régionale et locale des rapports TOC/TN respectifs des matériaux dunaires. Ainsi, les valeurs du TOC/TN sont plus élevées dans les dunes du bassin du Lac Tchad et surtout dans la partie saharienne de référence. Ce qui impliquerait un apport allochtone de la matière organique et surtout une faible production d'azote (N) dans ces milieux favoriserait cela. La tendance est plus élevée plus on va vers le Nord et l'Est des zones étudiées, où la couverture végétale est réduite et où les vents pourraient apporter les sédiments paléo-lacustres qui, par la suite rendraient élevées ces valeurs. En outre, la nature majoritairement herbacée de la végétation au nord et à l'Est pourrait aussi y contribuer.

Ainsi du point de vue interprétatif, les variances (Var.P) très élevées du TOC/TN expliqueraient soit un apport allochtone de la matière organique dans les sédiments soit sa rapide minéralisation. D'après le graphique n°15 ci-dessous, on constate que dans l'ensemble des paysages dunaires, ces valeurs sont situées entre 9,5 et 78. Les valeurs extrêmes (> 50) sont observées dans les paysages dunaires du Bassin du Lac Tchad. Dans les paysages dunaires du Bassin des Iullemenden par contre ces valeurs sont toutes comprises entre 19 et 40. Cela pourrait s'expliquer par une forte minéralisation de la matière organique des matériaux dunaires dans ces zones. Les analyses statistiques des valeurs spécifiques *in situ* des échantillons et les corrélations linéaires effectuées à l'échelle de l'ensemble des paysages dunaires montrent que la matière organique se minéralise presque entièrement dans les couches superficielles des dunes. Cela expliquerait bien la pauvreté en matière organique des dunes malgré une couverture végétale herbacée appréciable en saison des pluies. Cela se confirme en remarquant les valeurs

presque identiques des TOC/TN du milieu saharien hyperaride (sans couverture végétale et avec une pluviométrie < 10 mm /an) et celui des milieux semi-arides (avec une certaine couverture végétale et une pluie moyenne annuelle comprise entre 300-500 mm). Ainsi, ce graphique (n°15) suggère une minéralisation rapide de la matière organique. Mais celle-ci se produit plus rapidement dans les matériaux des couches superficielles des dunes du DM, du Mg et du TEN Réf. que dans ceux des dunes de l'ADM et du Gl. Ceci expliquerait la pauvreté en matière organique brute (LOI) des dunes malgré une bonne couverture végétale herbacée en saison des pluies.



Graphique n°15 : Variation du rapport C/N et TOC/TN dans les couches superficielles des dunes étudiées.

5.4. Conclusion partielle

L'étude des caractéristiques physiques et géochimiques des couches superficielles des dunes a permis de comprendre les modifications actuelles *in situ* des matériaux dunaires. Il s'agit particulièrement des transformations *in situ* et des apports en matériaux à la surface des dunes. Ces mécanismes occasionnent des modifications morpho-pédologiques dans les paysages dunaires fixés par la végétation au Niger. Ainsi, cette étude met en relief les variabilités locales et régionales des spectres granulométriques des matériaux dunaires de surface et leurs liens avec la pédogénèse. Elle, démontre en effet, que des activités pédogénétiques d'une faible ampleur se produisent dans les milieux dunaires étudiés. Celles-ci semblent relativement plus actives dans les dunes du bassin des Iullemenden (ADM, Gl) que dans celles du bassin du Lac Tchad (DM, Mg). Les couleurs des matériaux, malgré quelques affinités chromatiques de base, semblent être influencées par les conditions géologiques et de végétation locales. En ce qui concerne le pH, plus on se rapproche des latitudes sahariennes, plus le pH augmente et inversement quand on s'en éloigne vers le Sud en milieux sahéliens. La comparaison des rapports Fe_t / TIC , Ti_t / TIC et TOC / TN indique que malgré les productions locales, les couches superficielles des dunes sont constamment enrichies en carbonates et substances organiques qui proviendraient des zones sahariennes et subsahariennes. En effet, dans ces régions, les matériaux érodés pourvus en carbonates et autres substances organiques (sédiments lacustres),

sont transportés par le vent et viennent enrichir les sols et sédiments dunaires du Sud. Enfin, il faudrait noter que, les paramètres étudiés pourraient bien être considérés comme un indicateur proxy pour des investigations relatives à l'érosion et aux remaniements des matériaux dunaires au Sahel.

Cinquième partie

6. Altération chimique des matériaux dunaires et pédogenèse

6.1. Altération chimique des couches superficielles des dunes

Avant d'entamer ce chapitre relatif à l'altération chimique des matériaux dunaires, il est important de souligner que les processus d'altération chimique se produisent très difficilement dans les conditions climatiques actuelles des milieux dunaires étudiés. En outre, les processus d'altération qui ont précédé la situation actuelle ont eu une puissance telle que les matériaux altérables ont presque ou totalement disparus (DIDIER & SAINT-ARMAN 1969). Les matériaux dunaires étudiés sont en effet, pour la plupart, anciens et hérités de périodes arides que l'actuel (FELIX-HENNINGSSEN et al 2009 ; HERRMANN 2009 ; HERRMANN 2000, HERRMANN 1996, VOLKEL 1989 ; SERVANT 1983 ; SERVANT 1973). Ceci rend délicat et problématique cette partie du travail car dans les paysages dunaires fixés du Niger, comme dans la plupart des zones sahéliennes, les conditions d'altération chimiques sont très réduites voire même nulles en raison de l'aridité du climat.

Néanmoins, pour vérifier l'évolution des matériaux dunaires dans les conditions climatiques actuelles des milieux sahéliens (300-500 mm/an) des indices d'altération chimique appliqués aux roches et aux sols ont été testés. Ils ont été testés dans le but de déceler et d'estimer une éventuelle altération chimique *in situ* des couches superficielles des dunes car ces dernières sont en effet, actuellement soumises surtout à des phénomènes érosifs et climatiques extrêmes (sécheresse, inondations) et variables. Ainsi, ces variabilités sont d'une part, caractérisées par des alternances de périodes sèches dont les conséquences sont: une intense érosion éolienne et une forte remobilisation des dunes avec des apports proximaux (sables) et distaux (poussières et fines diverses). D'autre part, par des périodes pluvieuses dont les conséquences sont : des inondations et une érosion des dunes. Dans cette dynamique paradoxale de remaniement d'origines diversifiées, est-il possible que des processus d'altération chimique soient observés ne serait-ce que très faiblement ? Les résultats des tests des divers indices en diront un peu plus.

6.2. Choix des indices d'altérations chimiques

Selon la littérature, plusieurs indices d'altération chimique ont été proposés et utilisés pour l'étude des processus d'altération des roches et matériaux détritiques. Pour le cas de cette étude, le choix est porté sur des indices ayant les plus larges applicabilités. Ceux-ci sont non seulement applicables à tout type de roches, mais aussi aux sols et sédiments d'âges divers (HEINRICH & NICOLE 2009 ; PRICE et al. 2003 ; DUZGOREN-AYDIN 2002 ; FEDO ET AL 1995 ; HARNOIS 1988 ; NESBITT & YOUNG 1989 et 1982 ; ROUXTON 1968). Ainsi, ces indices sont notamment applicables aux sols et sédiments dunaires qui, sont particulièrement composés de matériaux clastiques sableux (quartzeux) à plus de 80%. Entre outre, ces dunes présentent un aspect massif pouvant atteindre plus de 2 mètres d'épaisseur, voire au-delà leurs les couches superficielles étudiées (0-20 cm) présenteraient souvent une faible relation avec la roche sous-jacente (photo n°22). Cependant leurs matériaux sont essentiellement constitués de silicates et pourraient jouer dans ces conditions, le rôle de « roche mère ».

Pour ces raisons, ont d'abord été considérés et testés le CIW (Chemical Index of Weathering) de HARNOIS (1988) et le CIA (Chemical Index of Alteration) de NESBITT & YOUNG (1982). Ces deux indices sont en effet, indiqués comme des indices d'altération chimiques applicables : pour le premier aux roches silicatées et le second aux sols actuels et anciens. Mais en raison de la complexité des

processus d'altération chimique des matériaux, de la mobilité de certains oxydes et éléments minéraux majeurs (Ca, Mg, K, Na), de la nécessité de connaître au préalable les profils d'altération de la roche mère en place (DUZGOREN-AYDIN 2002, ROUXTON 1968) mais qui sont ici non caractérisés, il a été jugé utile d'intégrer d'autres indices qui, tiennent compte des rapports entre les oxydes de certains éléments majeurs relativement moins mobiles (Al, Fe, Si, Ti). Ainsi, le « STI » de JAYAVARDENA & IZAWA (1994), le « MWIP » (modified Weathering Index of Parker) de REICHE (1943) / VOGEL (1975), le « V » de VOGT (1927) / ROALDSET (1972), le « WIP » (Weathering Index of Parker) de PARKER (1970) et le « R » de ROUXTON (1968) ont été comparés aux CIA et CIW.



Photo n°22 : Coupe d'une dune jadis fixée par la végétation mais en dégradation (dune du Manga/Mainé Soroa : 13°13' N et 12°03' E). Les parties blanches des parties inférieures du corps dunaire indiquent les fluctuations des niveaux de la nappe phréatique qui a à présent totalement disparue.

Cette comparaison vise ainsi à identifier les variations spatiales du degré d'altération chimique à la surface des dunes. L'application de ces indices est en effet, basée sur des équations mettant en rapports relatifs aux oxydes des éléments majeurs mobiles (CaO, Na₂O, K₂O, MgO) et des oxydes des éléments majeurs immobiles (Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂) Les indices choisis ici sont traduits par les équations suivantes :

1. JAYAVARDENA & IZAWA 1994 $STI = ((SiO_2 / TiO_2) / ((SiO_2 / TiO_2) + (SiO_2 / Fe_2O_3) + (Al_2O_3 / TiO_2))) * 100$
2. HARNOIS 1988 $CIW = (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)) * 100$
3. NESBITT & YOUNG 1982 $CIA = (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) * 100$
4. REICHE 1943 / VOGEL 1975 $MWPI = ((Na_2O + K_2O + CaO + MgO) / (Na_2O + K_2O + CaO + MgO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)) * 100$
5. VOGT 1927 / ROALDSET 1972 $V = (Al_2O_3 + K_2O) / (MgO + CaO + Na_2O)$
6. Parker 1970 $WIP = ((2 Na_2O / 0,35) + (MgO / 0,9) + (2 K_2O / 0,25) + (CaO / 0,7)) * 100$
7. ROUXTON 1968 $R = SiO_2 / Al_2O_3$

Le **STI** : il est utilisé pour l'établissement du degré d'altération des roches silicatées des substrats de gneiss et de quartzite en milieu tropical et se rapproche de **R** car tous les deux indices utilisent les rapports entre les sesquioxydes des éléments majeurs relativement mobiles et ceux résistants

à l'altération (TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2)

Le **CIW** : il se rapproche du **CIA** mais ne tient pas compte de K_2O supposé très mobile et facilement mobilisable dans les processus de la pédogénèse

Le **CIA** : il est appliqué aux paléosols pour la reconstruction paléo-environnementale sur la base de la conversion du feldspath en kaolinite.

Le **V** : il est appliqué sur les sédiments marins et glaciaires de la période Quaternaire. Il est surtout appliqué sur les matériaux détritiques et les argiles.

Le **WIP** et le **MWIP** : ils sont établis sur la base des proportions des éléments alcalino-terreux très mobiles des roches silicatées (Na, Mg, K et Ca). WIP est utilisé sur la base de la mobilité de chaque élément en rapport avec la force de liaison existant entre chaque élément et l'oxygène (O_2). Il est appliqué sur les roches ignées acides et basiques et surtout sur les matériaux hautement altérés. Le MWIP est la version modifiée du WIP qui prend en compte non seulement les éléments mobiles mais aussi ceux relativement stables.

Le **R** : il est utilisé sur la base des rapports entre deux sesquioxydes dont l'un immobile (Al_2O_3) et l'autre mobile (SiO_2). Cet indice est établi à partir des roches ignées des régions tropicales humides.

Ainsi, selon PRICE et al (2003), ces différents indices sont pour la plupart utilisés pour l'élaboration des profils verticaux d'altération des matériaux en utilisant les proportions atomiques des principaux éléments majeurs composant les différents oxydes. Cependant, l'application de ces indices aux sols et sédiments est limitée par les impacts de la pédogénèse à travers les processus d'illuviation, d'éluviation, de bioturbation, d'adsorption des ions et la matière organique. Ce qui pourrait causer une surestimation des oxydes des éléments majeurs utilisés dans les différentes équations de calcul. Néanmoins ces indices sont révélateurs. Les valeurs élevées de **V**, **CIA** et **CIW** indiquent une forte altération chimique. Par contre, les valeurs basses de **WIP** et **STI** indiquent aussi une altération chimique des matériaux élevée (tableau n°12).

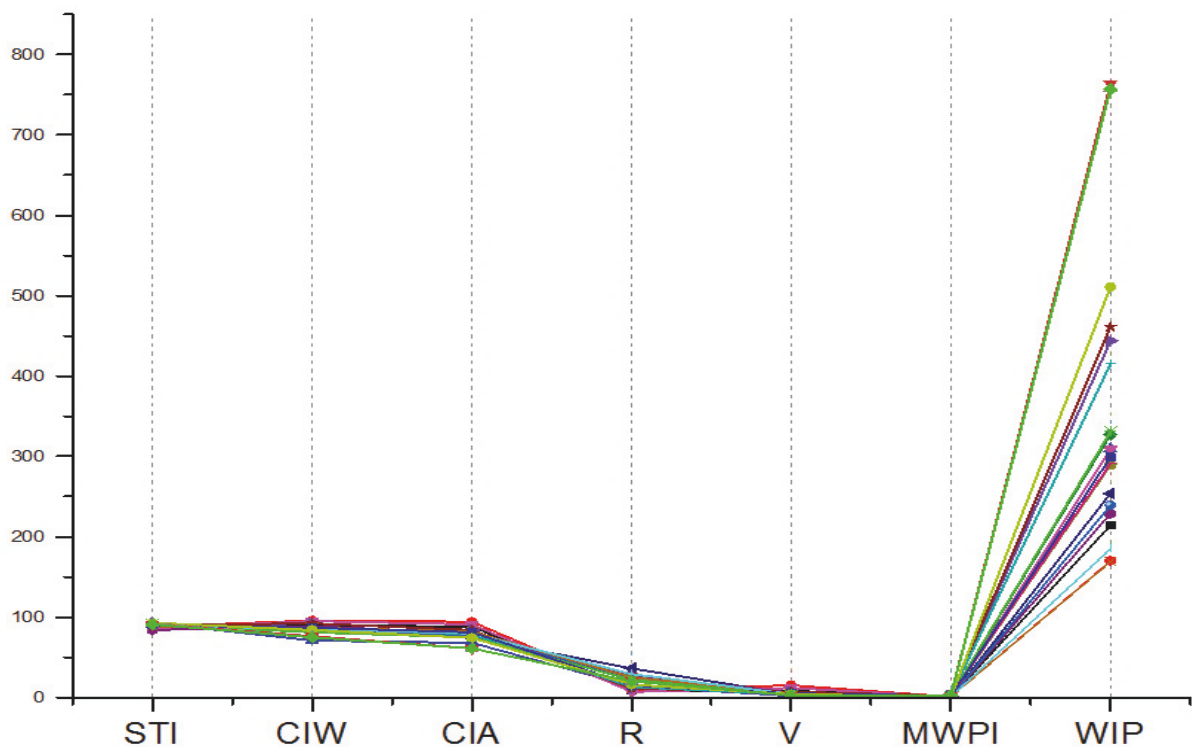
Indices	Valeur optimale pour les matériaux non ou peu altérés	Valeur optimale pour les matériaux fortement altérés
STI	> 90	0
CIW	≤ 50	100
CIA	≤ 50	100
R	> 10	0
V	< 1	infini
MWIP	-	-
WIP	> 100	0

Tableau n°12 : valeurs limites pour l'interprétation des valeurs des indices calculés (d'après Price et al 2003)

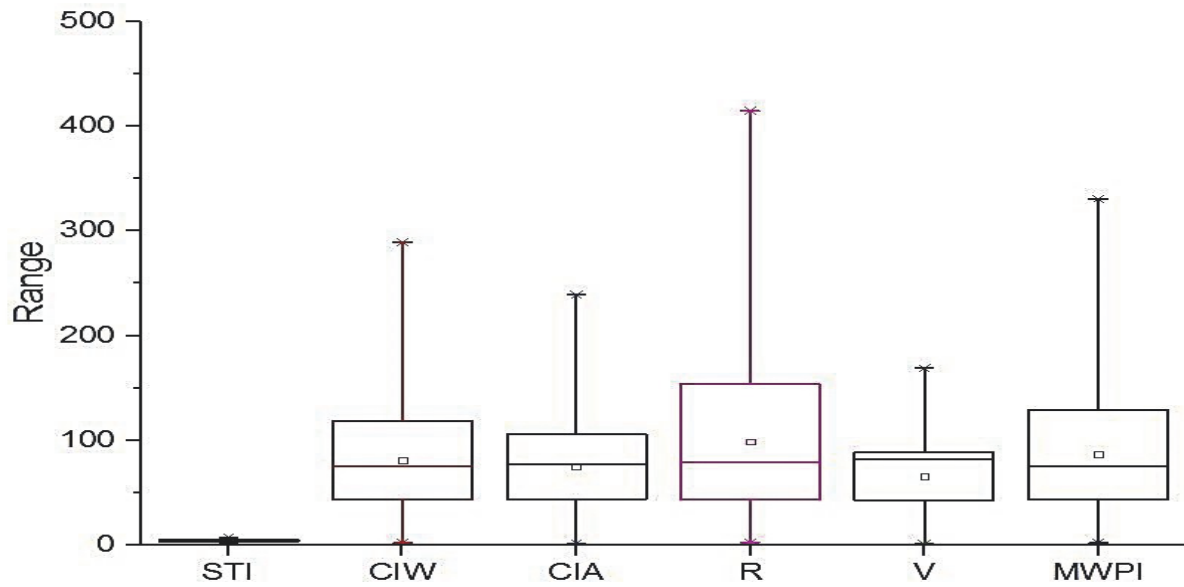
6.3. Choix des indices testés

Dans le cadre de cette étude, le **STI**, le **CIW** et le **CIA** sembleraient être plus applicables aux sols et matériaux silicatés qui sont les composants essentiels des matériaux des sols et sédiments dunaires (graphique n°16 ci-dessous). Le graphique n°17 ci-dessous montre la dispersion statistique des valeurs obtenues des différents indices testés. D'après ce graphique, les valeurs du **STI**, du **CIW** et du **CIA** sont plus proches de la moyenne que celles des autres indices. En effet, c'est en raison de cette faible dispersion des valeurs et du rapprochement des valeurs des indices

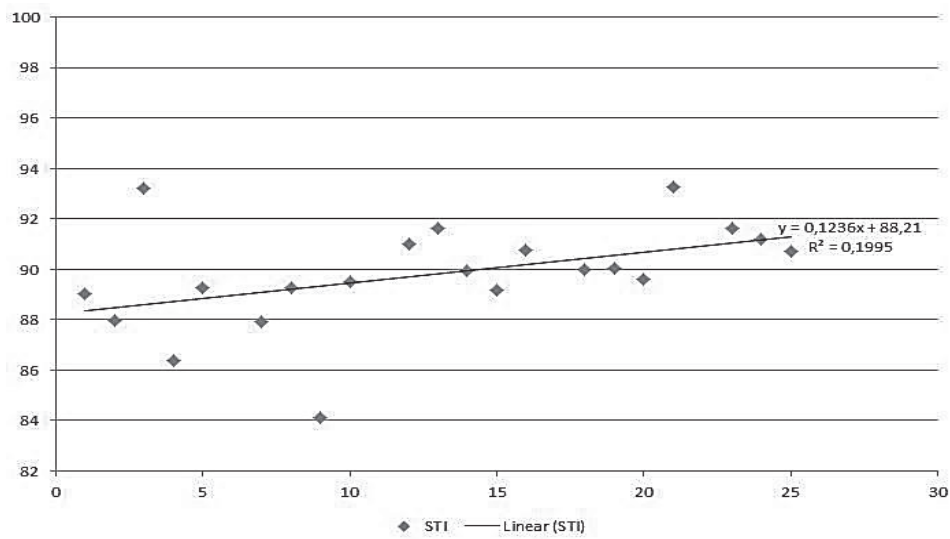
que le STI, le CIW et le CIA sont utilisés pour évaluer de degré d'altération chimique des matériaux des couches superficielles des dunes mais pour évaluer l'intensité de la pédogenèse en complément aux autres paramètres d'évaluation (U-Ratio, SO). Bien que statistiquement le STI semble être l'indice le mieux adapté pour la comparaison, le CIW et CIA sont plus applicables au contexte de cette étude relative aux sols et sédiments dunaires (graphiques n°18, n°19 et n°20). En effet, des raisons évoquées plus haut, ces deux indices prennent en compte les minéraux stables et instables, alors que le STI ne prend pas en compte les éléments minéraux très instables dans les processus pédogénétiques. Il prend seulement en considération les éléments relativement stables. Malgré cela, les trois indices ont été comparés afin d'évaluer l'altération possible des matériaux des couches superficielles des dunes dans les différents paysages dunaires étudiés. Cela signifie aussi l'évaluation des Et aussi évaluer les possibilités de régénération de ces couches superficielles de dunes dans les conditions climatiques actuelles.



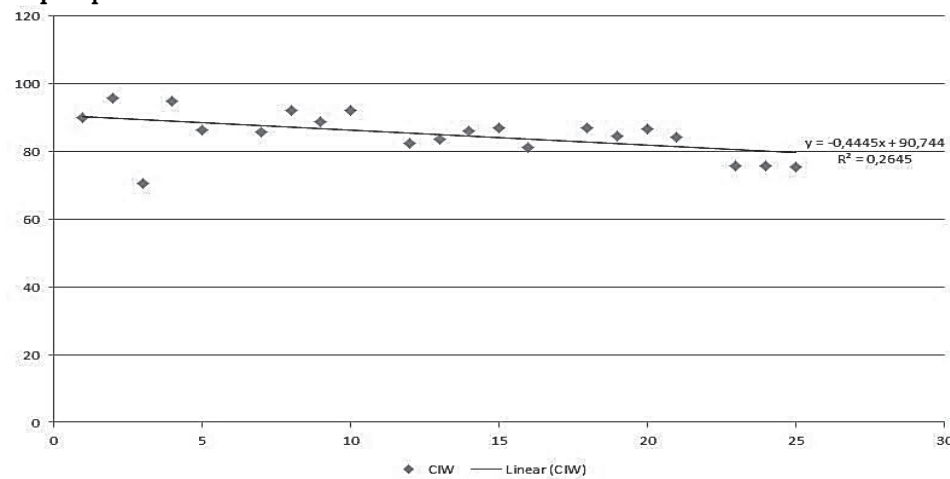
Graphique n°16: Dispersion des valeurs des différents indices d'altération chimique appliqués aux échantillons de tous les paysages dunaires analysés.



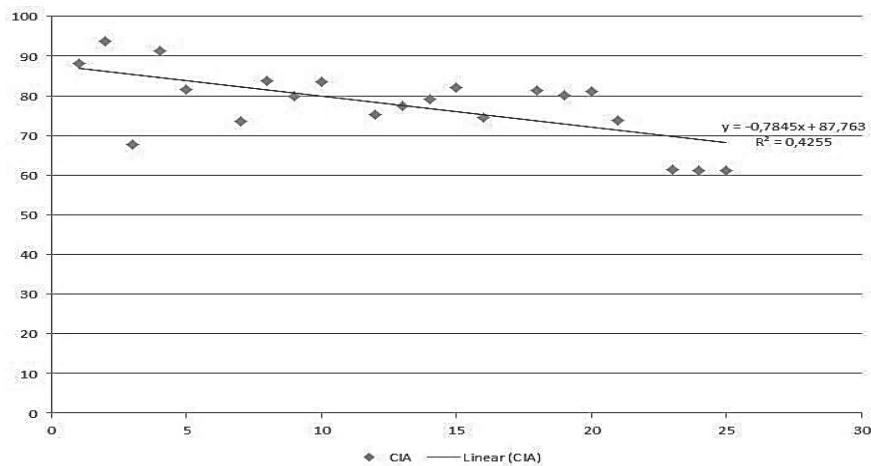
Graphique n°17 : Ecart par rapport à la moyenne et fiabilité statistique des indices d'altération chimique testés



Graphique n°18 : Corrélation linéaire du STI de l'ensemble des échantillons analysés



Graphique n°19 : Corrélation linéaire du CIW de l'ensemble des échantillons analysés



Graphique n°20 : Corrélation linéaire du CIA de l'ensemble des échantillons analysés

6.4. Altération chimique des matériaux à la surface des dunes étudiées

A titre de rappel, cette étude repose sur les rapports entre les proportions moléculaires et atomiques des différents oxydes et éléments majeurs plus ou moins stables dans couches superficielles des corps dunaires anciennement fixés par la végétation. Ainsi, les résultats des analyses des indices d'altération chimique des matériaux dunaires dans les deux bassins sédimentaires (des Iullemenden et du Lac Tchad) montrent bien une possible application pour l'évaluation de l'intensité de l'altération chimique des sédiments clastiques. En effet, dans les paysages dunaires de l'Ader-Douchi-Maggia (ADM), les échantillons testés semblent majoritairement peu altérés avec quelques-uns non ou très peu altérés. Un seul cas de dune à matériaux chimiquement altérés se présente. Le cas des matériaux non ou peu altérés proviennent des jeunes édifices des remobilisations qui, auraient connu une faible activité pédologique (tableau n°13 a). Dans le paysage dunaire du Goulbi (Gl), les sédiments dunaires analysés sont tous peu altérés chimiquement en raison probablement d'un lessivage intense des sols qui aurait favorisé la migration vers les bas des produits d'altération. Ce lessivage est bien caractéristique des types de sols sableux dunaires dominants dans la zone. Il existe néanmoins quelques cas dont les matériaux sont non ou très peu altérés (tableau n°13b). Quant au paysage dunaire du Damagaram-Mounio (DM), il présente aussi deux caractères. La majorité des échantillons sont peu altérés mais ceux issus des édifices dunaires de remobilisation par l'érosion ne présentent presque pas du tout de signes d'altération (tableau n°13c). Dans le paysage dunaire du Manga (Mg) par contre, les matériaux dunaires sont dans leur large majorité non ou très peu altérés chimiquement. Cela serait dû à l'érosion éolienne très active dans la zone et la remobilisation des dunes est très avancée (tableau n°13 d). En fin, dans la zone de référence du paysage dunaire du Ténéré (TEN.Réf.) presque l'ensemble des matériaux dunaires sont non ou très peu altérés (tableau n°13 e), car les conditions désertiques hyperarides y régnant (absence de pluie et de végétation, vannage éolien) sont peu favorables à l'altération chimique et conséquemment à la pédogénèse.

Indices (d'altération)	ADM 5°03' – 5°40'E 14° 09' – 14° 39'N					Non altéré (Optimal)	Très altéré (Optimal)
STI	89	88	93	86	89	> 90	0
CIW	90	96	71	95	86	≤ 50	100
CIA	88	94	68	91	81	≤ 50	100
R	9	9	14	7	14	> 10	0
V	8	15	2	12	5	< 1	infini
MWPI	1	1	1	1	2	-	-
WIP	214	170	309	309	327	> 100	0

Indices (d'altération)	GI : 7°03' – 7°15'E 13°09' – 13°20' N				Non altéré (Optimal)	Très altéré (Optimal)
STI	88	89	84	90	> 90	0
CIW	86	92	89	92	≤ 50	100
CIA	74	84	80	84	≤ 50	100
R	36	11	27	11	> 10	0
V	4	7	6	7	< 1	infini
MWPI	1	2	1	2	-	-
WIP	254	444	229	461	> 100	0

Indices (d'altération)	DM : 9°20'-10°21'E 13°30' – 14°05'N					Non altéré (Optimal)	Très altéré (Optimal)
STI	91	92	90	89	91	> 90	0
CIW	82	84	86	87	81	≤ 50	100
CIA	75	77	79	82	75	≤ 50	100
R	23	24	13	25	22	> 10	0
V	4	4	4	5	3	< 1	infini
MWPI	2	1	2	1	2	-	-
WIP	289	239	415	169	331	> 100	0

Indices (d'altération)	Mg : 11°10' – 12°03'E 13°10' – 13°35' N				Non altéré (Optimal)	Très altéré (Optimal)
STI	90	90	90	93	> 90	0
CIW	87	85	87	84	≤ 50	100
CIA	81	80	81	74	≤ 50	100
R	15	29	15	16	> 10	0
V	5	4	5	4	< 1	infini
MWPI	2	1	2	1	-	-
WIP	291	185	299	511	> 100	0

Indices (d'altération)	TEN.Réf. : 10°34'- 10°50'E 18°22'- 18°38'N			Non altéré (Optimal)	Très altéré (Optimal)
STI	92	91	91	> 90	0
CIW	76	76	75	≤ 50	100
CIA	61	61	61	≤ 50	100
R	20	20	20	> 10	0
V	3	3	3	< 1	infini
MWPI	3	3	3	-	-
WIP	758	764	757	> 100	0

	Non ou très peu altéré
	Peu altéré
	Altéré
	Très à fortement altéré

Tableaux n°13 : Variations régionales des indices d'altération chimique appliqués aux sols et sédiments des couches superficielles des dunes étudiées.

6.5. Conclusion partielle

Au regard des résultats obtenus quant aux différents indices d'altération, on constate que les couches superficielles des dunes subissent une très faible altération chimique. Cela veut dire que les processus de pédogenèse sont très réduits dans le contexte climatique actuel. Néanmoins en comparant les indices d'altération chimique des matériaux dunaires des jeunes édifices de remobilisation éolienne des milieux semi-arides (Sahel) et des dunes mobiles des milieux hyperarides (Sahara) à ceux des dunes fixées non ou peu dégradées du Sahel, on peut noter de faibles activités pédogénétiques à la surface de ces dunes. En effet, les sédiments remobilisés et les dunes mobiles du Sahara possèdent des indices d'altérations chimiques relativement très faibles (parfois nuls). Les matériaux dunaires à indices d'altération chimiques relativement élevés, sont plus riches en matériaux très fins et donc plus favorables à la pédogenèse et potentiellement plus fertiles. Dans le paysages dunaire de référence à dunes vives et où les sables constituant les dunes sont constamment triés par le vent, tous les indices testés ne montrent quasiment pas de signes claires d'altération chimique et sont pour la plus part pauvres en matériaux fins (voir les analyses granulométriques Chap. VI).

7. Qualité chimique des couches superficielles des matériaux dunaires

7.1. Métaux lourds et pollution chimique des couches superficielles des dunes

Dans ce chapitre relatif à la qualité chimique des matériaux dunaires, ce sont les éléments traces métalliques (ETM) communément appelés métaux lourds qui sont utilisés comme critères de comparaison. En général, les sources de pollutions des sols aux métaux lourds sont soit d'origine naturelle (altération des roches sources, apports des poussières par le vent, transformations biochimiques) soit d'origine humaine par l'extraction minière ou l'usage des hydrocarbures et de certains solvants (PERRONO 1999). Ces éléments-traces métalliques sont à certaines doses, des sources de toxicité dans le monde. Ils font l'objet de beaucoup d'études dans les pays développées où ils sont souvent accusés d'être responsables de la pollution des sols, de certains cancers, de maladies métaboliques diverses et aussi de pollutions environnementales (NICOLAS 2007 ; GOMEZ et al 1992, JUSTE & SOLDA 1988). Concernant les paysages dunaires du Niger présenteraient aussi des sensibilités particulières aux risques de pollution en raison du caractère très mobile des matériaux sédimentaires dunaires, de leur grande porosité et à cause de leur structure et leur texture. Mais, les données toxicologiques sur les ETM dans les matériaux dunaires sont peu ou pas du tout établies. Cependant dans la partie Ouest du Niger une étude relative à la pollution des sols aux ETM a été menée dans un contexte restreint des sols des zones périurbaines par TANKARI et al (2013). L'intérêt ici d'étudier les teneurs en ETM des couches superficielles des dunes tient au fait que les sols de type sableux dunaires dont la texture majoritairement sableuse, acide et relativement perméable, assurerait un transfert rapide des métaux lourds et minéraux pouvant facilement être assimilés par les plantes ou rejoindre la nappe phréatiques et ainsi intégrer la chaîne écologique. En effet, selon PERRONO (1999), les ETM sont très mobiles dans les sols sableux siliceux qui sont généralement acides.

Cette étude voudrait tenter d'établir un spectre de variation locale et régionale des ETM dans les couches superficielles des dunes, sur la base de l'analyse des éléments chimiques majeurs que contiennent les échantillons. En raison d'une absence de données statistiques relatives aux zones étudiées, les données sont comparées aux mesures standard certifiées et référentielles européennes (67/548/CEE). Il faut aussi noter que cette étude des ETM (métaux lourds), présente un intérêt vital pour la santé humaine qui n'est pas abordée par cette étude.

7.2. Difficulté à définir les ETM

La définition des ETM n'est pas toujours unanime et varie selon les institutions et les auteurs (IMYIM 2000, NRIAGU 1979). Certains auteurs définissent les métaux lourds comme les éléments métalliques ayant une masse volumique supérieure à une certaine valeur (cette valeur minimale variant entre 4000 kg/m³ et 5000 kg/m³ selon les auteurs). D'autres les définissent comme les éléments métalliques compris entre le cuivre et le plomb dans le tableau périodique des éléments (excluant donc le fer, le chrome). Pour d'autres il s'agit de tous les éléments métalliques à partir de la quatrième période du tableau périodique des éléments. Ainsi, compte tenu du caractère potentiellement toxique de composés des métaux lourds (mercure, plomb, cadmium en particulier), on inclut même parfois dans la catégorie des métaux lourds certains éléments toxiques comme l'arsenic (métalloïde), voire même certains composés organiques. Il vaut mieux dans ce cas parler d'« éléments traces ». Dans le cadre de cette étude, sont pris en compte les éléments métalliques majeurs suivants comme ETM : le plomb (Pb), le zinc (Zn), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni) et le cadmium (Cd)

7.3. Variations locale et régionale des spectres en éléments trace métalliques (ETM)

Selon les normes européennes (67/548/CEE) des valeurs limites de métaux lourds dans l'environnement (NICOLAS 2007), les éléments chrome (Cr), cuivre (Cu) et nickel (Ni) dans les matériaux dunaires de l'ADM sont proches ou même parfois dépassent les valeurs souhaitées en matière de pollution (tableau n°14). Ceci constitue une menace pour la qualité environnementale de ces régions du Niger. La corrélation entre les différents échantillons étudiés est positive (R^2 entre 0,03 et 0,2). Dans le paysage dunaire du Goulbi, le risque de pollution aux éléments chrome (Cr) et nickel (Ni) est visible sur le tableau n°15, avec aussi un coefficient de corrélation positif (R^2 entre 0,1 et 0,3). Cette situation est aussi pareille dans le paysage dunaire du Damagaram-Mounio avec un R^2 compris entre 0,1 et 0,3 (tableau n°16). Dans le paysage dunaire du Manga, le risque de pollution aux éléments chrome (Cr), cuivre (Cu) et nickel (Ni) est plus accentuée. En comparant certains échantillons des couches superficielles de dunes de ce paysage dunaire aux autres sus étudiés on note bien les fortes teneurs en ces éléments. Mais cela est régionalement très variable car le tableau n°17 montre un R^2 compris entre 0,0014 et 0,2. Quant à la zone de référence du Ténéré les risques de pollutions en ces éléments sont relativement moindres car tous les échantillons analysés présentent des valeurs inférieures aux valeurs de pollution acceptable avec un $R^2 > 0,4$ (tableau n°18). Le graphique n°21 est une synthèse locale et régionale de ces risques de pollution des couches superficielles des différents paysages dunaires étudiés.

