Université Lumière Lyon 2

École Doctorale Sciences Sociales
Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art, Tourisme
Département de Géographie
ArchéOrient UMR 5133 du CNRS et UMR Espace–DEV de l'IRD

La morphodynamique éolienne en régions sèches

Des échelles spatiales et temporelles aux outils

Thèse

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

Cédric Venard

soutenue le 13 décembre 2012 devant le jury composé de :

Gilles Bergametti	CNRS, Créteil	(examinateur)
Yann Callot	univ. Lumière Lyon 2	(directeur)
Éric Delaître	IRD, Montpellier	(encadreur)
Luc Descroix	IRD, Grenoble	(rapporteur)
Yanni Gunnel	univ. Lumière Lyon 2	(examinateur)
Houcine Khatelli	IRA, Médenine	(examinateur)
Catherine Mering	univ. Denis Diderot Paris 7	(rapporteur)
Mohamed Ouessar	IRA, Médenine	(encadreur)

Photographie de la page de garde : le décollage du Pixy *à Dar Dhaoui, Tunisie. Cliché : M. Guied (2009)*

Sauf mention contraire, les clichés, cartes, schémas et tableaux de ce document sont de l'auteur et le bord supérieur des cartes et images satellites est orienté au nord.

Archéorient
Environnements et sociétés de l'Orient ancien
UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2
IRD
Institut de recherche pour le développement
unité espace
Institut des Régions Arides

Dust in the wind, all we are is dust in the wind…
– Kansas, 1977

Remerciements

On entend dire dans les couloirs des universités que la thèse est une forme de rite initiatique au terme duquel on acquiert, avant tout, une meilleure connaissance de soi. Sans préjuger de l'évaluation qui en sera faite par les membres du jury, je crois que, de ce point de vue au moins, celle-ci est une réussite. Ce long apprentissage a commencé par la rencontre avec mes encadreurs, Yann Callot et Éric Delaître. C'est Yann qui m'a proposé, au terme de ma licence, de travailler avec lui et l'IRD sur une problématique pour le moins iconoclaste : les formes éoliennes de petites dimensions qui jalonnent les paysages secs du pourtour saharien. Éric, quant à lui, m'a initié aux outils de cartographie et de télédétection qui étaient, alors, aussi nébuleux pour moi que le sujet que Yann me proposait !

Ce fut le début d'un chemin lent de maturation, aussi bien intellectuelle que personnelle, et, au bout de ce chemin, les encadrants sont devenus des amis et les ébauches de réflexions ont conduit à la réalisation de ce mémoire. Quant à moi, j'ai découvert ce qu'était le travail du chercheur, de l'enseignant dans le supérieur, ce que sont les contraintes de la recherche de terrain, d'autres cultures. Tout cela a façonné celui que je suis aujourd'hui et je le dois, en grande partie, à Yann et à Éric. Avec toute mon amitié, merci.

Une thèse de géographie n'est pas faite que de beaux sentiments, d'idées (plus ou moins) lumineuses et de voyages exotiques. C'est aussi un certain nombre de contraintes matérielles. C'est pourquoi j'exprime ma reconnaissance à tous les membres de l'IRA, représentée par son directeur général, Si Houcine Khatelli, au laboratoire d'Érémologie et de lutte contre la désertification de cet institut, dirigé par Si Houcine Taamallah et à l'équipe SIG et télédétection de Si Mohamed Ouessar, qui a accepté de co-encadrer ce travail. Tous ont généreusement mis à ma disposition leur temps et leurs ressources pour m'aider dans ma recherche. J'ai été accepté et accompagné sur un terrain qui était le leur et j'espère qu'ils trouveront dans ce travail des résultats qui honoreront la confiance qu'ils m'ont accordée.

L'ensemble de ce travail, en particulier le séjour en Tunisie et les missions de terrain, a bénéficié du soutien matériel et intellectuel de l'IRD, depuis la maîtrise, préparée dans le cadre des recherches conduites par l'Unité de Service (US) désertification. En France, l'UMR Espace-Dev, dirigée par Frédéric Huynh et l'équipe PASSAGE, dirigée par Maud Loireau, ont assuré la logistique, en particulier financière de mes missions de terrain. En Tunisie, la représentation de l'IRD, dirigée par Patrick Thonneau, m'a accueilli et fait une place dans ses bu-

reaux, ses plannings et m'a accompagné dans toutes mes démarches d'arrivée, de travail et de départ et a assuré les conditions matérielles de mes missions. Merci donc à l'ensemble de cette institution et à tous ses membres qui m'ont permis de découvrir ce qu'était la coopération scientifique internationale dans les meilleures conditions possibles.

Le laboratoire ArchéOrient, aussi bien lorsque Pierre Lombard en était le directeur que sous la direction d'Emmanuelle Vila, aura toujours été présent, matériellement bien sûr, mais aussi pour me soutenir dans mes travaux et mes démarches. Je n'ai jamais attendu longtemps de réponse à mes questions et, au cours d'une thèse, c'est un luxe qui est appréciable. Malgré l'aspect décalé de mes travaux par rapport au cœur de métier d'ArchéOrient, j'ai toujours reçu de ses membres une écoute attentive et des remarques pertinentes lors des présentations de mes recherches.

Un travail de recherche ne vaut que s'il est confronté à différents points de vue contradictoires. Je remercie donc tout d'abord les deux rapporteurs, M^me^ Catherine Mering et M. Luc Descroix, pour avoir, dans des délais assez courts, évalué ce mémoire et apporté des remarques qui ont contribué à en améliorer la qualité. Je remercie également les autres membres du jury pour leur lecture et leurs commentaires éclairés.

De nombreuses autres personnes pourraient être nommées ici et, sans aucun doute, je ne les citerais pas toutes. Néanmoins, je tiens à remercier plus particulièrement Gilles Bergametti, directeur du laboratoire LISA pour sa disponibilité et sa confiance, Vincent Bourdin, du laboratoire LIMSI pour avoir patiemment répondu à mes nombreuses et naïves questions sur les calculs solaires, Jérôme Lejot, enfin, pour son aide précieuse en analyse d'images et en programmation.

Merci également à tous mes collègues de la faculté GHHAT : Christina, Marie, Pascal, Claire, Nicolas, Saïda, Norbert, Laurent… et ceux que j'oublie, pour leur accompagnement, leur soutien et leurs témoignages toujours sincères. J'ai passé d'excellents moments avec les compagnons de route et parfois d'infortune - doctorants ou non - rencontrés sur le terrain, au laboratoire ou ailleurs : Hatem, Vincent, Thomas, Féréol, Pauline, Hervé, Dalel, Olfa, Maël, Hugo, Marion, Mohamed, Louise, Adrien… Bon courage à vous tous pour la suite !

Enfin, cette thèse a été, au sens propre, une aventure familiale. Me supporter, m'aider à franchir les étapes, n'a sans doute pas toujours été simple mais c'est un beau chemin que nous avons parcouru ensemble. Merci à vous trois d'embellir ainsi mon existence.

Lyon, le 19 novembre 2012.

Sommaire

Liste des acronymes ix

Introduction générale 1

I De la forme au paysage 7

1 La morphodynamique éolienne des milieux désertiques 9

2 Les contextes des régions sèches non désertiques 53

3 Une échelle, un outil 103

II Applications en Tunisie pré-saharienne 153

4 L'échelle stationnelle 155

5 Paysages et morphodynamique éolienne 185

6 Un indicateur prédictif 223

Conclusion générale 253

Bibliographie 259

Liste des figures 275

Liste des tableaux 283

Table des matières 285

Annexes 291

Résumé 311

Liste des acronymes

AIMS	Approche Intégrée Milieux-Sociétés
AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
APN	Appareil Photographique Numérique
CAMELEO	Changement dans les écosystèmes méditerranéens arides à long terme et observation de la terre (*Changes in Arid Mediterranean Ecosystems on the Long term and Earth Observation*)
CEPMT	Centre Européen pour la Prévision à Moyen Terme
CILD	Convention Internationale de Lutte contre la Désertification
CM	Coefficient de Migration
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNT	Centre National de Télédétection
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement
CRDA	Centre Régional de Développement Agricole
CT	Capacité de Transport
DD	Degrés Décimaux
DPS	Déplacements Potentiels Sableux
DyPEN	Dynamiques des Populations et Évolution des milieux Naturels
DR	Direction Résultante
EDS	État De Surface
ES	Élément Structurant
ESE	État de Surface Élémentaire
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agricultural Organization*)
FEO	Forme Éolienne d'Obstacle
GLCF	Global Land Cover Facility
GPS	Système de positionnement mondial par satellite (*Global Positioning System*)
IGN	Institut Géographique National
IRA	Institut des Régions Arides
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISESCO	Organisation islamique pour l'éducation, la science et la culture (*Islamic Educational, Scientific and Cultural Organization*)

ISS	Société internationale de stéréologie (*International Society for Stereology*)
LIDAR	Télédétection par laser (*LIght Detection And Ranging*)
LIMSI	Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur
LISA	Laboratoire Inter-universitaire des Système Atmosphériques
NCDC	Centre national des données climatiques (*National Climatic Data Center*)
MBR	plus petit rectangle enveloppant (*Minimum Bounding Rectangle*)
MM	Morphologie Mathématique
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MR	Migration Résultante
NASA	Agence spatiale et aéronautique nationale des États–Unis (*National Aeronautics and Space Administration*)
ORE	Observatoires de Recherche en Environnement
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
OSU	Observatoires des Sciences de l'Univers
PASSAGE	Paysage et observatoire pour la gestion des ressources et des territoires
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SIG	Système d'Information Géographique
RDPS	Roses des Déplacements Potentiels Sableux
RMS	Erreur moyenne quadratique (*Root Mean Square*)
ROSELT	Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme
RVB	Rouge Vert Bleu
SAU	Surface Agricole Utile
SIEL	Système d'Information sur l'Environnement à l'Échelle Locale
SNIMM	Société Nationale des Industries Minières de Mauritanie
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
THR	Très Haute Résolution
TIFF	Tagged Image File Format
UMR	Unité Mixte de Recherche
US	Unité de Service
UNCOD	Conférence des Nations Unies sur la désertification (*United Nations Conference On Desertification*)
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*)
UP	Unités Paysagères
UPC	Unités de Pratiques Combinées
USR	Unités Spatiales de Référence

UTM	Projection transverse universelle de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)
UV	Unités Vectorielles
WMO	Organisation mondiale de la météorologie (*World Meteorological Organization*)

Introduction générale

« J'ai soif aussi… cherchons un puits… »
J'eus un geste de lassitude : il est absurde de chercher un puits, au hasard, dans l'immensité du désert.

- Le Petit Prince. Antoine de Saint-Exupéry.

Dans bien des écrits, qu'ils soient imaginés ou bien retraçant un parcours vécu, comme *Le Désert des déserts* de W. Thesiger, le désert est d'abord le lieu de la soif, du manque d'eau et, de fait, de la sécheresse qui les explique. Faire le lien entre sécheresse et désert est presque un truisme. Aussi, le titre de ce mémoire, qui utilise l'expression « régions sèches », amènera probablement le lecteur à visualiser spontanément les paysages sableux des déserts. Le désert serait, en effet, la région sèche par excellence, comme l'illustre la définition de Rognon (1994) :

> *[le désert est] une région où l'eau à l'état liquide est rare ou quasiment absente.*

Cette association constitue cependant une extension de la signification initiale du terme en français puisque, au Moyen-Âge, il désignait un lieu vide de population, en accord avec son étymologie latine [1] (Brunet *et al.*, 1993). On retrouve ce sens aujourd'hui dans un certain nombre de toponymes français, comme Saint-Guilhem-le-Désert dans l'Hérault. La poursuite de l'association amène en général l'évocation du Sahara, probablement le désert le plus connu du monde. Le désert, en plus d'être sec et vide, serait donc chaud, alors que la définition proposée n'exclut pas les déserts froids, comme peuvent l'être l'Antarctique ou les plus hauts sommets, où l'eau à l'état liquide peut également être absente.

Encore est-il nécessaire d'amender la définition de Rognon puisque, dans bien des contextes, de l'eau liquide est effectivement présente mais, en raison de sa nature endoréique, souvent trop salée pour être utilisée comme ressource. Ainsi la définition des régions sèches que proposaient Tricart et Cailleux (1969) semble-t-elle mieux rendre compte de la réalité des régions sèches dans leur ensemble :

> *les régions sèches sont celles où, par suite de l'insuffisance des ressources en eau, la couverture végétale et les sols sont trop réduits pour assurer une protection efficace de la roche contre les actions atmosphériques.*

1. *Deserere* : disjoint, dissocié, traduisant une idée d'abandon.

Très synthétique, elle permet à ses auteurs d'appréhender ces milieux dans la diversité des degrés de sécheresse sans faire cependant intervenir de notions climatiques comme la température ou les précipitations. Cela se justifie par l'hétérogénéité, à l'échelle de la planète, des milieux constituant les régions sèches. Certaines régions du Brésil sont considérées comme sèches alors qu'elles reçoivent en moyenne autant de précipitations annuelles que la région de Poitiers. Aussi n'est-ce pas la quantité d'eau qui distingue les régions sèches des autres, mais bien la disponibilité de celle-ci pour les besoins végétaux et animaux. Les régions sèches ne sont donc pas circonscrites au périmètre des déserts. Dès lors, il n'est pas inutile de préciser que le propos concerne les régions sèches *chaudes*. C'est donc ce sens qu'il faudra donner à l'expression dans la suite de ce mémoire.

Davantage que le désert au sens strict, les régions sèches sont propices à un peuplement et une mise en valeur sédentaires (Bisson, 2005). Cependant, elles sont fréquemment localisées au contact des déserts - cf. la carte proposée en p. 63 - avec lesquels elles partagent, sur un mode transitoire, de nombreuses conditions environnementales qui les rendent particulièrement sensibles : couverture végétale éparse, sols peu épais et sensibles à l'érosion, etc. Elles ne peuvent donc être exploitées le plus souvent qu'avec de grandes précautions ou bien après de lourds investissements (Mainguet, 1995). Ces deux contraintes ont la même conséquence : la nécessité de bien connaître les mécanismes affectant le milieu, pris dans une acception large comme la combinaison des influence de la géomorphologie et des activités humaines.

Le principal problème lié à la fragilité des régions sèches est l'extension des mécanismes géomorphologiques propres aux déserts. Il s'agit de l'un des éléments du phénomène de désertification, défini comme par la Convention Internationale de Lutte contre la Désertification (CILD) comme [2] :

> *la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines.*

Concernant essentiellement des pays moins avancés sur le plan économique, la lutte contre la désertification est un enjeu de développement qui a conduit à la mise en place de nombreux programmes de recherche et de lutte, suivant les termes de la CILD qui oblige les pays signataires à :

> *accorder la priorité voulue à la lutte contre la désertification [...] selon leur situation et leurs moyens.*

La prise de conscience de ce problème à l'échelle internationale - 179 pays sont signataires de la CILD - a permis de renforcer le partenariat entre les différents instituts de recherche ayant des intérêts à l'étude du phénomène. En Tunisie, en particulier, la collaboration entre l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) - français - et l'Institut des Régions Arides (IRA) - tunisien - a produit de nombreux travaux dans le cadre de programmes pluri-disciplinaires (Genin *et al.*, 2006). La collaboration entre disciplines est en effet nécessaire

2. Le texte intégral est disponible sur le site internet de la convention : `http://www.unccd.int`

pour analyser un problème complexe où les composantes humaines et environnementales interagissent fortement. Rétro-activement, les recherches menées dans le contexte de la lutte contre la désertification ont participé à enrichir la connaissance des régions sèches et notamment des mécanismes à l'œuvre dans la constitution de leurs paysages.

L'un des aspects les plus marquants de la désertification est le phénomène d'ensablement et, plus généralement, l'ensemble des actions liées à l'érosion éolienne. Ce processus paysager actif dans toutes les régions sèches - et particulièrement les déserts, même si les étendues sableuses, directement façonnées par le vent, représentent une petite partie de l'ensemble des régions sèches (Thomas, 1997) - peut se révéler extrêmement problématique. Il peut perturber aussi bien les voies de communication, l'agriculture, l'élevage que l'habitat sédentaire. La capacité du vent à bâtir des édifices et à faire remonter des pentes au matériel qu'il transporte renforce son caractère spectaculaire et fonde une autre association d'idées, celle qui présente la désertification comme « une extension du désert », par l'avancée de dunes de sable poussées par le vent.

Le diagnostic étant centré sur la notion de dégradation, la dimension paysagère est, de fait, importante dans l'étude de la désertification, l'évaluation de cette dernière faisant précisément intervenir le suivi d'indicateurs reposant sur des éléments du paysage. La végétation est souvent retenue pour ce suivi, par l'observation au sol ou, à une plus large échelle spatiale, par la mesure en télédétection d'indices évaluant notamment l'activité chlorophyllienne. L'expérience de terrain accumulée dans ce contexte a montré qu'il était nécessaire de compléter ces approches par une autre famille d'indicateurs, liées à la géodynamique externe : les formes éoliennes.

Leur étude a d'abord porté sur les formes de grande taille, souvent associées dans des systèmes importants, comme les ergs ou les « fleuves de sable ». Dans ces contextes bien particuliers, l'influence des activités humaines sur leur évolution est réduite. En revanche, dans les régions sèches non-désertiques, des formes de plus petite dimension, d'échelle de hauteur centimétrique à métrique, peuvent également couvrir des superficies importantes. Leur intérêt pour l'analyse environnementale en général et pour celle de la désertification en particulier réside dans leur vitesse de réaction aux changements des conditions du milieu. L'échelle temporelle de leurs évolutions est en effet corrélée à leur taille, au moins tant qu'elle sont constituées de matériaux vifs, c'est-à-dire mobilisables par le vent.

Mises en place et façonnées par le vent, elles sont étroitement liées aux autres composants du paysages avec lesquels elles interagissent fortement. Leur mise en place est, en outre, une des traductions possibles du transport de matériel éolien depuis des zones-sources dont le fonctionnement peut être lié à l'exploitation du milieu. On comprendra alors que le suivi de ces formes doit se faire dans une approche systémique.

Dans le cadre de la collaboration entre l'IRD et l'IRA, divers travaux ont été réalisés pour couvrir ce besoin de caractérisation des formes éoliennes spécifiques aux régions sèches. Ces travaux ont montré, en particulier, la nécessité de développer de nouvelles approches pour bien prendre en considération les

échelles spatiales et temporelles associées à ces formes de petite dimension. C'est ainsi que, dès la préparation du Master 2, nous avons été amené à envisager les possibilités offertes par les vecteurs d'acquisition d'images à Très Haute Résolution. Ce sont, par exemple, les satellites d'observation récents - Quickbird et Worldview - ainsi que le *Pixy*, paramoteur télécommandé conçu par un ingénieur de l'IRD dont un exemplaire était utilisé en Tunisie, en partenariat avec l'IRA et le Centre National de Télédétection (CNT) tunisien.

Une autre dimension importante de la démarche consistait à élaborer des méthodes simples à mettre en œuvre, pour assurer leur reproductibilité à la fois dans le temps et dans l'espace, dans des contextes différents. C'est pourquoi nous avons également évalué le potentiel offert par la suite *Google Earth* pour obtenir des images permettant de suivre des indicateurs à une échelle très fine.

Ainsi cette thèse est-elle articulée autour de ce double questionnement :

1. Un questionnement conceptuel : comment définir les formes éoliennes de façon à en faire des indicateurs pertinents de suivi de la morphodynamique éolienne et de la désertification ?
2. Un questionnement méthodologique : comment mettre en place une démarche de suivi globale fondée sur une échelle d'observation initiale très fine en contrôlant de façon satisfaisante les transferts d'échelle ?

Pour répondre à ces questions, nous avons organisé ce mémoire en deux parties. La *première partie* est consacrée aux éléments de contexte conceptuels et méthodologiques exploités dans la *deuxième partie*. Le *premier chapitre* vise d'abord à satisfaire l'exigence de Bagnold (1941) :

> *The geomorphologist [cannot] rest content in his study [...] of the shape and movement of sand accumulations until he knows* why *sand collects into dunes at all [...].*

Il consiste en une présentation des fondements physiques de l'étude de la morphodynamique éolienne, que l'on peut définir comme l'ensemble des actions du vent, à différentes échelles, sur les composants du paysage, incluant le transport, la morphogénèse, l'érosion, etc. Elle est appuyée sur les acquis des chercheurs travaillant dans les régions désertiques. En présentant différents exemples et en en détaillant un en particulier, nous montrerons comment la morphodynamique éolienne peut être utilisée à des fins de diagnostic dans ces contextes bien particuliers.

Le *deuxième chapitre* expose les contextes propres aux régions sèches non-désertiques, où les problèmes posés par la morphodynamique éolienne ont un lien plus étroit avec les activités humaines, en particulier dans des contextes de désertification. Nous chercherons à préciser le contenu de ce concept et nous introduirons la notion de forme éolienne d'obstacle, essentielle pour la compréhension de la morphodynamique éolienne dans ces conditions.

À partir de ces acquis, nous présenterons dans le *troisième chapitre* les méthodes que nous proposons d'utiliser et les sites de travail où nous envisageons de les appliquer. Il sera également l'occasion d'avoir une approche critique de ces méthodes et des données exploitées, toujours dans la perspective initiale de contrôler autant que possible les transferts d'échelle associés à la démarche.

La *deuxième partie* synthétise les résultats obtenus, à différentes échelles, lors des campagnes de terrain menées notamment pendant l'année 2009, passée en Tunisie dans le cadre d'un accueil de co-encadrement entre la représentation IRD de Tunis et l'IRA de Médenine. Le *quatrième chapitre* présente les indicateurs exploités dans le cadre d'une approche stationnelle. Ces indicateurs permettent de bien comprendre le fonctionnement local des éléments du paysage que nous avons considérés être pertinents pour caractériser la morphodynamique éolienne.

Ces résultats sont ensuite intégrés à d'autres approches dans le *cinquième chapitre* pour analyser la morphodynamique éolienne à une échelle intermédiaire entre l'élément paysager et le paysage, qui est celle du composant (Laques, 2009). Nous montrerons que c'est à cette échelle que les interactions sont les plus fortes entre les formes éoliennes qui nous intéressent et les autres éléments du milieu, parmi lesquels l'usage des ressources par les sociétés.

Enfin, nous nous appuierons sur ces différents résultats pour développer, dans le *sixième chapitre* une approche fondée sur la notion de densité d'obstacles, développée par les physiciens. Elle est utilisée dans des modélisations de l'érosion éolienne et nous avons mis en œuvre des méthodes qui permettent de quantifier de façon fine ce paramètre et ainsi de généraliser une approche de la morphodynamique éolienne à des échelles plus larges en utilisant une approche par mailles. L'ensemble de cette présentation permet enfin d'ouvrir des pistes de réflexion dépassant le cadre de la morphodynamique éolienne dans lequel elles ont été initialement formulées.

Première partie

De la forme au paysage

Chapitre 1

La morphodynamique éolienne des milieux désertiques

Apports théoriques et pratiques

Sommaire

1.1 Quelques bases physiques 11
1.1.1 Mise en mouvement du matériel éolien 11
1.1.2 Les paramètres influant sur la dynamique 16
1.1.3 Transferts d'échelles 21
1.2 Aspects géomorphologiques 24
1.2.1 La classification des formes éoliennes 24
1.2.2 Orientation des déplacements 28
1.2.3 Hauteurs des formes et volumes mobilisés 31
1.3 Proposition d'un modèle d'approche des déplacements sableux 34
1.3.1 Fondements conceptuels 34
1.3.2 Méthodes anciennes, nouvelles sources, propositions innovantes 37
1.3.3 Résultats et perspectives 42
Conclusion 50

Introduction

Ce chapitre est construit en deux temps : la première section présente les concepts fondamentaux de la dynamique éolienne et les problématiques afférentes ; son contenu n'est pas spécifique aux déserts mais a sa place dans ce chapitre car c'est l'étude de la dynamique éolienne désertique qui a permis son élaboration.

La deuxième section est une revue des différents arguments qui permettent d'envisager de relier aspect et état des formes éoliennes à l'instant t avec les

caractéristiques du milieu en général et du vent en particulier. Le contenu de ces deux premières sections sera repris pour le développement des applications présentées dans ce mémoire.

La troisième section, enfin, présente une approche à la fois conceptuelle et pratique des déplacements sableux en régions désertiques à vent unidirectionnel. Les résultats permettent d'envisager de généraliser l'évaluation de ces déplacements à partir de plusieurs sources possibles des coefficients exprimant la capacité de transport du vent.

1.1 Quelques bases physiques

Parmi les processus géomorphologiques, le déplacement de matériel par le vent présente des originalités qu'il convient de rappeler (Callot, 2008) :

- la friction exercée par le vent affecte potentiellement tout point d'une surface considérée, à la différence des écoulement concentrés ;
- il développe une certaine indépendance vis-à-vis de la pesanteur qui lui permet de faire remonter du matériel sur des pentes et de franchir des crêtes et ce, à toutes les échelles spatiales ;
- il peut se faire dans une direction unique - il est dit unimodal - ou dans plusieurs directions non hiérarchisées - il est alors dit complexe, avec toute la gamme des modes intermédiaires décrite par Fryberger (1979).

Il n'est pas de notre propos, ni de notre compétence, de prétendre synthétiser dans cette section l'intégralité des problèmes et propositions théoriques que les physiciens intègrent à leurs approches de la dynamique éolienne. Toutefois, la présentation d'un certain nombre de concepts et d'équations est nécessaire à la bonne compréhension de la démarche que nous avons développée.

1.1.1 Mise en mouvement du matériel éolien

1.1.1.1 La vitesse-seuil de mobilisation

Le vent ne met en mouvement que du matériel disponible, c'est-à-dire exposé à son action et dont les caractéristiques font qu'il peut être mobilisé. Parmi celles-ci, la cohésion des particules susceptibles d'être transportées joue un rôle essentiel. Elles sont principalement soumises à deux types de forces : cohésion et pesanteur (fig. 1.1).

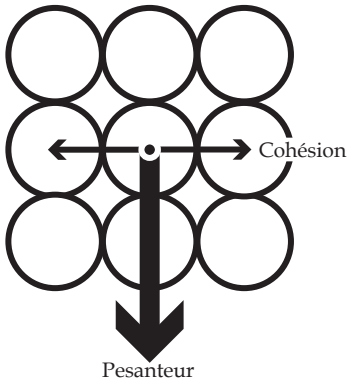


Figure 1.1 – *Les forces agissant sur les particules du sol. D'après Marticorena (1995)*

On comprend alors que les particules sont déplacées si la force d'arrachement du vent est supérieure aux forces qui les maintiennent au sol. Elles sont d'abord relatives à la taille des particules, à leur densité propre et à divers paramètres du milieu, comme l'humidité qui influe sur les forces capillaires liant les particules (Fécan *et al.*, 1999). Ce constat amène à prendre en considération la vitesse-seuil de mise en mouvement, notée généralement V_t. La mise au point

et le raffinement de ce paramètre constituent le fondement de la théorie de la dynamique éolienne. Les premières propositions ont été avancées par Bagnold (1941), suite à des observations effectuées dans le Sahara qui l'ont amené à formuler l'équation suivante :

$$V_t = a\sqrt{\frac{(\sigma - \rho)}{\rho} g\, d} \tag{1.1}$$

avec

- a : constante égale à 0,1 pour des particules de taille supérieure à 100 μm
- σ : densité spécifique des grains
- ρ : densité spécifique de l'air
- g : effet de pesanteur
- d : diamètre des grains

Les mesures en laboratoire de la vitesse-seuil de mise en mouvement ont permis de montrer qu'elle était généralement comprise entre 4 $m.s^{-1}$ et $6,25$ $m.s^{-1}$ suivant les caractéristiques du milieu considéré (Oulehri, 1992). Les auteurs retiennent en général 4 $m.s^{-1}$ comme vitesse-seuil de mobilisation mais 6 $m.s^{-1}$ comme valeur à partir de laquelle la mobilisation est suffisante pour avoir un effet morphologique (Callot et Oulehri, 1996).

1.1.1.2 Les modalités de transport éolien

Une fois le matériel mis en mouvement, le vent le transporte de différentes façons en fonction de ses caractéristiques propres, de celles du matériel transporté et de celles du milieu affecté (tab. 1.1).

Tableau 1.1 – *Le déplacement éolien, d'après Callot (2008)*

Type	Granulométrie	Description
Suspension	< 125 μm	Elle est permanente (particules < 10 μm) ou discontinue. Les particules peuvent être transportées sur de longues distances et, pour engendrer un dépôt, il faut l'intervention d'autres facteurs : condensation ou précipitations. Elle est la cause des pluies de poussière que l'on observe en Europe.
Saltation	$100 - 300$ μm	Les grains mis en mouvement progressent par sauts successifs, suivant une trajectoire liée à la nature du substrat. L'impact des grains en saltation peut provoquer la mise en mouvement d'autres particules.
Reptation	> 350 μm	Les grains ne sont pas soulevés mais roulent sur la surface, poussés par le vent ou par les autres grains. Dans certaines conditions, des grains de 2 mm de diamètre peuvent être ainsi déplacés.