ETM (métaux lourds)	Valeur Certifiée mg/kg	Occurrence de pollution (%)	Valeurs Maximales (mg/kg)	Valeurs Souhaitées (mg/Kg)	Valeurs Moyennes Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)	Valeurs Minimales Mesurées (mg/kg)
Pb	25,6	17,8	200	20	4,48	10,21	1,71
Zn	140	10,45	4500	450	30,99	103,40	4,35
Cr	27,2	15,54	65	6,5	27,57	72,13	5,28
Cu	18,8	14,55	95	9,5	4,43	7,75	1,90
Ni	14,4	10,09	70	7	11,68	28,51	4,31
Cd	11,7	6,3	10	1	0,05	0,14	0,02
R^2 ADM	0,055	0,1603	0,0301	0,2209	0,2139		

Tableau n°14 : Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de l'ADM

ETM (métaux lourds)	Valeur Certifiée mg/kg	Occurrence de pollution (%)	Valeurs Maximales (mg/kg)	Valeurs Souhaitées (mg/Kg)	Valeurs Moyennes Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)
Pb	25,6	17,8	200	20	1,78	2,33	1,23
Zn	140	10,45	4500	450	5,12	6,54	3,70
Cr	27,2	15,54	65	6,5	5,31	7,04	3,58
Cu	18,8	14,55	95	9,5	1,80	2,57	1,03
Ni	14,4	10,09	70	7	6,19	8,65	3,72
Cd	11,7	6,3	10	1	0,02	0,03	0,01
R ² GI	0,1261	0,2461	0,126	0,2453			

Tableau n°15 : Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire du GI

ETM (métaux lourds)	Valeur Certifiée mg/kg	Occurrence de pollution (%)	Valeurs Maximales (mg/kg)	Valeurs Souhaitées (mg/Kg)	Valeurs Moyennes Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)
Pb	25,6	17,8	200	20	1,59	2,14	1,37
Zn	140	10,45	4500	450	5,24	6,95	3,41
Cr	27,2	15,54	65	6,5	5,28	6,61	4,29
Cu	18,8	14,55	95	9,5	2,28	3,94	1,46
Ni	14,4	10,09	70	7	6,29	10,00	3,67
Cd	11,7	6,3	10	1	0,03	0,05	0,02
R ² DM	0,1212	0,2104	0,1269	0,1653	0,2537		

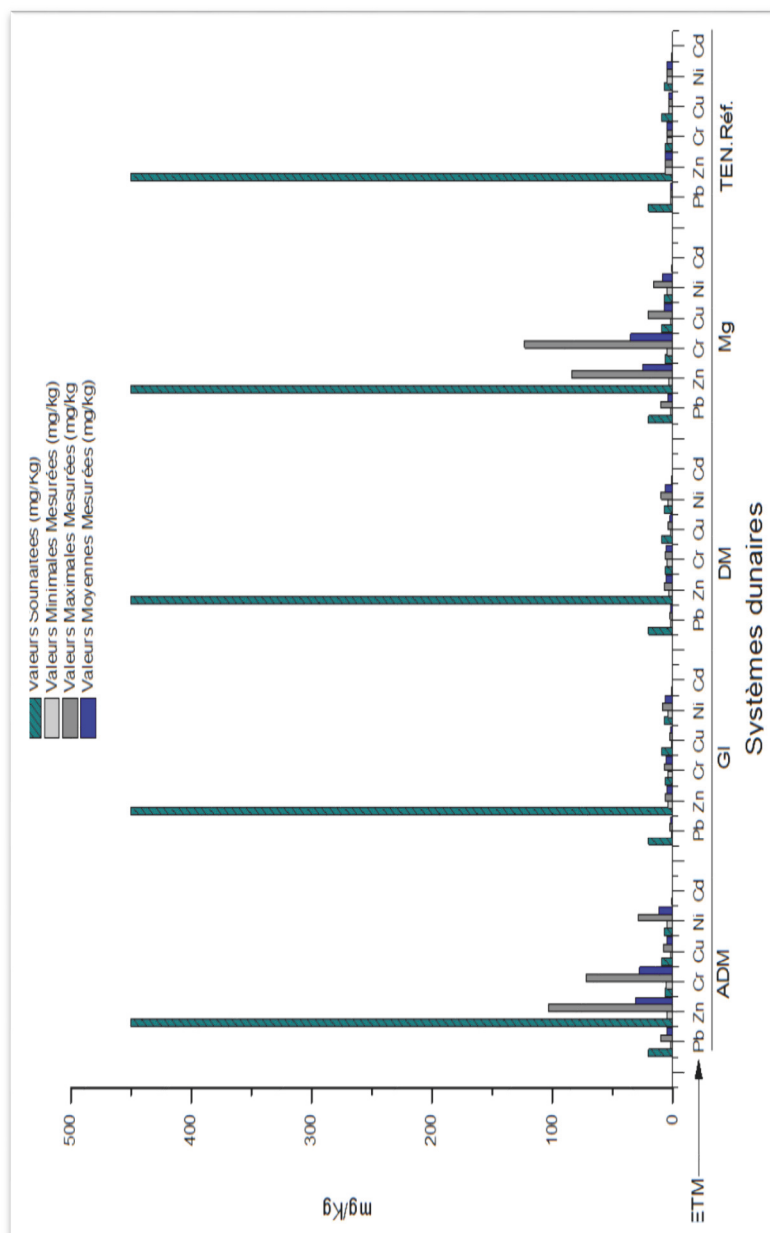
Tableau n°16 : Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de DM

ETM (métaux lourds)	Valeur Certifiée mg/kg	Occurrence de pollution (%)	Valeurs Maximales (mg/kg)	Valeurs Souhaitées (mg/Kg)	Valeurs Moyennes Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)	Valeurs Minimales Mesurées (mg/kg)
Pb	25,6	17,8	200	20	3,66	9,52	1,47
Zn	140	10,45	4500	450	24,46	83,91	3,42
Cr	27,2	15,54	65	6,5	34,95	123,10	4,97
Cu	18,8	14,55	95	9,5	6,69	20,66	1,80
Ni	14,4	10,09	70	7	8,31	16,06	4,45
Cd	11,7	6,3	10	1	0,04	0,08	0,03
R ² Mg	0,0014	0,1745	0,0512	0,1749			

Tableau n°17 : Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire du Mg

ETM (métaux lourds)	Valeur Certifiée mg/kg	Occurrence de pollution (%)	Valeurs Maximales (mg/kg)	Valeurs Souhaitées (mg/Kg)	Valeurs Moyennes Mesurées (mg/kg)	Valeurs Maximales Mesurées (mg/kg)	Valeurs Minimales Mesurées (mg/kg)
Pb	25,6	17,8	200	20	1,93	1,95	1,91
Zn	140	10,45	4500	450	6,33	6,33	6,32
Cr	27,2	15,54	65	6,5	4,72	4,72	4,71
Cu	18,8	14,55	95	9,5	3,06	3,06	3,06
Ni	14,4	10,09	70	7	4,46	4,46	4,45
Cd	11,7	6,3	10	1	0,02	0,03	0,01
R^2 TEN Réf.	0,4926	0,4904	0,4921				

Tableau n°18 : Teneur en ETM des sols et sédiments des dunes du paysage dunaire de TEN Réf.



Graphique n°21 : Variations locales et régionales des teneurs en ETM des couches superficielles des dunes des différents paysages dunaires étudiés : valeurs maximales, minimales et moyennes comparées aux valeurs souhaitées (normes 67/548/CEE)

7.4. Conclusion partielle

Les analyses des teneurs en éléments-traces métalliques (ETM) des matériaux des couches superficielles des dunes permettent de à comparer les qualités chimiques et les taux de pollution environnementale dans les paysages dunaires étudiés. En se référant aux normes sanitaires européennes (67/548/CEE), les résultats des analyses effectuées, montrent des teneurs élevées en chrome (Cr), en cuivre (Cu) et en nickel (Ni) dans presque tous les échantillons analysés, sauf dans les échantillons du Ténéré où les teneurs sont en dessous des valeurs de toxicité acceptables. Il faut noter que le stockage des ETM dépend de plusieurs facteurs dont la présence des argiles qui pourraient les adsorber à leur périphérie, celle des carbonates de calcium qui sont d'excellents fixateurs d'ETM, celle des oxydes de fer et de manganèse qui les retiennent aussi et la présence de la matière organique qui participent efficacement à leur rétention (PERRONO 1999).

8. Fonctions antagoniques des phénomènes d'encroûtement et du potentiel régénératif des couches superficielles des dunes

8.1. Les diverses fonctions des croûtes superficielles

Les croûtes se développent sur les couchent superficielles des dunes et des discussions controversées sur leurs fonctions dominant largement les débats scientifiques actuels. Elles ont fait l'objet de nombreuses recherches qui établissent qu'elles sont d'origines et de types divers. Les croûtes influencent les propriétés chimiques des sols sur lesquels elles se développent (GOMMEAUX et al 2010, POMEL 2008). Cependant, bien que leur fonction de protection des sols contre l'érosion soit bien reconnue par certaines études (CAMPBELL et al. 1989), d'autres recherches ont démontré qu'elles sont aussi capables d'entraver l'infiltration des eaux et favoriser le ruissellement, surtout si elles sont développées sur des matériaux limoneux et argileux (MALLAM ABDOU 2014 ; DESCROIX et al. 2007; KATERINA et al. (1999) ; WALKER 1979 in WEST 1990; NOY-MEIR 1973). D'autres auteurs par contre ont démontré qu'elles favorisent plutôt une meilleure infiltration des eaux des pluies et une réduction du ruissellement (ST. CLAIR et al. 1984 ; SCHERER et al.1984 ; ISICHEI 1980). Ainsi, ce ne sont pas toutes les croûtes qui entravent l'infiltration des eaux ; cela dépend plutôt des types de croûte.

En plus des auteurs sus cités, HARPER & MARBLE (1988) ; ECKERT et al. (1986) ; HARPER & ST. CLAIR (1985) et LOFTIS & KURTZ (1980) pensent aussi qu'en dépit de leurs effets négatifs sur l'infiltration, certains types de croûtes superficielles (formées par des cyanobactéries), une fois perturbées légèrement peuvent favoriser un piégeage et une stimulation de la germination des graines et l'établissement d'une végétation secondaire. Elles pourraient aussi selon MALAM ISSA et al (2009) améliorer la porosité des sols. En outre, POMEL (2008) précise que certaines croûtes biogéniques ou « bioconcentration » jouent un rôle important dans la fixation et la stabilisation des versants nus, favorisent la révégétalisation des surfaces du sol et l'agglomération du squelette minéral du sol. **Eu égard à ces diverses fonctions des croûtes, quelles sont les caractéristiques particulières des croûtes en milieux dunaires semi-arides ?**

8.2. Caractéristiques générales et importance des croûtes en milieux semi-arides

Les croûtes sont des états de surface des sols communément appelés OPS (Organisations Pelliculaires de Surface). Elles ont fait l'objet de plusieurs études qui ont mis en évidence l'évolution des sols suivant un binôme dégradation-régénération (POMEL 2008). Génétiquement, les croûtes sont soit développées par la battance pluviale, par les

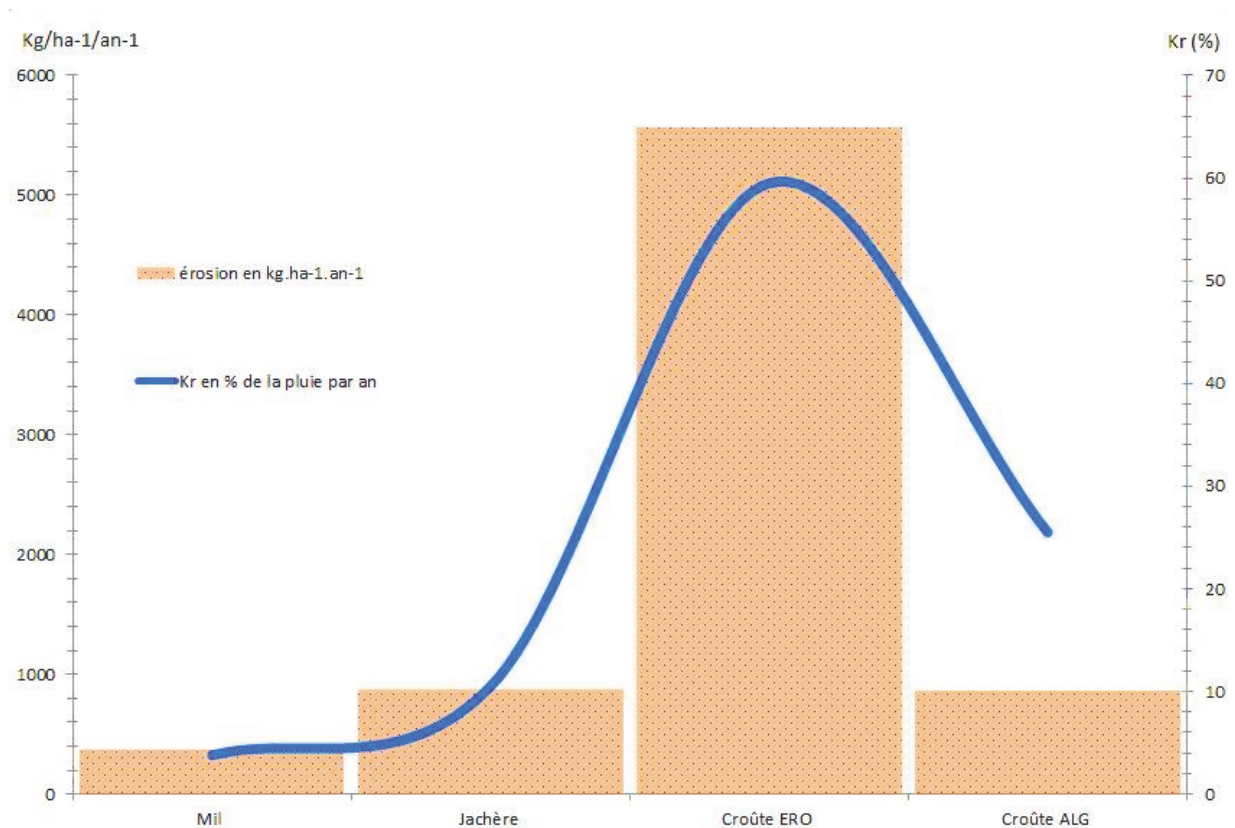
ruissellements ou bien par des microorganismes (micro-algues, champignons et bactéries...). Toutes agrègent ou cimentent les sédiments meubles de surface des dunes et les protègent ne serait-ce que pendant un certain moment de l'érosion ou de la remobilisation par le vent ou la pluie. Selon plusieurs études (MALLAM ABDOU 2014, KUSSEROW 2010 ; BUIS & al 2009 ; IBRAHIM 2005 ; MALAM ISSA 1999 ; HAHN & KUSSEROW 1998 ; AMBOUTA 1994 ; CASENAVE & VALENTIN 1988) certaines croûtes accroissent l'apport en éléments minéraux au sol en raison de leur autotrophie et d'autres réduisent l'érosion (hydrophobie) et assurent le maintien de l'humidité du sol en réduisant l'évaporation des eaux capillaires. Elles retiennent la matière organique (litière) et par conséquent, elles augmentent la fertilité du sol. Par exemple ABICHOU (2009 et 2002) a démontré dans ses travaux sur les organisations pelliculaires de surface des sols en Tunisie que « les mycéliums agglutinent les agrégats avec l'aide des filaments des algues, lichens et des mousses. La prolifération des bactéries thermophiles dégrade la matière organique primaire et engendre la concentration d'un plasma. Ainsi, ces « bioconcentrations » deviennent des fixateurs de la surface du sol ».

D'autre part, les croûtes jouent des fonctions ambivalentes dans les processus pédogénétiques en milieux arides et semi-arides. Selon ABICHOU 2002 et plusieurs autres auteurs (MALAM ISSA et al 2008, 2001 et 1999 ; MALAM ISSA 1999 ; HAHN & KUSSEROW 1998 ; AMBOUTA 1994 ; CASENAVE & VALENTIN 1988 ; BOIFFIN 1984 ; VALENTIN 1981 ; BREWER 1964), ces mêmes OPS sont aussi dans certaines conditions, des facteurs de dégradation des sols. En effet, dans les conditions d'aridité, les actions de l'eau et du vent favorisent une concentration des matériaux fins dont les limons et argiles aussi bien par la décantation dans les lames d'eau que par les dépôts des poussières éoliennes et d'autres cendres diverses. Ceux-ci s'organisent et se réorganisent suivant le rythme des saisons et celui de la fréquence et de l'intensité des agents météoriques et aussi des actions anthropogéniques (POMEL 2008). Les matériaux mis en place formant à la fin, des couvertures cryptogamiques (« bio-duriconcentration ») peuvent s'indurer et acquérir des caractéristiques moins favorables à la « pédogénèse ». Cette induration est selon POMEL (2008), ABICHOU (2002) due à des concentrations des hydroxydes de fer, des sulfates et carbonates divers. Selon toujours les mêmes auteurs, il peut aussi y avoir de « l'abruconcentration » qui, selon ABICHOU (2002) sont des concentrations de matériaux sédimentaires grossiers qui forment des microprofils d'ablation nés des vannages éoliens et des troncatures hydriques des horizons.

Ainsi, les croûtes, qu'elles soient d'origine biologique ou minérale (physique) constituent une succession de microcouches à la surface des sols. Leurs épaisseurs varient du millimètre au centimètre. Elles sont constituées de matériaux grossiers alternants avec des fractions plus fines dont des argiles et limons et des micro-organismes pour les cas des croûtes biologiques. Ces dernières constituent l'essentiel du plasma du squelette pédologique à la surface des sols dunaires (pour les autres types de sols aussi). Ces croûtes assurent une certaine protection aux sols contre les érosions diverses (éoliennes, hydriques et parfois même anthropiques. Selon POMEL (2008) et ABICHOU (2002), **la superposition du doublet « bioconcentration-duriconcentration » et la « satuconcentration » (classification de ABICHOU 2002) sont dans les conditions normales, des indicateurs de la fixation de la surface du sol ou vice versa.** Elles renseignent ainsi sur les conditions climatiques locales et les processus pédogénétiques *in situ* à la surface des sols dunaires.

En dehors de la fonction structurante des croûtes, elles jouent aussi un grand rôle dans le transfert des éléments de la surface à l'intérieur du sol à travers leur conductivité. MALLAM ABDOU (2014) a mis en évidence cette fonction des différentes croûtes dans différents types d'occupation des sols dans l'Ouest du Niger (graphique n°22). Selon ses travaux, la conductivité des sols est réduite de 5 fois de la surface du sol à seulement 1 cm. Il a mesuré le transfert hydrique entre la surface et 1 cm en dessous et a obtenu sur une croûte biogénique 13 mm/ heure sur 1cm d'épaisseur et 5 fois plus au 2^e cm en dessous. Pour la croûte minérale ou croûte de battance cette infiltration tombe à 10 mm/heure mais aussi 5 fois plus en dessous. Sur une jachère par contre il a obtenu 20 mm/heure et ne change pas

avec la durée de la pluie. Sur un sol cultivé enfin celle-ci est de 120 mm/heure mais change avec la durée de la pluie pour descendre à 10 mm/heure. Ces données démontrent clairement le rôle primordial que jouent ces croûtes et l'intérêt d'étudier leurs caractéristiques physico-chimiques et microstructurales dans les paysages dunaires du Niger suivant un gradient climatique orienté Ouest-Est entre les isohyètes 300-500mm. **Quels types de croûte sont alors observables sur les dunes des paysages dunaires étudiés?**



Graphique n°22 : Variation du coefficient de ruissellement et de l'intensité d'érosion en fonction des types d'occupation des sols au Sahel (d'après MALLAM ABDOU 2014 et DESCROIX et al 2009). Ce graphique montre que les croûtes biogéniques (Croûte ALG) réduisent les processus d'érosion des sols en abaissant conséquemment le coefficient de ruissellement des eaux de pluie. Par contre les croûtes physiques (Croûte ERO) favorisent une forte érosion des sols car elles génèrent un ruissellement abondant des eaux de pluie.

8.3. Les phénomènes d'encroûtement à la surface des dunes

D'après les observations effectuées dans les différents paysages dunaires situés entre les isohyètes 300-500 mm les croûtes superficielles se développent bien sur les matériaux sableux dunaires. Elles sont de divers types. Elles sont tantôt bien développées, tantôt dégradées. Elles ont des caractéristiques très variables selon leur nature, celle du substratum dunaire et selon les conditions écologiques locales. Généralement, **les croûtes développées sur substrat sableux dunaires sont plus moins consolidées. Elles « tressent » et réarrangent les particules des sols en favorisant leur agrégation. Parfois, elles captent, piègent puis fixent les particules fines de poussière, de matière organique et de certains aérosols riches en minéraux.** Les photos n°23 et n°25 ci-dessous montrent les états des croûtes biogéniques (dégradées et non dégradée) et illustrent aussi comment elles « captent » et « fixent » les matériaux fins et autres détritiques à la surface des dunes des zones étudiées (photo n° 24). La photo n° 26 illustre comment elles

« compactent » les matériaux du substratum sableux dunaire une fois dégradées ou « saturées » en sesquioxydes et autres ciments minéraux et organiques.

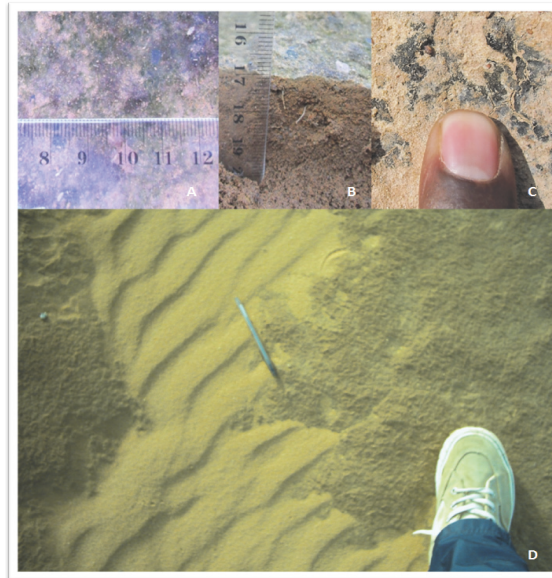


Photo n°23 : Exemple de croûtes biogéniques non dégradées colonisant les surfaces des dunes étudiées. A= croûte biogénique couvrant la surface des dunes en saison des pluies (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). B= profil vertical des horizons de surface des dunes couvertes par les croûtes biogéniques (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). C= croûte biogénique à faible recouvrement à la surface des dunes (Mg 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N). D= croûte biogénique et minérale à la surface des dunes fixées et couverte (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N). Ces croûtes sont parfois couvertes d'un voile éolien de sables déliés.

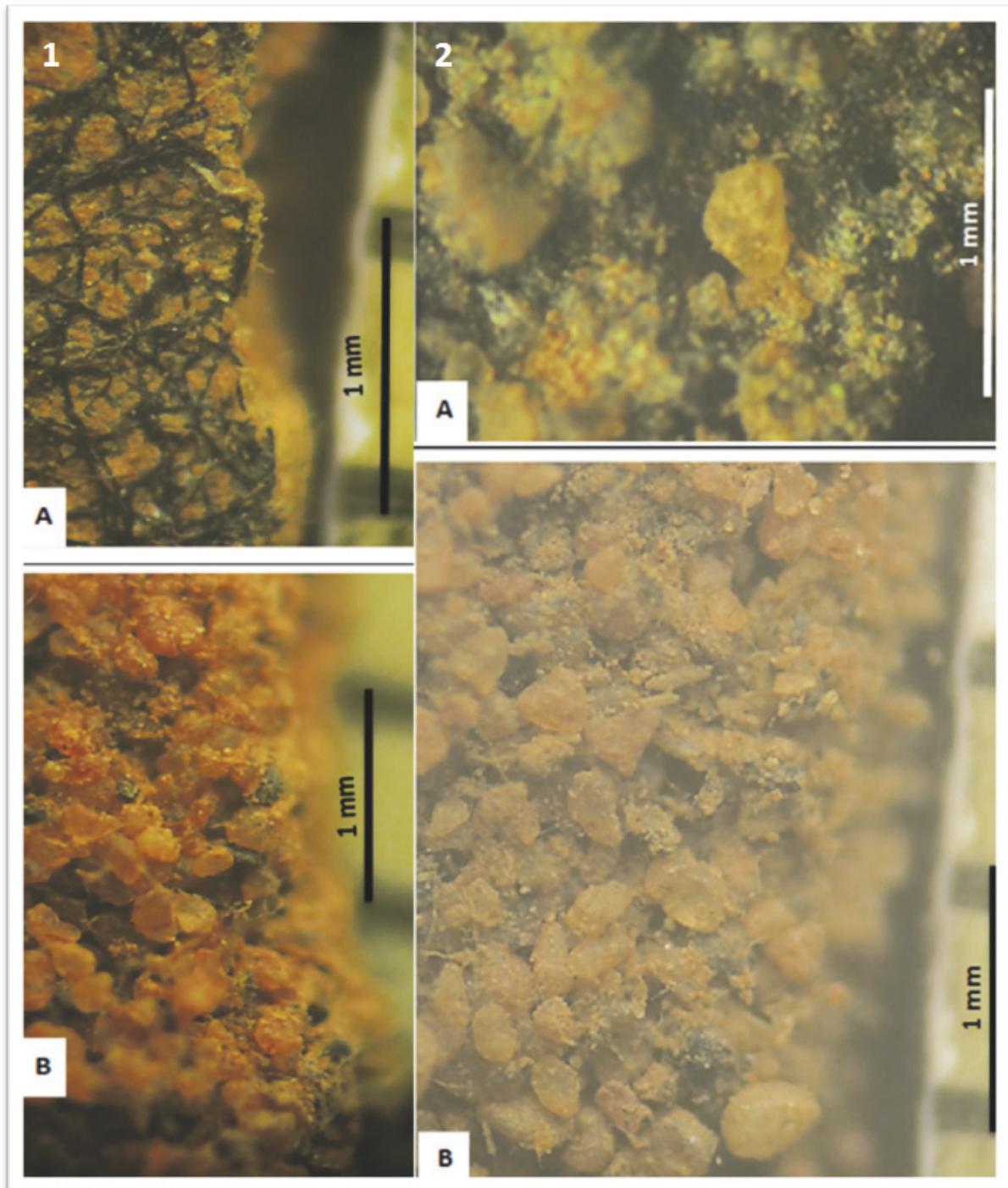


Photo n° 24: Caractéristiques macroscopique des matériaux sableux couverts de croûtes biogéniques non dégradées. Deux exemples de types de croûtes biogéniques : 1 (Mg 11°10' - 12°03'E et 13°10'-13°35' N) et 2 (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). (A = vue plane. B = vue transversale) : A : croûtes biogéniques à la surface et B : matériaux sableux sous-jacents des croûtes biogéniques non dégradées. A gauche on voit bien les filaments des micro-algues qui tapissent et tressent les grains de sables meubles à la surface des dunes. A droite, un autre type de micro-algue verte à aspect pâteux et gluant qui capte et fixe les particules fines et même grossières parfois.



Photo n°25. Exemple de croûtes dégradées à la surface des dunes (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). A gauche les tâches noirâtres indiquées par les flèches rouges sont des recouvrements de croûtes biogéniques dégradées et fortement consolidées à la surface des dunes. A droite les tâches noirâtres sont aussi des croûtes biogénique à niveau relativement peu consolidé.

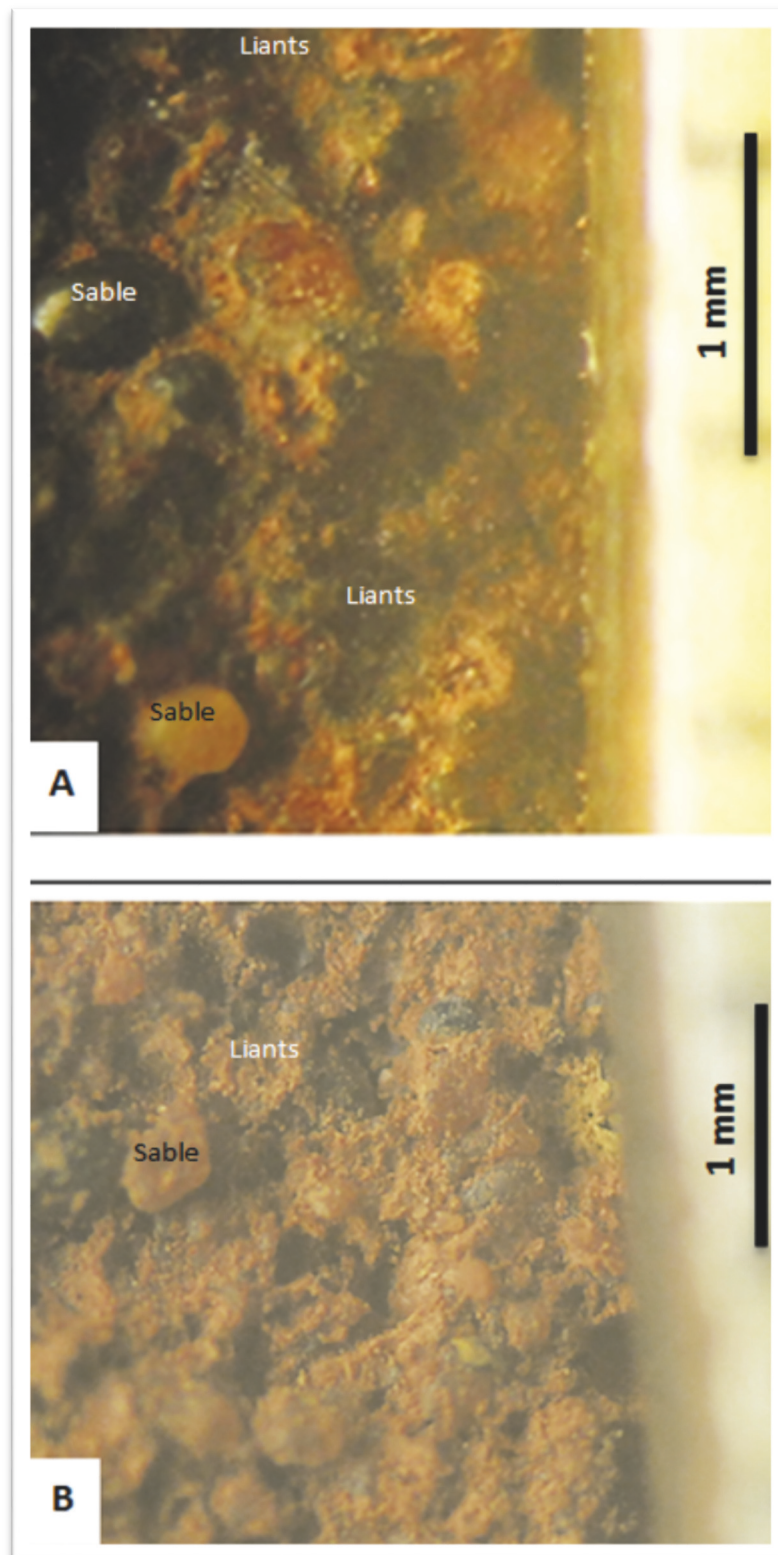


Photo n°26 : Caractéristiques macroscopiques des matériaux sableux sous-jacents aux croûtes biogéniques dégradées et concrétionnées (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). En haut vue de surface et en bas vue de profil.

8.4. Description micromorphologique des couches superficielles des dunes

La description micromorphologique est faite sur la base de l'étude des organisations microstructurales. Les critères descriptifs sont ceux (détails : chap. IV. /3^e partie) utilisés par POMEL (2008) ; ABICHOU (2002); BREWER (1964) et SPENCER (1963). Les couches superficielles des dunes se distinguent par leurs caractéristiques microstructurale et micro-texturale et par leur compositions minéralogiques dont principalement leurs teneurs en sesquioxydes et en matière organique (photos n°27, n°28, n°29 et n° 30). En fonction de la dominance de ces composantes elles se distinguent par leur nature minérale ou biogénique. Elles se disposent en micro-couches successives dont le développement microstructural dépend des conditions climatiques et édaphiques locales. Elles dépendent aussi de l'intensité et de la fréquence des agents d'érosion. Deux principaux types de micro-couches (ou croûtes) sont majoritairement observables dans l'ensemble des paysages dunaires étudiés : les micro-couches d'origine minérale et les micro-couches d'origine biologique. Ces types de croûtes se développent, se dégradent et se régénèrent. Parfois ils subissent des dynamiques alternées de dégradation et de régénération. Si bien que dans le détail, l'analyse microstructurale des croûtes montre d'après la synthèse faite en croquis n°5 ci-dessous, une diversité de types d'encroûtement sur la base des états liés à cette dynamique complexe.

Dans les paysages dunaires de l'ADM et du GI (Bassin des Iullemenden) comme dans ceux de celui du Lac Tchad les parties superficielles des dunes présentent une structure générale de type F-fabric caractérisée par un assemblage de particules grossières noyées dans une matrice fine et ne se supportant pas entre elles. Dans ce cas d'organisation, les particules détritiques microcristallines sont dominantes. Les couches superficielles des dunes de l'ADM et du GI (croquis n°14 et photos n° 27 et 28) sont plus riches en particules très fines que celles du DM et du Mg (croquis n° 14 et photos n° 29 et 30). Ce dernier (Mg) présente généralement une structure assez litée caractérisée par une alternance de couches de particules grossières et fines. Dans les paysages dunaires de l'Ader-Doutchi-Maggia, et du Goulbi, les croûtes superficielles présentent un faible litage mais davantage de sesquioxydes (principalement de fer) et de matière organique. Le litage des matériaux y est peu remarquable en raison probablement des bioturbations (et des activités pédogénétiques) plus denses qui favorisent leur rapide remaniement. Ce sont surtout les croûtes de battance qui présentent un caractère tassé et fortement compacté en raison de l'abondance du fer hérité de la géologie locale (dunes formées sur une cuirasse latéritique). D'ailleurs on observe certaines concrétions ferrugineuses de taille grossière à moyenne qui sont remobilisées et remaniées en formant des microcouches superficielles dans ces surfaces des corps dunaires (photo n° 27).

Dans les paysages dunaires du Damagaram-Mounio et du Manga, on constate encore les structures peu consolidées et litées des microcouches de surface des dunes. Ce litage serait la résultante de différentes phases successives de mise en place des croûtes de battance pluviale et des croûtes par dépôts éoliens successifs. Il est en effet aisé d'observer au microscope, l'organisation des microcouches successives où apparaissent des séries successives de couches de matériaux sédimentaires grossiers et moyens et de matériaux sédimentaires très fins à argileux. Observées sur lames minces, les couches des matériaux grossiers présentent peu de fractions fines incrustées dans les microporosités des espaces intra-granulaires. Ces fractions grossières et moyennes constituent dans certains cas un squelette pédologique enrobé des matériaux très fins. On reconnaît l'abondance des sesquioxydes de fer (couleur rouge sombre à rouge-grisâtre) et parfois de la matière organique et autres détritiques ultra fins (couleur sombre) qui servent de ciment pour le maintien de la microstructure (photos n°29 et n°30). Pour la plupart des cas, ces croûtes sont colonisées par des microorganismes et c'est le début de formation d'une croûte biologique. On constate néanmoins une dominance de sesquioxydes de fer et des concrétions

pisolitiques principalement dans les dunes du paysage dunaire de l'Ader-Douchi-Maggia et pour quelques cas du Goulbi. Mais cela s'observe très rarement dans les autres paysages dunaires qui présentent surtout des résidus à oxydes de fer remaniés des horizons inférieurs puis réintroduit dans les microcouches superficielles.

En résumé, dans les paysages dunaires de l'ADM, l'analyse de l'organisation microstructurale (photo n°27) montre une dominance du squelette pédologique et un faible remplissage plasmique. Le squelette est essentiellement composé de matériaux quartzeux (A) et de nodules et concrétions ferrugineuses (B). Le plasma (matrice) est composé essentiellement des débris minéraux et organiques ultra fins et de particules ferargiles divers qui assurent la cohésion des grains et le remplissage des espaces inter-granulaires du squelette pédologique. (C). La forte cohésion des matériaux et leur richesse en sesquioxydes et fines favorisent leur encroûtement. Comparativement aux matériaux dunaires de l'ADM, l'organisation microstructurale des matériaux des couches superficielles des dunes du G1 (photo n°28) présentent une moyenne dominance du squelette pédologique et un remplissage plasmique relativement important. Là aussi, le squelette est essentiellement composé de matériaux quartzeux (A). Néanmoins les nodules et autres concrétions retrouvés dans les matériaux dunaires de l'ADM ne sont pas observés dans ce cas. Le plasma (matrice) est composé principalement des débris minéraux et organiques ultra fins et de sesquioxydes divers. La cohésion des grains n'est pas aussi importante le remplissage des espaces inter-granulaires du squelette pédologique est parfois lacunaire. Cette microstructure favorise un encroûtement des matériaux dunaires de la zone.

Par ailleurs, dans les paysages dunaires du DM, l'organisation microstructurale des matériaux des couches superficielles des dunes du DM (photo n°19) montre que les dunes sont très pauvres en plasma pédologique mais présentent une dominance du squelette essentiellement composé de matériaux quartzeux (A). Quant au très faible remplissage plasmique ou matrice (C), il est composé essentiellement des débris minéraux et organiques ultra fins et de peu de sesquioxydes. On remarque une absence totale de concrétion et nodules. Les matériaux sont peu consolidés entre eux en raison d'une faible teneur plasmique des matériaux dunaires de cette région. Ceci les rend très vulnérable à l'érosion. Enfin, dans les paysages dunaires du Mg, l'analyse microstructurale des matériaux des couches superficielles des dunes montre que ceux-ci sont très pauvres en plasma pédologique. La photo n° 30 montre que le squelette pédologique est dominant mais présente d'importants espaces inter-granulaires. Ce squelette est principalement composé de matériaux quartzeux (A) se supportant entre eux. Quant au très faible remplissage plasmique, il est essentiellement composé de débris minéraux et organiques ultra fins et d'une très faible présence de sesquioxydes (C). Ce plasma dont la faible teneur en matériaux très fins assure peu ou pas la cohérence de la fraction squelettique plus abondante. Cet état rend fragile la stabilité des dunes de cette région et explique sans doute leur forte sensibilité à l'érosion éolienne.

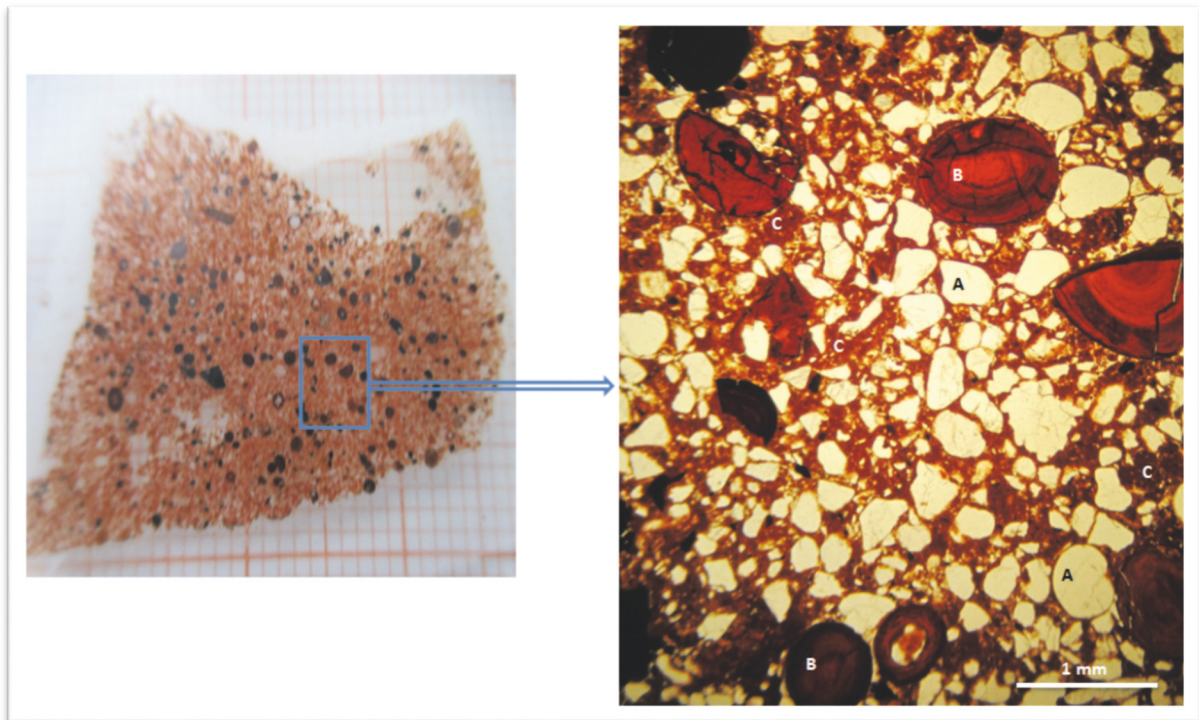


Photo n°27 : Microstructure des dunes développées sur les plateaux latéritiques de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N).

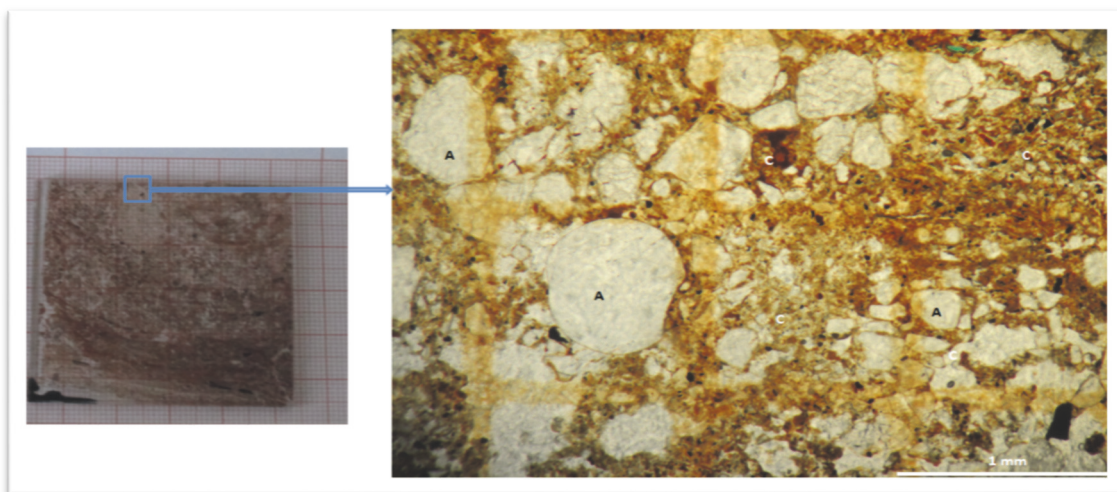


Photo n°28 : Microstructure des dunes du paysage dunaire du Goulbi (G1 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N).

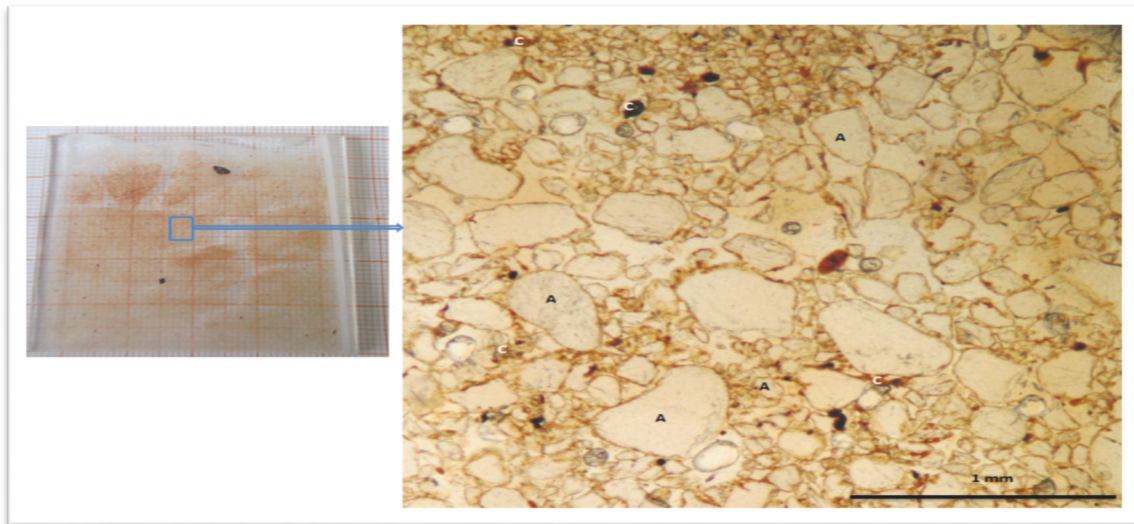


Photo n°29 : Microstructure des dunes du paysage dunaire du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N).

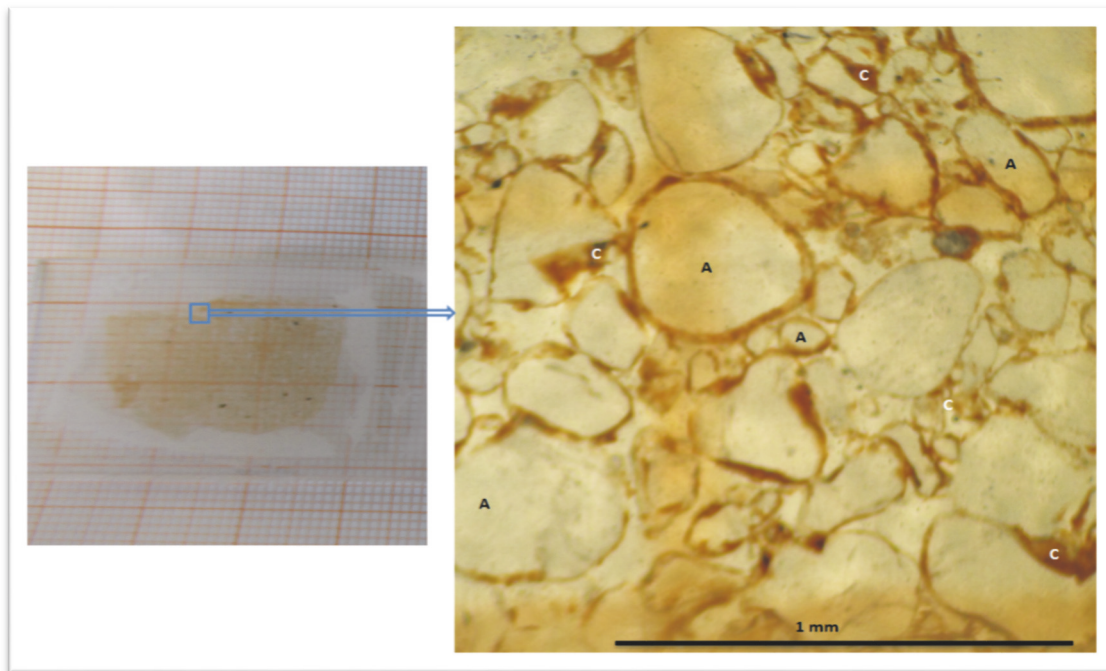
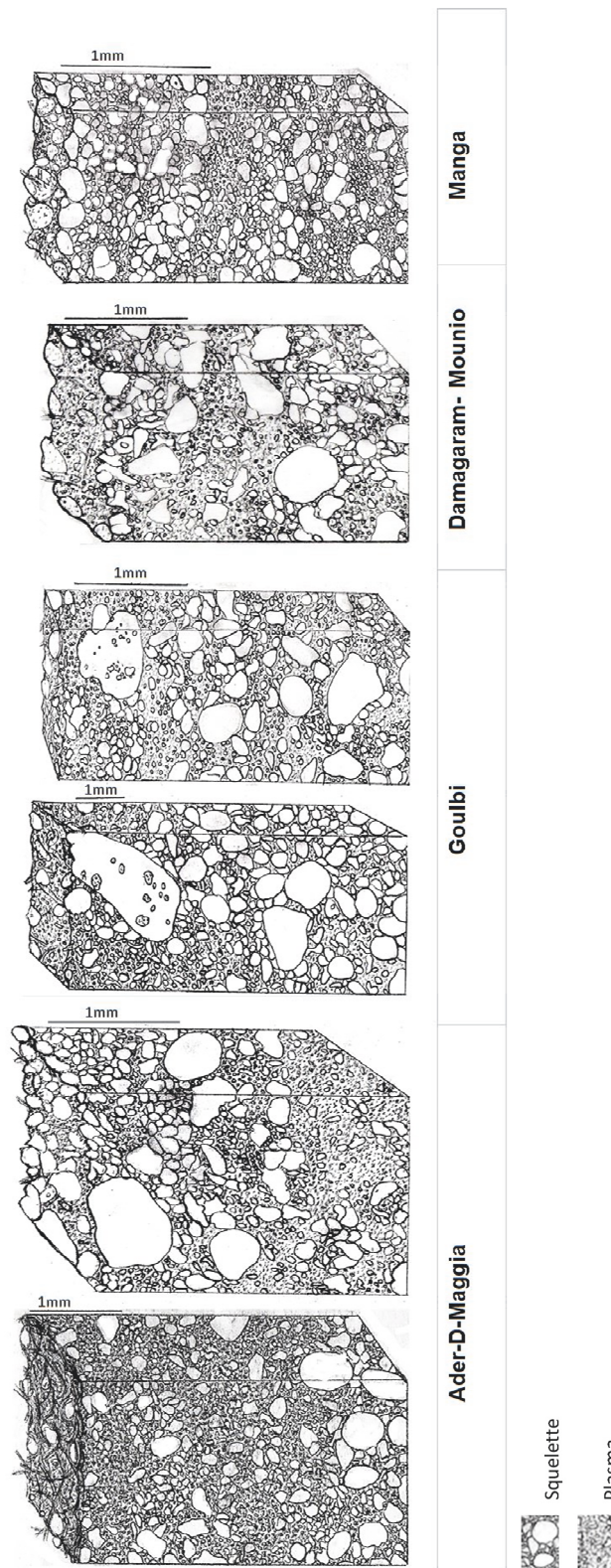


Photo n°30 : Microstructure des dunes du paysage dunaire du Manga (Mg 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N).



Croquis n°14 : Aperçu synthèse des microstructures des micro-couches superficielles des dunes fixées des paysages dunaires de l'Ader-Doutchi-Maggia (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N), du Goulbi (Gl 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N), du Damagaram-Mounio (DM 09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N) et du Manga (Mg 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N).

8.5. Mécanismes généraux de formation des croûtes

Dans les conditions semi-arides des paysages dunaires sahéliens, les formations des croûtes qu'elles soient d'origine physique ou biologique sont saisonnières. Mais les croûtes biologiques se développent principalement pendant la courte saison des pluies (juin-août) relativement humide. Elles peuvent aussi se développer en période sèche dans des milieux à hygrométrie relativement élevée (bord des points d'eau). Quant aux croûtes d'origines physiques, elles se développent pendant la saison humide (juin-septembre) et aussi pendant la saison sèche (octobre-mai) aux rythmes des pluies et des vents. En ce qui concerne les vents, bien qu'ils ne mobilisent que des matériaux meubles (sables, argiles, limons et autre particules détritiques fines), ils favorisent leur accumulation et en cas de pluie, leurs dépôts sont consolidés et forment aussi la base d'une prochaine accumulation (schéma n°5). A terme, les séries continues d'accumulation-fixation donnent lieu à la formation d'une croûte qui continue à se développer tant qu'elle n'est pas altérée par un autre cycle de dégradation ou d'érosion. Dans les conditions normales (non dégradées), les croûtes biologiques se développent facilement sur les sables non consolidés car selon CHEN et al (2006), une fois inoculées les croûtes biogéniques (*Microcoleus vaginatus*) peuvent coloniser les sols dégradés en seulement un mois.

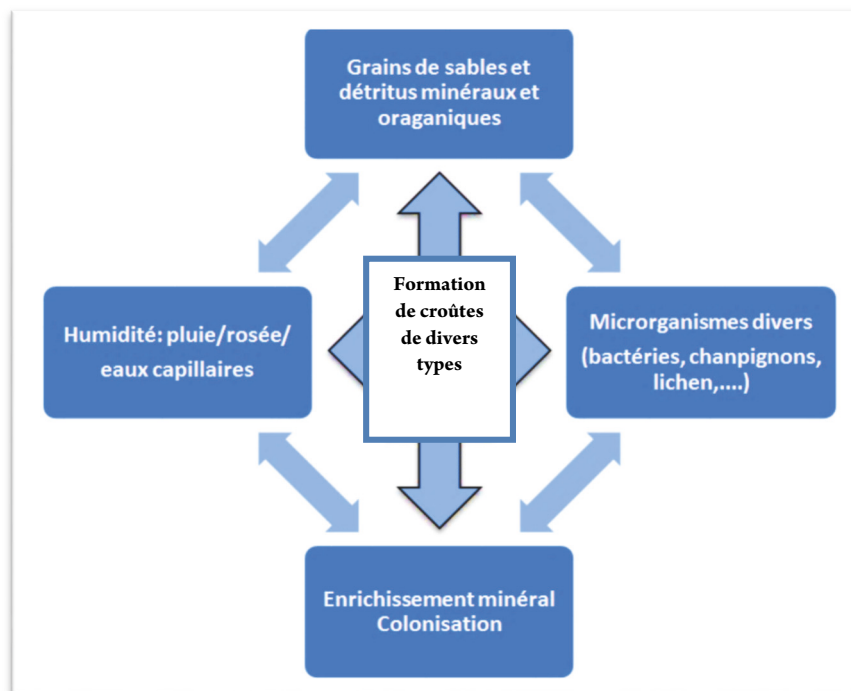


Schéma n°5 : Organigramme schématique des processus d'encroûtement

La mise en place des croûtes physiques repose principalement sur la structure et la texture des matériaux clastiques locaux. Mais les espaces inter-granulaires jouent un rôle de premier plan quant aux flux en matériaux très fins et des solutions chimiques diverses qui favorisent la cimentation de la fraction squelettique (matériaux grossiers et fins $> 30 \mu\text{m}$). Par contre dans le cas des croûtes d'origine biologique (photo n°31), ce sont les microorganismes dont des algues, lichens et bactéries (photo n° 32) qui jouent le rôle le plus important dans la consolidation des matériaux clastiques. Ils forment ainsi un réseau de mycéliums qui s'incrustent dans les espaces intra-granulaires et aussi sur les grains. Ceci leur assure une agrégation ne serait-ce temporaire ou saisonnière (photo n°33 et n°32). Ces types de croûtes se développent plus particulièrement sur les matériaux sableux car d'après

AYACHI (2009), « les croûtes micro-biotiques les plus développées se rencontrent sur la parcelle en défens installée sur la butte sableuse ». ZHANG et al (2007) ont aussi démontré que les croûtes biologiques se développent bien dans les paysages dunaires et colonisent sélectivement les dunes. Selon ces auteurs, les croûtes formées par les cyanobactéries colonisent les côtés au vent des dunes alors que les croûtes algales se développent mieux aux flancs sous le vent des dunes. Ce qui est un bon indicateur de choix des types de croûtes à tester pour une éventuelle fixation biologique des dunes dégradées. Une question importante dans cette optique est celle-ci : dans quelles conditions ces croûtes pourraient favoriser la régénération des sols dunaires dégradés ?



Photo n°31 : Exemple de croûte biogénique (algue bleu-vert) se développant à la surface des dunes (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N).

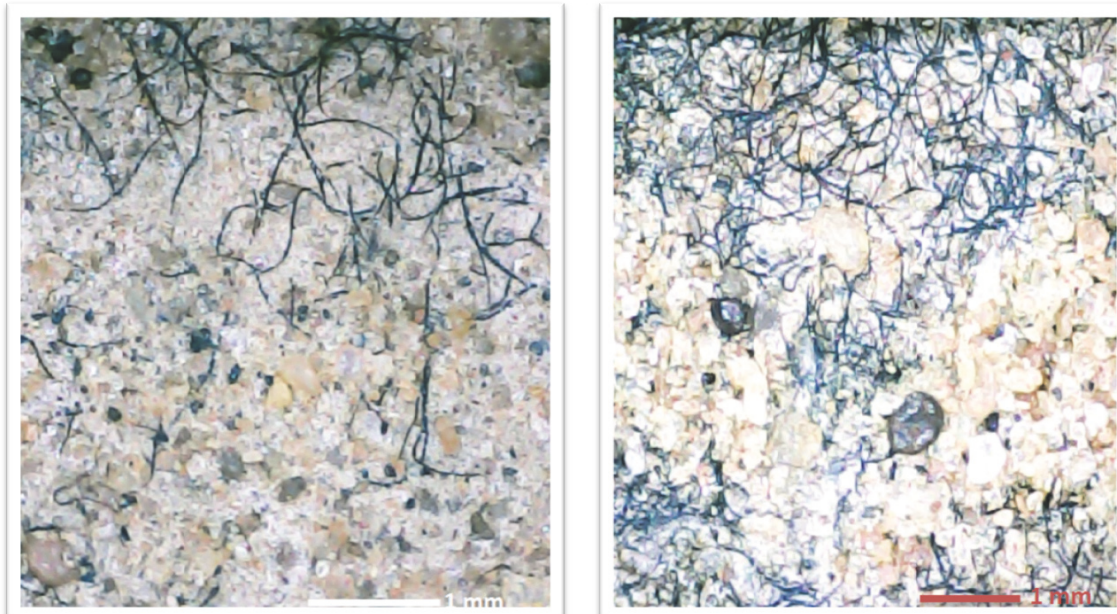


Photo n°32 : Développement des algues filamenteuses à la surface des épandages sableux dunaires. On distingue clairement les réseaux mycéliens (filaments noirs) qui enserrant les particules sableuses meubles des couches superficielles des dunes (G1 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N).

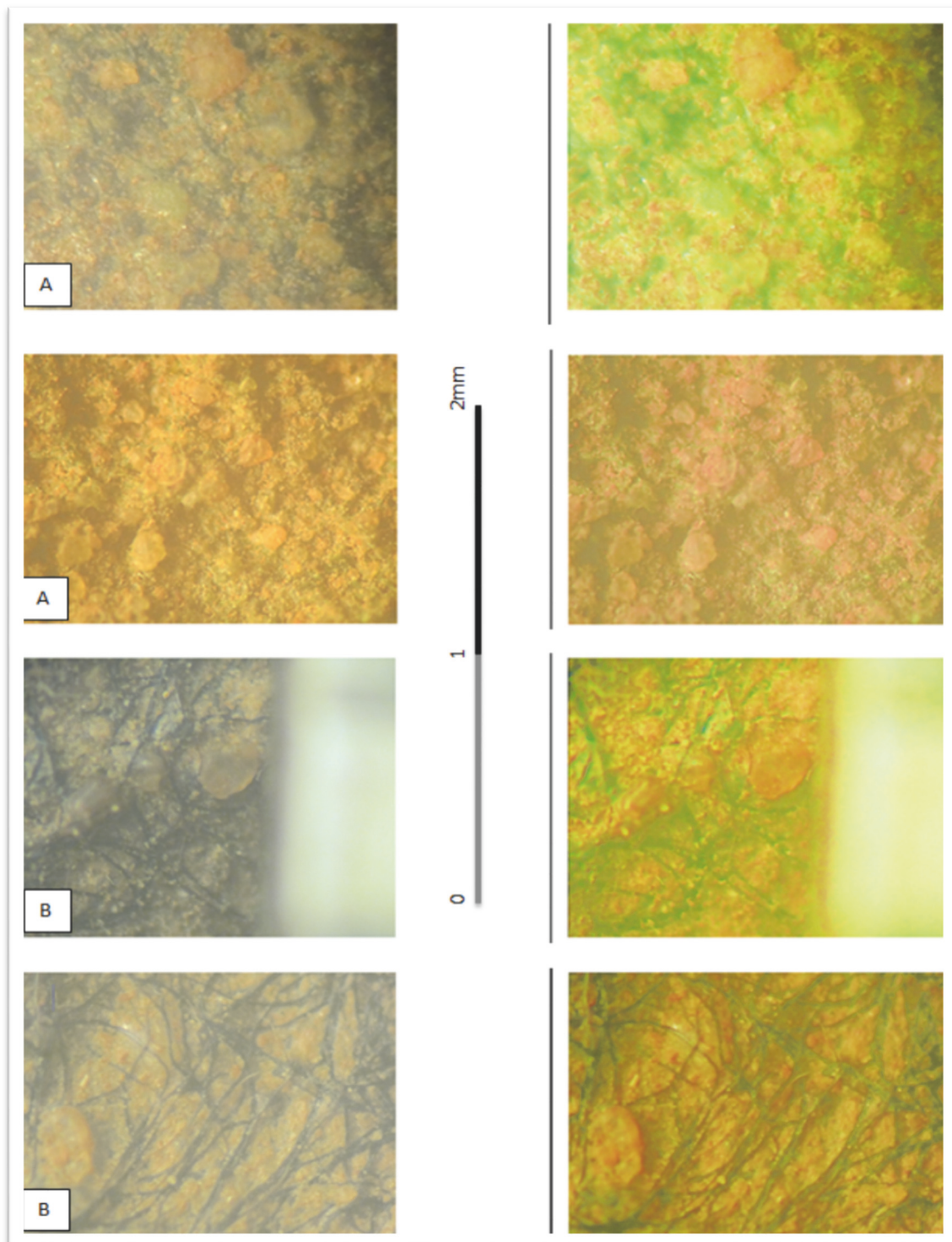


Photo n°33 : Exemples de croûtes biogéniques non altérées piégeant les particules de poussières et aussi fixant les grains meubles à la surface des dunes dégradées A= dunes du ADM ($05^{\circ}03' - 05^{\circ}40' E$ et $14^{\circ}09' - 14^{\circ}39' N$). B= dunes du Mg ($11^{\circ}10' - 12^{\circ}03' E$ et $13^{\circ}10' - 13^{\circ}35' N$). On remarque bien deux types de piégeage des matériaux selon le types d'algue : à filaments pour les deux premières en haut (A) et à biofilm gélatineux dans les deux dernières en bas (B). A gauche : photos originales et à droite : photos traitées et analysées. Détail : **photo n°34** ci- dessous.

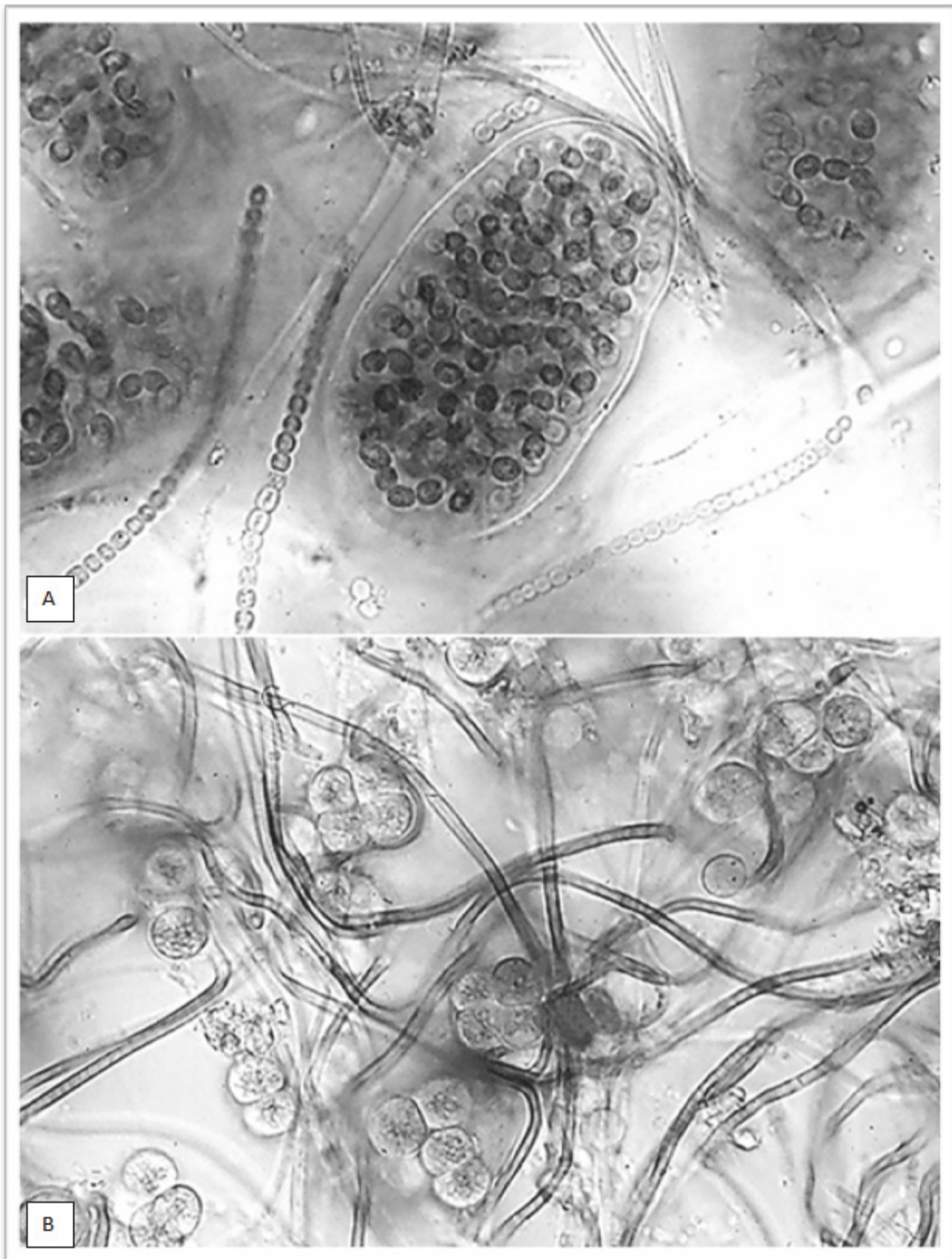


Photo n°34 : Vue microscopique des deux principaux types d'algues colonisant les sols sableux du Sahel d'après Hahn et Kousserow (1998).

8.6. Typologie des organisations microstructurales de la surface des dunes

D'après les observations microscopiques et les analyses géochimiques des couches superficielles des dunes, trois (3) types de micro-structuration des matériaux sédimentaires ont été identifiés à la surface des dunes. Tous les trois types relèvent des phénomènes d'organisation d'origines biologique et/ou minérale mais avec des amplitudes et fréquences très variées. Cependant les trois (3) types sont généralement associés imbriqués les uns aux autres mais peuvent être aussi bien individualisés selon les cas. On a ainsi :

- **Le Type de croûte 1** : Biogénique croûte (B-C) épais de plus ou moins 1 mm
- **Le Type de croûte 2** : Croûte minérale (MC) épaisseur > 1-10 mm,
- **Le Type de croûte 3** : Croûte biogénique-minérale (B-MC) : épaisseur > 10-50 mm

Le Type 1 (BC): ce type de croûte présente une succession de microcouches minces dont l'épaisseur varie entre 0,3 et 0,5 mm. Il est caractérisé principalement par un agencement des particules de type M-fabric. Ce type de micro-structuration est généralement développé sur une croûte minérale dont l'agencement des grains et particules est de type GS-fabric (0,3-> 2mm), M -fabric et C-fabric. Ces types de croûtes présentent une dominance plasmique importante composée essentiellement de biofilm algal (« B » sur photo n°35 ci-dessous), de particules très fines d'argiles et limons (« A » sur la photo n°35) qui enrobent les grains de matériaux fins à grossiers servant de squelette (« C » sur la photo n°35).

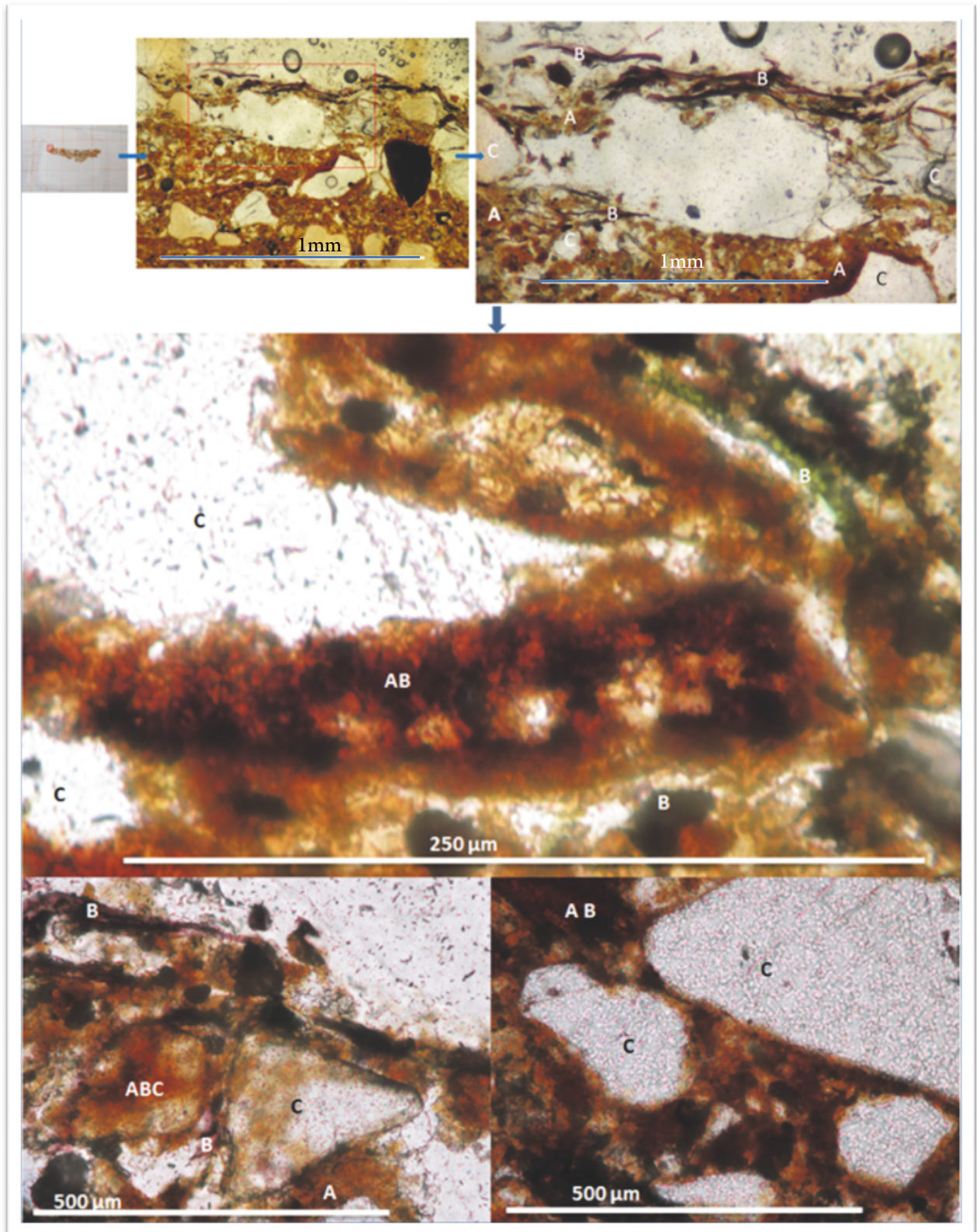


Photo n°35 : Exemple de croûte biogénique type 1. (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N).
 A= particules minérales et organiques ultrafines et sesquioxydes divers.
 B= biofilm algal.
 C= particules minérales sableuses.

Le Type 2 (MC) : ce type de micro-structuration dite croûte minérale présente généralement une alternance de microcouches relativement larges de type GS-fabric dont l'épaisseur varie de 1mm à 3 mm et de type M-fabric et F-fabric épaisses de 0,3 mm à 1 mm. Contrairement au type 1, ce type de croûte (type 2) présente une dominance squelettique composée principalement de particules minérales grossières et fines particules de quartz et concrétions diverses (« A » sur les photos n°36 et n°37). Le maintien de la structure de ce type de croûte dépend de l'importance du plasma ou matrice (« B » sur les photos n°36 et n°37) qui remplit les espaces intra-granulaires. Si celui-ci est très faible, la structure est instable mais s'il est important, la structure est relativement stable. Ce type de croûte pourrait aussi se développer sur les croûtes de type 1 qui, sert de « trappe » aux particules en reptation puis les fixe en raison de leur caractère gélatineux (mycélium et biofilm) et de la capacité des microorganismes constituant ces croûtes (type 1) à sertir les grains de sables ou de poussière par exemple.