La structure de cette classification est évidemment dépendante de la force du vent. Les bornes des classes présentées peuvent donc être décalées. De surcroît, la dynamique éolienne réelle n'est pas ainsi « sectorisée » : plusieurs types de déplacements se produisent simultanément. Depuis Bagnold (1941), les modalités du déplacement par le vent ont été abondamment décrites et analysées. Nous ne développerons donc pas davantage cette présentation. En revanche, il est plus difficile d'étudier les quantités déplacées alors qu'elles sont essentielles dans la mise en place des formations éoliennes à toutes les échelles spatiales.

1.1.1.3 Quantités de matériel transporté

À partir de la connaissance de la vitesse-seuil, il est possible de modéliser la dynamique éolienne sous ses différents aspects. Une relation entre la vitesse du vent et les caractéristiques du matériel exposé permet ainsi de calculer la quantité de sable transportée q, sur la base de l'équation de Lettau et Lettau (1969) :

$$q = V_*^2(V_* - V_t)\frac{C'(\phi/\phi^*)^n\rho}{g} \tag{1.2}$$

avec

V_*	:	la vitesse du vent
V_t	:	la vitesse-seuil
C'	:	constante universelle pour le sable ($\approx$ 6,7)
ϕ	:	diamètre des grains de sable transportés
ϕ^*	:	0,25 mm (diamètre standard)
n	:	constante empirique
ρ	:	densité de l'air
g	:	constante de gravité

Son application hors du contexte expérimental se révèle toutefois délicate en raison de la difficulté à estimer les valeurs de ses différents paramètres et de l'existence d'interférences liées aux conditions naturelles : rugosité du sol, recouvrement de la végétation, etc. Les spécialistes ont donc cherché à simplifier l'équation et à en fournir une version utilisable. Fryberger (1979) a ainsi proposé une formule pour évaluer les Déplacements Potentiels Sableux (DPS) à partir des données anémométriques :

$$q \propto V_*^2(V_* - V_t) \tag{1.3}$$

avec

V_*	:	vitesse du vent à 10 m de hauteur (en nœuds)
V_t	:	vitesse-seuil à 10 m de hauteur (en nœuds)
$\propto$	:	exprime un rapport de proportionnalité

Cette formule n'exprime plus la quantité de sable déplacée, mais le potentiel théorique d'arrachement des sables. Elle met en évidence un aspect important de la dynamique éolienne : *le transport par le vent est une fonction cubique de*

sa vitesse. Cela implique une progression exponentielle qui confère un poids particulier aux valeurs élevées.

L'équation exprime un potentiel qui correspond à un maximum puisque la condition de disponibilité du matériel doit être réalisée pour qu'il y ait effectivement déplacement. Elle est enfin facile à utiliser et générique puisque les spécificités de la zone d'étude sont intégrées dans la vitesse-seuil retenue, estimée de manière empirique.

La formule de Fryberger permet de calculer un coefficient de transport potentiel de sable (Callot et Oulehri, 1996). Pour une direction donnée, il faut faire le produit de la fréquence d'observation de chaque vitesse supérieure à V_t par le potentiel de transport donné par la formule 1.3. À partir de calculs empiriques, Callot (1987) a proposé de diviser le coefficient par 12,5 pour que son utilisation avec des vitesses relevées en $m.s^{-1}$ soit possible. On obtient alors la formule suivante :

$$Q = \frac{q.f}{12,5} \tag{1.4}$$

avec

f : fréquence d'observation de $V_* > V_t$
q : déplacement potentiel de Fryberger

Le principal intérêt de l'utilisation de ce coefficient relativement abstrait est de rendre possible la comparaison des dynamiques éoliennes de différents sites, suivant la méthode des Roses des Déplacements Potentiels Sableux (RDPS).

A l'aide du coefficient de transport potentiel de sable (eq. 1.4) on définit ces roses en calculant les coefficients de déplacements potentiels, ou capacité de transport, pour chaque direction et chaque vitesse. On en fait alors la somme par direction, que l'on rapporte au nombre d'observations (vents nuls inclus) pour obtenir un pourcentage.

La représentation se fait sous forme vectorielle où chaque vecteur a pour orientation une direction de la rose des vents et pour module, exprimé en Unités Vectorielles (UV), la valeur de la capacité de transport associée à cette direction [1]. On peut ensuite, en faisant la somme vectorielle des déplacements dans les différentes directions calculer la direction résultante à laquelle est également associé un potentiel de migration et on peut représenter le résultat sous forme graphique (fig. 1.2).

La présentation des résultats contient donc trois valeurs importantes :

- la Capacité de Transport (CT) totale : la somme des modules du déplacement des 16 directions ;
- la Migration Résultante (MR), somme vectorielle des 16 capacités de transport, à laquelle est associée une Direction Résultante (DR) ;
- le Coefficient de Migration (CM) (= MR/CT) qui permet d'estimer si les déplacements se font dans une direction préférentielle. S'il tend vers 1, les déplacements sont très orientés et, quand il tend vers 0, ils ont une forte variabilité et le sable ne migre pas ou peu.

1. Le détail de la méthode de calcul et de représentation est présenté en annexe A.

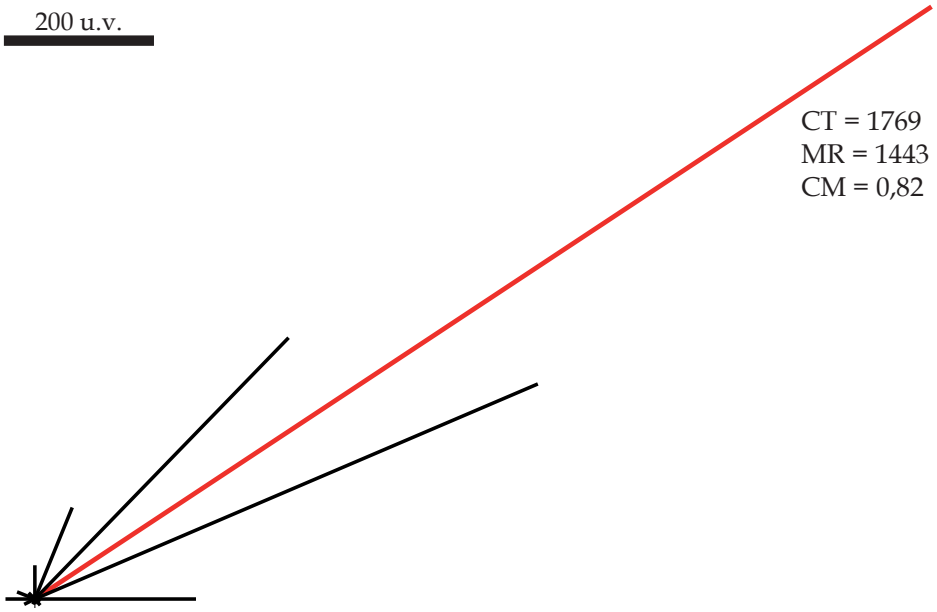


FIGURE 1.2 – *Rose des déplacements potentiels sableux (1994-2005) à Kebili, Tunisie. Données du CEPMT*

Les segments noirs de la figure représentent le déplacement potentiel dans chacune des 16 directions de la rose des vents. Leur longueur est proportionnelle à la valeur de ce déplacement, exprimé en unités vectorielles. Le trait rouge correspond à la direction de la migration résultante. Sa longueur est également proportionnelle à la valeur de la migration résultante. Ce mode de représentation sera identique pour toutes les RDPS exposées dans ce document.

Sous réserve de la vérification de certaines conditions - fourniture illimitée de sable, topographie peu marquée et faible couverture végétale - il est possible de convertir la capacité de transport en volumes transitant à travers une section de 1 m de large, perpendiculaire à la résultante des déplacements potentiels, au cours d'une année (en $m^3.m.an^{-1}$). La conversion se fait en appliquant une droite de corrélation à l'équation 1.2, suivant la vitesse-seuil retenue.

Pour $V_t = 4,5\ m.s^{-1}$ cette droite admet comme équation (Callot et Oulehri, 1996) :

$$Q' = 0,0716\ Q \tag{1.5}$$

Si la vitesse-seuil retenue est de 6 $m.s^{-1}$ l'équation devient :

$$Q' = 0,0692\ Q \tag{1.6}$$

En le multipliant par la densité apparente moyenne du sable éolien, de l'ordre de 1700 $kg.m^{-3}$, on peut transformer ce résultat en masse. L'ensemble de cette démarche est utile si l'enjeu est d'évaluer l'importance du risque d'ensablement lorsqu'il peut menacer des infrastructures, par exemple. Il faut en effet dimensionner les ouvrages ou choisir les éventuels modes de fixation en fonction des quantités de sables déplacées. Nous montrerons à la fin de ce chapitre (section 1.3) un exemple de son application.

La plupart des équations que nous venons de présenter sont valides dans des contextes soit expérimentaux, en conditions contrôlées de laboratoire, soit dans des contextes naturels très particuliers et minoritaires à l'échelle des régions sèches. C'est pourquoi la section suivante s'intéresse plus en détail aux éléments de complexité de l'étude de la dynamique éolienne.

1.1.2 Les paramètres influant sur la dynamique

Cette présentation reprend la synthèse de Marticorena (1995).

1.1.2.1 La nature des sols

Nous avons déjà évoqué la taille des particules mais la granulométrie des agrégats influe aussi sur la mobilisation. En effet, les particules libres de dimensions inférieures à celles des sables sont rares dans le sol et ce sont en général des agrégats qui sont concernés par l'érosion. On prend ainsi en considération le pourcentage d'agrégats secs de dimension inférieure à 0,84 mm pour élaborer des indices d'érodabilité des sols (tab. 1.2).

TABLEAU 1.2 – *Quelques indices d'érodabilité des sols proposés par Gilettte, extrait d'un tableau de Marticorena (1995)*

WEG [a]	**Soil texture**	**% dry aggregates** $< 0,84\ mm$	**WEI** [b]
1	very fine sand, fine sand, sand or coarse sand	93 – 99	160 – 310
2	loamy very fine sand, loamy fine sand, loamy sand loamy coarse sand or spric organic soil materials	90	134
3	very fine sandy loam, fine sandy loam sandy loam or coarse sandy loam	75	86
5	noncalcareous loam or silt loam with less than 20% clay content or sandy clay loam , sandy clay or hemic organic soils materials	55	48

a. wind erodibility group
b. wind erodibility index

La texture est également importante. On a pu montrer que les vitesses-seuil de mobilisation augmentent avec le pourcentage d'argiles et de limons dans le sol, tandis qu'elles diminuent avec l'augmentation de la teneur en sable. La teneur du sol en matière organique augmente sa capacité à former des agrégats mais, en phase de décomposition, semble affaiblir la dureté des croûtes qui peuvent se former en surface et protéger les sols de l'érosion.

1.1.2.2 La couverture des sols

Diverses observations montrent que la couverture de la surface du sol, en particulier végétale, influe sur les modalités de la dynamique éolienne à différents niveaux (Okin *et al.*, 2006). Elle agit sur la quantité de matériel mobilisable, par effet de protection, sur le déplacement, par effet de piégeage et sur les forces de friction du vent, par la rugosité qu'elle génère (fig. 1.3).

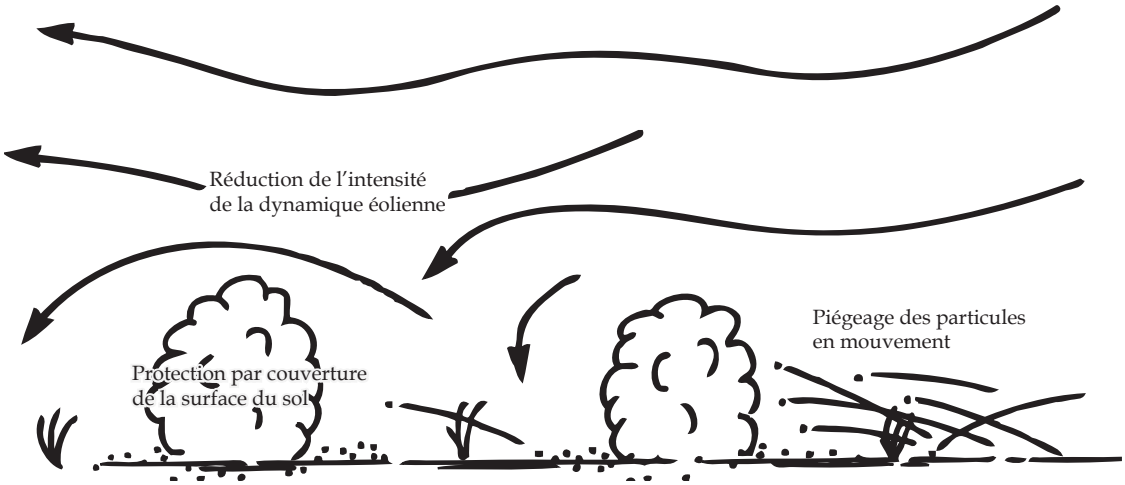


FIGURE 1.3 – *Les effets de la végétation sur la dynamique éolienne, d'après Okin* et al. *(2006)*

Ces auteurs considèrent que ces effets sont présents à différentes échelles spatiales, ce que confirment les observations de terrain. Dans le cas d'un plant intact - non pâturé - il n'y a pas d'accumulation mais plutôt une intensification de la dynamique qui peut se traduire par la mise en place de rides. En revanche, un plant pâturé situé au même endroit est à l'origine d'une accumulation à la fois interne et sous le vent, de type *nebka* [2] (fig. 1.4).

Cette différence peut s'expliquer par la densité du plant intact qui génère un effet Venturi [3] que le pâturage supprime. Localement, la rugosité différente des deux plants, à vent donné, soit renforce son efficacité, soit diminue sa compétence et déclenche le dépôt.

À l'échelle d'un groupement de végétaux, la densité influence également la dynamique. La figure 1.5 montre une zone sous le vent d'un cordon dunaire où la végétation est disposée suivant un gradient de densité décroissante. Là où la végétation est dense, où la rugosité est donc importante à l'échelle de l'état de surface, l'ensablement domine, tandis que là où la végétation est moins dense, le départ de matériel domine. Ce résultat met en évidence la notion de seuil qui est essentielle lorsqu'on envisage la capacité morphologique du vent.