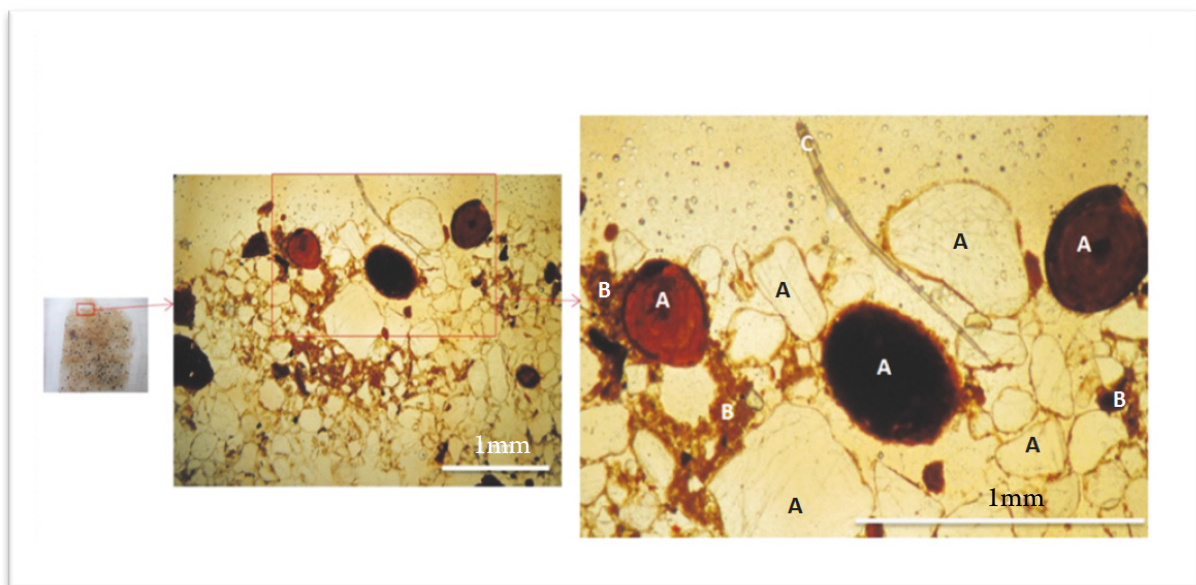


Photo n°36 : exemple de jeune croûte minérale de type 2 à assemblage GS-fabric (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). A= particules minérales grossières composées de sables quartzueux, de nodules ferrugineux. B= détritiques composites à ultrafins (sesquioxydes de fer, particules minérales d'argiles et de limons). On remarque bien une radicelle (C) d'1 mm incrustée entre les espaces poreux.

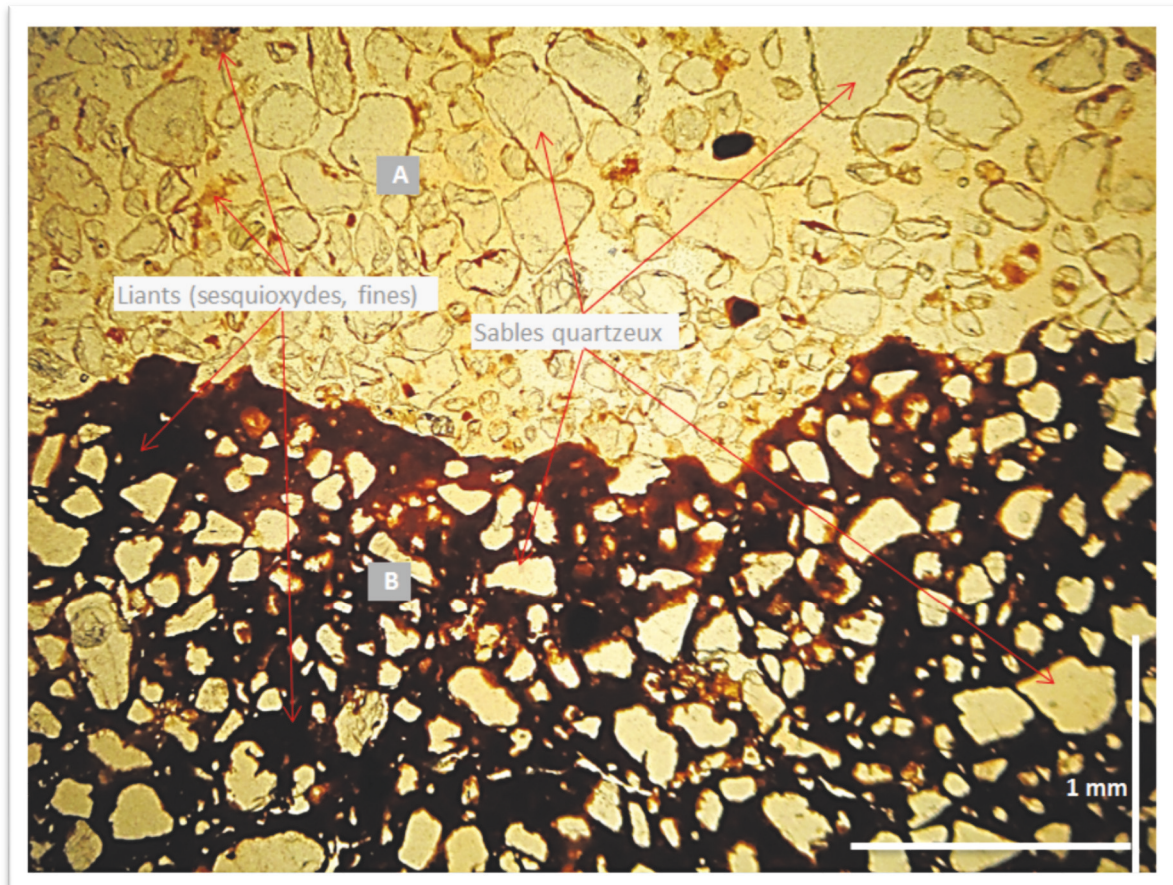


Photo n°37 : Exemple de type d'encroûtement d'origine minérale de type 2 à surface des dunes de ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). La photo présente une organisation microstructurale des matériaux des couches superficielles des dunes : un micro-horizon (A) de sable faiblement consolidé, pauvre en plasma reposant sur un autre micro-horizon (B) dont la partie plasmique est très riche en sesquioxydes de fer et fines (argiles et limons) et assure la cohésion des matériaux sableux qui composent le squelette. On distingue clairement dans la partie supérieure (A) des sables quartzeux aux grains majoritairement grossiers qui se supportent entre eux (GS-fabric) et dans la partie inférieure (B) des sables quartzeux aux grains grossiers noyés dans une matrice fines mais ne se supportent pas entre eux (F-fabric).

Le Type 3 (B-MC) : ce type de micro-structuration est vraisemblablement la conséquence de l'alternance des conditions climatiques saisonnières et de la fréquence des évènements et processus érosifs de mobilisation des matériaux sédimentaires à la surface des dunes. Épaisses de 1 à 5 mm parfois, elles présentent une modification conséquente et visible des microstructures et un mélange de portions des couches d'origine biologique et celles d'origine minérale (photo n°38). Dans ce cas on constate une dominance massive de l'agencement des grains et particules de type F-fabric/M-fabric avec une imbrication des couches de type GS-fabric des croûtes de type 2 (MC). Ainsi, on observe un mélange de différents types de croûtes dans ce type 3. Dans ce cas, il serait bien possible qu'un sol se forme à ce niveau si la structure n'est pas dégradée ou influencée négativement par les activités humaines et autres facteurs externes (photo n°38 et n°39).

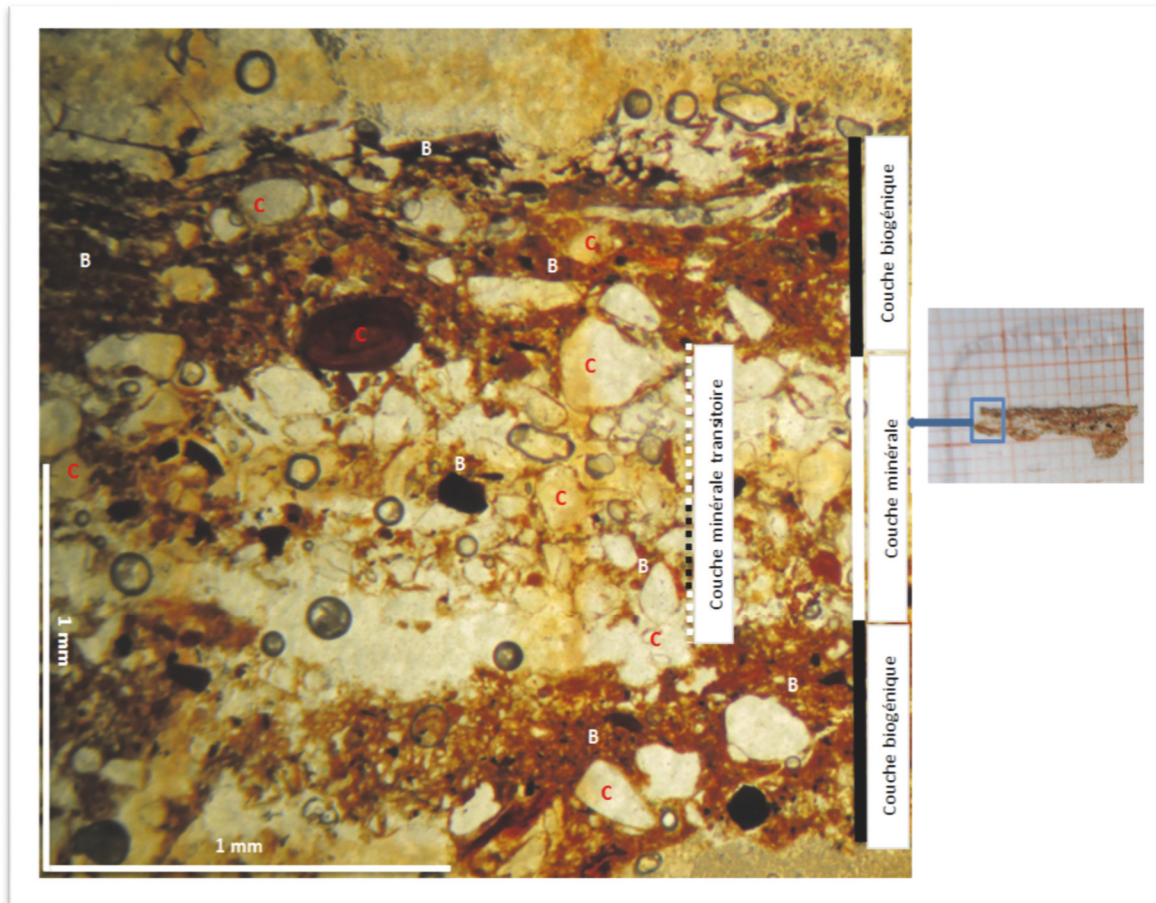


Photo n°38 : Exemple de croûte de type 3 présentant une alternance de microcouches biogéniques et couches minérales (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). Ce type de micro-organisation des croûtes à la surface des dunes, présente parfois des zones transitoires difficiles à délimiter, pouvant parfois se confondre à l'une ou l'autre des microcouches. Ces couches sont essentiellement composées d'un plasma constituant un mélange mixte composé de matériaux ultrafins (sesquioxydes, argiles, limons et autres détritiques organiques) associés aux filaments des algues microscopiques qui couvrent la surface des dunes (B). Elles sont aussi composées d'un squelette à particules sableuses essentiellement quartzes et autres concrétions minérales (C).

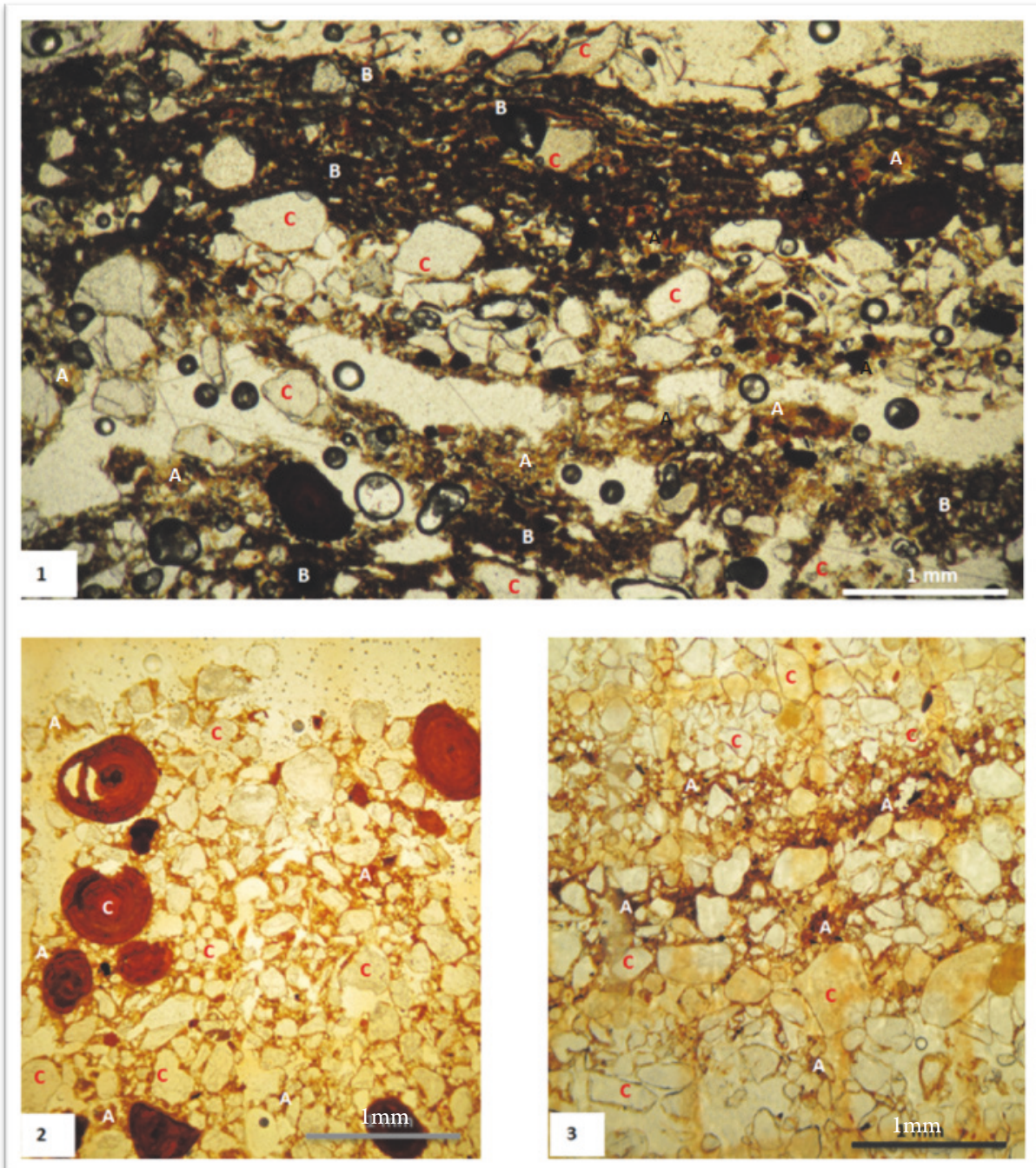


Photo n°39 : Exemples de micro-organisation des croûtes de type 3. 1= exemple de croûte à alternance de couches biogéniques (B) et de couches minérales (C) (G1 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N). 2= exemple de croûte minérale non litée. La matrice (plasma) est composée de sesquioxides et de matière minérale ultrafine ou microcristalline (A). Le squelette est essentiellement composé de sables quartzeux et de nodules ferrugineux (C) (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). 3= exemple de croûtes mixtes présentant un litage de couches minérales (C) et de couches dont le plasma est un mélange de sesquioxides, de matériaux détritiques ultrafins et de particules organiques (A) (Mg 11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N).

L'observation de différentes croûtes qu'elles soient d'origine biologique ou physique, montre une alternance nette des microcouches dont les tailles varient du millimètre au centimètre. Le contact avec le substratum dunaire est généralement estompé. Les croûtes d'origine physique présentent pour la plupart une alternance de microcouches à matériaux moyens à grossiers et très fins. Dans la couche à matériaux moyens et grossiers, on constate une dominance du squelette dont les grains sont liés par une pénétration de plasma (fraction très fine) qui assure le remplissage des « vides » intra-granulaires. Les analyses géochimiques des matériaux montrent une multitude de combinaisons minéralogiques servant de ciments entre les grains. Cette pénétration des matériaux très fins est essentiellement constituée de sesquioxides (fer, alumine, carbonates, argiles) et des débris organiques divers. Néanmoins, quelques matériaux moyens à grossiers s'incrudent dans la masse plasmique et sont fortement consolidés voire noyés dans le plasma. Les couches plasmiques sont plus fines que les couches squelettiques. Ces alternances des couches sont probablement consécutives aux phases successives d'érosion-accumulation de matériaux à la surface des dunes et forment une couche relativement « stable » pouvant protéger le corps dunaire de la désagrégation et éventuellement occasionner un début de construction de l'horizon pédologique. Malheureusement ces croûtes sont rapidement altérées et le processus reprend aux rythmes des saisons selon que les conditions soient favorables ou pas. Mais il faut noter que les croûtes à faible dominance plasmique s'altèrent plus rapidement que celles dont la concentration plasmique est élevée et présentant une forte pénétration plasmique dans les couches de matériaux moyens à grossiers. Et plus ces dernières sont peu épaisses, plus la croûte semble « stable » donc durable pour la formation d'horizons pelliculaires nets relativement riches en matière organique et à forte concentration en minéraux et sesquioxides divers dont ceux du fer amorphe. Cela semble plus « stable » quand le remplissage plasmique autour des grains est très faible et que la pénétration plasmique est profonde. Mais un grand inconvénient lié à ce type de phénomène d'encroûtement serait la réduction de la perméabilité qui favoriserait un fort ruissellement pour les croûtes à faible remplissage plasmique. Celles présentant une forte remplissage plasmique et une mince pénétration plasmique serait plus perméables mais facilement désagrégées en cas de pluie ou de vent intense.

8.7. Facteurs d'encroûtement des matériaux des couches superficielles des dunes

Deux actions principales favoriseraient les formations des croûtes, que celles-ci soient d'origine physique ou bien biologique. Il s'agit des actions mécaniques et chimiques. Les actions mécaniques sont traduites par l'accumulation des matériaux minéraux servant de squelette (grains $>=30\mu\text{m}$) pour une matrice (plasma) composée de matériaux minéraux et organiques ultrafins qui assurent le remplissage et le colmatage des espaces intergranulaires du squelette (POMEL 2008). Les actions chimiques quant à elles, sont traduites par des apports de sesquioxides et de solutions interstitielles composites (surtout le fer Fe_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}(\text{OH})$, silice, alumine et carbonates divers) qui, selon les conditions d'humidité, du pH et d'autres facteurs physico-chimiques d'oxydo-réduction favorisent une dissolution et/ou une cimentation *in situ* des fragments de matériaux clastiques accumulés. Ainsi, selon UEHARA & JONES (1974), en plus des substances organiques et sesquioxides amorphes, la silice (sous forme d'acide silicique) est aussi considérée comme un agent d'encroûtement. Dans le cas de cette étude, la majorité des sables sont constitués principalement de quartz et les liants sont essentiellement de la silice, des argiles, des limons, des carbonates et des composés organiques divers (photo n°40). En effet, la dissolution du quartz (composant principal des matériaux dunaires) et la colonisation par certaines bactéries forment souvent des films de silice amorphe qui cimentent les particules minérales des sols (POMEL 2008 et ABICHOU 2002). Ces facteurs d'encroûtement sont illustrés sur la photo n° 40 suivante. La

photo montre les facteurs suivant : 1= mélange complexe de matériaux très fins dont des sesquioxydes, des résidus d'argiles et limons fins, et matière organique (A) servant de ciment entre les particules sableuses à la surface des dunes (ADM 05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). 2= filaments d'algues microscopiques (B en rose) formant les croûtes biogéniques qui agrègent les particules sableuses des couches superficielles des dunes. Ces filaments et substances organiques sont parfois combinés aux sesquioxydes et autres ciments d'origine minérale (G1 07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N). 3= sesquioxydes et matériaux microcristallins (A) servant de ciment entourant les auréoles des particules sableuses (C) qui forment le squelette des couches superficielles des dunes. Dans ce cas les matériaux sont peu consolidés et peu ou pas du tout encroûtés en raison d'une faible présence du plasma pouvant assurer le remplissage des espaces intra-granulaires de la fraction squelettique dans ces parties superficielles des dunes du Mg (11°10' -12°03'E et 13°10'-13°35' N). 4= plasma (matrice) composé de matériaux microcristallins (AC) et de substance organique ultrafines (B) servant de ciment entre les particules sableuses du squelette pédologique (C) des couches superficielles des dunes du ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N) . Les concrétions noduleuses de fer (C-grain rond et rouge) fournissent les résidus et oxyde de fer (facteurs de cimentation des grains et de remplissage des espaces intra-granulaires. Dans ce cas, les sédiments sont plus enclins à un encroûtement d'origine minérale.

En plus des processus chimiques, la taille et la forme des particules minérales (EWING & GUPTA 1994) et certains carbonates dont les carbonates de calcium, sont des facteurs de lithification des matériaux sédimentaires (CAMPBELL 1979). Aussi, que cela soit des croûtes physiques ou biogéniques, on peut observer de fins films de sesquioxydes métalliques et carbonates ou des micro-liants d'origines organiques autour des grains. Cela est d'autant plus visible que les croûtes présentent des stratifications alternées de couche à dominance plasmique et de couches à dominance squelettique. Un autre facteur important est la forme des grains. En effet, en raison de leur géométrie plate, les argiles et limons (poussières et boues) ont une plus grande capacité à la compaction que les sables surtout si ceux-ci sont ronds (von ENTGELHARDT 1973 in OKTUSCH & MATTHES 2009). Face à une telle diversité et variabilité des facteurs d'encroûtement, comment alors évaluer le degré d'encroûtement des couches superficielles des dunes étudiées ? Et quels cas seraient favorables à la régénération des sols sableux dunaires, si l'on tient compte de leurs propriétés physico-chimiques relatives?

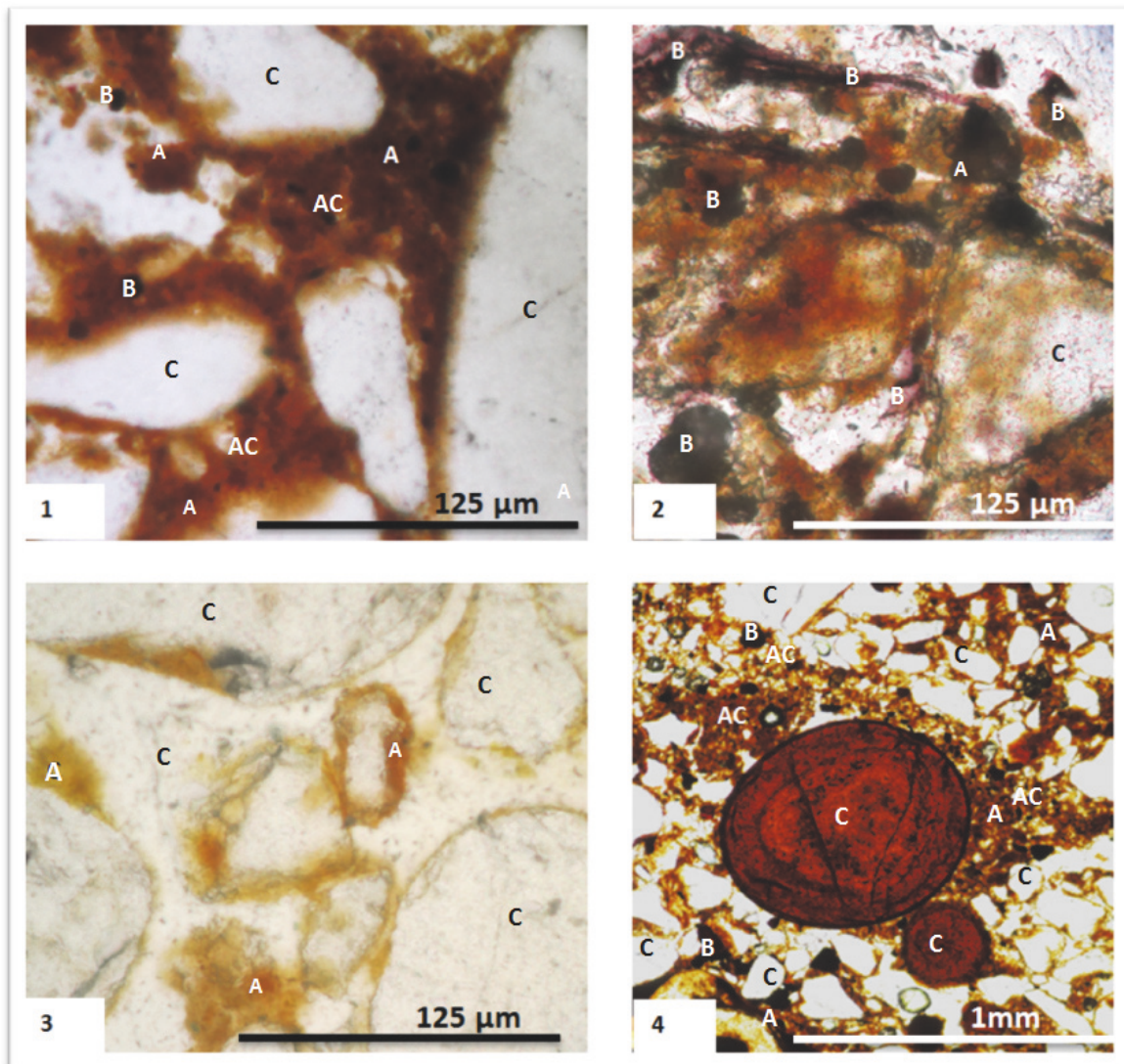
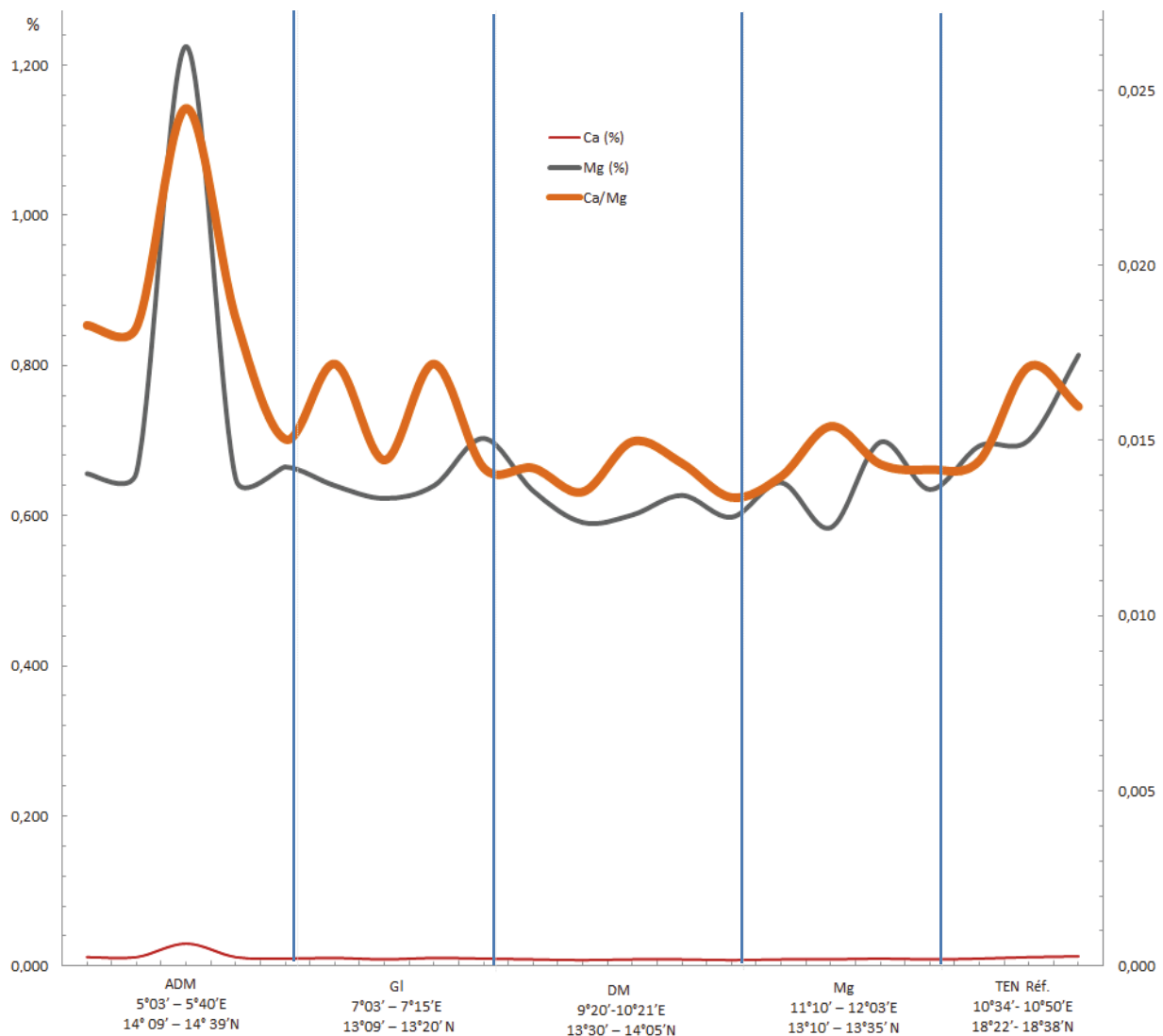


Photo n° 40 : Encroûtement et différents facteurs de cimentation des matériaux dunaires.

En outre, pour évaluer ce potentiel à l'encroûtement des couches superficielles des dunes, le rapport Ca/Mg a été utilisé. C'est un excellent indicateur de la qualité d'un sol et de sa résistance à l'érosion. Il est en effet accepté selon FENTON & CONYER (2002), que dans un sol sodique, le magnésium (Mg) a un effet négatif sur les propriétés physiques du sol quand sa concentration est très élevée par rapport à celle du calcium (Ca). En outre quand un sol est non sodique, un Mg élevé favorise le colmatage des espaces inter-poraux et favorise un ruissellement important en cas de pluie. Ainsi, d'après ces auteurs quand le rapport Ca/Mg est élevé, il pourrait favoriser une forte infiltration passant de 20 à 100%. Ceci induirait une baisse de perte en sol et une bonne structuration. Par contre si le Ca/Mg est très bas, il pourrait conduire à la floculation de l'argile qui favoriserait un colmatage des espaces inter-granulaires, donc une réduction de la porosité, un accroissement du ruissellement en même temps qu'une perte de structure du sol. Bien que cela soit encore discuté, les valeurs limites du Ca/Mg sont comprises entre 1 (parfois $\lt; 10$) et 30. Dans le contexte de cette étude, les rapports Ca/Mg de l'ensemble des matériaux de surfaces des dunes étudiées présentent des valeurs $\lt; 2$ (graphique n°23) et ils ont presque dans leur majorité un pH non sodique (voir chapitre IV). Ceci signifierait un potentiel relativement faible à un encroûtement dégradant, et les apports accidentels par le vent en calcium dans les couches superficielles des dunes (HERRMANN 1996) et leurs faibles teneurs en magnésium faciliteraient leur restructuration si les conditions d'humidité et de végétation sont favorables.



Graphique n°23 : Répartition du rapport Ca/Mg : indicateur du potentiel à l'encroûtement des couches superficielles des dunes dans les différents paysages dunaires étudiés. A travers ce graphique on peut constater que les matériaux des couches superficielles des dunes sont potentiellement très peu exposés à un encroûtement dégradant en raison de la faible valeur du rapport Ca/Mg pour la plupart < 2 . On remarque néanmoins que les matériaux des couches superficielles des dunes de l'ADM présentent un rapport Ca/Mg relativement élevé par rapport à ceux des matériaux des couches superficielles des dunes des autres paysages dunaires.

Encroûtement et pédogenèse

D'après les observations microscopiques, la formation des croûtes semble être le premier stade de formation des couches superficielles des sols dunaires. Grâce à des conditions d'humidité occasionnelles (rosée et pluies, remontées capillaires et autres facteurs hydratants), les bactéries se fixent aux grains de sables et forment un biofilm et un réseau de mycéliums gélatineux. Ce complexe de mycéliums et biofilms favorise à son tour la fixation des poussières minérales et même des particules grossières et autres débris organiques qui proviendraient d'ailleurs (photos n°32, n°33 et n°34 ci-dessus). Ainsi, si la croûte n'est pas altérée, elle pourrait assurer une réserve potentielle de minéraux et autres

composés organiques qui, à leur tour vont intégrer la structure des horizons de surface des dunes et favoriser des conditions probables de pédogenèse dans les parties superficielles des dunes. En Chine (Mongolie) par exemple les croûtes algales sont utilisées pour stabiliser les sols dunaires dégradés (CHEN et al 2006). Selon plusieurs études effectuées au Niger, dont celles de MALAM ISSA et al (2008, 2007, 2001 et 1999) ; MALAM ISSA (1999) ; HAHN ET KUSSEROW (1998), ces croûtes présentent plusieurs aspects et constituent une réserve de biomasse pouvant servir de base pour cette régénération. Selon ces auteurs la couleur des croûtes traduit le stade de leur développement et de l'abondance de la biomasse. Ainsi selon ces auteurs les croûtes de couleur rouge traduisent une faible biomasse microbienne (de cyanobactéries). A l'inverse, celles de couleur noire présentent une biomasse élevée. Ces observations servent d'indicateurs du stade de développement des croûtes microbiennes (BELNAP et al. 2008; HAHN & KUSSEROW 1998). Pour le cas du Niger, les résultats obtenus par HAHN & KUSSEROW (1998) associent les croûtes micro-biotiques rouges à une faible biomasse des cyanobactéries, à l'inverse les croûtes micro-biotiques noires indiquent une biomasse élevée.

Ainsi, en fonction de leur origine (biogénique ou minérale ou les deux à la fois), les croûtes forment des microcouches millimétriques à centimétriques qui se succèdent ou qui alternent parfois. Selon les conditions écologiques locales des milieux dunaires (pluie, vent, humidité, température, végétation, ensoleillement), ces couches constituées de particules diverses (organique et minérale) sont par la suite structurées ou restructurées par un réarrangement mécanique (et chimique) des matériaux et aussi par une bioturbation active qui peuvent bien favoriser la formation de micro-horizons pédologiques (photos n° 41 et n°42). Si ces microcouches superficielles formées par les croûtes à la surface des dunes ne sont pas affectés par les activités humaines et les facteurs naturels dégradant, elles peuvent bien constituer le point de départ pour l'évolution des sols sur les matériaux dunaires de remobilisation. En effet, d'après le schéma n°5 ci-dessus si les conditions sont bonnes, les processus d'enrichissement minéral et de colonisation des couches superficielles des sols et sédiments en place s'enclenche avec l'apparition des croûtes. Parfois les croûtes biogéniques assurent la fixation des grains de poussières et particules diverses transportés par l'eau ou les vents. Cela aboutit à une **formation de microcouches successive et à terme d'horizons pédologiques** (photo n°3) **si le rythme n'est pas interrompu** par un quelconque événement altérateur (ou tout autre facteur érosif). C'est particulièrement en présence d'humidité (saison des pluies), que ces types de croûtes se développent plus ou moins bien sur les sols sableux dégradés en formant de minces pellicules micrométriques à millimétriques. **Avec le temps, celles-ci pourraient bien servir de point de départ au développement d'un tapis végétal herbacé** (photo n°44) **et à l'installation d'une microfaune à partir desquels les sols sableux dunaires dégradés acquièrent de nouvelles propriétés physiques et chimiques dynamisant leur régénération.**

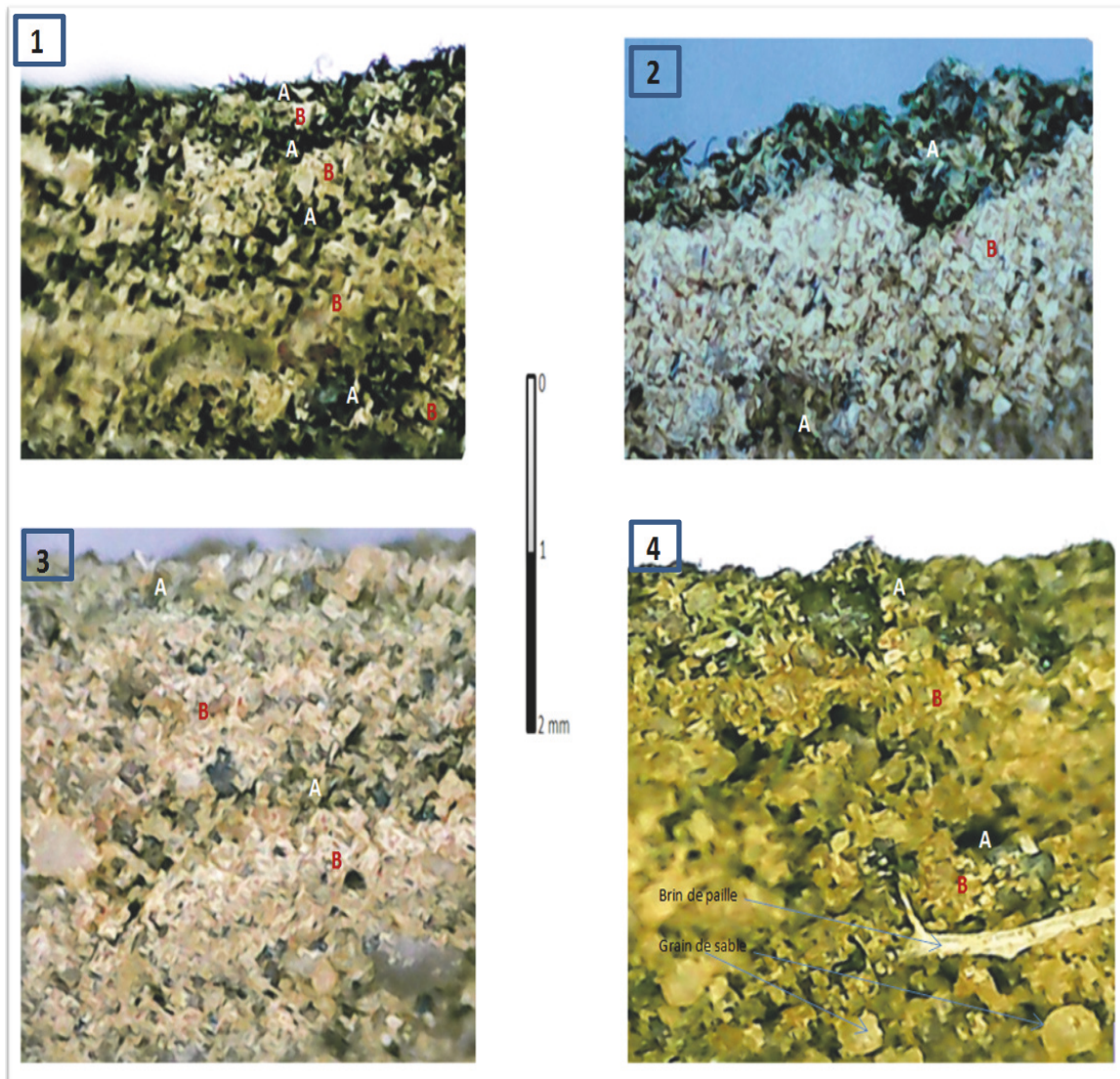


Photo n° 41: Développement des horizons à la surface des dunes. Les structures sombres (A) sont une accumulation de croûtes biogéniques et filaments algues. Les structures claires (B) sont des couches de matériaux d'origine minérale. 1 et 2 = croûtes à la surface des dunes du paysage dunaires de l'ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). 3= paysage dunaire du DM (09°20'-10°21' E et 13°30'-14°05' N). 4= paysage dunaire du G1 (07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N).