La couverture des sols par la végétation ou par tout autre élément, naturel ou non, joue dans la dimension horizontale - la surface couverte est protégée de l'érosion - ainsi que dans la dimension verticale. On considère qu'un obstacle

2. Pour la signification des termes désignant les formes éoliennes d'obstacle, comme ici, se reporter au chap. 2, section 2.3.

3. Accélération de la vitesse du flux en raison de la réduction de l'espace disponible.

(a) Non pâturé

(b) Pâturé

FIGURE 1.4 – *Deux états de* Cyperus *et la dynamique éolienne associée. Bamba, nord-Mali*

d'une hauteur donnée protège la zone sous le vent sur une distance 10 à 12 fois supérieure à cette hauteur, à condition qu'il ait une densité propre et une surface frontale suffisantes (Combeau, 1977). La surface tridimensionnelle opposée par les obstacles à l'écoulement de l'air est donc un paramètre important dans l'évaluation de l'érosion éolienne, dans la mesure où elle conditionne la répartition de la force du vent entre celle exercée sur les obstacles et celle disponible

FIGURE 1.5 – *Gradient de densité de végétation. Bamba, nord-Mali*

effectivement pour l'érosion. On peut alors considérer la densité d'obstacles, notée λ, dans la caractérisation d'une surface de région sèche (Marticorena et Bergametti, 1995) :

$$\lambda = \frac{nbh}{S'} \tag{1.7}$$

avec

n	:	nombre d'obstacles
b	:	largeur moyenne des obstacles
h	:	hauteur moyenne des obstacles
S'	:	surface horizontale où l'observation est faite

Des expériences réalisées en soufflerie montrent que ce paramètre joue sur les frictions de la surface en les faisant décroître à mesure que la densité d'obstacles augmente, et les rendant négligeables quand λ devient supérieur à 0,3 environ. Ce paramètre important des modélisations permet ainsi de classer un espace suivant sa sensibilité à l'érosion, fournissant une référence pour, par exemple, expliquer les différentes formes éoliennes mises en place.

Cherchant à modéliser les émissions d'aérosols en milieux arides et semi-arides, Marticorena *et al.* (2004 ; 2006) ont travaillé sur une relation entre la rugosité induite par les éléments pérennes de la surface du sol : végétation, blocs et des valeurs de coefficients issus de données de télédétection. Dans la continuité, Pierre (2010) a paramétré la rugosité liée à la végétation saisonnière et aux cycles de précipitations. Ces auteurs ont travaillé à partir d'images à résolution grossière et, si leurs résultats sont pertinents dans le cadre du modèle qu'ils cherchent à renseigner, ils sont plus délicats à manipuler dans le cadre d'un suivi ou d'un diagnostic environnemental, en particulier en raison de l'important transfert d'échelle que la méthode implique. Nous essaierons de

montrer comment la densité d'obstacles peut néanmoins servir à caractériser une surface de région sèche dans une perspective de suivi opérationnel.

1.1.2.3 Les processus bio-physiques affectant les sols

En dernier lieu, la surface des sols connaît un certain nombre de processus qui affectent sa sensibilité à l'action éolienne. Ces processus sont liés au climat, aux actions biotiques et aux actions chimiques. Belnap et Gillette (1998), par exemple, montrent comment la nature des processus biologiques affectant la couverture des sols, associée à la texture de ces sols, joue sur les vitesses-seuil (fig. 1.6).

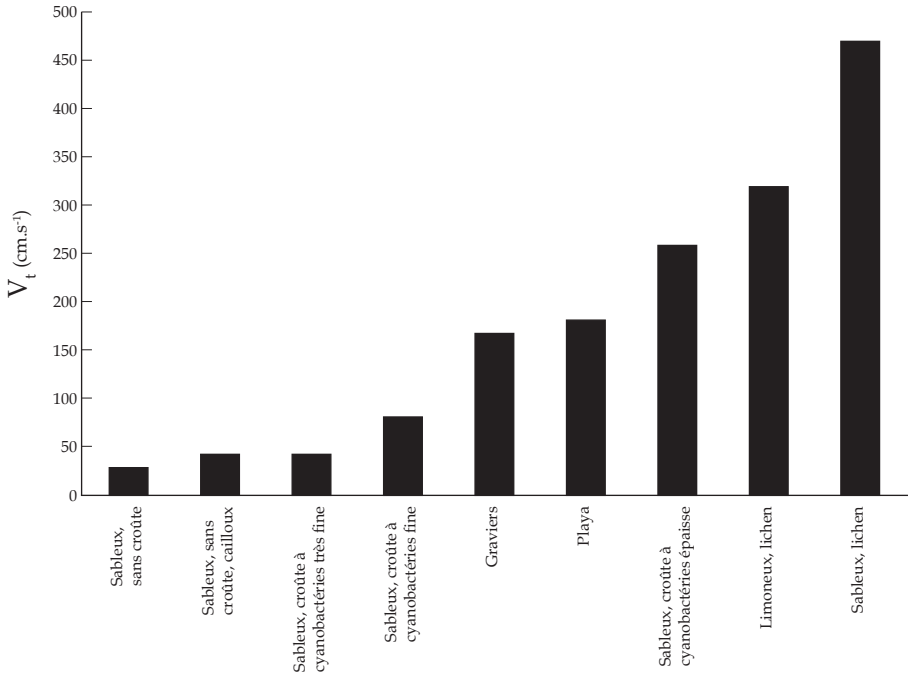


FIGURE 1.6 – *Les vitesses-seuil en fonction de la nature des sols et de leur couverture et en l'absence de perturbations, d'après Belnap et Gilette (1998)*

Sur des sols dénudés et sableux ou sablo-limoneux, les précipitations peuvent avoir un rôle indirect sur la dynamique éolienne. La percussion des gouttes (phénomène du splash) provoque en surface la formation de pellicules dites *de battance*. Leur structure très compacte bien que de faible épaisseur protège le sol de l'érosion éolienne, dans la mesure où il n'y a pas de perturbations extérieures comme du piétinement animal (Kardous, 2005).

On peut citer un dernier exemple de processus physique affectant la surface du sol et perturbant la dynamique éolienne : le vannage éolien. Il est directement lié aux caractéristiques du vent puisque ce dernier, n'emportant que les particules d'une certaine taille, effectue un tri sur les surfaces exposées à son action (fig. 1.7).

Sans perturbation, ce tri se poursuit jusqu'à ce que la surface soit couverte par des éléments grossiers non mobilisables. Il met alors en place un modelé

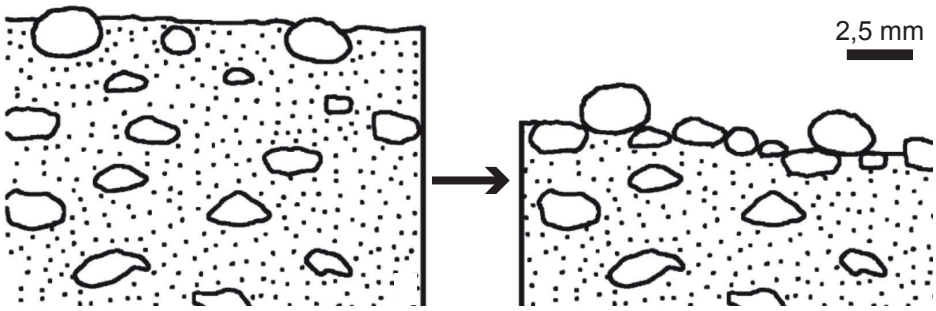


FIGURE 1.7 – *Mécanisme du vannage éolien, d'après Callot (2008)*

appelé *pavage de déflation* et que l'on rencontre dans toutes les régions sèches dès lors que le vent est efficace (fig. 1.8).

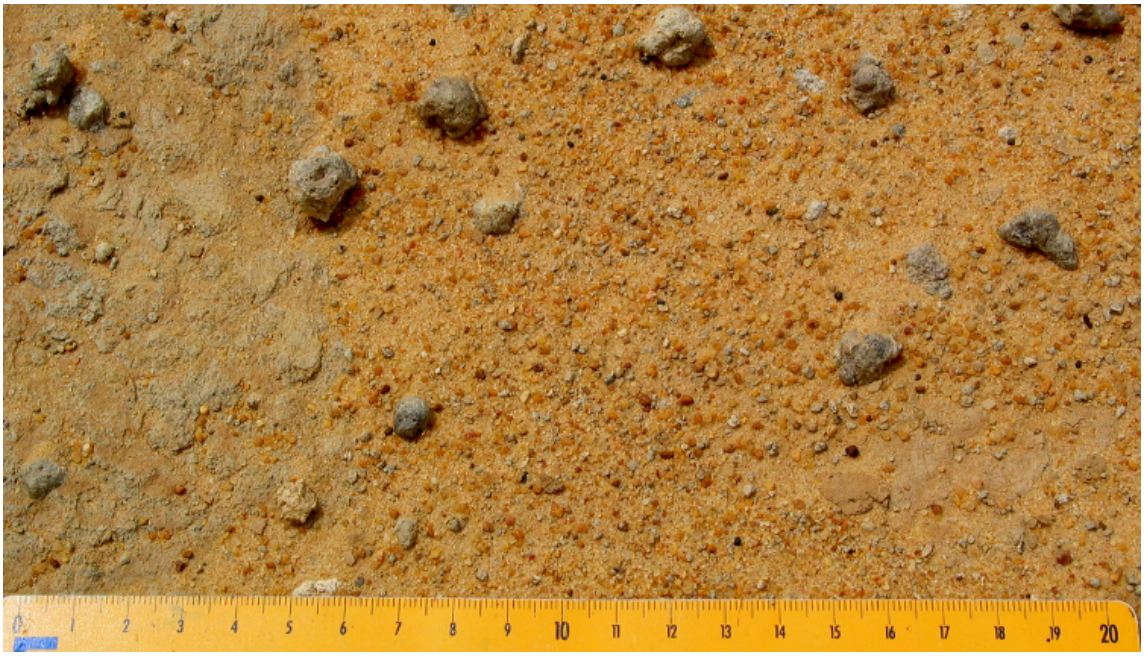


FIGURE 1.8 – *Effets du vannage éolien avec, à gauche, une croûte striée par la corrasion. Secteur de Bamba, nord-Mali*

L'étude de la dynamique éolienne en région désertique a également permis de mettre en évidence d'autres paramètres de contrôle, à des échelles spatiales et temporelles radicalement différentes. Ce point fait l'objet de la section suivante.

1.1.3 Transferts d'échelles

1.1.3.1 La complexité du Grand Erg occidental

À une grande échelle spatiale, de l'ordre régional, la morphodynamique éolienne peut s'organiser en systèmes d'envergure. Cette extension traduit l'influence d'autres paramètres que ceux que nous avons présenté jusqu'à présent.

Ce point n'est pas au cœur de ce travail aussi cette section est-elle succinte et non-exhaustive. Elle s'appuie sur l'exemple du Grand Erg occidental. S'il n'est pas le plus grand des ergs existants, il présente une couverture sableuse quasi-continue qui le rend remarquable (Callot, 1987).

L'étude de sa structure montre que les formes éoliennes, qu'elles soient dunaires ou non, présentent plusieurs orientations, certaines dominantes et d'autres secondaires, qui, par endroits, peuvent se recouper (fig. 1.9).

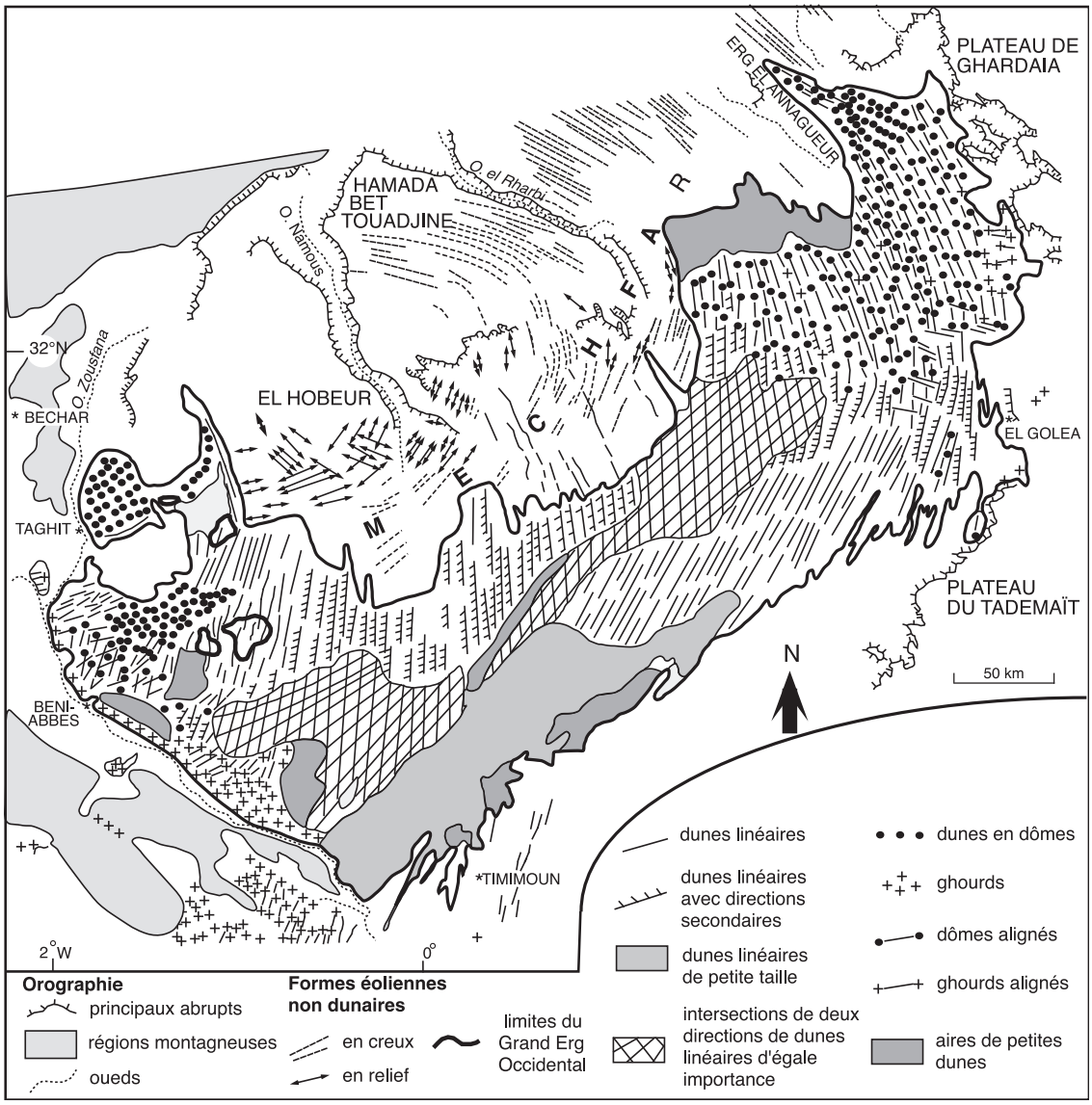


FIGURE 1.9 – *Structure du Grand Erg occidental, d'après Callot (2008)*

La complexité de ce système d'orientations, ainsi que son aspect structurel, dans le cas de grandes dépressions creusées dans les hamadas (larges plateaux en pente douce), excluent de l'attribuer au seul régime des vents. Callot (1991) propose comme explication une interaction d'actions fluviatiles et éoliennes : au Plio-Pléistocène, l'erg serait remonté beaucoup plus au nord qu'actuellement et des cordons dunaires espacés se seraient installés. Lors de la phase humide

suivante, ces cordons, fixés par la végétation, auraient canalisé des cours d'eau qui se seraient alors incisés. L'encroûtement de la surface aurait ensuite fossilisé le système.