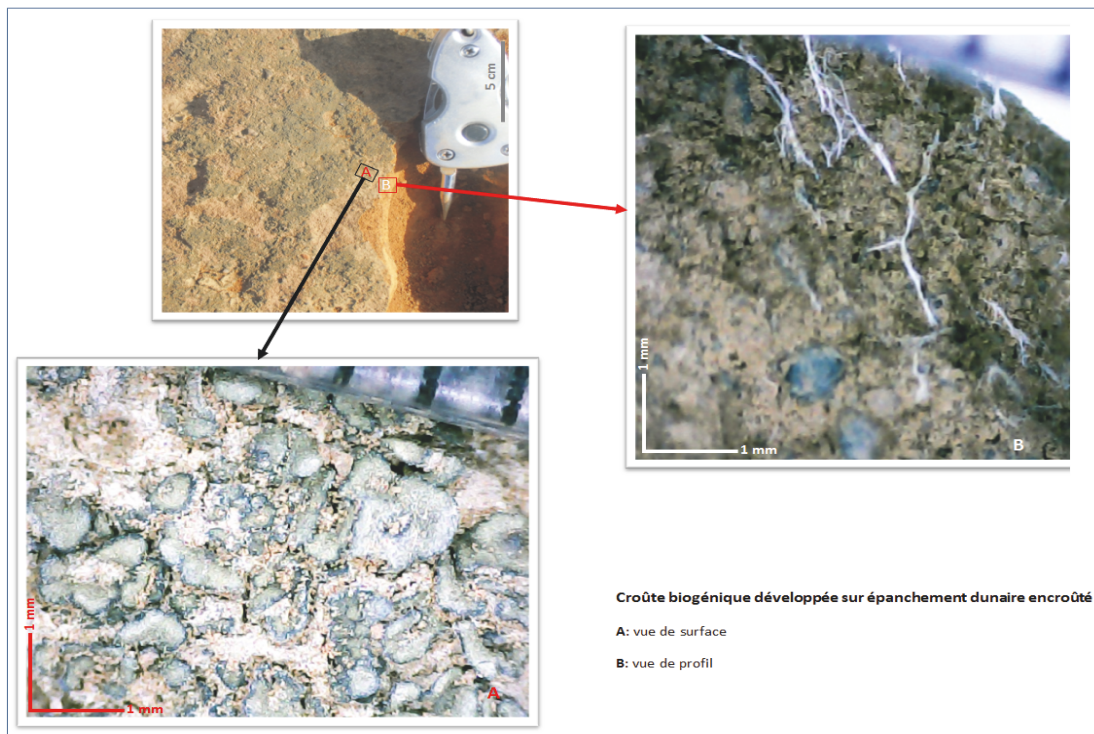


Photo n° 42 : Exemple de formation de micro-horizon pédologique sur épanchage dunaire encroûté dans le paysage dunaires de l'ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N). On remarque bien une intumescence de racines mortes (filaments blanc sur B) et une mixtiture de matériaux minéraux fins (brunâtres sur A) incrustés dans les fentes des croûtes biogéniques (en vert-bleu sur A).

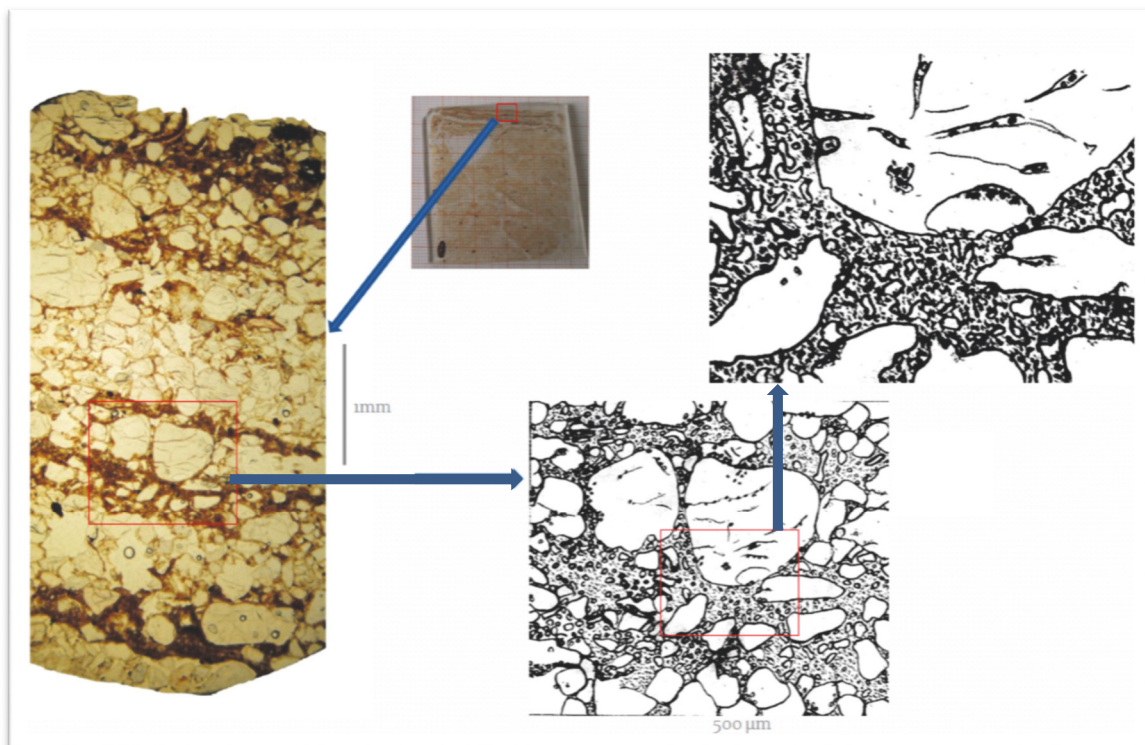


Photo n° 43 : Coûte de type 3 (B-MC). Vue microstructurale des microcouches pédologiques dans les horizons de surface des matériaux des couches superficielles des dunes du GI (07°03'-07°15' E et 13°09'-13°20' N).

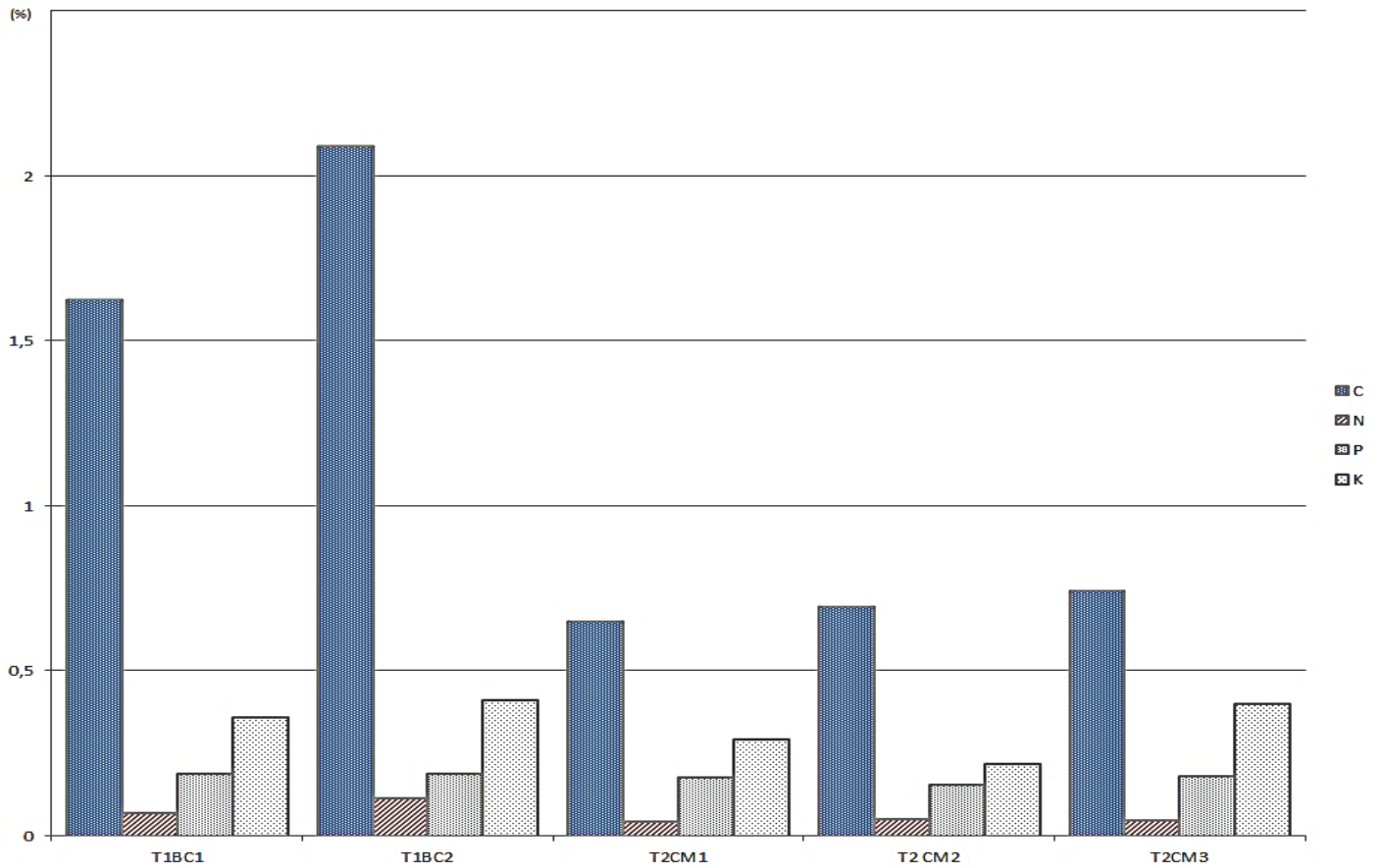


Photos n° 44: Végétation secondaire (2) sur un sol dégradé des épanges dunaires de l'ADM (05°03'-05°40' E et 14°09'-14°39' N) sur plateau latéritique. On voit un tapis de croûte biogénique couvrant le sol (1 : fond noirâtre à vert sombre).

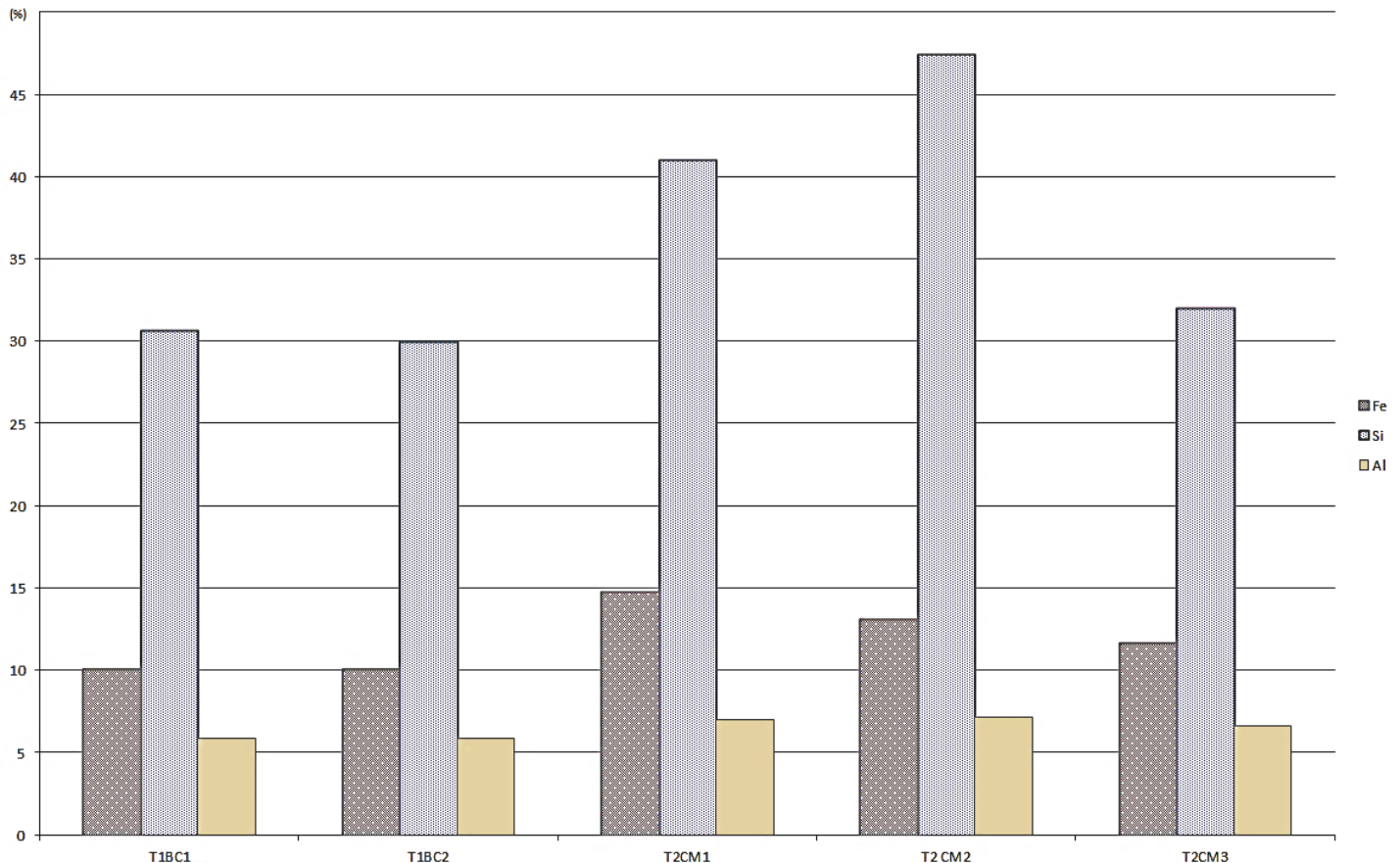
8.8. Encroûtement et enrichissement des couches superficielles des dunes

Par la capacité des microorganismes qui forment les croûtes biologiques (cyanobactéries en particulier) à réaliser la photosynthèse et aussi leur capacité à fixer de l'azote atmosphérique, celle-ci constituent une source d'entrée de carbone (C), d'azote (N) et autres éléments pour les régions à faible productivité de ces éléments minéraux (NISHA ET AL. 2007 ; BROSTOFF et al. 2005 ; TIRKEY & ADHIKARY 2005 ; ACEA et al. 2003 ; MALAM ISSA et al. 2001). En effet, selon CHEN et al (2006), les croûtes assurent une augmentation significative du potassium (K) du sol. Pour le cas de cette étude, l'analyse de quelques échantillons de croûtes biogéniques et minérales révèle aussi une grande différence des teneurs en carbone entre les croûtes biogéniques (> 1,5%) et les croûtes minérales (< 1%). Par contre leurs teneurs en potassium, en azote et en phosphore ne présentent pas une grande différence (< 0,4 %). Cependant la teneur en silicium (sable quartzueux) est plus élevée dans les croûtes minérales (30 à 45%) que dans les matériaux des croûtes biogéniques (30%). La teneur en fer est aussi relativement plus élevée dans les matériaux des croûtes minérales (> 10< 15%) que dans ceux des croûtes biogéniques (< 10 %). La teneur en aluminium est très peu variable dans les deux types de croûtes et est inférieure à 6% (graphiques n°24 et n°25 ci-dessous, graphiques annexes n°1A, 1B, 1C, 1D et graphiques annexes n°2A, 2B, 2C, 2D). Généralement les croûtes minérales qui sont très riches en fer et en aluminium durcissent fortement en saison sèche. Souvent celles-ci présentent des traces de carbonates liées à la matrice du ciment (Annexe n°3 : tableaux n°1 et 2). Mais en présence d'humidité conséquente, ces croûtes pourraient bien s'hydrater et probablement être recolonisées par une végétation secondaire. Ces combinaisons minérales pourraient aussi favoriser l'enrichissement minéral de microcouches pédologiques formées à la surface des dunes. Ce type de croûte (biogénique-minérale) pourrait bien être favorable à une infiltration des eaux de pluie et aussi aux piégeages des matériaux minéraux et organiques qui selon POMEL (2008) sont capables d'assurer la mise en place d'une végétation pionnière (photo n°44 ci-dessus) et conséquemment la régénération du substratum dunaire encroûté. Dans le cas de ces types d'encroûtement, les remplissages intra-granulaires sont essentiellement composés de matériaux minéraux et organiques fins. Les couches successives traduisent une alternance des types de remaniements et dont les événements ayant favorisé la mise en place successive de ces microcouches biogéniques et minérales. Sur les lames minces, on

distingue nettement les différentes couches qui se succèdent mais avec des amplitudes le plus souvent variables (photo n°43 ci-dessus).



Graphique n°24 : Variation des taux de carbone, d'azote, du phosphore et du potassium dans les matériaux des croûtes biogéniques (T1BC1 et 2) et des croûtes minérales (T2CM1,2 et 3).



Graphique n°25 : Variation des taux du, de silicium et d'aluminium dans les matériaux des croûtes biogéniques (T1BC1 et 2) et des croûtes minérales (T2CM1, 2 et 3).

8.9. Conclusion partielle

Dans la littérature, les organisations pelliculaires de surface (OPS), selon qu'elles soient d'origine biologique ou physique jouent des fonctions parfois antagonistes dans les processus sédimentaires actuels (Pomel 2008 ; Abichou 2002 ; AMBOUTA 1996 ; CASENAVE et VALENTIN 1998, 1990 et 1989). Elles ont en effet, un rôle tantôt structurant, compactant, hydrophobe, ou régénérant. Ces OPS « réorganisent » les matériaux sédimentaires meubles à la surface des dunes et favorisent la formation de microcouches dont les fonctions pédogénétiques sont à mieux clarifier. Ces OPS constituent des enregistreurs de la charge minérale, chimique et organique à la surface des sols dunaires. En effet, ce travail a tenté d'évaluer les parts (potentielles) respectives de processus biotiques et abiotiques dans la genèse et le développement des phénomènes d'encroûtement sur les couches superficielles des dunes.

Du point de vue génétique, il est parfois difficile de séparer une croûte biogénique de ses origines physiques car pour la plupart des cas, celles-ci se développent sur un substrat d'une ancienne accumulation sédimentaire d'origine physique (croûte de battance pluviale ou d'accumulation éolienne). Inversement, il est tout aussi difficile de séparer une croûte physique de ses origines de mise en place biogéniques, car certaines accumulations superficielles qu'elles soient d'origine éolienne ou hydrique font à la faveur de rugosités liées à des substrats d'origine organo-minérale précédemment mise en place. On distingue parfois nettement cette transition quand la matière organique se dégrade. Néanmoins, les observations faites ont permis ici de distinguer trois (3) types d'OPS (croûtes). Les trois types de croûtes caractérisées sont observés dans tous les différents paysages dunaires étudiés,

avec bien évidemment quelques différences dans les modes et facteurs de leur mise en place. On les observe ainsi, dans l'ensemble des paysages dunaires étudiés à l'exception de celui du Ténéré dans lequel les observations sur les OPS n'ont pas été réalisées (non étudié).

D'après les observations effectuées sur le terrain, leurs mécanismes de formation dans les milieux dunaires à saisons alternées (sèche-humide) semblent obéir à une dynamique d'alternance de croûtes minérales et des croûtes biogéniques en fonction des événements climatiques prévalant. **Suivant cette dynamique, les croûtes minérales ou croûtes physiques constituent un support et une source de minéraux nécessaires à la mise en place des croûtes biogéniques. La combinaison et les interactions des deux types d'encroûtement pourraient bien favoriser la régénération des sols dunaires et la fixation des jeunes édifices dunaires de remobilisation.** En effet, sur la base des analyses géochimiques et des observations microscopiques des différents types de croûtes qui pourraient se développer à la surface des dunes, **il est bien possible que les types 1 et 3 contribuent à la régénération temporaire soit-elle des dunes en dégradation. Ils pourraient aussi assurer la protection des dunes contre la dégradation par l'érosion.** Ces types d'encroûtements pourraient ainsi avec le temps constituer une étape de départ pour la pédogénèse et les successions de végétation des milieux dunaires dégradés. Cependant, il faut noter que, bien que les croûtes aient des fonctions régénératrices des sols dunaires, celles-ci sont aussi très fragiles et elles se dégradent très facilement. En perspectives, des recherches sur les facteurs fonctionnels *in situ* doivent être menées afin de mieux déterminer les paramètres qui pourraient assurer leur stabilité et leur durabilité en vue des actions d'aménagement et de protection des paysages dunaires des milieux semi-arides sahéliens.

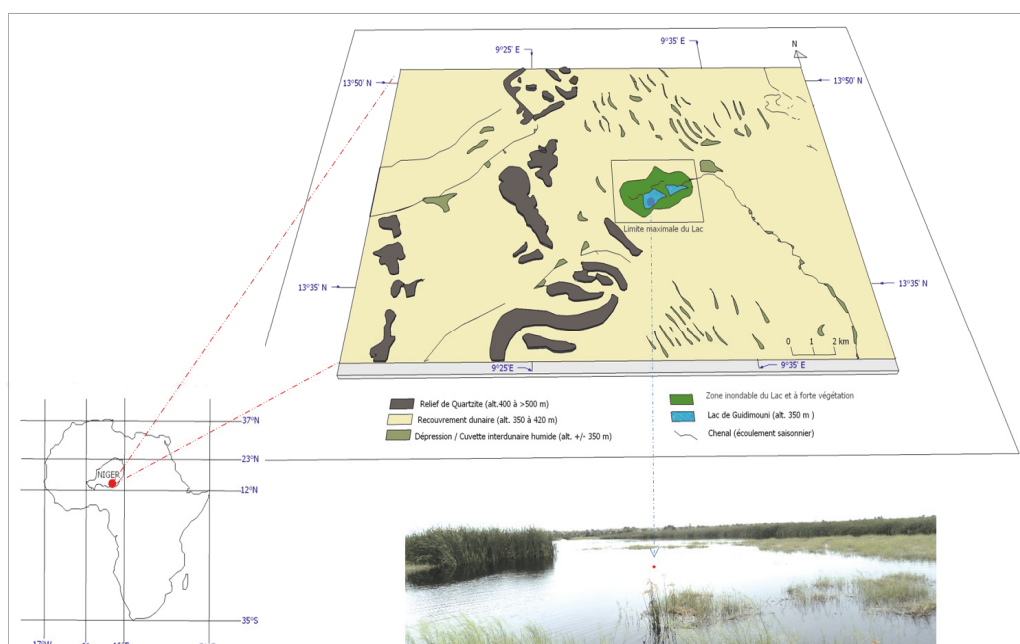
Sixième partie

9. Sédiments lacustres : archives et évidence des modifications environnementales

9.1. Contexte et situation générale

Pour mieux comprendre la situation actuelle des milieux dunaires sahéliens, une étude sédimentologique (stratigraphie et palynologi) des sédiments lacustres a été menée dans la partie SE du Niger. Cette étude a été inspirée des travaux récents menés dans des milieux paléolacustres situés plus au Nord en zones hyperarides et visant la reconstruction des paléoenvironnements sahariens (BAUMHAUER 2014 ; BRAUNECK 2010; BAUMHAUER et al 2009; SCHULZ et al 2009 ; SCHÜTZ & KRAUSE 2009 ET SCHULZ et al 2002). Le cas étudié ici concerne un environnement lacustre actuel situé en pleine zone sahélienne (lac de Guidimouni). Le matériel provient d'un carottage est fait sous le plan d'eau douce du lac.

Le lac de Guidimouni est situé en zone sahélienne avec une pluviométrie dépassant en moyenne les 300 mm/an. Situé dans le Sud-Est du Niger, le Lac forme une dépression endoréique allongée (SW-NE) sur près de 3 km et large de près de 0,7 km. Le plan d'eau est formé par deux grands étangs dont la profondeur dépasse rarement 1,5 m. Le lac est formé sur une plaine sableuse légèrement ondulée avec des altitudes variant entre 390 et 395 m. il est entouré de collines dont l'altitude maximale dépasse 590 m. Les bords du lac sont colonisés par des roseaux (carte n°9). Il est alimenté par deux sources d'eau douce, qui assurent plus ou moins la permanence du plan d'eau dont la surface varie beaucoup au cours de l'année et pendant les périodes de sécheresse. Actuellement, la végétation environnante est une savane sahélienne dégradée composée principalement d'une strate ligneuse d'*Acacia*, de *Balanites*, de buissons à *Leptadenia pyrotechnica* et d'une strate d'herbacée composite. Les roseaux (*Thypha...*) couvrent densément les bordures du lac et sont régulièrement brûlés pour dégager l'espace destiné aux cultures de contre saison et des champs. Sur les dunes environnantes, les buissons de *Leptadenia* sont parfois défrichés pour brulis et transformés en champs de mil et parfois de haricot.



Carte n°9 : Localisation du lac de Guidimouni et des points de prélèvement de la carotte (indiqué par la flèche bleue).

Pour étudier les modifications environnementales intervenues dans les paysages dunaires sahéliens en général et en particulier dans la région, un carottage est fait au milieu du lac dans la partie constamment immergée. Une carotte de 70 cm y a été prélevée. Les sédiments ont été analysés au laboratoire. Ainsi la structure des dépôts sédimentaires a été décrite au microscope sous lames minces produites à l'Université de Szeged (Hongrie). En plus des analyses stratigraphiques, une étude palynologique a été faite et un diagramme pollinique a été établi. Celui-ci est produit sur la base d'échantillons prélevés à chaque centimètre de la carotte. Les échantillons sont préparés selon la méthode traditionnelle de tamisage, de traitement combiné à l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide fluorique (HF), la soude caustique (KOH) incluant l'acétolyse. Après centrifugation, les échantillons sont mis dans de la glycérine et le comptage des pollens est fait au microscope optique sous grossissements 400X à 1000 X.

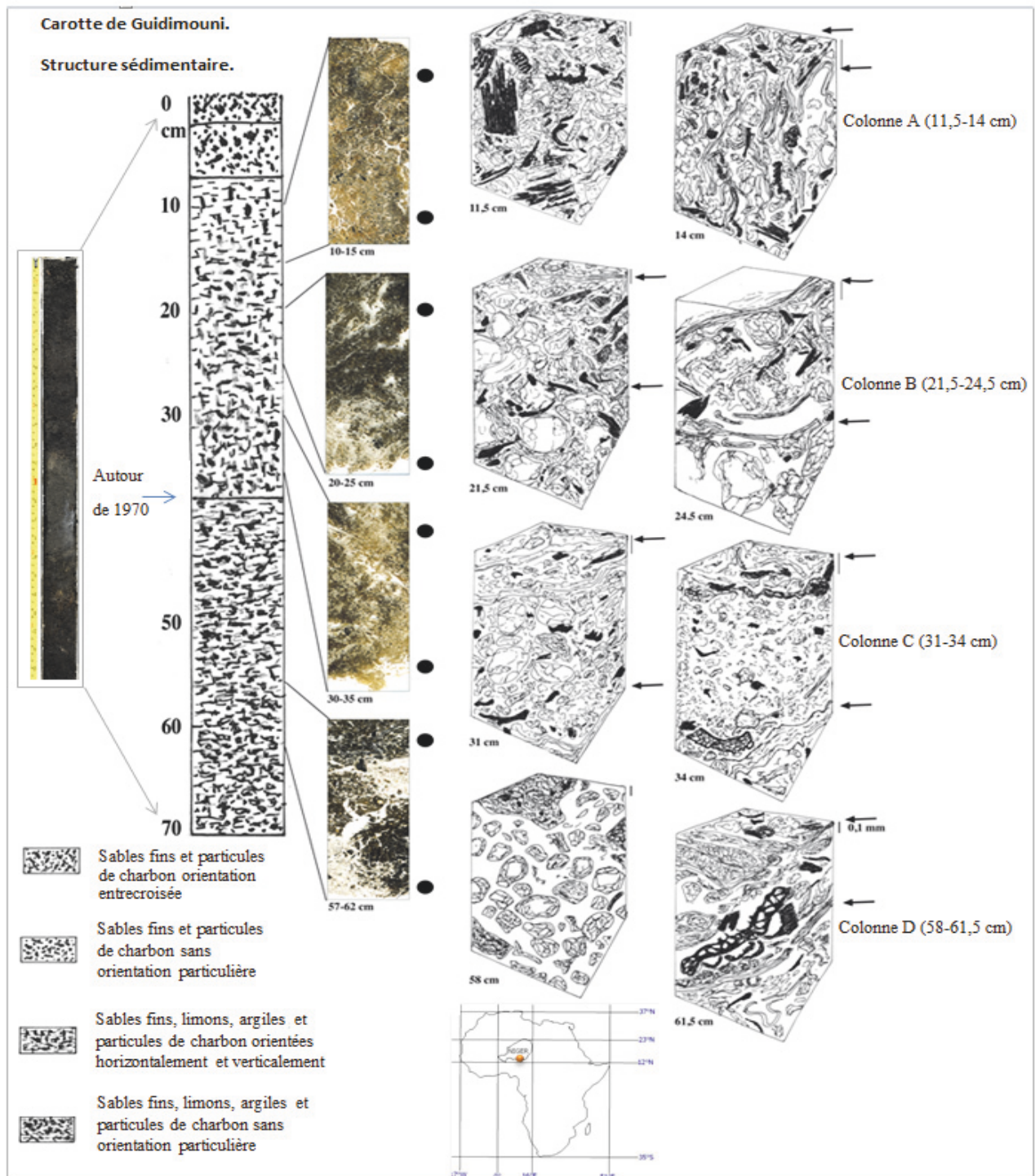
Les analyses macroscopiques de la carotte montrent à première vue, une uniformité de structure des dépôts sédimentaires ou bien ceux-ci ne présentent pas de variations particulières des modes de sédimentation. Cependant, observé à un agrandissement 400 X et 1000X, on peut distinguer deux éléments majeurs pouvant servir d'archives exploitables : le mode de sédimentation et la présence des particules microscopiques de charbon anthropogénique (croquis n°15).

9.2. La fonction d'archives environnementales

D'après le croquis n°15 ci-dessous, l'analyse de la structure sédimentaire de la carotte de Guidimouni montre les caractéristiques suivantes. Les matériaux sédimentaires de la partie en contact avec la lame d'eau (de 0 à 12 cm) présentent une sédimentation complètement perturbée. Cette partie revêt moins d'intérêts et pourrait fausser les interprétations car les matériaux sédimentaires à ce niveau semblent troublés par les mouvements de la lame d'eau (vagues) et les impacts très récents des activités humaines. En outre, cette partie n'a pas de structure distincte, mais est bien riche en diatomées (croquis n°15 colonne A). C'est en dessous des 12 premiers cm que les dépôts sédimentaires présentent un litage en couches millimétriques. Ces couches sont séparées par des films et gelées d'algues / bactéries microscopiques fortement colorés par les oxydes de fer (croquis n°15 colonne B). C'est à ce niveau que débute la sédimentation par un apport de matériaux sablonneux très fins et de la matière organique altérée (photo n° 45). Cette couche de gelées d'algues / bactéries est formée dans des conditions d'un lac eutrophique peu profond constamment influencé par l'énergie solaire. Elle couvre le dépôt situé en-dessous. Les flèches sur le croquis n°15 indiquent la position de ces films.

La partie centrale de la carotte (environ 20-38 cm), est principalement composée d'un mélange de sables et de vase, mais est elle aussi entrecoupées de couches d'algues (croquis n°15 colonne C). Cette partie indique des changements de mode de sédimentation occasionnés par les périodes de sécheresses des années 70/80. Pendant cette période le lac serait quasi asséché (communication de Mr Ali Adamou un ressortissant du village de Guidimouni témoin de cette période). Toutefois, malgré cet assèchement, il y aurait eu persistance d'une mince lame d'eau du lac qui a permis la formation des films d'algues / bactéries caractérisant cette partie de la carotte.

Enfin la partie inférieure de la carotte (à partir de 58 cm) est caractérisée par la présence de matériaux sableux moyens à grossiers très altérés et une présence abondante de matière organique (photo n°45). A ce niveau aussi on observe encore les films et gelées d'algue/bactéries qui entrecoupent la structure (croquis n°15 colonne D)



Croquis 15 : Caractéristiques et structures sédimentaires de la carotte de Guidimouni (13°42'N et 09°32' E) (Schulz et Ibrahim 2015 modifié)

9.3. Le charbon comme archive des activités humaines

La deuxième fonction importante des matériaux de la carotte est la présence régulière de particules de charbon de paille (photo n°45). Ces microparticules proviennent essentiellement des charbons des restes de cuticules et des feuilles. Les microparticules de charbon de bois sont rares et parfois absentes. Ces microparticules sont captées et organisées en microcouches

orientées le long des films d'algues/bactéries. Toutefois, dans les premiers centimètres des couches supérieures elles ont des orientations mixtes ou bien suivent les bandes déformées par l'action des vagues (croquis n°15 colonne A). Cette présence régulière des microparticules de charbon dans l'ensemble de la carotte montre bien que l'usage du feu est partie intégrante de la dynamique agraire dans les paysages agraire de la région. En effet, actuellement, les populations locales utilisent encore régulièrement le feu pour défricher les champs sur les dunes environnantes ou pour brûler les roseaux qui entourent le lac à des fins agricoles. Ainsi, la plupart des charbons retrouvés dans les matériaux sont d'origine proximale et ne seraient pas transportés sur de longues distances. Finalement, cette étude des particules de charbon dans les sédiments lacustres pourrait bien servir de modèle d'évaluation des archives des sédiments paléo-lacustres. Cela est bien nécessaire à l'étude des paléo-environnements pour la compréhension des dynamiques paysagères actuelles des milieux dunaires et aussi les changements climatiques.