1.1.3.2 Des formes complexes

L'étude de ce système a permis de mettre en évidence une structure complexe où les formes actuelles se mêlent aux formes héritées toujours en activité, en conservant une disposition cohérente avec l'hypothèse paléoenvironnementale (fig. 1.10).

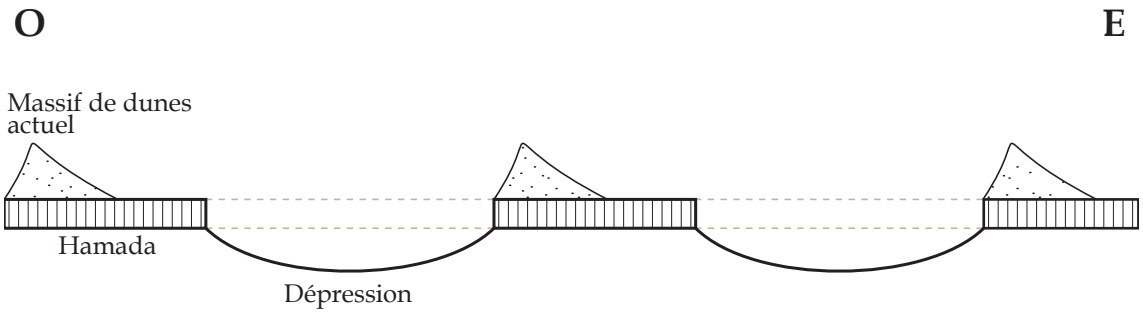


FIGURE 1.10 – *Coupe montrant la disposition des formes éoliennes dunaires et non-dunaires au centre du Grand Erg occidental entre l'oued Namous et l'oued Rharbi*

Cette disposition traduit une stabilité des zones d'ablation et des zones d'accumulation qui, là encore, ne peut s'expliquer par le seul régime des vents. L'hypothèse permettant d'expliquer ce système de la façon la plus pertinente est fournie par Clos-Arceduc (1969) et se fonde sur l'existence d'oscillations stationnaires aériennes (fig. 1.11).

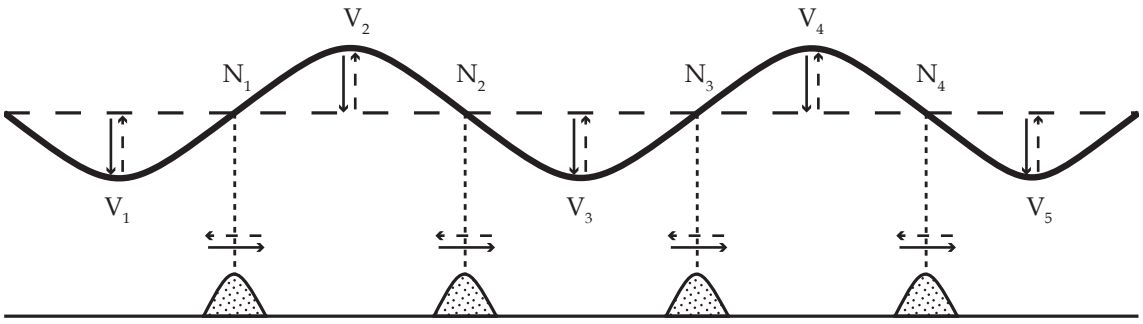


FIGURE 1.11 – *Fonctionnement d'une oscillation stationnaire et conséquences érosives. D'après Clos-Arceduc (1969)*

Les V_i sont appelés les ventres et les N_i les nœuds. Les variations d'amplitude de l'oscillation font que, au niveau des nœuds et à proximité de la surface du sol, le mouvement du fluide (l'hypothèse s'applique aussi bien à l'air qu'à l'eau) est dit *horizontal-alternatif*, ce qui génère un dépôt. Les ventres sont par contre des secteurs d'agitation verticale où l'ablation domine. Malgré

la méconnaissance des causes de la permanence des oscillations depuis le Plio-Pléistocène, elle seule peut expliquer celle de la disposition des formes dont la nature est fonction de la phase climatique.

1.1.3.3 Conclusions sur les échelles spatiales et temporelles

D'une certaine façon, le dernier exemple traduit un effet de seuil classique en géomorphologie. Au-delà d'une certaine extension spatiale, la temporalité des paramètres de contrôle change. Les facteurs jouant sur le temps court n'ont donc plus la même portée explicative.

L'exemple du Grand Erg occidental montre aussi que les grands systèmes désertiques ont une stabilité à l'échelle temporelle historique, voire géologique, qui ne permet pas d'étudier de la même façon des zones à la réactivité plus forte, par exemple en contexte de désertification.

Cette question du transfert d'échelle est essentielle et peut être source de confusions. Par exemple, Mainguet (1983), s'appuyant sur son expérience d'analyse et de classifications des formes éoliennes, construit un système conceptuel de fonctionnement des aires ensablées en zones à bilan sédimentaire positif ou négatif théoriquement robuste et séduisant. L'application de cette théorie au cas du Grand Erg occidental (Mainguet et Jacqueminet, 1984) conduit en revanche à des erreurs d'interprétation que l'analyse de terrain a révélées (Callot, 1987). Le passage de l'observation à la généralisation, puis l'application de cette généralisation à des cas d'étude, si les différents transferts d'échelle ne sont pas pris en considération, peuvent ainsi se révéler hasardeux.

Enfin, les travaux réalisés dans le contexte désertique ont enrichi la connaissance des formes éoliennes. À cette échelle, ils ont montré que la capacité morphogénique du vent, associée à sa capacité de transport, permettent d'aborder la géomorphologie de surface des régions sèches d'un point de vue dynamique, et de lier formes et évolutions du milieu comme la section suivante cherche à l'illustrer.

1.2 Aspects géomorphologiques

Il n'est pas dans notre propos de reprendre dans le détail l'ensemble des critères de classification des formes éoliennes. La bibliographie en fournit plusieurs synthèses. L'objet de cette section est davantage de préciser quelques éléments de différenciation et de montrer à travers l'étude d'exemples ciblés comment on peut caractériser les formes et en quoi elles peuvent renseigner sur la dynamique du milieu auquel elles appartiennent.

1.2.1 La classification des formes éoliennes

Les chercheurs ayant travaillé sur les formes éoliennes désertiques ont avancé plusieurs propositions de classification. On peut citer en particulier :

– parmi les précurseurs : Chudeau (1920) dont certaines remarques, appuyées uniquement sur des observations de terrain, sont remarquables de pertinence ;
– Bagnold (1941) dont l'ouvrage comporte également des descriptions fines de différentes formes ;
– Mainguet et Callot (1978) pour le travail spécifique sur la classification des formes et la définition des combinaisons ;
– Oulehri (1992) dont l'étude du fleuve de sable de la région de Laâyoune (Sahara occidental) est très riche ;
– Cook *et al.* (1993) qui est une référence complète concernant tant les formes que les processus ;
– Callot (2008) pour la synthèse la plus récente.

On admet depuis longtemps que la classification géomorphologique doit associer processus et principe dimensionnel, le processus ressortissant d'une logique qualitative et le principe dimensionnel d'une logique quantitative qui permet de prendre en considération les échelles et les seuils (Cailleux et Tricart, 1956). Sur cette base, on peut dans un premier temps distinguer d'une part les formes d'ablation et d'autre part les formes d'accumulation.

1.2.1.1 Les formes d'ablation

Elles ne posent guère de problèmes conceptuels. Elles résultent soit de la corrasion lors de l'usure d'une roche cohérente par le matériel transporté par le vent, soit de la déflation lorsqu'un autre processus - thermoclastie, gélifraction, etc. - libère du matériel qui est détaché puis emporté. Les formes d'ablation se rencontrent à toutes les échelles de taille et dans toutes les régions sèches, mais elles sont d'autant plus spectaculaires que le vent est plus constant, cas que l'on rencontre davantage dans les régions désertiques.

Les plus petites, en taille, sont les cailloux éolisés ou dreykanters, matériel en place sur une longue durée et poli par le vent. Lorsque le phénomène s'exerce sur la roche à nu du sol, des stries de corrasion apparaissent.

Les yardangs se situent un niveau au-dessus dans l'échelle dimensionnelle. Il s'agit de buttes aérodynamiques creusées dans une roche cohérente, avec une forme allongée sous le vent. Leur hauteur varie selon la résistance du matériau et suivant l'intensité et la régularité des vents efficaces.

Enfin, un niveau encore au-dessus, les systèmes crêtes-couloirs comptent parmi les plus impressionnantes formes d'ablation, les plus rares également. Ils résultent de l'exploitation par le vent des diaclases de couches souvent gréseuses, accentuées par les actions météoriques et l'érosion hydrique concentrée dans ces diaclases érodées. Ils atteignent des dimensions pluri-kilométriques en longueur et hectométriques en largeur (fig. 1.12) [4].

4. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 21.650342 N / 15.030014 E

FIGURE 1.12 – *Système crêtes-couloirs sur le plateau du Djado, Niger. Extrait* Google Earth *d'une image SPOT5 de 2010*

1.2.1.2 Les formes d'accumulation

Elles posent plus de problèmes, parce que les classifications traditionnelles sont généralement appuyées sur les seuls critères morphométriques, en particulier de taille. Or, une segmentation ainsi conçue, appliquée à des formes mises en place par un processus qui est quasi uniforme et continu, le vent, s'accomode mal du continuum observé sur le terrain. De plus, les différents paramètres de contrôle de la morphodynamique éolienne font que l'on trouve des formes de toutes les tailles. Aussi est-il nécessaire d'introduire une distinction liée aux processus, adossée ensuite à des critères quantitatifs permettant la mise en évidence de seuils.

Les sections précédentes nous ont permis de montrer que le transport éolien est une fonction de la vitesse du vent qui définit sa capacité de charge. De même, comme il est extrêmement rare que le vent agisse sur une surface aérodynamiquement lisse, cette dernière a aussi une influence. Le long d'un transect, on peut alors caractériser l'action du vent par la combinaison de ce qu'il dépose et de ce qu'il emporte en chaque point considéré. Lorsque, pour une raison ou une autre, la vitesse du vent diminue, cette combinaison est déséquilibrée au bénéfice du dépôt et l'acccumulation commence (fig. 1.13).

La construction d'une forme résulte ainsi de la rencontre entre un fluide : l'air, et un solide en grains : la masse de sable déposé, qui n'a pas le même comportement physique qu'un grain libre (Callot, 2008). Cela entraîne une perturbation du fluide par le solide qui, par rétroaction, déclenche une modification de la forme du solide du fait de sa structure meuble. Au-delà d'un certain seuil, la forme atteint une importance suffisante pour créer une dynamique locale.

Cela nous a conduit à faire une distinction entre une forme construite en

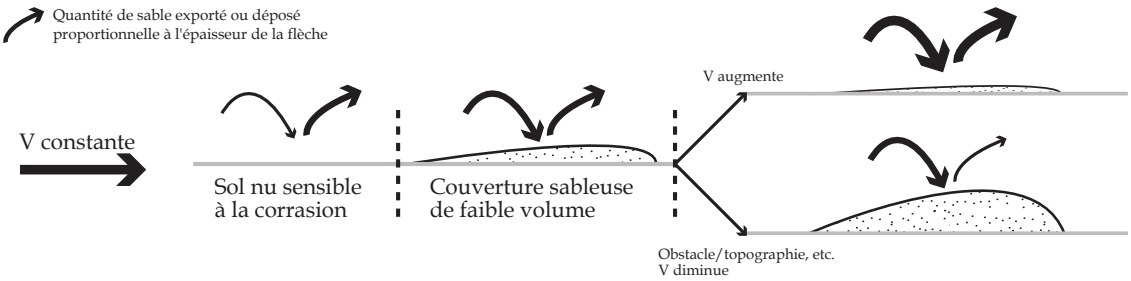


FIGURE 1.13 – *Tentative de schématisation du lien entre transport et action morphologique du vent*

lien avec un obstacle - non éolien - qui diminue la capacité de charge du vent et une forme éolienne dont les caractéristiques propres produisent le même effet. Nous pouvons ainsi définir deux catégories :

1. la forme éolienne autonome : sous condition de fourniture de sable suffisante et hors perturbations, sa seule présence est la source de la dynamique qui la maintient en place et la fait évoluer. Elle peut être élémentaire ou, à une autre échelle de taille, constituée de plusieurs formes et donc dite complexe.
2. la forme éolienne d'obstacle (Coque, 1962, Khatelli, 1996) - *anchored dune* pour certains auteurs anglo-saxons - qui n'existe que dans la relation à un obstacle. Si cet obstacle disparaît, la forme disparaît très rapidement.

Le continuum n'est pas brisé par cette distinction puisque, nécessairement, c'est une perturbation du flux qui amorce la construction d'une forme. Une forme autonome a donc aussi un rapport initial avec un obstacle. Mais, passé un certain seuil, elle s'en affranchit pour établir un nouveau système de relations avec le flux éolien.

On peut ajouter à ce premier niveau de distinction un second qui lui est parallèle : si la perturbation décrite plus haut est suffisamment importante, une arête vive peut se mettre en place, qui correspond à une, parfois deux pentes et qui a une orientation qui est soit transversale soit longitudinale. La présence d'une arête augmente ainsi les possibilités de caractérisation géométrique de la forme. On peut alors distinguer les formes éoliennes d'obstacle avec et sans arête vive des formes éoliennes autonomes avec et sans arête vive.