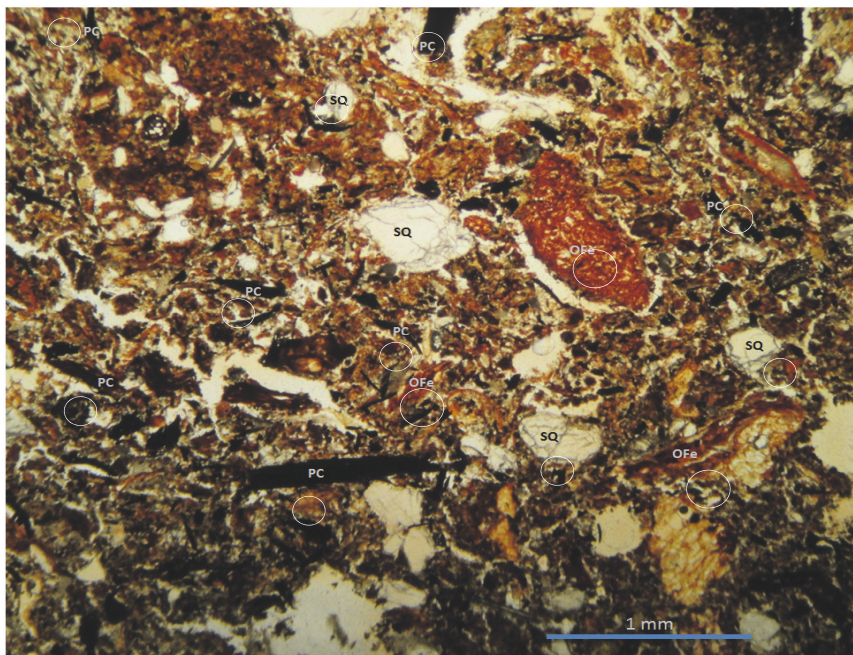
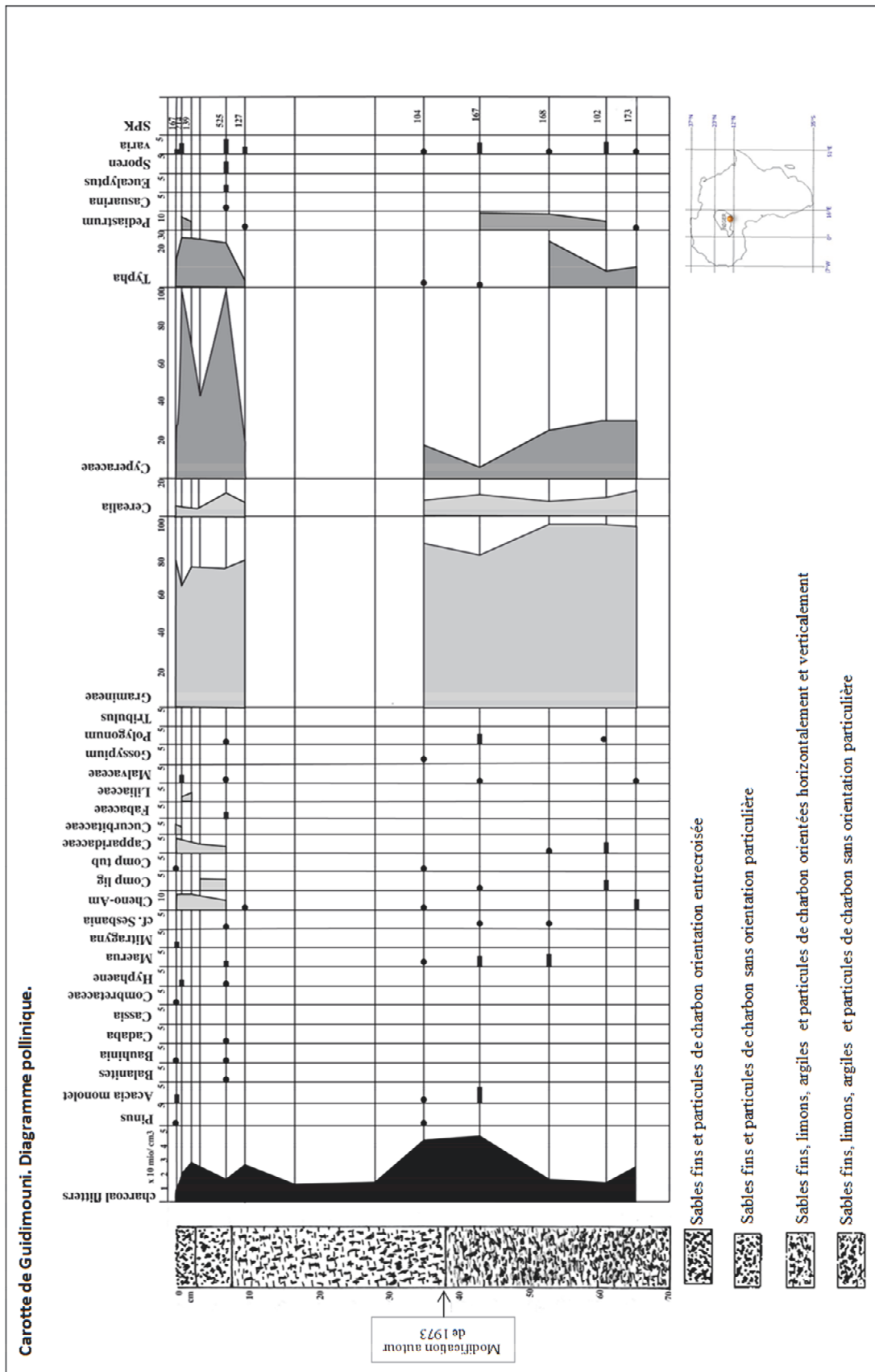


Photo n° 45 : Particules microscopiques de charbon dans les sédiments du lac de Guidimouni à 55 cm de la partie inférieure des carottes. PC= particules de charbon, SQ = particules de sables quartzeux, OFe = oxydes de fer.

9.4. Les enregistrements polliniques comme archives des paysages dunaires

L'analyse palynologique des sédiments de la carotte de Guidimouni a permis ainsi de reconstituer une partie de l'histoire du paysage de cette région. Elle a surtout permis d'évaluer l'évolution de la végétation locale au cours des 100-120 dernières années. Dans l'ensemble, les échantillons sont pauvres en pollen. Ceci pourrait être dû à l'abondance des microparticules de charbons qui empêche la visibilité et la séparation des pollens dans les sédiments de la carotte. Pour le calcul de la fréquence pollinique, les espèces aquatiques (Cypéracée, Typha) sont exclues de la somme de pollen. Mais les algues (*Pediastrum*) sont représentées dans le diagramme car elles sont indicatrices des conditions d'eau douce. Ainsi, d'après le graphique n°26, le spectre des pollens identifiés indique l'existence d'une végétation composée d'herbacées composites et d'espèces rudérales (*Chénopodiacée*, *Amarantacée*). La strate ligneuse est de type sahélo-saharien et est composée de *Acacia*, *Balanites*, *Bauhinia*, *Combrétacée*, *Maerua* et *Mitragyna* dont aucune des espèces n'est prédominante. *Pinus* est aussi présente mais est transportée depuis de très longues distances. Les spectres les plus importants des pollens retrouvés dans la carotte

sont les espèces aquatiques locales de *Cypéracée* et de *Typha* qui dominent actuellement les bordures du lac. La partie centrale de la carotte est malheureusement très pauvres en pollens.



Graphique n°26. Diagramme pollinique de la carotte de Guidimouni. (Schulz et Ibrahim 2015 modifié)

9.5. Changements environnementaux reconstitués dans les milieux Sahélo-Sahariens

9.5.1. Modifications climatiques et environnementales

Les nombreux travaux de recherches paléo-environnementales pluridisciplinaires réalisés dans les bassins du Lac Tchad et des Iullemenden ont permis de mettre en évidence les fluctuations climatiques et leurs conséquences sur l'environnement du Sahel et du Sahara. Les études sur les fluctuations paléo-climatiques ont été réalisées par GIBERT et al., (2002), GASSE (2000); PASTOURET et al., (1978). Des études paléolimnologiques ont été faites par GASSE (2002) ; SERVANT et al (1978) ; FAURE et al., (1963), des études palynologiques sont réalisées par MALEY, (1981) et enfin, des études stratigraphiques et les datations au radiocarbone, de carbonates et de matières organiques ont été effectuées par GARNIER et al.,(2015); DURAND et al. (1984) ; SERVANT (1983 et 1973) ; CONRAD (1969).

Ainsi, plusieurs reconstitutions ont été développées sur les fluctuations paleoclimatiques dans les régions actuelles du Sahara et du Sahel. Déjà certains chercheurs de l'Institut de Recherches Sahariennes (BALOUT & DUBIEF 1952) avaient suggéré que pendant les périodes de glaciations, le désert avait avancé vers le sud. Ils ont appelé cette théorie le « balancement climatique ». Par contre CONRAD (1969), travaillant sur la Saoura (Sahara septentrional) a remis en cause cette hypothèse avec l'avènement de la méthode de datation au carbone 14. Il proposait un scénario non plus sur le déplacement latitudinal du désert mais sur une alternance de « contraction » du désert pendant les phases pluviales et son « expansion » pendant les phases sèches. Il a démontré qu'il y a eu des écoulements de la Saoura dans le Sahara septentrional dès avant 40000 BP jusqu'à 14000 BP. Selon cet auteur, des cours d'eau avaient déposé des alluvions parfois sur plus de 25 m d'épaisseur et selon lui, bien que ces sables aient un façonnement éolien, ils ont été repris et transportés sur des centaines de km par des crues puissantes qui alimentent à l'aval les paléolacs. Ces dépôts sont datés par CONRAD (1969), entre 38000 ans et 18000 ans BP. Plus au Sud-Est, dans le bassin du Lac Tchad, SERVANT (1973), a confirmé cette hypothèse qui prend un tournant décisif quand il a démontré que des lacs importants avaient existés dans la cuvette du Tchad dès avant 40000 BP et jusque vers 20000 BP pendant les phases de glaciations qui correspondraient à des pluvieux dans la zone intertropicale. Dans l'Afar, situé aux latitudes du Sahel actuel, GASSE (1972) et (1975) a aussi effectué un carottage dans les paléo-lacs qu'elle a daté au Carbone 14. Elle a mis en évidence une augmentation des niveaux des lacs de plus de 100 m vers 40000 s BP et vers 30000 BP, une baisse des niveaux des lacs. Autour de 20000 BP ce fut à nouveau une hausse des niveaux lacustres. Vers les 12000-11000 BP il y a un assèchement progressif des lacs, dû à une diminution brutale des précipitations et non pas à une modification du régime saisonnier.

Ainsi, à partir des témoins paléocéologiques, trois grandes modifications climatiques ont marqué les zones d'étude pendant les 40000 dernières années. Ces modifications ont été synthétisées par SERVANT (1983 et 1973):

A – une première phase dite épisode Ghazalien (40 000-20 000 B.P.) est caractérisée par des conditions climatiques très humides qui ont favorisé une forte activité fluvio-lacustre dans les milieux sahariens.

B – une deuxième phase, sèche, interrompt la première (A-) et se caractérise d'après SERVANT (1983 et 1973) par une longue période aride qui aboutit à un remaniement éolien, nommé épisode Kanémien (20000-12 000 B.P.). Cela a abouti à la mise en place d'un Erg qui s'est étendu jusqu'à la frontière nord du Nigeria à plus de 400 km plus au Sud des ergs du Sahara actuel situés autour du 18° parallèle. Le vent a modelé les dunes selon la « direction NE-SW, comparable à l'Harmattan actuel ». Ces dunes sont encore visibles aujourd'hui dans les régions du Manga et du Mounio qui font partie des zones étudiées.

C – après la longue phase aride (B-) vers 12000 B.P. une troisième phase, humide, marque les milieux sahariens. Celle-ci est caractérisée par une phase humide souvent entrecoupée de brefs

épisodes secs jusqu'à la dégradation climatique actuelle. Cette phase est subdivisée en trois sous-phases à savoir : C1, C2 et C3.

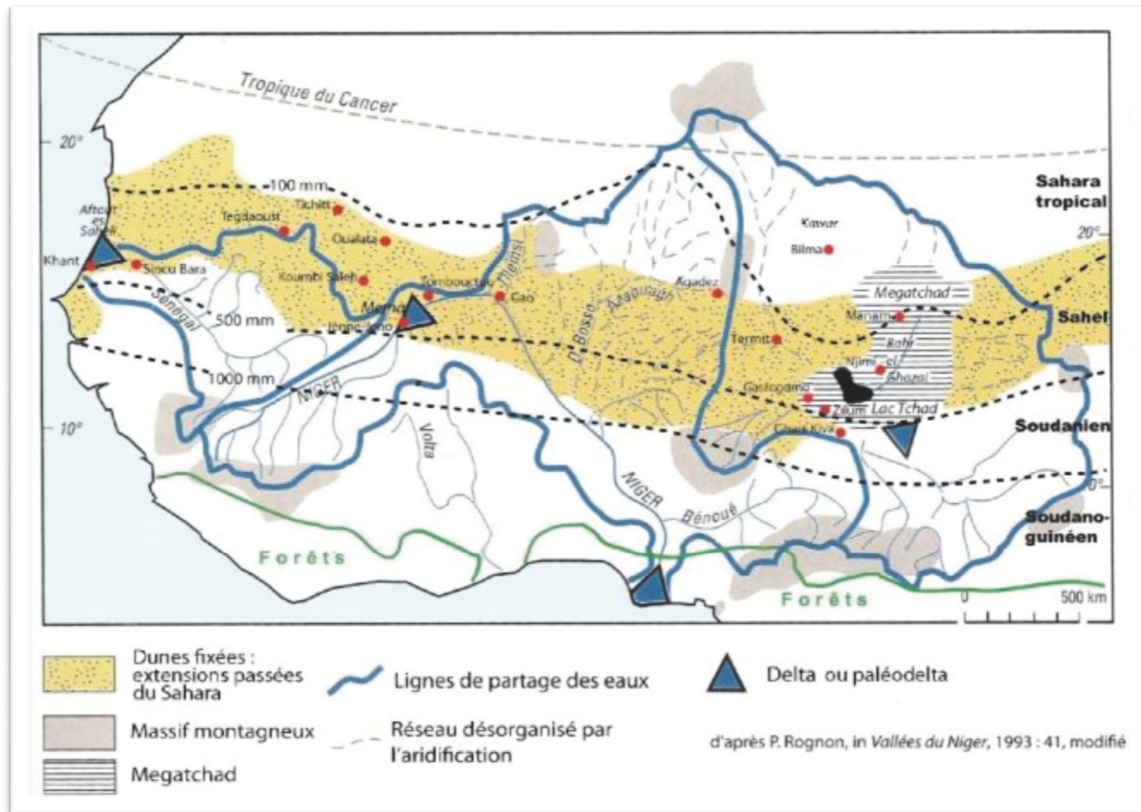
C1- Celle-ci correspond au « rétablissement d'une phase humide sur l'ensemble du bassin du Lac Tchad ». Elle atteint un maximum humide vers 9000-8000 B.P. selon SERVANT (1983 et 1973), le ruissellement s'est accru et a occasionné par exemple la formation des lacs de piedmont à proximité des massifs tels que Termit et Agadem. En parallèle, la nappe phréatique remonte pour affleurer dans les bas-fonds interdunaires, provoquant alors l'individualisation de grandes mares dans le Manga et le Mounio. Cette phase a favorisé le développement de la végétation qui fixe les dunes formées pendant la phase B- et a permis selon la migration de la végétation vers le Nord, le développement d'une végétation de type soudanienne à guinéenne plus au Sud du Sahara (SALZMANN & WALLER 1998, LEZINE 1989).

C2- vers 7 500 B.P. après une brève phase de dégradation climatique, une pulsation humide réapparaît vers 7000 ans B.P. mais pas uniformément sur l'ensemble du bassin. Les régions de Termit et du sud du Niger enregistrent par exemple une remontée lacustre tandis qu'à Agadem les bas-fonds restent marécageux. Le lac Tchad aurait atteint sa cote maximale à cette période. Aujourd'hui le seul vestige visible de ce paléolac est un cordon littoral discontinu à 320 m d'altitude, daté vers 6500 ans B.P. (THIEMEYER, 1992).

C3- cette phase marque le début de la dégradation des milieux dunaires sahélo-sahariens consécutive à la dégradation générale du climat qui aurait commencée autour de 4000-3000 BP. Elle se traduit par un abaissement des niveaux lacustres et de nombreuses fluctuations qui vont conduire à l'extension progressive du Sahara vers le Sud et son organisation actuelle (MALEY, 1977).

9.5.2. Mise en place des différentes générations de dunes au sahel

Selon VÖLKE (1989) et SERVANT (1983 et 1973), trois (3) générations de dunes marquent l'histoire des paysages dunaires fixés par la végétation dans les zones d'études. Elles marquent aussi les différentes phases successives des périodes humides et arides ayant marquées l'histoire climatique des bordures Sud du désert du Sahara pendant la Période Quaternaire. Les dunes vives du Sahara auraient atteint la latitude 14°N et la génération de dunes identifiée dans les zones d'études est datée de la période très aride de la fin Pléistocène (20000-16000 BP). Au début Holocène, un retour d'une période humide a favorisé la fixation des dunes de la première génération et la mise en place d'une pédogénèse ayant abouti à la formation des sols dunaires. La deuxième génération des dunes quant à elle, a été mise en place puis fixée pendant la période humide Mi-Holocène. Cette période est caractérisée par des événements lacustres ayant favorisés le lessivage des sols nés de la première génération des dunes. Suite à une autre phase aride une troisième génération de dunes a été mise en place à la période Holocène récente (3000-2500 ans), une autre phase plus ou moins humide a favorisé sa fixation par la végétation. C'est cette troisième génération de dunes qui couvre actuellement les paysages dunaires concernés par cette d'étude. Ces dunes sont actuellement en dégradation et leurs sols hérités aussi (tableau n°19 et carte n°10 ci-dessous).



Carte n°10 : Extension passée du Sahara et paysages dunaires dans les bassins sédimentaires du Lac Tchad et celui des Iullemenden. (D'après ROGNON 1993)

Période	Fluctuations climatiques et changements écologiques	Auteurs
20000-16000 BP	Hyperaridité forte activité éolienne et dégradation de G1 (Génération de dune 1)	VÖKEL 1989, SERVANT 1973 – 1983,
14000-12000 BP	Phase humide forte activité hydrique, installation de la végétation, pédogénèse active et fixation des dunes	BECKERS et SCHÜTT 2009, SCHÜTT et KRAUSE 2009, VÖKEL 1989, SERVANT 1983-1973
9000-5000 BP	Fin de l'optimum humide, phase hyperaride, forte activité éolienne et dégradation de G1 puis formation de G2	GARNIER et al., 2015, VÖKEL 1989, SERVANT 1973 -1983
Holocène 6000 -4000 BP	Climat humide favorable au Sahara Méridionale et nord Sahel. Chasse et élevage	GARNIER et al. 2015, BRAUNECK et al 2013, BAUMHAUER R. et al 2009 SPONHOLZ 2009, BAUMHAUER & FELIX- HENNINGSEN 2009, FELIX- HENNINGSEN et al 2010, SPONHOLZ et al 1993, TAUVERON et al. 2009, BECKERS et SCHÜTT 2009, SCHULZ et al 2009, MAINGUET 1977
Autour de 4000 BP	Période sèche intercalation sableuse des séries stratigraphiques	TAUVERON et al. 2009
Fin 4000 BP	Période humide	VERNET 2006, ROSET 1987
3000 BP	Pluies courtes et violentes, transformation des lacs en Sebkhha, dégradation de la végétation, apparition des dunes, migration de la faune vers le Sud	MCINTOSH 1993, ROSET 1987, MALEY & VERNET 2013
Après 3000 BP	Crise arides (dunes G3)	SCHWARZ 1992, VÖKEL 1989, SERVANT 1983-1973
A partir de 2500-2000 BP	Basculement définitifs, fin de l'épisode humide Holocène, aridité visible, mise en place des variantes des paysages actuels, alternance marquée des saisons, recule des forêts en Afrique de l'ouest (30 à 40% des pollens de graminées de savane	GARNIER et al., 2015, MALEY 2001, MALEY & BRENAC 1998
Après 2000 BP	Apparition des environnements semi-arides actuels : destruction des formations forestières et disparition des espèces soudaniennes	MONTEILLET 1988, LEZINE 1989, PERSON et al 2001, SCHULZ et al 2009
1800 -1700 BP	Retour période humide, forte érosion dans le Bahr et Ghazal dans la région du Lac Tchad	GARNIER et al., 2015, VERNET 2006
Début 1 ^{er} millénaire	Rupture totale avec l'héritage écologique. Mise en place des paysages écologiques du Sahel Subactuel, Installation du Sahara jusqu'à 18°N	VERNET 2006
6 ^e -7 ^e siècle	Réurrence humide et retour du Sahara à 20-21°N colonisation agricole des terres basses des fleuves dont les crues diminuent, pic de précipitations	BOCOUM et MCINTOSH 1995, BALLOUCHE et al 1993, BONNEFILLE 1993
7 ^e - 8 ^e siècle	Changements des paysages avec les progrès de l'agriculture création des villes Sahélo-Sahariennes : Koumbi Saleh, Gao, Djenne	FELLER et al 1981
8 ^e - 11 ^e siècle	Pluviométrie supérieure à l'actuelle	MALEY 1981
11 ^e - 14 ^e siècle	Soubresaut climatique, aridification accrue abandon de villes du nord sahel Djenne	MCINTOSH 1993, MALEY 1981, el BEKRI et EL IDRISI, GADO 1980
15 ^e siècle	Péjoration climatiques et déclin des villes du Sahara méridional (Koumbi Saleh)	DEVISSE & DIALLO 1993
20 ^e siècle	Sécheresse récentes au sahel dégradation du couvert végétal	GARNIER et al., 2015
Période actuelle	Actuellement, assiste-t-on à des fluctuations diverses caractérisées par des variations décennales des conditions climatiques (sécheresses et inondation). Dans les franges Sahélo-Saharienne du Niger, il subsiste encore des systèmes dunaires qui témoignent de ces fluctuations et des conséquences visibles (FINK et al. , 2010, OZER & ERPICUM 2003 et 1995)	

Tableau n°19. Synthèse des différentes modifications ayant affecté les paysages dunaires des zones étudiées.

9.6. Conclusion partielle

La carotte des sédiments prélevés dans le lac de Guidimouni fonctionne comme une archive des variations environnementales intervenues au cours des 100 dernières années. Les informations enregistrées dans ces sédiments montrent à travers les analyses stratigraphiques et polliniques, qu'une végétation de type savane sahélienne ouverte à *Acacia*, *Balanites*, *Bauhinia*, *Combrétacée*, *Maerua* et *Mitragyna* avait prévalu. La pratique agraire du brûlis demeure toujours comme technique agricole car dans l'ensemble de la carotte il y a une présence massive des particules microscopiques de charbon de paille et très peu de bois. En outre dans la partie centrale de la carotte, on distingue nettement les traces d'assèchement ou d'une forte réduction du niveau du plan d'eau du lac. Cette partie indiquerait bien les sécheresses des années 70/80. Ceci pourrait expliquer aussi la pauvreté en pollens de cette partie de la carotte. Enfin, cette analyse pousse à des questionnements relatifs à l'avenir des milieux dunaires sahéliens surtout que des discussions sur le reverdissement du sahel sont en cours.

Conclusion générale et perspectives

10. Conclusion générale et perspectives

10.1. Conclusion générale

Dans les conditions climatiques actuelles et les influences humaines diverses, les paysages dunaires des régions sahéniennes subissent de grandes transformations. Ces transformations sont caractérisées par la modification de la couverture végétale et des remaniements divers des dunes anciennement fixées par la végétation. Les phénomènes d'érosion et de dégradation sont bien remarquables. Ces dynamiques suscitent des questionnements relatifs à la **résilience des écosystèmes de ces paysages dans ces conditions de dégradations**. Pour répondre à ces questionnements, cette étude a eu pour objectif de **comprendre et à d'identifier les facteurs, les processus et les impacts clés de dégradation dans ces milieux**. Ils ont aussi visé à **détecter les possibilités de régénération**. Pour estimer ces phénomènes de dégradation-régénération des paysages dunaires, l'étude s'est concentrée sur la dynamique de la végétation et les modifications *in situ* des matériaux des couches superficielles des dunes fixées par la végétation. En plus, une analyse des archives sédimentaires lacustres a été entreprise afin de reconstituer l'évolution historique de ces paysages.

Les résultats de cette étude montrent que la **dégradation des paysages dunaires au Niger est intrinsèquement liée à l'état de la couverture végétale** qui, dépend aussi des variations saisonnières et interannuelles des pluies et de l'humidité dans les corps dunaires. Le type de formation végétale et la forme des systèmes racinaires dominants sont aussi déterminants dans le développement et la survie de la végétation dans les milieux dunaires. En dehors de ces facteurs naturels, la dégradation des paysages dunaires est aussi influencée par les activités humaines qui conduisent à travers la surexploitation et l'extension des terres agricoles, la déforestation et le surpâturage, à la destruction de la végétation qui protège les dunes de l'érosion.

Cependant, **ces phénomènes de dégradation ne sont pas irréversibles si les influences humaines sont contrôlées**. En effet, **les dunes pourraient bien se régénérer car elles ont toujours été confrontées à des changements au cours de leur histoire. Ces changements ont été parfois plus importants par le passé que ceux observés actuellement**. Par ailleurs, la comparaison des caractéristiques géophysiques et géochimiques des matériaux des couches superficielles des dunes a mis en exergue des changements qui influencent parfois positivement les sols à des échelles régionales et locales. Malgré des conditions semi-arides très peu favorables à l'altération chimique une très faible altération chimique des matériaux se produit dans ces milieux dunaires sahéniens où il pleut entre 300 à 500 mm par an. Cette étude montre aussi qu'à une échelle microscopique, certains types d'organisations de surface des dunes (phénomènes d'encroûtement) sont **favorables à un maintien de l'équilibre écologique et de la stabilité des dunes, si celles-ci ne sont pas perturbées par les actions de l'homme**. Ces micro-organisations de surface des sols peuvent aussi servir de points de départ pour la régénération des dunes dégradées et la fixation des jeunes édifices de remobilisation éolienne.

Enfin, les résultats des analyses stratigraphiques et palynologiques de la carotte de Guidimouni montrent que les paysages dunaires de la région ont subi des changements au cours de ces 100-120 dernières années. En effet, les sécheresses des années 70 et 80 ont contribué significativement à la dégradation de la végétation locale et les activités humaines ont toujours influencés ces changements. La présence des microparticules de charbon dans les sédiments montre que le feu est utilisé depuis longtemps comme outil agricole. Et jusqu'à présent les

paysans l'utilisent pour déficher les champs et gagner des espaces cultivables. Cette présence de charbon dans les sédiments lacustres actuels est aussi remarquée dans les sédiments paléolacustres Holocène (Brauneck 2010, Baumhauer et al (2009). Ceci indique que **le charbon est un excellent matériau d'investigation et un bon indice dans les enregistrements sédimentaires**. Enfin cela confirme aussi que **des milieux lacustres fonctionnent comme des archives relativement fiables pour comprendre les paléo-changements environnementaux**.

10.2. Perspectives

A l'issue des différentes conclusions tirées sur les différentes thématiques abordées dans ce travail, les recherches futures seront orientées vers **les processus actifs qui influencent les échanges directs entre les parties superficielles des sols et sédiments dunaires et le substratum sableux sous-jacent**. Elles doivent être aussi orientées sur le rôle actif des croûtes dans les processus de pédogenèse afin d'évaluer les potentialités de régénération des milieux dunaires dégradés. Il serait de ce fait très important d'étudier la chrono-stratigraphie des croûtes sur les dunes jugées « stables » et sur les jeunes édifices de remobilisation issus de l'érosion des dunes fixées. Enfin, pour mieux comprendre la dynamiques de la végétation dans les paysages dunaires, **des études doivent être entreprises en vue de mieux comprendre les mécanismes *in situ* de transferts de l'eau et des nutriments dans les couches superficielles des dunes d'une part et d'autre part, les mécanismes de transfert des eaux des pluies dans les corps dunaires**. En effet, c'est de ces deux mécanismes que dépendent les nappes phréatiques (et eau capillaire) qui assurent la survie de la végétation sur les dunes.

Références bibliographiques

- ABICHOU, A. (2009): The microstratigraphy and micromorphology of a Holocene palaeolake in Southern Tunisia p187-186. *Palaeoecology of Africa* N°29 269 p.
- ABICHOU, A. (2002): les Changements des paysages du Bassin-versant de l'oued Tataouine-Fessi (Sud Est tunisien): étude multiscalaire et micromorphologique des remplissages des sebkhas et étude des états de surface. Thèse de doctorat Université Michel de Montaigne Bordeaux III CNRS 410 pages.
- ALI, A.; LEBEL, T. & AMANI, A. (2005): Estimation of Rainfall in the Sahel. Part 1 : Error Function. *J Appl Meteorol* ; 44 : 691-706 p.
- AMBOUTA, K. J. M. (1996) jachère et croûte d'érosion au sahel. *Sécheresse* N°4 vol.7 269-275p
- AUBREVILLE, A., (1949) : Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Ed. Géogr. Marit. et Colon., Paris, 255 p.
- AUBREVILLE A. PATTERSON J.R., COLLIER F.S., BRYNMOR J., DUNDAS J., MATHEY J. AND BACHELIER R. (1973) : Rapport de la mission forestière anglo-française Nigéria-Niger (décembre 1936-février 1937). - *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 148, pp. 3-26.
- BALLOUCHE, A. & NEUMANN, K. (1995): „A new contribution to the Holocene vegetation history of the west African Sahel ; pollen from Oursi, B.F. and charcoal from tree sites in N.E. Nigeria“. *Veget. Hist. Archaeobot.* N° 4 31-39 p.
- BALLOUCHE, A. ; KÜPPERS, K. ; NEUMANN, K. & WOTZKA, H.P. (1993) : Aspects de l'occupation humaine et de l'histoire de la végétation au cours de l'Holocène dans la Région de la chaîne des Gobnangou, SE Burkina Faso. *Bericht des Sonderforsch. Bd 1* 13-31, 268 p
- BARRY, J.P., CELLES, J.C. & MUSSO, J., (1986) : Le problème des divisions bioclimatiques et floristiques du Sahara. Note V : du Sahara au Sahel, Un essai de définition de cette marche africaine aux alentours. *Ecol. Médit.*, XII, 187-235.
- BARRY J.P (1982): La frontière méridionale du Sahara entre l'Adrar des Iforas et Tombouctou. *Ecol. Médit.*, 7/3, 99-124 p.
- BAUMHAUER, R. (2014): Some new insights into palaeoenvironmental dynamic and Holocene landscape evolution in the Nigrian Central Sahara (Ténéré, Erg of Ténéré, Erg of Fachi-Bilma) in *Zbl. Geol. Paläont. Teil I, Jg. 2014, Heft 1*, 387-403 p.
- BAUMHAUER, R.; FELIX-HENNINGSSEN, P.; & SCHÜTT, B. (2009): Geomorphological and palaeoenvironmental research in the South-Central Sahara in *Palaeoecology of Africa*, 29: p.1-21 In: Baumhauer, R. & Runge, J. (Eds.2009): *Holocene Palaeoenvironmental history of the Central Sahara*.252 p.
- BAUMHAUER, R.; SCHULZ, E. & POMEL, S. (2004): Environmental changes in the Central Sahara during Holocene-The Mid-Holocene transition from freshwater lake into sebkha in the Segedim depression, NE Niger. *Springer* N° 102 30-45 p.
- BAUMHAUER, R.; BUSCHE, D. & SPONHOLZ, B. (1989): Relief history and palaeoclimate of the Saharan East Niger. *Geographische Rundschau*. Vol. 41, Issue 9, 493-499 p.
- BECKERS, B. & SCHÜTT, B. (2009): Different dimension of recent vegetation dynamics of North and West Africa. In *Palaeoecology of Africa* N°29. 198-2018 p.
- BELNAP, J., PHILLIPS, S.L., WITWICKI, D.L. & MILLER, M.E. (2008): Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated biological soil crusts. *Journal of Arid Environments* 72: 1257-1264 p.
- BELNAP, J.; PHILLIPS, S.L.; HERRICK, J.E.; JOHANSEN, J.R. (2007): Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: implications for land management. *Earth Surface Processes and Landforms* n°32: 75-84 p.
- BELNAP, J. (2006): The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes* n°20: 3159-3178 p.
- BELNAP, J. & LANGE, O.L. (2001): Biological soil crusts structure, function and management. *Ecological Studies* 150 Springer Berlin 202-213 p.

- BELNAP, J.; KALTENECKER, J.H.; ROSENRETER, R.; WILLIAMS, J.; LEONARD, S. & ELDRIDGE, D. (2001): Biological soil crusts: ecology and management. Technical Reference 1730#177:2, U.S. Department of the Interior 110 p.
- BELNAP, J. & GILLETTE, D.A. (1998): Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments* n°39: 133-142 p.
- BELNAP, J. & GILLETTE, D.A. (1997): Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degradation and Development* 8: 355-362 p.
- BELNAP, J. & GARDNER, J.S. (1993): Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the Cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *Great Basin Nat* 53: 40#177:47
Belnap J (1995) Surface disturbances: Their role in accelerating desertification. *Environmental Monitoring and Assessment* 37: 39-57 p.
- BENDER, H., BOZZA, J. & OUSSEINI, I. (1991) : Influence du seuil d'épandage sur la végétation naturelle et les perspectives d'utilisation pour la production végétale (vallée de Tamazalak, Air, Niger) In : Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride (Étude par Kergreis A.), Actualité scientifiques universités francophones, Uref-Aupelf, John Libbey Eurotext, 267-274p.
- BIELDERS, CHARLES, RAJOT JEAN, AMADOU, M. (2002) : Transport of soil and nutrients by wind in bush fallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel. *Geoderma*, 109: 19-39 p.
- BRAUNECK, JENS. (2010): Late Quaternary climate changes in central Sahara. New evidence from palaeoenvironmental research in NE-Niger. *Uni-Würzburg. Geographisch Institut*. 158 p.
- BREUNIG, P. & NEUMANN, K. (2002) : Continuity or Discontinuity ? The first Millennium BC crisis in West Africa Prehistory . In Vernet R. (2006) : évolution du peuplement et glissement des isohyètes à la fin de la préhistoire et au début de l'histoire en Afrique de l'ouest sahélienne. *Mande Studies* N°6 29-48 p.
- BREWER, R. 1964 : Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons INC. 470 p.
- BUIS, E. et al (2009): Controls of plant functional surface cover types along a precipitation gradient in the Negev Desert of Israel. *Journal of Arid Environment* N° 82 p 82-90.
- BARTH, H., (1857-1858) : *Reisen und Entdeckungen in Nord-und Central-Afrika*. 5 vol. Gotha. p.
- CAILLEUX, ANDRE & TRICART, JEAN. (1959) : *Initiation à l'étude des sables et des galets*. C.D.U., Paris 1, 369 p.; 2, 194 p. et 3, 202 p.
- CAMPBELL, S. E. (1979): Soil stabilization by a prokaryotic desert crust: Implications for precambrianland biota. - *Origins Life* n°9: 335-348 p.
- CAPOT-REY R. (1953) : *Le sahara francais*. Paris Presse univ. de France, 564 p.
- CASENAVE, A. & VALENTIN, C. (1990) : Les états de surface : une des clefs de l'hydrologie sahélienne. In *International Water Ressources*, p. 135-147p.
- CASENAVE, A. & VALENTIN, C., (1989) : Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Ed. de l'ORSTOM, Paris, 229 p.
- CELLES J.C. ET MANIERE R. (1983) 29-35 in PETIT-MAIRE N. ET RISER J. (1983): Sahara ou Sahel ? Quaternaire récent du Bassin de Taoudeni (Mali). 473 pages
- CHEN, L.; XIE, Z.; HU, C.; LI, D.; WANG, G. & LIU, Y. (2006): Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid environments* n°6. Elsevier 521-527 p.
- CHAPPELL A., AGNEW, C.T. (2004): Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931-90) as an artifact of changing station. *Int J Climatol* n°24 : 547-54p.
- CRISTIANO, N. 2009: Micromorphology of some Phosphatic Inclusions and Neoformations of Occurring in Archaeological Deposit. 89-98 p. in Thiemeyer H. (2009)
- D'Hoore, J.L. (1964) : Soil map of Africa (scale:1:5000000, plus explanatory monograph). Commission for Technical Co-operation in Africa, n° 93, 205 p.