1.2.1.3 Une forme éolienne autonome remarquable : la barkhane

Parmi les formes autonomes, la plus remarquable et la plus connue est la barkhane. Elle illustre parfaitement cette problématique de relation complexe entre un fluide et un solide en grains. Sa forme en croissant traduit l'intensité de la dynamique et son fonctionnement propre est particulièrement intéressant. Oulehri (1992) distingue pour cette dune cinq secteurs organisés d'amont en aval dans la direction du vent (fig. 1.14).

Le secteur A est le lieu de la déflation, provoquée par les filets d'air qui se compriment à l'arrivée sur cet obstacle. Le sable qui s'y trouve est mis à jour

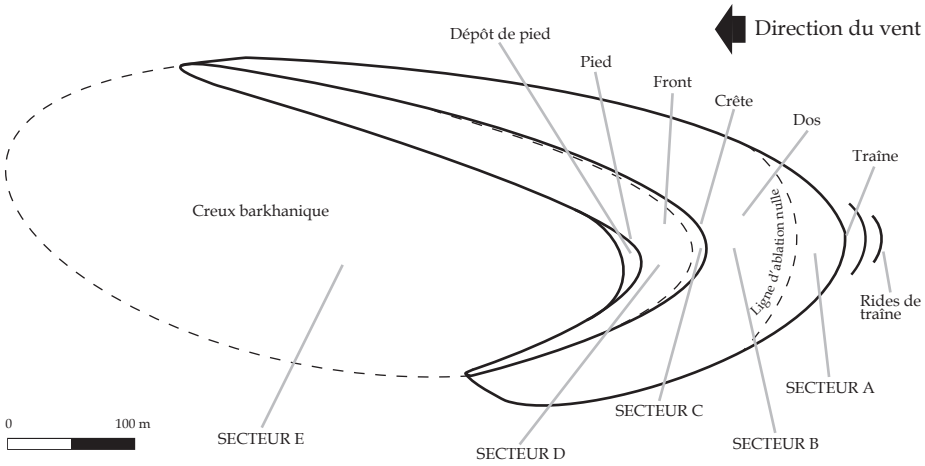


FIGURE 1.14 – *Vue en plan d'une barkhane et délimitation des secteurs selon le comportement du sable, d'après Oulehri (1992)*

par cette déflation et a séjourné sous la barkhane pendant son déplacement. Le secteur B est une zone de dépôt et de tri parce que les filets d'air s'incurvent vers le haut et emportent les particules les plus fines. Après avoir franchi la crête, les particules s'accumulent dans le secteur C (le haut du front), générant une pente qui peut atteindre 39°. Au-delà, le phénomène de l'avalanche se déclenche qui ramène la pente à sa valeur d'équilibre (voir *infra*). La partie inférieure du front, le secteur D, est protégée de l'action du vent sauf sur les cornes latérales. Enfin, le secteur E correspond à une zone de remous qui ramène le sable vers la barkhane, créant le dépôt de pied.

L'exemple détaillé de la barkhane permet de mettre en évidence la forte structuration de certaines formes éoliennes qui permet d'étudier un certain nombre de leurs paramètres en les reliant à la dynamique éolienne et ensuite aux dynamiques du milieu (Zhen-Ting *et al.*, 2007).

1.2.2 Orientation des déplacements

Le premier paramètre concerne les directions des déplacements sableux. Les formes éoliennes peuvent être orientées selon la résultante des vents efficaces, à différentes échelles de temps et de façon variée suivant leur nature. On distingue deux types d'orientation : longitudinale et transversale.

1.2.2.1 Les formes longitudinales

Les yardangs sont un exemple parlant d'orientation longitudinale. Ils résultent d'un processus qui prend plus ou moins de temps suivant leur taille et la résistance du matériel qui les compose mais qui s'échelonne entre la génération humaine et la période historique. À l'échelle géologique, on trouvera les systèmes de crêtes-couloirs (cf. *supra*). Ces formes renseignent également sur l'intensité de la dynamique : Callot (1991) a ainsi évalué une vitesse d'ablation

de l'ordre de 1 $mm.an^{-1}$ sur des yardangs façonnés dans des buttes-témoins de sédiments palustres du Grand Erg occidental.

Les formes d'accumulation offrent aussi de nombreux exemples d'orientation dans la direction des vents efficaces. Dans les formes de petite taille, on peut citer *la nebka à flèche sableuse* qui se rencontre dans toutes les régions sèches et dont la langue sableuse est allongée dans la dernière direction de vent efficace (fig. 1.15).

FIGURE 1.15 – *Nebkas à flèche, secteur de Bamba, nord-Mali. Hauteur des buissons : 30 cm*

Dans certaines régions à vents particulièrement importants et suivant la taille de l'obstacle, ces flèches peuvent atteindre des dimensions considérables, suffisantes pour être visibles par des satellites (fig.1.16) [5].

1.2.2.2 Les formes transversales

Concernant les formes transversales, les plus petites que l'on puisse observer sont les rides éoliennes, ou *ripple-marks*. Elles sont orientées perpendiculairement au dernier vent efficace. On peut les considérer comme étant en limite entre des formes d'ablation et des formes d'accumulation dans la mesure où elles traduisent un tri des particules de la surface. On distingue leur hauteur de leur longueur d'onde, ces deux paramètres semblant être fonction de la granulométrie du matériel et des caractéristiques du vent (Pelletier, 2009). L'intérêt des rides éoliennes est qu'elles peuvent se mettre en place sur des formes sableuses déjà existantes (fig. 1.17). Leur suivi permet ainsi d'étudier les effets du vent sans introduire des instruments de mesure qui perturbent la dynamique éolienne et pour lesquels il est délicat de distinguer la mesure effective de l'effet de perturbation. C'est en les étudiant que l'on a ainsi appris beaucoup sur la dynamique du vent arrivant sur une barkhane (Oulehri, 1992, Elbelrhiti, 2005).

5. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 24.584805 N / 30.729563 E

FIGURE 1.16 – *Nebkas à flèche géantes, secteur de Douch, Égypte. Capture d'écran* Google Earth *d'une image* QuickBird *de mars 2003*

On peut alors considérer que, sur une surface sableuse, ces rides indiquent les endroits où, pour diverses raisons, le vent est particulièrement efficace.

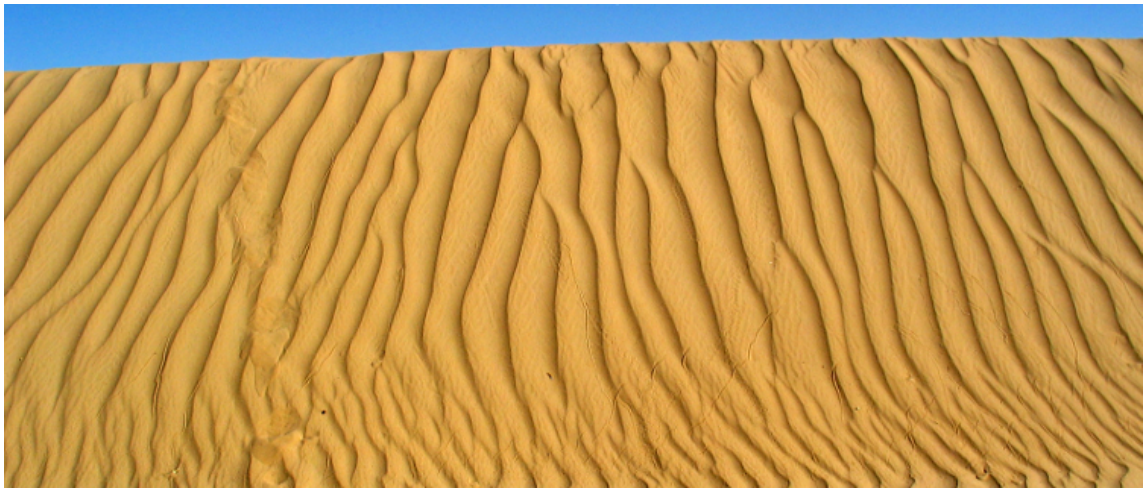


FIGURE 1.17 – *Face sous le vent d'un cordon dunaire (orienté O-E) strié de rides correspondant à 3 jours de vent d'est ; hauteur du cordon : 1,8 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali*

Enfin, la barkhane est, elle aussi, une forme orientée transversalement par rapport au vent dominant. On peut ainsi envisager de mesurer cette direction à partir de la bissectrice de l'angle formé par ses deux cornes (fig. 1.18). Pour cela, il faut néanmoins qu'elle ait une stabilité suffisante par rapport à d'éventuels changements temporaires de direction du vent. Cette stabilité est liée à sa taille, qui doit être de l'ordre hectométrique pour être parfaitement représentatif, sauf si la région possède un régime de vent strictement unidirectionnel.

Ces divers exemples montrent comment les formes éoliennes peuvent renseigner sur les directions du vent. Ils montrent aussi que, suivant la taille de

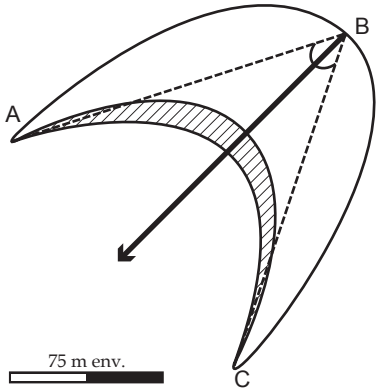


FIGURE 1.18 – *L'axe de déplacement de la barkhane*

la forme et sa composition, ces informations seront de nature conjoncturelle ou structurelle. Les aspects géométriques des formes éoliennes permettent également d'induire des volumes de sable transporté.

1.2.3 Hauteurs des formes et volumes mobilisés

1.2.3.1 Approche thématique

Avant d'évoquer les possibilités de mesure, on peut proposer des approches thématiques. Oulehri (1992) a par exemple mis en relation les volumes de sable déplacés par le vent et les formes ou associations de formes rencontrées sur le terrain dans le système du « fleuve de sable » du cap Juby au Maroc (fig. 1.19).

FIGURE 1.19 – *Formes éoliennes en fonction des volumes de sable déplacés. D'après Callot et Oulehri (1996)*

Alors que Mainguet *et al.* (2001) considèrent la présence de nebkas comme *la marque d'une mobilisation massive du sable* la figure précédente permet également de dire que, lorsque le stock de sable disponible pour le vent n'est pas assez conséquent, la dynamique éolienne aura tendance à mettre en place des nebkas plutôt que des formes plus importantes comme des barkhanes. Cette hypothèse est confirmée par les travaux de modélisation de Nield et Baas (2008). Ainsi la seule présence/absence de formes permet-elle de formuler des hypothèses sur la dynamique éolienne d'un site donné.

1.2.3.2 Approche morphométrique

Les formes à arête vive peuvent, elles aussi, fournir des informations précieuses. Une pente composée de grains de sable éoliens, dont la granulométrie varie dans des limites fixes, a en effet une valeur relativement stable. Suivant les auteurs elle peut atteindre 34° (Oulehri, 1992) mais il semble que 31° soit une valeur approchée raisonnable (Coursin, 1964). Cette valeur permet ainsi d'évaluer avec une précison satisfaisante la hauteur des barkhanes en mesurant (fig. 1.20) :

1. Sur le terrain le paramètre C qui permet de retrouver la hauteur $H = C.\sin 31$.
2. Sur photographie aérienne ou images satellite Très Haute Résolution (THR)[6] le paramètre C', projection de C sur le plan horizontal et de retrouver $H = C'.\tan 31$.

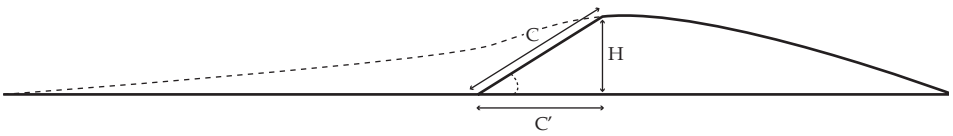


FIGURE 1.20 – *Coupe sagittale et paramètres morphométriques d'une barkhane, d'après Oulehri (1992)*

Elbelrhiti (2005) propose une relation entre la hauteur d'une barkhane et sa largeur mais elle nous paraît plus délicate à mettre en application dans la mesure où elle n'est valide que pour une forme « parfaite » et strictement non perturbée par un vent latéral par exemple. En revanche, la mesure de la projection de la pente croulante est valide pour estimer la hauteur à partir du moment où on est dans la situation d'une barkhane, c'est-à-dire lorsque l'arête atteint le haut de la dune, ce qui la différencie du dièdre.

On peut appliquer la démarche à d'autres formes. Ainsi les nebkas à flèche ont une arête qui suit une pente descendante jusqu'à rejoindre le niveau de référence. Si l'on considère la section frontale de plus grande hauteur, elle se présente sous la forme d'un triangle. En prenant comme valeur des deux pentes latérales la valeur d'équilibre, on peut calculer la hauteur maximale de la flèche.

1.2.3.3 Les possibilités de conversion en volumes

Lorsque l'on connaît la hauteur d'une forme qui présente une géométrie relative, comme la nebka à flèche, on peut transformer cette hauteur en volume. La flèche d'une nebka peut se comparer ainsi à un demi-prisme droit à base triangulaire dont le volume est fourni par la formule :

$$V = \frac{1}{2}B.L \tag{1.8}$$

6. Dans tout ce mémoire, cet acronyme désignera, par convention, la très haute résolution spatiale en planimétrie.

avec

B : l'aire de la section de plus grande hauteur
L : la longueur de la flèche

La possibilité de convertir des hauteurs de formes en volumes de sable est encore plus intéressante dans le cas des barkhanes. Ces dernières sont les seules dunes vraiment mobiles, comme en atteste les traditions des nomades qui racontent que, pour échapper aux razzias ou aux collecteurs d'impôts, ces derniers déposaient leurs biens sous une barkhane qui les submergeait. Une fois le danger éloigné, leurs propriétaires n'avaient plus qu'à attendre que la barkhane soit passée pour récupérer leurs valeurs (Oulehri, 1992).

Toutefois, cette propriété ne doit pas occulter le fait que ce n'est pas lorsque le sable est organisé en barkhane qu'il transite le plus rapidement, ni en plus grande quantité (Elbelrhiti *et al.*, 2008). Le sable est en effet piégé et son parcours dans la forme fait avancer cette dernière. La barkhane peut ainsi être définie comme *un stock mobile de sable piégé* (Callot, 2008). Ceci posé, on peut alors estimer la quantité de sable transitant par une barkhane se déplaçant (fig. 1.21).