- DAGMAR, F. 2009: Micromorphological Investigation of Laminated Sediments of Early Bronze Age Settlement Mount Tell Chuera, Syria 35-43 p in Thiemeyer H. (2009)
- DAI, A., LAMB P.J., TRENBERTH, K.E., HULME, M., JONES, P.D. & XIE, P. (2004): The recent Sahel drought is real. *Int J Climatol* ; 24 : 1323-31 p.
- DANIEL, R. MUHS, PRINS, M.A. & MACHALETT, B. (2014): Loess as a Quaternary Palaeoenvironmental indicator in *PAGES 2014 vol 22 N°2* 58-115 p.
- DANIN, A. (1978): Plant species diversity and plant succession in a sandy area in the northern Negev. *Flora* 167: 409-422p.
- DESCROIX, L., MAHE, G., LEBEL, T., G., FAVREAU, G., GALLE, S., GAUTIER, E., OLIVRY, J-C., ALBERGEL, J., AMOGU, O., CAPPELAERE, B., DESSOUASSI, R., DIEDHIOU, A., LE BRETON, E., MAMADOU, I., AND SIGHOMNOU, D. (2009) : Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis, *J. Hydrol., AMMA 25 special issue.*, 375, 90–102 p.
- DESCROIX, L., VIRAMONTES, D., ESTRADA, J., GONZALEZ BARRIOS, J.L. & ASSELINE, J-P. (2007): Investigating the spatial and temporal boundaries of Hortonian and Hewlettian runoff in Northern Mexico, *J. Hydrol.*, 346, 144–158 p.
- DESCROIX, L. (2007) : Sols, eaux et gestion conservatoire. *Compte rendu de conférence FLSH/UAM Niamey* 10 p.
- DEVISSE, J. & Diallo B. (1993) : « Le seuil du Wagadu ». In *Vallée du Niger* (Paris : RMN)103-125 p.
- DEVISSE, J. (1982) : L'apport de l'archéologie à l'histoire de l'Afrique Occidentale, entre le 5e et 12e siècle. *C.R. Acad.Inscript. et Belles Lettres*, Janv-Mars 157-176 p.
- DIDIER, ROGER & SAINT ARMAN (1969) : le Continental Terminal et son influence sur la formation des sols au Niger. *Cah.ORSTOM.Sér.Pedol. Vol. VII N° 4* 562-584 p.
- DURAND, A. ; FONTES, J. C. ; GASSE, F. ; ICOLE, M. & LANG, J. (1984) : Le nord-ouest du lac Tchad au Quaternaire : étude de paléo- environnements alluviaux, palustres et lacustres. *Palaeoecology of Africa*, vol 16, 215-244p.
- ETTL, H. & GÄRTNER, G. (1995): *Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen.* – Jena.
- EWING, R. P. & GUPTA, S. C. (1994): Pore-scale network modeling of compaction and filtration during surface sealing. – *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 58: 712-720 p.
- FANGFANG, S. et SHENGGAO, L. 2014 : Biochar improve aggregate stability, water retention and pore-space properties of clayey soil. 26-33 *J.plant Nutr. Soil Sci.* n°177 108 p.
- FAO (1990): *Guidelines for Soil Profile Description.* The 3th. Revised edition. Soil Resources, Management and Conservation Service, Land und Water Development Division, FAO Rome.
- FAO, ISRIC & AISS, (1999) : *Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols. Rapport sur les Ressources en Sols du Monde.* Rome ; 96 p.
- FAO-UNESCO (1974): *Soil Map of the World 1/5000000 Volume 1 Legend UNESCO*, Paris
- FAURE, H. 1966 : *Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger Oriental.* Mém. BRGM n°47. Paris, 630 p.
- FEDO, C.M., NESBITT, HW & YOUNG, G.M. (1995): Unraveling the effect of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implication for paleo-weathering conditions and provenance. *Geology* N° 23. 921-924 p.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. , PETER, K. (2009): Palaeo-climatic evidence of soil development on Sahelian ancient dunes of different age in Niger, Chad and Mauritania . p 91-105 in *Palaeoecology of Africa* N°29 269 p.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. ; KORNATZ, P. & EBERHARDT, E. (2009): Palaeo-climatic evidence of soil development on Sahelian ancient dunes of different age in Niger, Chad and Mauretania. – In: Baumhauer, R. & Runge, J. (Eds.): *Holocene Palaeoenvironmental history of the Central Sahara.* – *Palaeoecology of Africa*, 29: 91 – 105 p.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (2004): *Genesis and Paleo-ecological Interpretation of Swamp Ore Deposits at Sahara Paleo-Lakes of East Niger.* Springer N° 102 47-72 p.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (2003): *Genesis and paleo-ecological interpretation of swamp ore deposits at Sahara paleo-lakes of East Niger.* – In: SMYKATZ-KLOSS, W. & FELIX- FELIX-

- HENNINGSSEN, P. (Eds.): Palaeoecology of Quarternary Drylands. – Lecture Notes in Earth Sciences, Springer N°102, 47 – 72 p.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (2000): Paleosols on Pleistocene dunes as indicators of paleo-monsoon events in the Sahara of East Niger. *Catena* 41: 43 – 60 P.
- FELLER, C. et al (1981) : Etudes palynologique et pédologique d'un site protohistorique de la moyenne vallée du fleuve sénégal, *Palaeoecology of Africa* n° 13 235-248 p.
- FINK, H. A.; JON, M. S. & SIMONE, K. (2010): On the Potential Causes of the Nonstationary Correlations between West African Precipitation and Atlantic Hurricane Activity. P 5437-5456 in <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010JCLI3356.1>
- FISCHER T. et al (2010): Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crust on inland dunes, Brandenburg, NE-Germany, *Catena* n° 80 47-52 p.
- GADO, B. (1980) : Le Zarmatarey. Contribution à l'étude des populations d'entre Niger et Dallol Mawri. Etude Nigériennes , N° 45 Niamey 356 p.
- GARCIA-PICHEL, F. & BELNAP, J. (1996): Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *Journal of Phycology* N°32: 774-782 p.
- GARNIER, A. ; LESPEZ, L. ; OZAINNE, S. ; BALLOUCHE, A. ; MAYOR, A. ; LE DRÉZEN, Y. ; RASSE, M. & HUYSECOM, E.(2015): L'incision généralisée de la vallée du yamé (mali) entre 2 350 et 1 700 ans cal. bp : quelle signification paléoenvironnementale et archéologique ? *Quaternaire*, N° 26, (1), 49-66 p.
- GASSE, F. (2002): Diatom-inferred salinity and carbonates oxygen isotopes in Holocene waterbodies of the Western Sahara and Sahel (Africa). *Quarternary Science Reviews* n° 21, 737-767 p.
- GASSE, F. (2000): Hydrological changes in the African tropics since the last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* n° 19, 189-211 p.
- GAVAUD, M. (1966): Etude pédologique du Niger Occidental. Rapport général Tome II+III. Monographie des sols. Centre ORSTOM de Hann, Dakar. 523 p.
- GIESSNER, K. (1988): Sahara-"Die grosse Wüste" als Forschungsobjekt der Physiogeographie. *Eichstätter Hochschulreden* 50, 70 p.
- GOMEZ, A. ; SOLDA, P. ; LAMBROT C. ; WILBERT, J. & JUSTE, C. (1992) : Bilan des éléments-traces métalliques transférés dans un sol sableux après 16 années d'apports continus et connus de boues de station d'épuration et de fumier de ferme en monoculture irriguée de maïs, *Conv. Min. Env. / INRA* n° 89-256, 57p.
- GOMMEAUX, M. ; AYACHI, S. ; MARIN, B. ; PONTHEU, M. ; CANCES, B. ; RALAHIMANANA, C. ; MALAM ISSA, O. ; MOERDIJK, T. & STAL, L (2010). Influence of slope and land use on biomass, diversity and physico-chemical properties of BSC from sahelian part of western Niger. Workshop « Biological Soil Crusts in Ecosystems – their Diversity, Ecology, and Management; 22-25 p.
- GOUDIE, A. S. & KENNETH, P. (1983): Chemical sediments and Geomorphology. Precipitates and residua in the Near-surface Environment. 439 p.
- GREIGERT, J. & POUGNET, R. (1967) : Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. *Mém. BRGM* n°48. Paris, 239 p.
- GREIGERT, J. AND R. POUGNET, (1967): Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. Editions du Brgm, Paris, 273 pp.
- GREIGERT, J. (1963): Description des formations crétacées et tertiaires du Bassin des Iullemeden, Editions du BRGM, Paris, 234 p.
- GRONDIN, A. E. & JOHANSEN, J. R. (1993): Microbial spatial heterogeneity in microbiotic crusts in Colorado National Monument. 1. Algae. – *Great Basin Naturalist* 53: 24-30 p.
- HAGEDORN, H., (1985) : Formen und Bilder der Wüste am Beispiel der Sahara. *Natur und Museum*, 115, 210-230 p.
- HAHN A. & KUSSEROW H. (1998): Spatial and temporal distribution of algae in soil crusts in the Sahel of W Africa: Preliminary results. *Willdenowia* N° 28: 227-238 p.
- HARNOIS, L. (1988): The CIW Index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* N°

55. 319-322 p.
- HARPER, K. T. & MARBLE, J. R. (1988): A role for nonvascular plants in management of arid and Willdenowia semiarid rangelands N°28 133-169 p. in: Tueller, P. T. (ed.), Vegetation science applications for rangeland analysis and management. Dordrecht.
- HARTMUT, L. (1977): Feld und Labor Methoden des Geomorphologie. De Gruyter Lehrbuch. 446 p.
- HEEJIN, L. (2009) : Soil Micromorphology and the Recognition of Ancient Wet Rice Farming: A Cas Study from Gulhwa, South Korea. P 59-70 in Thiemeyer H. (2009)
- HEINRICH, B. et NICOLE, D. (2009): A review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions. Institut für Geologie und Paläontologie, Westfälische Wilhelms Universität, 48149 Münster, Germany. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies (CO2CRC), The University of Adelaide. in: Arnaud, E., Halverson, G.P. & Shields, G.A., (eds.), The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society, London, Memoir.
- HEIRI, O., LOTTER, A.F. & LEMCKE, G., (2001): Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of Paleolimnology, 25(1): 101-110 p.
- HERRMANN L.; MOUNKAILA M. & GAEF, F. (2009): Are there valuable pedological palaeoenvironmental indicators in North Chad? In Palaeoecology of Africa N°29, 107-126 P.
- HERRMANN, L. STAHR, K. & SPONHOLZ, B. (1997): Identifizierung trockenzeitlicher und regenzeitlicher Staubquellen im östlicher Westafrika. Würzburger Géographische Arbeiten N°92 189-211 p.
- HERRMANN, L. ; SPONHOLZ, B. & STAHR, K. (1997): Identifizierung trockenzeitlicher und regenzeitlicher Staubquellen im östlichen Westafrika. Würz. Geogr. Arbeiten, 92 : 189-211 p.
- HERRMANN, L. (1996): Staubdeposition auf Böden West-Afrikas. Eigenschaften und Herkunftsgebiete des Staube und ihr Einfluß auf Boden und Sta Werner S.K. et Felix-Henningsen P. (2004): Palaeoecology of Quaternary Drylands. Ed. Springer N° 102. 250 P.ndseigenschaften. Universität Hohenheim 239 p.
- HUBERT, P.; CARBONNEL, J.P. & CHAOUCHE, A. (1989): Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. J. Hydrol. 110, 349-367 p.
- IBRAHIM, S. OSSEINI, I. (2009) : The Sahelian and saharan dune systems of Niger. A comparison of their granulometric characteristics. Palaeoecology of Africa N°29, 239-246 P
- IBRAHIM, S. (2007) : Changements climatiques et dynamique actuelle de dégradation éolienne des écopaysages dunaires au Sahel : étude comparée de l'efficacité de l'éolisation au Sahel (Sud-Est du Niger) et au Sahara (extrême Nord du Niger) DEA Université de Niamey 71 p.
- IBRAHIM, S. (2005) : Analyse des conditions de mobilisation éolienne autour des cuvettes du Mounio (Région de Zinder): étude de la dynamique d'ensablement des cuvettes et de l'impact des haies mortes sur les flux éoliens (sites de Tchago et de Woro). Mémoire de fin d'études, Université Abdou Moumouni de Niamey, 125 p.
- IMYIM, A. (2000) : Méthodologie d'évaluation environnementale des déchets stabilisés par liants hydrauliques. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, 181 p.
- ISICHEI, A. O. (1980): Nitrogen fixation by blue-green algal soil crusts in Nigerian savanna. - 191-199 p. in: Rosswall, T. (ed.), Nitrogen cycling in West African ecosystems. - Stockholm.
- JAYAWARDENA, U.S. et IZAWA, E. (1994): A new Chemical Index of Weathering for metamorphic silicates rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. Engineering Geology N° 36 , 303-310 p.
- JUSTE C. & SOLDA P. (1988) : Influence de l'addition de différentes matières fertilisantes sur la biodisponibilité de cadmium, du manganèse, du nickel et du zinc contenus dans un sol sableux amendés par des boues de station d'épuration, Agronomie n°8, 897-904 p.
- KARL, E. & REHFUES, S. (1990): Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studentexte N°29, 2. Aulage Hamburg und Berlin. 294 p.

- KILIAN, C. (1932): Sur les conglomérats précambriens du Sahara central. Le Pharusien et le Suggarien. C.R. Soc. Geol. France., 87 p.
- KING L.C. (1967): The morphology of the earth. A study and synthesis of world scenery. 2nd éd. Oliver and Boyd, Edinburgh-London, 728 p.
- KUSSEROW, H. (2014) : Die Sahelzone Afrikas im Spannungsfeld zwischen Desertifikation und Salafismus in Zbl. Geol. Paläont. AdG (Afrikagruppe deutscher Geowissenschaftler) Teil I, Jg. 2014, Heft 1, 117-150 p.
- KUSSEROW, H. (1994): Quantitative und qualitative Erfassung von Vegetationsänderungen. Ein Beispiel aus dem Südsahel Malis. – Die Erde 125: 35-56 p.
- L'HÔTE, Y., MAHE, G., SOME, B. & TRIBOULET, J.P. (2002) : Analysis of a Sahelian index from 1896 to 2000 ; the drought continues. Hydrol Sci J; N° 47 : 563-572 p.
- LAMOUREUX, M. (1972): Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersialitique au Liban. ORSTOM Paris 266 p.
- Le HOUÉROU, H. N. (1989): The grazing land ecosystem of the African Sahel. – Berlin, etc.
- LENKA, L. VÁCLAV, K. & BAJER, A. (2009): The Geoarchaeological and Micromorphological Reconstruction of Medieval Food Store Room Floor Layers : the Case Study from Tisnov, Czech Republic. P71-79 p. ; in THIEMEYER H. (2009)
- LEZINE, A .M. (1989 b): Le Sahel: 20000 ans d'histoire de la végétation. Bull.Soc. Geol. France ,VI 35-42 p.
- LEZINE, A .M. (1989a): Late quaternary vegetation and climat of Sahel. Quaternary Res., N° 32 317-334 p.
- LOFTIS, S. G. & KURTZ, E. B. (1980): Field studies of inorganic nitrogen added to semiarid soils by rainfall and blue-green algae. – Soil Sci. 129: 150-155 p.
- LOUIS, P. (1970) : Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du lac Tchad. Mém. ORSTOM n°42 Paris, 312 p.
- MAINGUET, MONIQUE (1996): The Saharo-Sahelian global wind action system: one face of wind erosion analysed at a synoptique scale. In Wind erosion in West Africa: the problem and its control. Proceedings of International Seminar, (Stuttgart-Hohenheim: Margraf Verlag), 7-22 p.
- MAINGUET, M. (1991): Desertification. National background and human mismanagement. – Berlin,
- MAINGUET, M. (1977) : Analyse quantitative de l'extrémité sahélienne du courant éolien transporteur de sable du Sahara nigérien.CR. Paris n° 285 série D. 1029-1033 p.
- MAINGUET, M. ET CALLOT, Y.(1978) : L'Erg de Fachi-Bilma(Tchad-Niger) contribution à la connaissance de la dynamique des Ergs et des dunes des zones arides chaudes . Mémoire et documents. Nouvelle serie., n° 18 CNRS, Paris, 184 p.
- MALAM ISSA, O., DÉFARGE, C., TRICHET, J. & VALENTIN, C. (2009): Microbiotic soil crusts in the Sahelian part of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics. Catena n°77, 48-55 p.
- MALAM ISSA, O. 2009 : Vulnérabilité des croûtes biologiques et dégradation des sols en zone sahélienne. IRD.Niger.
- MALAM ISSA, O., DEFARGE, C., TRICHET, J., VALENTIN, C. & RAJOT, J.L. (2008): Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on Soil Porosity and water dynamics. CATENA: 23 p.
- MALAM ISSA, O. (1999) : Etude du rôle des croûtes microbiotiques dans les sols de deux écosystèmes sahéliens (jachères et brousse tigrée) au Niger: micromorphologie, propriétés physiques et biogéochimiques. Thèse doctorat. Université d'Orléans, France: 276 p.
- MALAM ISSA O., Le BISSONNAIS Y., DEFARGE C., TRICHET J. (2001): Role of a microbial cover on structural stability of a sandy soil in Sahelian part of western Niger. Geoderma N° 101:15-30 P.
- MALAM ISSA O., TRICHET J., DEFARGE C., COUTE A. & VALENTIN C. (1999) : Morphology and microstructure of microbiotic soil crusts on a tiger bush sequence (Niger, Sahel). Catena 37: 175-196 p.

- MALEY, J. & VERNET, R. (2013) : Peuples et évolution climatique en Afrique nord-tropicale, de la fin du Néolithique à l'aube de l'époque moderne. Afrique, débats, méthodes et terrains d'histoire. Vol.4: 50 p.
- MALEY, J. (2001): *Elaeis Guineensis* Jac. (oil palm) fluctuation in central Africa during the late Holocene: Climate or Human driving forces fort his pioneering species? *Veget Hist. Archeobot.*, N°10 117-120 p.
- MALEY, J. & BRENAC, P. (1998) : Vegetation dynamics, palaeoenvironments and climatic changes in the forest of western Cameroon during the last 28000 years BP. *Review of palaeobotany and palynology* N°99 157-187 p.
- MALEY, J. (1981) : Etude palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 3000 ans à l'époque actuelle. *Travaux et Documents de l'ORSTOM* N° 129 Paris
- MALLAM ABDOU, M. (2014) : États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. Université de Grenoble et Université de Niamey, 268 p.
- MAMAN, I. (2013): Etude intégrée de la résilience des systèmes sociaux de la limite nord des cultures pluviales dans le département de Goudoumaria face au changement climatique. Université Abdou Moumouni de Niamey 285 p.
- SCHULZ, E., VANNINA, U. & HALL, M. (2014) : The double mosaic-regeneration of vegetation and soil after clearing, burning and cultivation: lessons from the Forchtenberg experiment. *Vegetation History and Archaeobotany* Vol 23 (Suppl 1) 19-36 p.
- MARTIN, O. et SIEGFRIED, M. (2009): *Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. 8e Auflage Springer. 658 p.
- MARZO, M. & PUIGDEFABREGAS, C. (1993) : *Alluvial Sedimentation*. International Association of sedimentologists. Blackwell Sc. Publications. 586 p.
- MAUZ, B. & FELIX-HENNINGSSEN, P. (2005): Palaeosols in Saharian and Sahelian Dunes of Chad. *Archives of Holocene North African Climate Changes. – The Holocene*, 15: 453 – 458 p.
- McINTOSH, R.J. (1993) : the pulse model : genesis and accommodation of specialization in the Middle Niger. *Journal of African History* N°34 181-220 p.
- McINTOSH R. J. (1983) : floodplain géomorphology and human occupation of the upper inland delta of the Niger. *The Geographical Journal* , vol 149, N°2
- MENSCHING, H. G. (1990): *Desertifikation. Ein weltweites Problem der ökologischen Verwüstung in den Trockengebieten der Erde. – Darmstadt*.
- METTING, B. (1981): The systematics and ecology of soil algae. – *Bot. Rev. (Lancaster)* 52: 195-312 p.
- MEYERS, P. A. & LALLIER-VERGÉS, E. (1999) : Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates *Journal of Paleolimnology* N° 21: 345–372 p.
- MIALL A. D. (1984): *Principles of Sedimentary basin analysis*. Ed. Springer-Verlag New York(Berlin Heidelberg Tokyo 1984). 490 p.
- MILLOT, G. (1964) : *Géologie des argiles*. Masson, Paris, 500 p.
- MONTEILLET, J. (1988) : Environnements sédimentaires et paleoecology du Delta du Sénégal au quaternaire. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Perpignan In OZER, André. & OZER, Pierre. 2005 : Désertification au Sahel : Crise climatique ou anthropique ? *Bulletin des Séances de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer* 51: 395-423 p.
- MONOD, THÉODORE, (1986): The Sahel zone north of the equator. In : Evenary, M. Nov-Meir, J. (ed). *Hot deserts and arid shrublands*. Oxford, 203-243 p.
- MONOD, THÉODORE (1973) : *Les déserts*, Paris, Horizons de France, 247 p.
- MONOD, THÉODORE (1954) : Modes "contracté et diffus" de végétation saharienne. In: Cloudsley-Thompson, J.L.(ed.) *Biology of desert*. London, 35-44 p.
- NACHTIGAL, G., (1879) : *Sahara und Sudan*. 2 vol. Berlin. p. In Schulz , E. (1988).
- NESBITT, H. W. & YOUNG, G.M. (1982) : Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* N°299, 715-717 p.
- NESBITT H. W. et YOUNG G.M. (1989): Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of*

- Geology N°97, 129-147 p.
- NESBITT, H.W. (1979): Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of granodiorite. *Nature* N° 279; 206-210 p.
- Noy-Meir, I. 1973: Desert ecosystems: Environment and producers. – *Annual Rev. Ecol. Syst.* 4: 25-51 p.
- OUSSEINI, I. (2002) : Erosion et conservation des sols dans la vallée du Moyen Niger (République du Niger) : Interprétations préliminaires des mesures en parcelles et observation à l'échelle des petits et moyens bassins versants. *Human response to Drastic Change of Environments in Africa II Tokyo/Japan.* 39-70 p.
- OUSSEINI, I. (1987) : Etude de la répartition des formations quaternaires et interprétation des dépôts éoliens dans le Liptako Oriental (Rép. Du Niger). Thèse 3e cycle, Paris 6, 233 p.
- OUSSEINI, I. (1983) : Origine et évolution du matériel sableux dans le Liptako Oriental (Rep. Du Niger). Mémoire de DEA Paris VI, 84 p.
- OZER, P. & ERPICUM, M. (1995) : Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, 6: 103-108 p.
- OZER, P. (2000): Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification. *Geo-Eco-Trop.* 24: 1-317 p.
- OZER, P. (2002): Les lithométéores au Niger : mise au point. *Würzburger Géographische Arbeiten* N° 97 P7-32 p.
- OZER PIERRE., ERPICUM M., DEMAREE G., VANDIEPENBEECK M. (2003): The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrol Sci J*; 48 : 489-92 p.
- OZER, PIERRE (2010) : Désertification au Sahel : historique et perspectives. *BSGLg*, vol. 54 : 69-84 p.
- PARKER, A. (1970): An index of weathering for silicate rocks. *Geol.Mag.* N°10 501-504 p.
- PASTOURET L. et al., (1978). Late Quaternary climatic changes in western tropical Africa deduced from deep-sea sedimentation of the Niger delta. *Oceanologica Acta*, 1: 217-232 p.
- POMEL SIMON (2008) : La mémoire des sols. Presse Universitaire de Bordeaux. 343 p
- PUGNAIRE , F.I. ; LUQUE, M.T. ; ARMAS, C. ; & GUTIERREZ L., (2006) : Colonization processes in semi-arid Mediterranean old-field. *ELSEVIER: Journal of Arid Environment* n° 65, 591-603 p.
- PERSON, A. et al. (2001): Jardins perches néolithiques sur le dhar Oualata (Mauritanie). *Afrique : Archéologie et arts*, N°1 102-109 p.
- PIAS, J. (1967) : République du Tchad. Esquisse géologique des formations tertiaires et quaternaires du Tchad (Au sud du 16e parallèle). 1/1 000 000. Centre ORSTOM de Fort-Lamy, 2 feuilles.
- POMEL SIMON (2008): La mémoire des sols. Presse Universitaire. Bordeaux 343 p
- PRICE, J. R.; MICHAEL, A. & VELBEL (2003) : Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology* N° 202 397-416 p.
- PYE, K. & LANCASTER, N. (1993) Aeolian Sedimentation: ancient and Moder. *International Association of sedimentologists.* 116 p.
- QUEZEL, P. (1965) : La végétation du Sahara du Tchad à la Mauritanie. *Geobotanica selecta*, Stuttgart, 2, p. 333 p.
- REICHEL, R., FAURE, H., MALEY, J. 1992. Die Entwicklung des Klimas im randtropischen Sahara-Sahelbereich während des Jungquartärs- ein Beitrag zur angewandten Klimakunde. *Petermanns Geogr. Mittlgn.* 136,2-3,69-79 P
- REICHE, P. (1943): Graphic representation of chemical weathering. *Journal of sedimentary Petrology* N° 13, 58-68 p.
- RICHAR, I.M. & JOHN, C. (2009) : Illustrations from Soil Micromorphology and Complementary Investigation. P 81-87; in THIEMEYER H. (2009)

- RICHARD, W.B., FRANCOISE, G. & CATHERINE, E.S. (2004) : Past climate variability through Europe and Africa. Development in paleoenvironmental research Vol 6. ed. Springer 638 p.
- RIVIERE, A. (1977) : Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan 167 p.
- ROALDSET, E. (1972): Mineralogy and Geochemistry of Quaternary clays in Numedal Area, southern Norway, Norsk Geolisk Tidsskrift N° 52 335-369 p.
- ROGNON, P. 1996. Sécheresse et aridité : leur impact sur la désertification au Maghreb. Sécheresse N° 7 : 287-297 p.
- ROGNON, P. 1993: L'évolution des vallées du Niger depuis 20000 ans. Vallée du Niger. (Catalogue de l'exposition). Paris, Réunion des Musées Nationaux 40-62 p.
- ROGNON, P. (1989) : Biographie d'un désert. Ed. Plon (collections scientifiques). Paris 347 p.
- ROSET, J. P. (1987): Néolithisation, Néolithique et post-Néolithique au Niger nordoriental. In: Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire – Vol. 24 – N° 4 pp. 203-214 p.
- RUDOLF, A. (2003): Röntgenpulverdiffraktometrie. Rechnergestützte Auswertung, Phasenanalyse und Strukturbestimmung. Ed Springer 275 p.
- RUXTON, B.P. (1968): Measures of the degree of chemical weathering of rocks. Journ. Geol. N°76: 518-527 p.
- SAID, R. (1993) : The river Nile geology, hydrology and utilization. Oxford: Pergamon Press
- SALZMANN, U. & WALLER, M. (1998): The Holocene vegetational history of the nigerian Sahel based on multiple pollen profiles. Review of palaeobotany and palynology n° 100: 39-72 p.
- SCHERER, S.; ERNST, A.; CHEN, T. & W. & BÖGER, P. (1984): Rewetting of drought-resistant blue-green algae. Time course of water uptake and reappearance of respiration, photosynthesis, and nitrogen fixation. – Oecologia 62: 418-423 p.
- SCHULZ Erhard & IBRAHIM Sani (2015): Enlithing the Sahel-The Guidimouni sediment and pollen record. Unpublished manuscript. Würzburg 6 p.
- SCHULZ, E. ; ABICHO, A. ; ABOUBACAR, A.; BALLOUCHE, A. & OUSSEINI, I. (2009) : The desert in the Sahara. Transitions and boundaries. in Palaeoecology of Africa N°29 63-89 p.
- SCHULZ, E. & MERKT, J. (1996): Transsahara- Die Überwindung der Wüste- Würzb. Geogr. Manuskripte 38. 116 p.
- SCHULZ Erhard 1991: the Taoudenni-Agorgott Pollen Record and the Holocene Vegetation History of the Central Sahara 143-162. Paléoenvironments du Sahara. Lacs holocène à Taoudenni (Mali) Edition CNRS
- SCHULZ Erhard (1988): Der Südrand der Sahara, Würzb. Geogr. Arb. N° 69 167-210 p.
- Schulz, Erhard (1986): Zur Vegetation der Sahara und ihrer Randgebiete. Würzb. Geogr. Man. 16. 52- 64 p.
- SCHULZ, E. (1980) : Zur Vegetation der östlichen zentralen Sahara und zu ihrer Entwicklung im Holozän. Würzburger Geographische Arbeiten heft N° 51. Institut für Geographie der Universität Würzburg. 194 p.
- SCHÜTT, B. & KRAUSE, J. (2009): Comparison of proxy-based palaeoenvironmental reconstructions and hindcast modelled annual precipitations—a review of Holocene palaeoenvironmental research in central Sahara. Palaeoecology of Africa N°29 24-37 p.
- SCHWARZ, D. (1992) : Assèchement climatique vers 3000 BP et expansion bantou en Afrique Centrale atlantique : quelques réflexions . Bull. Soc. Géol. Fr. N° 163 3-7 p.
- SEBAG, D.; DISNAR, J.R.; GUILLET, B.; Di GIOVANNI, C.; VERRECCHIA, E.P. & DURAND, A. (2006): Monitoring organic matter dynamics in soil profiles by Rock-Eval pyrolysis : bulk characterization and quantification of degradation. *European Journal of Soil Science* N°57, 344-355 p.
- SEELER, J. S. & Golubic, S. (1989): Desert crust formation and soil stabilization. – Arid Soil Res. Rehab. 3: 217-228 p.
- SERVANT M. (1983) : Séquences continentales et variations climatiques: évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Travaux et documents de l'ORSTOM 159-567 p.

- SERVANT M. (1973): « Séquences continentales et variations climatiques : évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur », Thèse Se, Paris, in Trav. et Doc. ORSTOM, N° 159.
- SERVANT, M. et al., (1973) : Le Plio-Quaternaire du bassin du lac Tchad. Centre National de la Recherche Scientifique. Conference Proceeding Le Quaternaire, géodynamique, stratigraphie et environnement. 169-175 p.
- SHACHAK, M. & STEINBERGER, Y. (1980): An algae-desert snail food chain: Energy flow and soil turnover. - *Oecologia* 146: 402-411 p.
- SHARON, E. N. (2001): Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climat research. Clim Res* vol.17 : 123-144 p.
- SHIELDS, L. M. & DURRELL, L. W. (1964): Algae in relation to soil fertility. - *Bot. Rev. (Lancaster)* 30: 92-128 p.
- SHUBERT, L. E. & STARKS, T. L. (1979): Algal succession on orphaned coal mine spoils. Wali, M. K. (ed.), *Ecology and coal resource development*. - New York.- 661-669 p.
- SKUJINS, J. & KLUBEK, B. (1978): Nitrogen fixation and cycling by blue-green algae-lichen-crusts in arid rangeland soils. - *Ecol. Bull.* 26: 164-171 p.
- SPENCER, D.W. (1963): The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediment. *J. Sed. Petrol.* N°33 180-190 p.
- SPONHOLZ B. (2009): New discovery of rock fulgurites in Central Sahara. in *Palaeoecology of Africa* N°29-127-136 p.
- SPONHOLZ B. (1994): Phénomène s karstiques dans les roches silicieuses au Niger Oriental. *Karstologia* N°23 23-32 p.
- SPONHOLZ, B.; BAUMHAUER R. & FELIX-HENNINGSSEN P. (1993): Fulgurites in the southern central Sahara, Republic of Niger and their palaeoenvironmental significance. *Holocene* Vol. 3, , 97-104 p.
- SPONHOLZ B.(1989) : Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen des östlichen Republik Niger. Würzburg Universität. 265 p.
- St. CLAIR, L. L.; WEBB, B. L.; JOHANSEN, J. R. & NEBEKER, G. T. (1984): Cryptogamic soil crusts: Enhancement of seedling establishment in disturbed and undisturbed areas. - *Reclam. Reveg. Res.* 3: 129-136 p.
- STARKS, T. L., SHUBERT, L. E. & TRAINOR, F. R. (1981): Ecology of soil algae: A review. - *Phycologia* N°20: 65-80 p.
- STEBBING, E.P., (1935) : The advance of the desert. *Geogr. Journ.*, 91, 356-359.
- STEFANIE, K. et al (2014) : Biochar application to temperate soils : effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. 3-15 *J.plant Nutr. Soil Sci.* N°177 108 p.
- STENGEL, I. (1992) : Zur äolischen Morphodynamik vom Dünen und Sandoberflächen. *Würzburger Geographische Arbeiten* N° 83. 363 p.
- TANKARI DAN-BADJO A. ; GUÉRO Y. ; DAN LAMSO N. ; TIDJANI A.D ; AMBOUTA K.J.M. ; FEIDT C. ; STERCKEMAN T. & ECHEVARRIA G. (2013) : Evaluation de la contamination des sols par les éléments traces métalliques dans les zones urbaines et périurbaines de la ville de Niamey (Niger). *Revue des BioRessources* Vol 3 n°2. 82-95 p.
- TAUVERON, M.; STRIEDER, K. H. & FERHAT N. (2009): Neolithic Domestication and Pastoralism in Central Sahara : The Cattle Necropolis of Mankhor (Tadrart Algérienne) in *Palaeoecology of Africa* N°29 180-186 p.
- THIEMEYER, H. (2009): *Archaeological Soil Micromorphology Working Group*. Frankfurt 141 P.
- THIEMEYER, H. (1992) : On the age of the Bama ridge - a new 14C-record from Konduga area, Borno state, NE- Nigeria. *Z.Geomorph.N.F.*, 36: 113-118 p.
- TILHO Cl. (1911-1944): *Documents scientifiques de la mission Tilho*, 3 Bde. Paris.
- TILHO Cl. 1910: The French mission to Lake Chad. *Geogr. Journal* n°36 271-288 p.
- TORSTEN H. et al (2005): Climatically induced lake level changes during the last two millennia as reflected in sediments of Laguna Potrok Aike, southern Patagonia (Santa Cruz, Argentina). *Journ. of Paleolimnology* Springer N° 33, 283-302 p.

- UEHARA, G. & JONES, R. C. (1974): Bonding mechanisms for soil crusts 1. Particle surfaces and cementing agents. – In: Cary, J. W. & Evans, D. D. (ed.), Soil crusts. – Arizona Agric. Exper. Sta., Techn. Bull. 214: 17-28 p.
- ULLMANN & BÜDEL (2001): Ecological determinants of species composition of biological soil crusts on a landscape scale. In Belnap J. & Lange (2001)
- USGS 2004: Shuttle Radar Topography Mission, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland. <<http://glcf.umd.edu/>>
- VERNET Robert (2006) : évolution du peuplement et glissement des isohyètes à la fin de la préhistoire et au début de l'histoire en Afrique de l'ouest sahélienne. Mande Studies N°6 29-48 p.
- VOGEL, D.E. (1975): Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, South-Central Quebec, Canadian Journal of Earth Sciences N°12, 2080-2085 p.
- VÖLKEL, J. (1989): Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartär Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Niger (Südsahara und Sahel) 257 p.
- WEST, A. R. (1992) : Grundlagen des Festkörperchemie. Ed VCH. 455p
- WEST, N. E. (1990): Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semiarid regions. – Advances Ecol. Res. 20: 179-223 p.
- WILLIAM, M. L. & JOHN, P. S. (2001) : Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Physical and Geochemical methods Vol 6. Kluwer Academic Publishers 504 p.
- WILLIAM, P.A. et MICHAEL, Y. (2009) : Soil Micromorphology in a New Context- the Science-art Project : "Ground-breaking: Experience Past Landscapes in Grains and Pixels" p 7-13 in THIEMEYER H. 2009: Archaeological Soil Micromorphologie. Contribution to the Archaeological soil Micromorphology. Working Group Meeting 3rd-5th April 2008. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten. 141 p.
- WISCHMEIER, W.H. (1973) : Conservation tillage to control water erosion. Proc. National Conservation Tillage Conference, Soil Conserv. Soc. Of Amer. Ankeny, Iowa. 133-141 p.
- ZHANG, Y.M.; CHEN, J.; WANG, L.; WANG, X.Q. & GU Z.H. (2007): The spatial distribution patterns of biological soil crust in the Gurbantunggut Desert, Northern Xinjiang China. Journal of Arid Environments n° 68. Elsevier. 599-610 p.