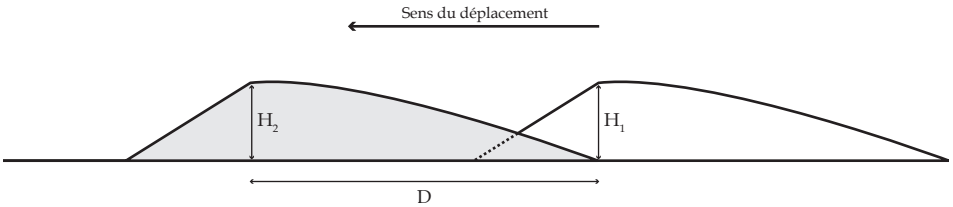


FIGURE 1.21 – *Coupe latérale d'une barkhane se déplaçant*

Si l'on considère une section frontale de 1 m de large au centre d'une barkhane de hauteur H se déplaçant d'une distance D (en mètres) entre t_1 et t_2, alors cette section voit passer un volume $V = H \times D$ de sable exprimé en m^3 par mètre linéaire et par unité de temps. On pourrait être tenté de directement extrapoler ce résultat à la largeur de la barkhane pour avoir le déplacement total et non seulement sur une section d'un mètre. Toutefois, la hauteur de la barkhane n'étant pas identique sur toute sa largeur, ce n'est pas possible sans surestimer considérablement les résultats, comme l'a démontré Oulehri (1992) à propos d'une étude de la direction provinciale de l'équipement de Laâyoune (nord du Sahara occidental). L'estimation quantitative du déplacement à partir de l'analyse des barkhanes fait l'objet d'un développement détaillé dans la section suivante.

1.3 Proposition d'un modèle d'approche des déplacements sableux

1.3.1 Fondements conceptuels

1.3.1.1 Le risque éolien

La morphodynamique éolienne est, en régions sèches, tout autant un atout - pour le tourisme - qu'un des risques les plus importants, menaçant les infrastructures de transport (routes, voies ferrées, etc.) et les zones d'activités ou de peuplement (ensablement d'oasis, de villages). Ce risque est souvent mal évalué en raison de la difficulté à connaître les modalités du déplacement du sable. Dans les régions à régime de vent unidirectionnel qui sont traitées ici, la direction des déplacements est évidente et ce sont les quantités qu'il est important de pouvoir apprécier.

1.3.1.2 Limites des méthodes d'évaluation des quantités transportées

Les méthodes d'évaluation à partir de prélèvements directs, sur la base de pièges à sable, peuvent être sujettes à caution dans la mesure où elles interfèrent avec la dynamique éolienne et introduisent donc un biais. Si les progrès techniques et correctifs permettent de réduire ce biais, ces mesures restent délicates à mettre en place dans des zones le plus souvent difficiles d'accès, et leur représentativité pose question. Goossens *et al.* (2000) ont ainsi démontré en testant cinq des pièges à sable les plus utilisés que l'échantillonnage du flux en saltation n'était représentatif que sur l'emprise spatiale de ces pièges, le plus grand faisant 70 cm de large, et sur la durée de l'expérience. Le résultat est donc ponctuel et difficilement exploitable dans une perspective d'aménagement et de prévention.

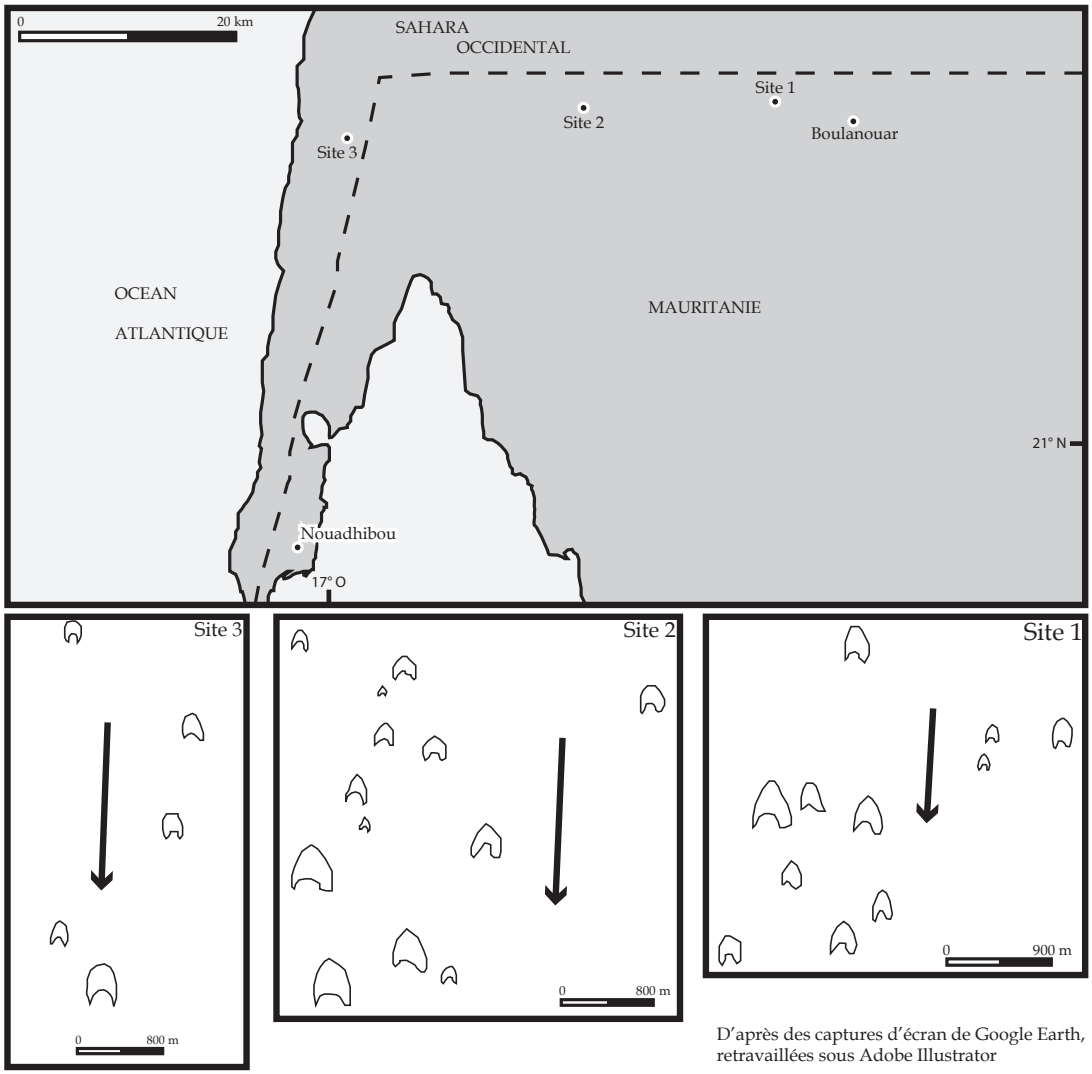
Nous avons présenté en section 1.1.1.3 la méthode d'estimation des déplacements à partir des données anémométriques. Cette méthode est efficace sous certaines conditions qui sont généralement celles des régions arides à vent unidirectionnel, au sens de la classification de Fryberger (1979). En revanche, elle implique de disposer de séries de données suffisamment longues, au minimum un an (Tsoar, 1974) mais plutôt cinq voire dix ans (Lancaster, 1982). Elle connaît également la même limite de représentativité que les prélèvements sableux, les mesures étant ponctuelles et les stations souvent localisées dans les pôles urbains.

1.3.1.3 Utilisation des formes éoliennes

Il existe, théoriquement, une dernière possibilité d'évaluation des quantités déplacées fondée sur l'observation des barkhanes. Nous avons montré qu'elles pouvaient être considérées comme des stocks mobiles de sable. Cela implique que le maximum de la capacité de transport du vent est évacué sous le vent de la dune et que l'excédent s'accumule sur la barkhane. Ce jeu de dépôt/départ fait avancer la dune et si l'apport augmente, elle grossit ; s'il diminue, elle maigrit.

Ainsi la barkhane peut-elle être considérée, à un instant t, comme la traduction de la capacité de transport du vent.

Nous avons montré que le volume de sable déplacé par une barkhane pouvait être estimé à partir de son déplacement et de sa hauteur. Cette hypothèse a été suivie par Coursin (1964) qui a réalisé des mesures de terrain et sur missions de photographies aériennes dans la région de Boulanouar, au nord-ouest de la Mauritanie (fig. 1.22). Dans ce secteur, un fleuve de sable étire ses bar-



D'après des captures d'écran de Google Earth, retravaillées sous Adobe Illustrator

FIGURE 1.22 – *Localisation de la zone de travail et tentative de schématisation de la morphodynamique éolienne locale*

khanes presque parfaitement nord-sud de façon plus ou moins continue sur près de 200 km, depuis la Bahia Cipriano jusqu'à la Baie du Levier, contrôlé par les alizés côtiers. Sur sa trajectoire, il rencontre la voie ferrée et la piste Nouadhibou–Zouerate qui constituent l'axe principal des déplacements et un enjeu, au plan économique, menacé par les dunes. Les mesures de Coursin lui ont permis de mettre au point une relation empirique locale entre le déplace-

ment d'une barkhane hypothétique et sa plus grande hauteur :

$$V = \frac{300}{H} \tag{1.9}$$

avec

V : avance annuelle moyenne de la barkhane, en $m.an^{-1}$
H : plus grande hauteur de la barkhane en m

Cette formule montre que les barkhanes sont d'autant plus rapides qu'elles sont plus petites. Cela s'explique par le fait que lorsqu'une barkhane grandit, le vent agit sur une surface croissant suivant une fonction au carré alors que le volume croît de façon cubique. Ainsi le déplacement est-il ralenti. Elle permet également d'estimer le volume déplacé : il est de 300 $m^3.an^{-1}$ sur un mètre de largeur au centre de la barkhane (cf. *supra*, fig. 1.21) qui est le secteur de l'édifice qui voit passer le plus de sable.

L'approche développée à présent vise dans un premier temps à confirmer les travaux de Coursin - qui utilise des photographies aériennes de mars 1944, avril 1954 et février 1955 et des relevés de terrain de mars, avril et mai 1956 - en appliquant ses méthodes à des données plus récentes. Nous nous appuierons ensuite sur ces résultats pour tenter de valider le calcul de déplacements généralisés à partir de la morphométrie des barkhanes.

Elbelrhiti (2005) montre qu'il existe une relation entre la largeur W et le volume V des barkhanes du fleuve de sable Tarfaya–Laâyoune. Il utilise ensuite cette relation pour évaluer des quantités de sables déplacé qu'il cherche à comparer avec des données météorologiques. La relation établie est :

$$V \approx \frac{1}{45} W^3 \tag{1.10}$$

Cet auteur utilise des photographie aériennes et des contours GPS pour ses mesures. Il a choisi de travailler sur la largeur plus que sur la hauteur, arguant que la détermination de cette dernière est malaisée sur des images et source d'erreur. Nous n'adhérons pas à l'argument pour deux raisons :

1. Si, sur une image donnée, la mesure de la longueur de la pente croulante est difficile, alors celle de la largeur l'est encore plus. La pente croulante présente en effet au rayonnement une surface lisse et homogène qui se traduit par une réponse radiométrique spécifique qui permet même de la distinguer du dépôt de pied. De surcoît, sur des images panchromatiques comme celles utilisées par cet auteur, la largeur nous paraît d'autant plus difficile à mesurer sans erreur qu'elle peut se confondre - radiométriquement - avec un éventuel placage sableux distinct de la dune.
2. Elbelrhiti reconnait d'ailleurs que sa démarche génère diverses erreurs qui induisent une erreur totale comprise entre 10 % et 30 %. Ce point nous paraît capital car une estimation du volume fondée sur une fonction au cube de la largeur entraîne une propagation d'erreur exponentielle. Si l'on considère l'erreur minimale potentielle, 10 %, alors une dune mesurée à 100 m de large aura un volume de 25 000 m^3 et la même, mesurée à 110 m de large, aura un volume de 33 275 m^3, soit 33 % de plus.

Ces raisons, associées à l'incertitude sur les données météorologiques utilisées et le fait que ce point n'est pas au cœur du travail, nous conduisent à développer notre propre approche, sur un autre secteur. Une éventuelle comparaison pourra ainsi être proposée.

1.3.2 Méthodes anciennes, nouvelles sources, propositions innovantes

1.3.2.1 Validation de la formule de Coursin

L'équation 1.9 a une validité locale puisqu'elle dépend de la compétence du vent qui n'est pas uniforme à la surface du globe. Développer une approche généralisable implique donc de proposer des méthodes simples de définition de la relation *in situ*, susceptibles d'être appliquées partout. Dans cet esprit, l'utilisation de la télédétection s'impose.

Ce travail a utilisé un jeu de données précis spatialement et étalé dans le temps, comprenant, recalées les unes par rapport aux autres :

- une photographie aérienne de 1996 à l'échelle 1 : 5 000, numérisée ;
- une mosaïque, réalisée selon la méthode développée par Venard *et al.* (2010), de captures d'écran *Google Earth*. Elles sont extraites d'une image satellite *QuickBird* à 0,6 *cm* de résolution capturée le 05/01/2003 ;
- une image satellite Worldview à 0,5 *m* de résolution capturée le 10/08/2009 ;

Et, en complément, un jeu de données moins précis spatialement, plus resserré dans le temps et utilisant :

- le canal 8, panchromatique à 15 *m* de résolution, d'une image LANDSAT ETM+ du 15/12/2000, téléchargée depuis le serveur du Global Land Cover Facility (GLCF). La position des barkhanes est repérée par un point sous le logiciel ArcMap. La couche obtenue est exportée au format KMZ de *Google Earth* ;
- le logiciel *Google Earth* pour mesurer les déplacements de ces barkhanes entre le 15/12/2000 et la date de l'image disponible - 5 entre le 18/12/2002 et le 26/12/2003 - ainsi que la hauteur des barkhanes à la même date.

Le premier jeu de données fournit des informations en principe plus fiables que le second mais elles sont limitées en quantité : nous n'avons pu faire de mesures que sur 18 barkhanes, et pas sur toute la période. La mission de photographie aérienne qui suit la voie ferrée et n'offre qu'une seule image exploitable et le coût de l'achat d'une image satellite THR, de l'ordre de 15 € par km², expliquent cette limite. Le problème posé en terme de représentativité nous a conduit à mettre au point la seconde démarche.

Celle-ci se fonde néanmoins sur une hypothèse restrictive : la hauteur des dunes n'est mesurée que sur *Google Earth* et pas sur l'image de 2000, de résolution trop grossière. Cela implique que l'on considère dans le calcul final que la hauteur est restée la même sur la période, ce qui n'est pas nécessairement le cas. Toutefois, l'étroitesse de la fenêtre temporelle considérée, au maximum trois ans, permet de limiter l'impact de ce biais, notamment dans des régions

où le régime des vents est relativement stable. Nous avons ainsi pu mesurer 90 dunes supplémentaires.