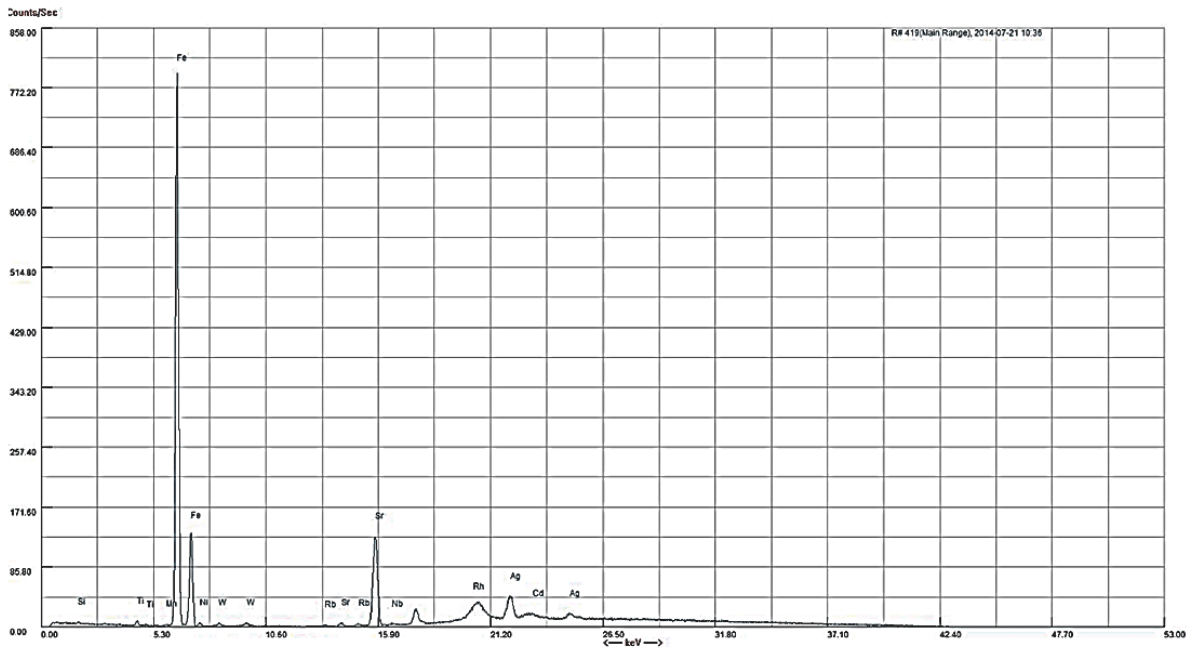
Web-Bibliographie

- AYACHI, S. (2009): Rôle des croûtes microbiotiques sur l'hydrophobicité de la surface des sols de la région de Banizoumbou (Niger) Univ. Reims Champagne in http://www.memoireonline.com/08/11/4677/m_Rle-des-crotes-microbiotiques-sur-lhydrophobicite-de-la-surface-des-sols-de-la-region-de-Ba.html
- ANCYCLOPEADIA UNIVERSALIS:
http://www.universalis.fr/encyclopedie/geomorphologie/#i_38099
- BELNAP, J. ; WILLIAMS, J. & KALTENECKER, J. (2001): structure et fonction des croûtes édaphiques des sols désertiques. Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux/université Laval/Département des Sciences du Bois et de la Forêt. Québec G1K 7P4/ Québec Canada 81 p. in <http://forestgeomat.ffg.ulaval.ca/brf/>
- BERNOUX, M. & CHEVALLIER, T. (2013) : in <http://www.csf-desertification.org/combattre-la-desertification/item/fiche-carbone-dans-les-sols-des-zones-seches>
- BRAUNECK, J. FLORIAS, M. ET BAUMHAUER, R. (2012): A record of early to middle Holocene environmental change inferred from lake deposits beneath a sabkha sequence in the Central Sahara (Seggedim, NE Niger). J. Paleolimnol ed. Springer Science+ business Media. in https://www.researchgate.net/publication/257593798_A_record_of_early_to_middle_Holocene_environmental_change_inferred_from_lake_deposits_beneath_a_sabkha_sequence_in_the_Central_Sahara_%28Seggedim_NE_Niger%29
- BRICE, M. (2008) : Contribution de l'approche sédimentologie à la reconstitution de l'histoire des sols. Définition de traceurs pédologiques et application sur des sédiments lacustres de montagne (Maurienne, Savoie, France). Earth Sciences. Université de Savoie, in <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00367597v2/document>
- CHRIS REIJ (2011): Reverdir le Sahel. African Re-greening Initiatives, Vrije Universiteit, Amsterdam in http://www.unep.org/pdf/op_sept_2011/FR/OP-2011-09-FR-ARTICLE6.pdf
- DUZGOREN-AYDIN, N.S.; AYDIN, A. & MALPAS, J. (2009) : Re-assessment of chemical weathering indices : case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. Engineering Geology/Elsevier N° 63 99-119 P in <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795201000734#>
- Fenton Greg & Conyer Mark (2002): Interpreting soil tests for calcium, magnesium and Ca/Mg ratios. Wagga Wagga Agriculture Institute in http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/166415/ca-mg-test-ratios.pdf
- FAO, 2015 : <http://www.fao.org/soils-portal/degradation-des-sols/fr/>
http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/166415/ca-mg-test-ratios.pdf
<http://www.fluxana.com/reference-material/reference-material-catalogs>
<http://www.icdd.com>
<http://www.rigaku.com/fr/products/xrd/miniflex>
- INS (2013): Annuaire statistique du Niger in http://www.stat-niger.org/statistique/file/Annuaire_Statistiques/ANNUAIRESTAT2008-2012.pdf
- IPCC, 2014: Climate Change 2014 Synthesis Report in http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- KATERINA Dontsova et DARRELL Norton (1999): Effects of Exchangeable Ca/Mg Ratio on Soil Clay Flocculation, Infiltration and Erosion. 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29. Purdue Univ. and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. In D.E.Stott R.H. Mohtar et G.C. Steinhardt (eds) 2001 580-585 in http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/166415/ca-mg-test-ratios.pdf
- LADA2014/FAO 2015: <http://www.fao.org/nr/lada/index.php?lang=fr>
- MALEY, J. & VERNET, R.(2013) : Peuples et évolution climatique en Afrique nord-tropicale, de la fin du Néolithique à l'aube de l'époque moderne. Afriques, débats, méthodes et terrains d'histoire. Volume 4: 50 p. In <http://afriques.revues.org/1209>

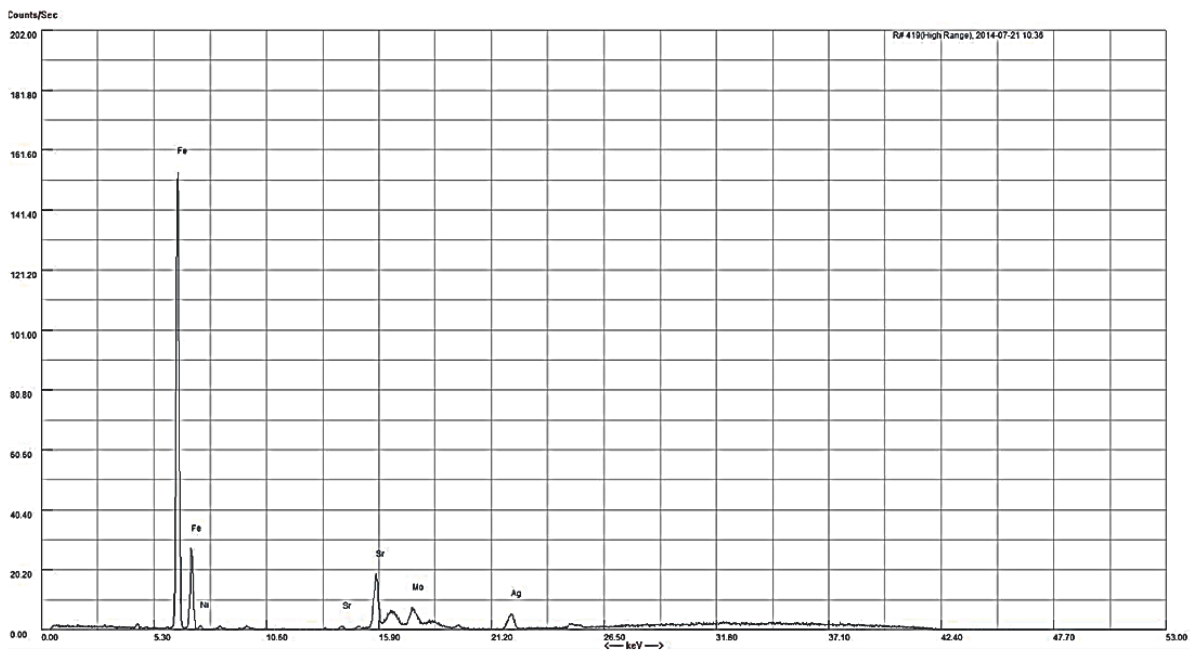
- MICHEL, R. (2002): la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres
Institut National de Recherche Agronomique Paris, Rome /FAO/ Rapport sur les
ressources en sols du monde 96 in <http://www.fao.org/docrep/005/y2779f/y2779f03.htm>
- Nriagu, J. O. (1979): Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to
the atmosphere in <http://www.nature.com/nature/journal/v279/n5712/abs/279409a0.html>
- OZER, P. ; BODAR, C. & TYCHON, B. (2005) : Analyse climatique de la région de Gouré, Niger
oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. Environnement, Nature,
Paysage, N°308. In <http://cybergeog.revues.org/3338>
- PERRONO, P. (1999) : Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration
urbaine et l'épandage agricole. Mém. D.U.E.S.S., D.E.P., Univ. Picardie, Amiens in
<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duce/perrono/perrono.htm>
- PROJET GRANDE MURAILLE VERTE:<http://www.oss-online.org/fr/initiative-de-la-grande-muraille-verte-pour-le-sahara-et-le-sahel>,
<http://www.fao.org/docrep/016/ap603f/ap603f.pdf>
- PROJET GRANDE MURAILLE VERTE :
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_muraille_verte_\(Afrique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_muraille_verte_(Afrique))
- Schulz, E.; Akhtar-Schuster, M. ; Agwu, Ch. ; Beck, C. ; Dupont, L.; Jahns, S. ; Niedermeyer,
M. ; Ousseini, I. & Salzmann, U. (2000): The Holocene landscape and vegetation history of
northern and western africaA palaeoecological atlas:
file:///F:/Atlas%20V%C3%A9g%C3%A9tation%20Afrique_CDROM/index_atlas.htm

Annexes

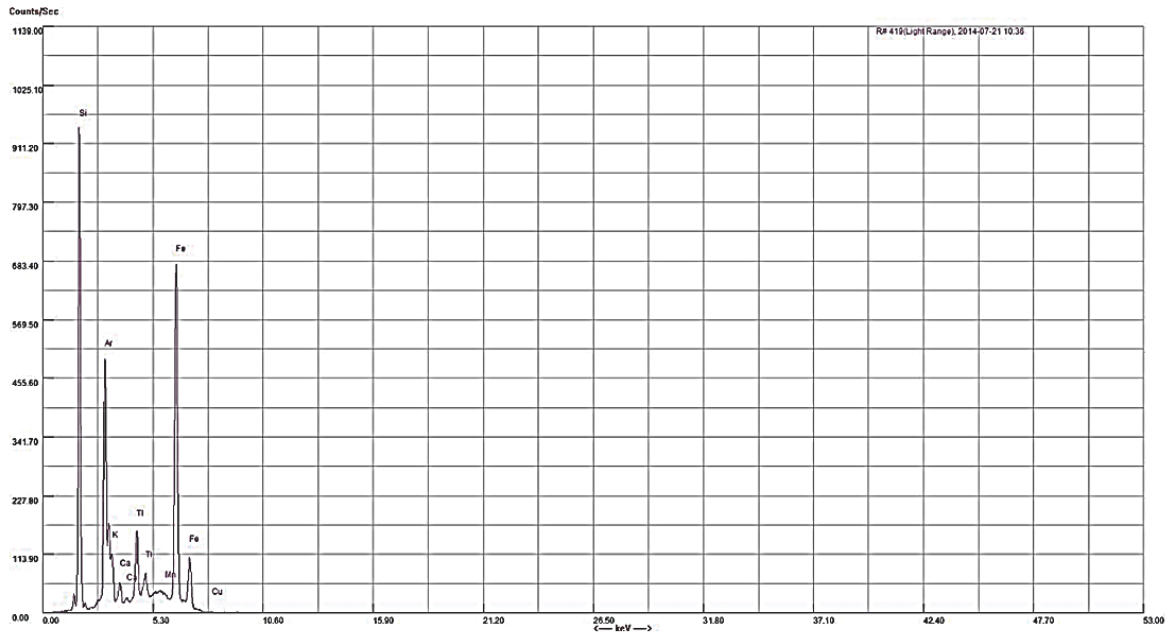
Annexe 1 Analyses spectrométriques (RFA) des croûte biogéniques



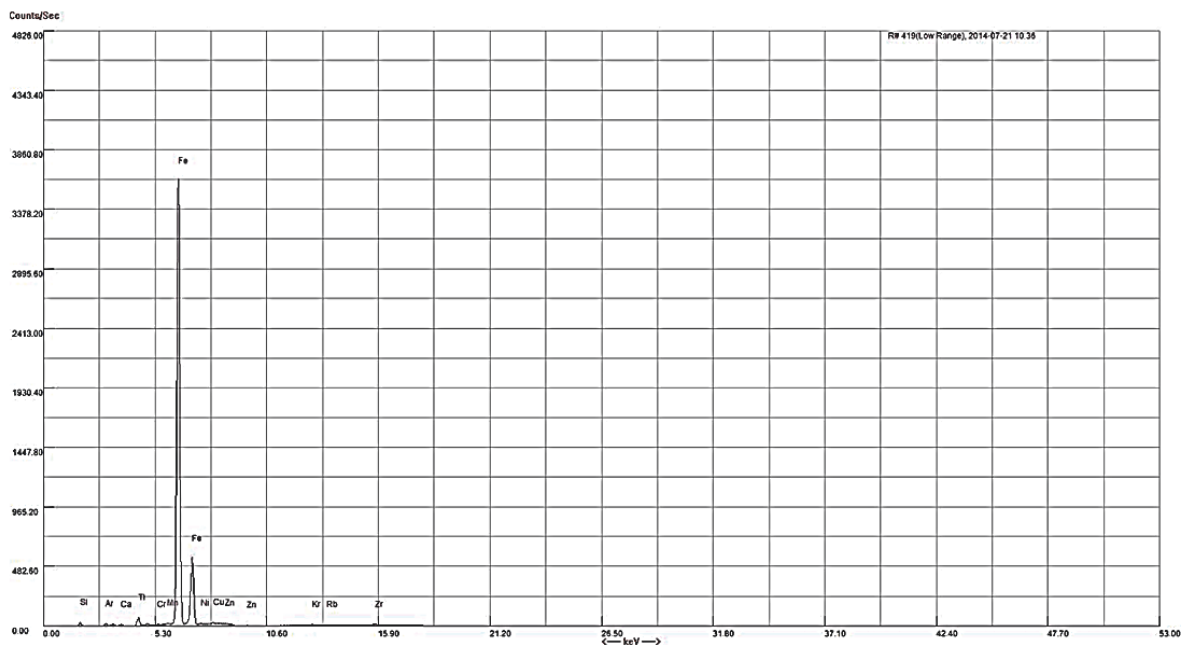
A : Moyen spectre



B : Haut spectre

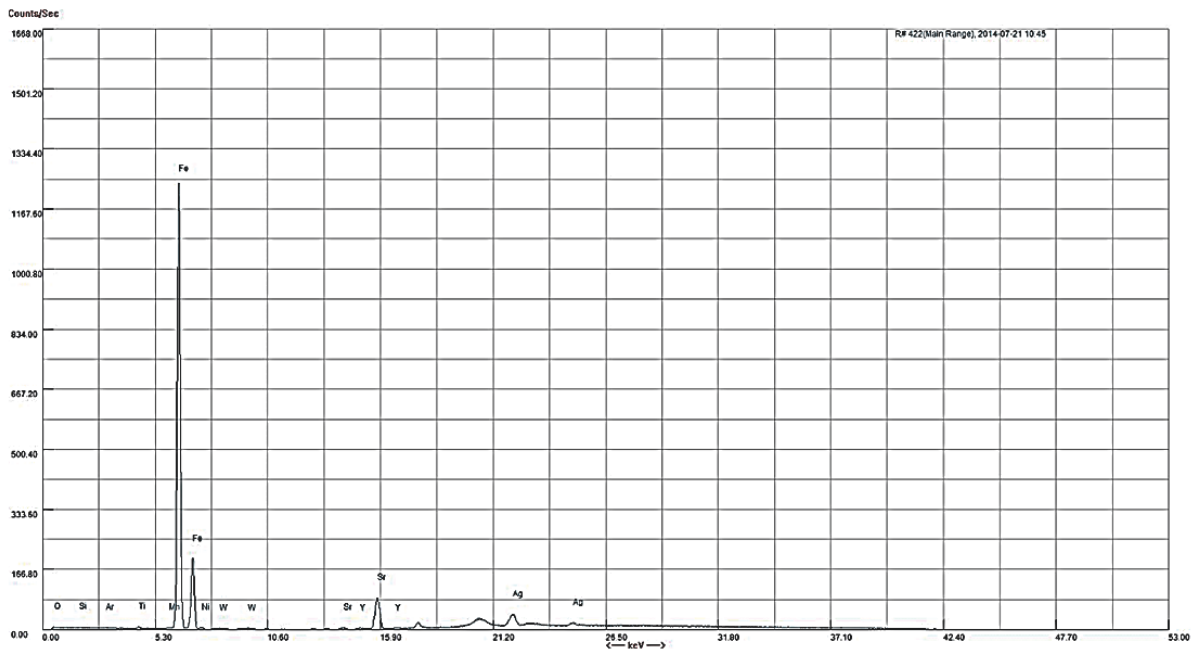


C : Léger spectre

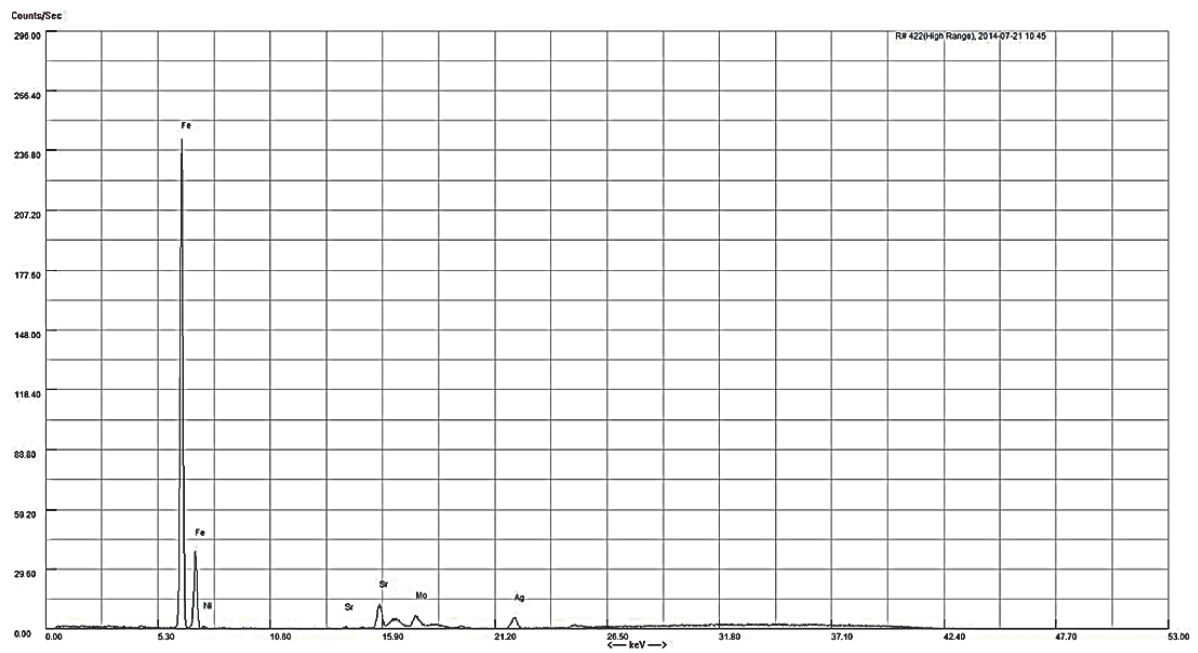


C : Bas spectre

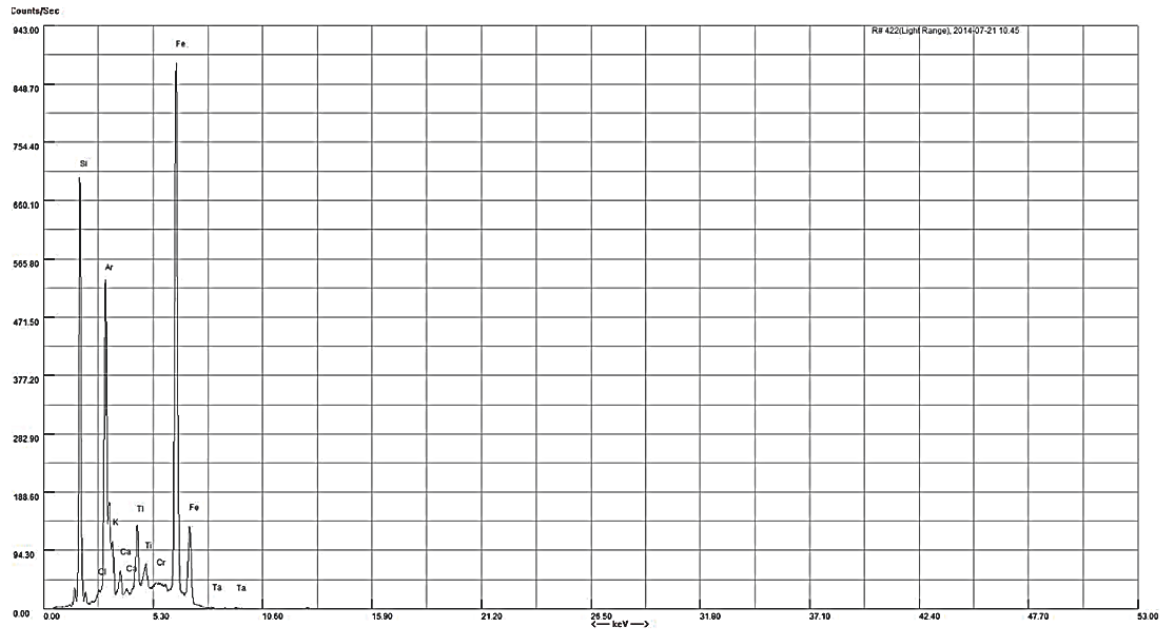
Annexe 2: Analyses spectrométriques des croûtes minérales



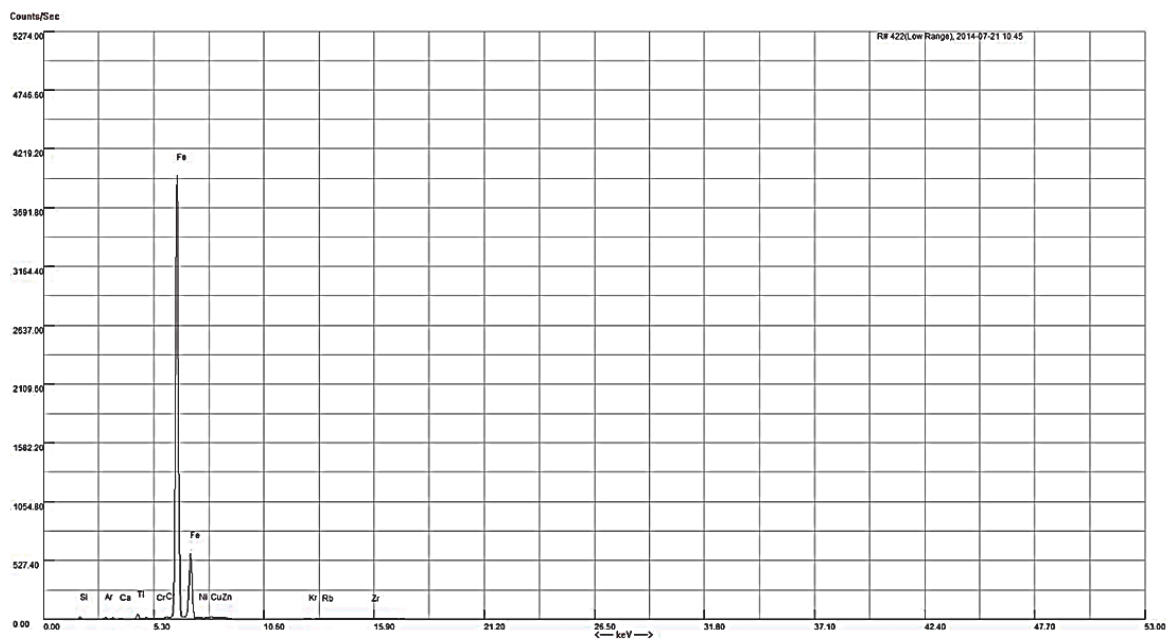
A : Moyen spectre



B : Haut spectre



C : Léger spectre



C : Bas spectre

Annexe 3: Analyses (diffractométrie RDA) des principales combinaisons géochimiques et minéralogiques des croûtes biogéniques et de la croûte minérale :

Tableau n°1 Ex.Sample: N# IBS 23_2: croûte biogénique)

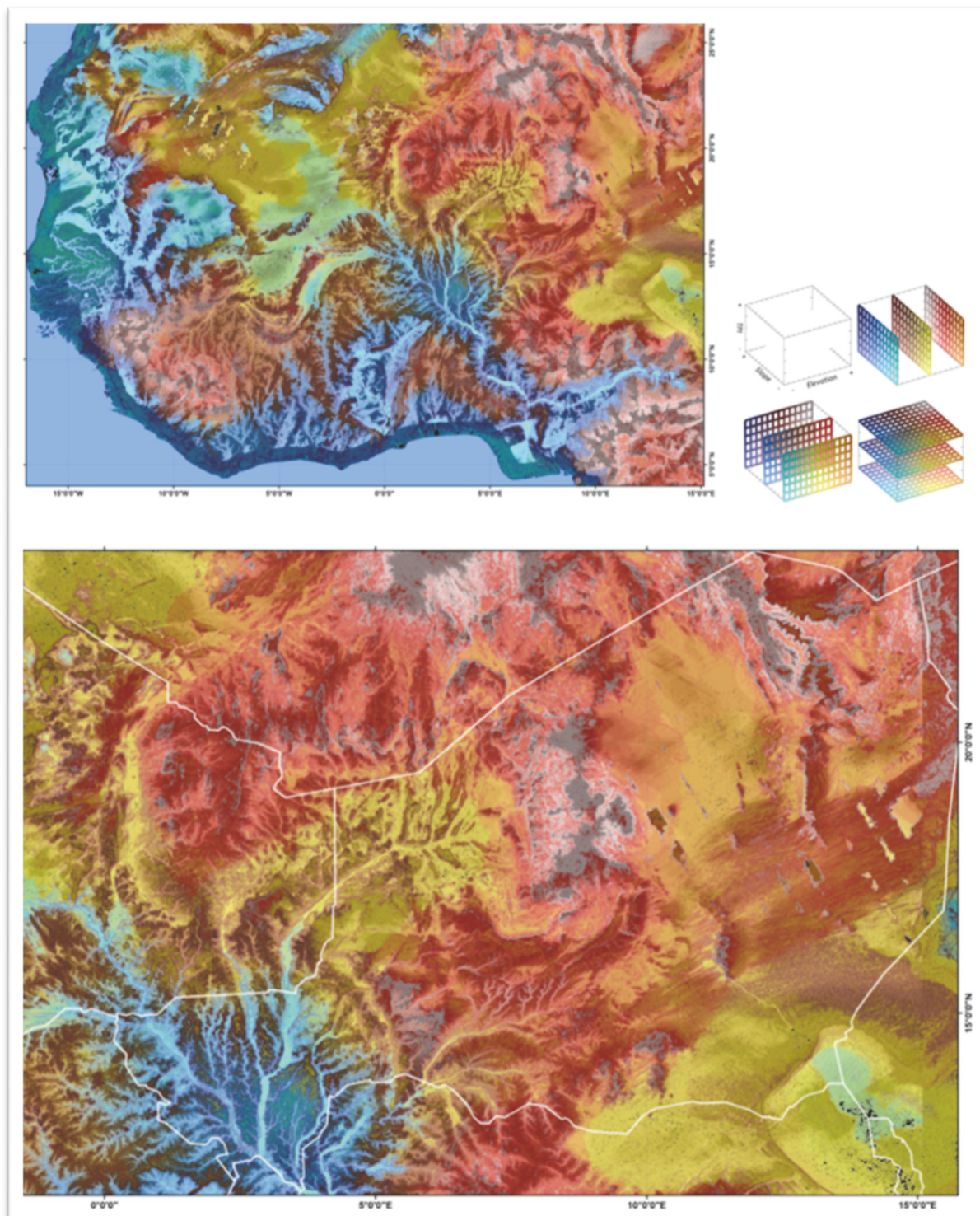
PDF-Nr.	Score	Verbindungsname	Chemische Formel
01-0572	1	Calcium Aluminum Oxide	Ca ₃ Al ₁₀ O ₁₈
02-0083	3	Calcium Aluminum Oxide Hydrate	Ca ₃ Al ₂ O ₆ !x H ₂ O
02-0714	1	Calcite, manganoan	(Ca, Mn) C O ₃
03-0548	1	Calcium Silicate Hydrate	2 Ca ₃ Si ₂ O ₇ ! ₃ H ₂ O
03-0594	6	Calcium Silicate Hydrate	Ca ₂ Si O ₄ ! H ₂ O
04-0877	3	Alumina	Al ₂ O ₃
05-0355	3	Diaspore	Al O (O H)
05-0586	1	Calcite, syn	Ca C O ₃
05-0613	2	Arcanite, syn	K ₂ S O ₄
06-0602	8	Calcium Iron Oxide	Ca O ! ₂ Fe O
06-0717	4	Calcium Aluminum Oxide Fluoride	Ca Al ₁₀ O ₁₅ F ₂
07-0239	1	Brucite, syn	Mg (O H) ₂
07-0348	2	Potassium Calcium Silicate	Ca _{1.917} K _{0.166} Si O ₄

Tableau n° 2 : Ex.Sample: N# IBS 26_4: croûte minérale)

PDF-Nr.	Score	Verbindungsname	Chemische Formel
02-0714	1	Calcite, manganoan	(Ca , Mn) C O ₃
05-0355	4	Diaspore	Al O (O H)
05-0586	1	Calcite, syn	Ca C O ₃
05-0613	4	Arcanite, syn	K ₂ S O ₄
09-0413	7	Mayenite, syn	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃
10-0173	1	Alumina	Al ₂ O ₃
11-0155	1	Calcium mordenite	Ca Al ₂ Si ₁₀ O ₂₄ ! ₇ H ₂ O
11-0647	2	Mirabilite	Na ₂ S O ₄ ! ₁₀ H ₂ O
12-0627	2	Scarbrote	Al ₅ (O H) ₁₃ (C O ₃) ! ₅ H ₂ O
01-0119	1	Ferrisymplesite, syn	Fe ₃ (As O ₄) ₂ ! ₆ H ₂ O
01-0403	8	Morenosite, syn	Ni S O ₄ ! ₇ H ₂ O
01-0989	1	Sinjarite, syn	Ca Cl ₂ ! ₂ H ₂ O
01-1059	10	Molysite, syn	Fe + ₃ Cl ₃
02-0095	1	Antigorite-6.86\ITM\RG	Mg _{3-x} [Si ₂ O ₅] (O H) _{4-2x}

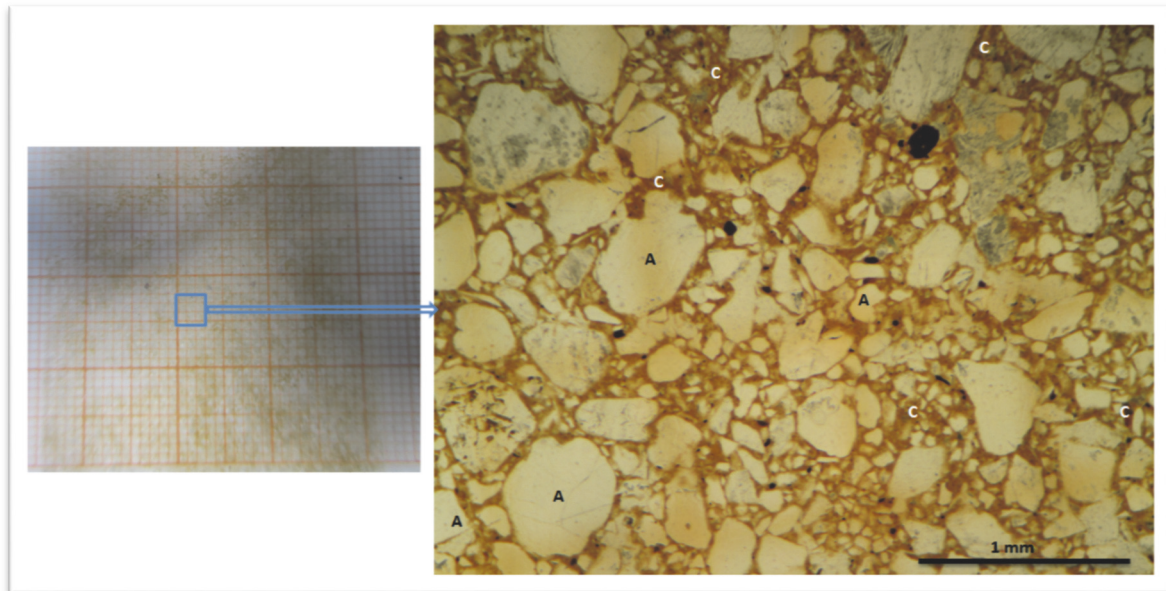
Annexe n° 4 : carte

Carte : Echelle de classification du modelé numérique de terrain des zones d'étude (USGS 2004)



Annexe 5 : photo

Photo 1 : Microstructure des jeunes édifices de remobilisation éolienne. A : matériaux quartzeux. C : plasma composé de débris minéraux (et organique) ultra fins et de sesquioxydes divers très abondants. On remarque un mélange de sables détritiques anguleux et ronds et aussi de particules fines diverses (organiques et minérales). Cela traduit bien l'intensité des remaniements subis par le matériel.



YOUNG AFRICA CENTRE SERIES

The University of Würzburg's Young Africa Centre has initiated the **Young Africa Centre Series** in order to provide outstanding students and young scholars with a platform for the publication of their excellent research and working papers.

The **Young Africa Centre Series** is open to both students or faculty members of the University of Würzburg and to students and scholars from Africa to make visible not only research on Africa but also significant contributions from the continent.

Series editors:

Julien Bobineau
Philipp Gieg
Dr. Karin Linhart
Ferdinand Paesler

© Julius-Maximilians-Universität Würzburg 2016
Young Africa Centre (Junges Afrikazentrum)
Campus-Nord, Josef-Martin Weg 52/1, Abteilung L7
97074 Würzburg / Germany
Tel.: +49 (0)931 / 3184005
Web: afrikazentrum.uni-wuerzburg.de/jaz
E-Mail: jaz@uni-wuerzburg.de
All rights reserved.

This document is provided through
the University of Würzburg's
publication service.

University Library Würzburg
Am Hubland
97074 Würzburg / Germany
Tel.: +49 (0) 931 - 31-85906
Fax: +49 (0) 931 - 31-85970
opus@bibliothek.uni-wuerzburg.de
<http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de>

ISSN: 2199-4315

SCHRIFTENREIHE JUNGES AFRIKAZENTRUM

Das Junge Afrikazentrum der Universität Würzburg (JAZ) hat im Jahre 2014 die **Schriftenreihe Junges Afrikazentrum** ins Leben gerufen. Sie soll hervorragenden Studierenden und Nachwuchswissenschaftlern eine Plattform für die Publikation exzellenter Arbeiten mit Afrikabezug bieten.

Die **Schriftenreihe Junges Afrikazentrum** steht neben Angehörigen der Universität Würzburg insbesondere auch Gaststudierenden und Gastwissenschaftlern aus Afrika offen, um nicht nur die Forschung über Afrika, sondern auch beachtliche Beiträge aus Afrika sichtbar zu machen.

Herausgeber:

Julien Bobineau
Philipp Gieg
Dr. Karin Linhart
Ferdinand Paesler

© Julius-Maximilians-Universität Würzburg 2016
Junges Afrikazentrum
Campus-Nord, Josef-Martin Weg 52/1, Abteilung L7
97074 Würzburg
Tel.: +49 (0)931 / 3184005
Website: afrikazentrum.uni-wuerzburg.de/jaz
E-Mail: jaz@uni-wuerzburg.de
Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Dokument wird bereitgestellt durch
den Publikationsservice der Universität
Würzburg.

Universitätsbibliothek Würzburg
Am Hubland
97074 Würzburg
Tel.: +49 (0) 931 - 31-85906
Fax: +49 (0) 931 - 31-85970
opus@bibliothek.uni-wuerzburg.de
<http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de>

ISSN: 2199-4315