Dans les deux cas de figure, le déplacement est mesuré simplement sur le plan horizontal et la hauteur est calculée depuis la mesure de la longueur de la pente croulante (cf. *supra*, fig. 1.20). La durée totale du déplacement est obtenue en divisant le nombre exact de jours entre les prises de vues par 365,25 pour avoir une valeur en années décimales.

Un extrait des résultats obtenus est présenté dans le tableau 1.3. La base

Tableau 1.3 – *Extrait de la base de données de mesures des barkhanes*

Barkh n°	L [a]	ϕ [b]	H [c]	D_{tot} [d]	T [e]	D_{moy} [f]	$C = D_{moy}.H$ [g]
Pr1 [h]	23,5	31	14,1	264,7	12	22,1	311,9
Pr2	27,5	31	16,5	293,4	12	24,5	403,6
Pr3	20,2	31	12,2	434,6	12	36,2	440,3
Pr4	15,4	31	9,3	517,8	12	43,2	400,1
Pr5	14,9	31	8,9	328,4	12	27,4	244,2
Lt1 [i]	40	31	24	44,6	3	14,9	357,3
Lt2	26	31	15,6	55	3	18,3	286,4
Lt3	24	31	14,4	56,2	3	18,7	270,1
Lt4	27	31	16,2	52,7	3	17,6	285
Lt5	22	31	13,2	57	2	28,5	376,7

a. longueur de la projection de la pente sous le vent
b. angle de la pente
c. hauteur calculée
d. déplacement total sur la période considérée
e. durée de la période considérée (arrondie pour des commodités de présentation)
f. déplacement annuel moyen
g. constante de Coursin
h. jeu de données 1
i. jeu de données 2

de données complète est présentée en annexe B. La moyenne des constantes calculées est de 325. Cette valeur est, à la marge d'erreur liée à la résolution des images exploitées près, cohérente avec celle de Coursin.

La figure 1.23 montre, de plus, que la courbe d'équation $y = 300/x$ s'ajuste bien au nuage de points composé des données collectées dans cette étude. Nous considérons donc que la valeur 300 est une approximation représentative dans le temps et dans l'espace et nous la conservons pour la suite du travail.

1.3.2.2 Les données météorologiques

Puisque l'objet de cette étude est de montrer comment il est possible d'interpréter le déplacement des barkhanes comme la traduction quantitative du

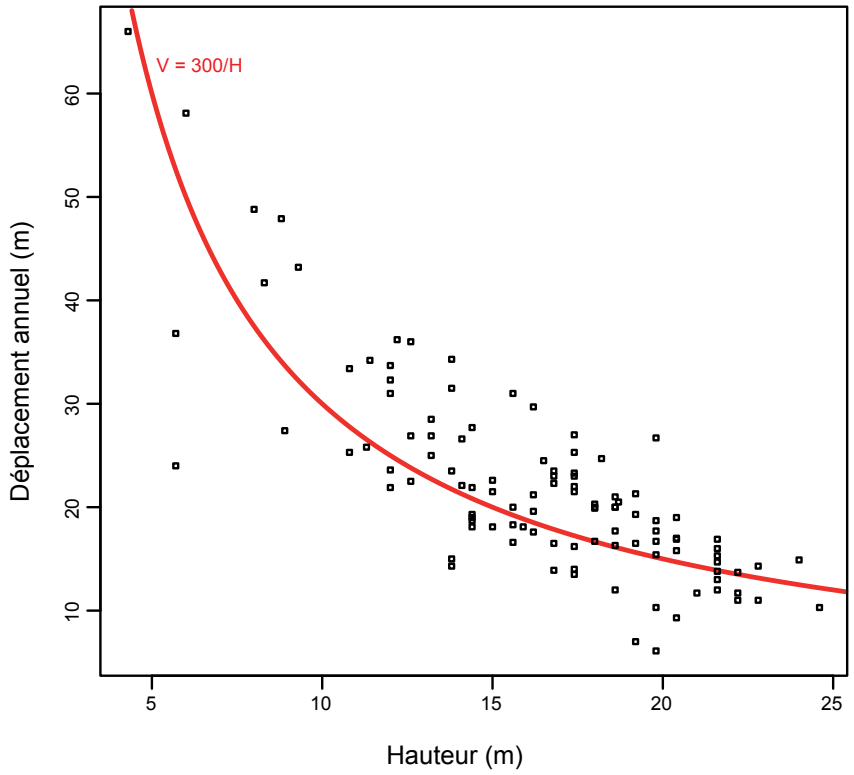


FIGURE 1.23 – *Valeurs de déplacements en fonction de la hauteur des barkhanes de Boulanouar entre 1996 (2000) et 2009 (2003). En rouge, la courbe déterminée par Coursin (1964)*

régime éolien, il importe de disposer de données météorologiques. Celles que nous utilisons ont été enregistrées à la station de Nouadhibou et proviennent du Centre Européen pour la Prévision à Moyen Terme (CEPMT). La première question qui se pose concerne la possibilité d'utiliser ces données dans une comparaison avec le déplacement des barkhanes du secteur de Boulanouar. Nouadhibou se situe à environ 50 km à l'ouest de Boulanouar et, surtout, en position côtière. Néanmoins, la distance n'est pas excessive et l'observation des directions de migration des barkhanes à l'échelle subrégionale montre que, le long de ce gradient est-ouest, elles restent stables (fig. 1.22). Une réserve s'impose toutefois : les vents sur le littoral seront probablement supérieurs à ceux de l'intérieur des terres. Cette donnée devra donc être intégrée à l'interprétation des résultats.

Les données se présentent sous la forme de tableaux annuels comportant le mois, le jour et l'heure de relevé, les vitesses et directions de vent discrétisées, et la visibilité horizontale entre le 1er janvier 1985 et le 31 décembre 2005. En principe les relevés, instantanés, sont tri-horaires ce qui devait donner 8 relevés quotidiens et donc plus de 61 000 valeurs. En pratique, ces tableaux ont dû faire l'objet d'un nettoyage en plusieurs étapes :

1. Certaines valeurs sont aberrantes, allant jusqu'à 90 $m.s^{-1}$ et plus. Oulehri (1992) n'ayant pas relevé de valeur supérieure à 23 $m.s^{-1}$ à Laâyoune dans des conditions climatiques comparables, nous avons choisi de supprimer toutes les valeurs supérieures à 30 $m.s^{-1}$. Nous avons ensuite supprimé

toutes les valeurs supérieures à 20 $m.s^{-1}$ qui n'étaient pas accompagnées d'une baisse significative de la visibilité. Les données ainsi supprimées représentent toujours moins de 1 % de l'échantillon global. Le biais potentiellement introduit par ces corrections est donc négligeable.

2. La série de données peut être divisée : de 1985 au milieu des années 1990, les relevés à 3h, 9h, 15h et 21h sont sporadiques et, par la suite, beaucoup plus réguliers. Mais le biais introduit est important car la comparaison devient hasardeuse et, surtout, à 3h, 9h et 21h les vents sont plutôt faibles en zone saharienne. Ce déséquilibre dans la résolution des données introduit donc une diminution mécanique des capacités de transport calculées avec les données de la deuxième partie, les plus précises. Pour harmoniser l'échantillon, nous avons donc choisi de ne conserver que les données relevées à 0h, 6h, 12h et 18h.
3. Ainsi la répartition des relevés est-elle équilibrée au long de la journée et sur l'ensemble de la période. Certaines données sont manquantes mais, comme le montre la fig. 1.24, on peut d'une certaine façon dire que les manques sont homogènes et que l'échantillon reste représentatif. Au lieu des 61 000 valeurs initialement espérées, la base de données n'en contient que 20 700. Ce nombre reste suffisant et nous sommes en mesure de bien en apprécier la qualité, ce qui est essentiel.

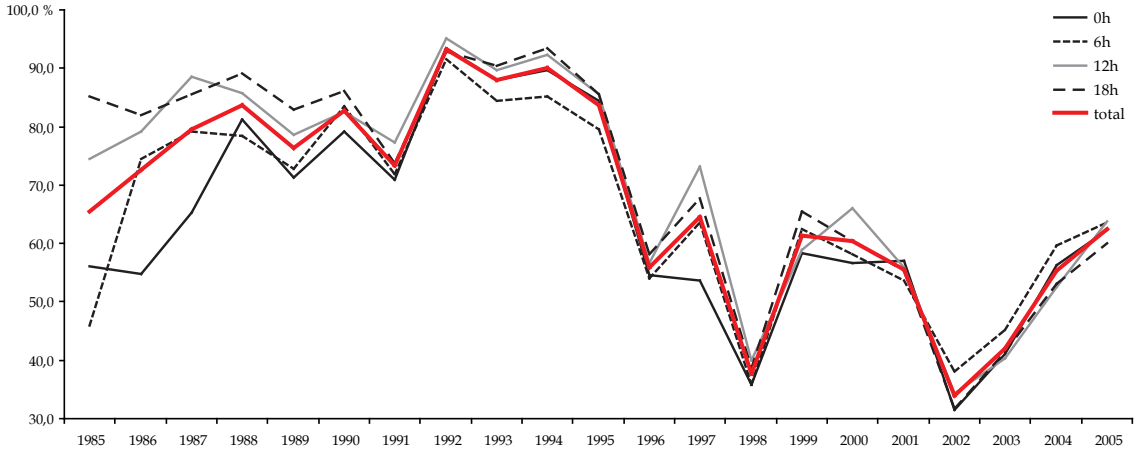
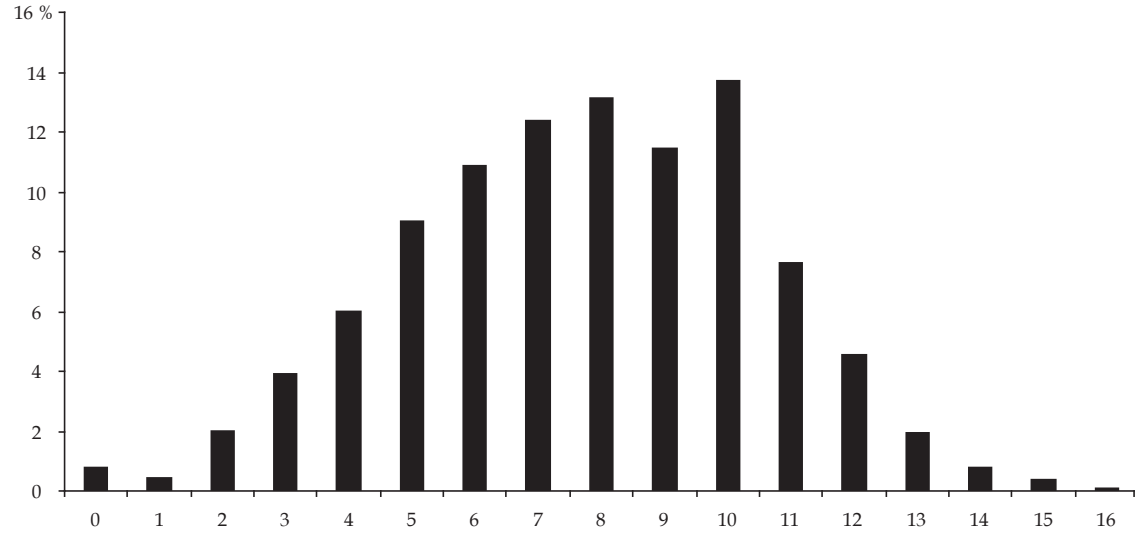


FIGURE 1.24 – *Part (relative aux données initiales) des valeurs conservées pour l'analyse.* $Y_0 = 30$

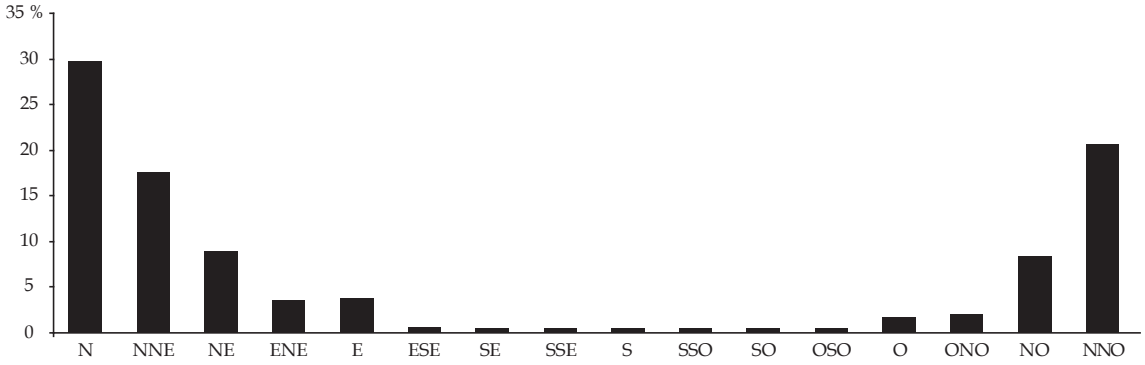
Les données ont été alors traitées en utilisant la méthode de Fryberger et nous avons retenu la valeur de $4,5$ $m.s^{-1}$ comme vitesse-seuil, d'après les travaux d'Oulehri qui montre que cette valeur donne les meilleurs résultats pour le fleuve de sable du Cap Juby et que ces derniers sont cohérents avec les formes observées sur le terrain.

La figure 1.25 présente le résumé statistique des données. L'approche par les DPS est présentée dans la section 1.3.3.

Les valeurs supérieures à 15 $m.s^{-1}$ ne représentent que 0,5 % de l'échantillon ce qui signifie que, même si l'équation de Fryberger va les affecter d'un poids



(a) Fréquences des vitesses de 0 à 16 $m.s^{-1}$



(b) Fréquences des directions

FIGURE 1.25 – *Résumé statistique des données de vent de la station de Nouadhibou*

important, elles ne pèseront malgré tout pas trop dans le résultat final. Même si elles étaient erronées et avaient passé les filtres que nous avons appliqués, elles ne constituent alors pas un biais rédhibitoire.

1.3.2.3 Convertir le déplacement d'une barkhane en volumes pertinents de sables déplacés

Le dernier problème méthodologique qui se pose est celui de la quantification du déplacement de sable par les bakhanes. Nous avons montré que, sur la base de la constante de Coursin, nous pouvions considérer qu'il passe en moyenne 300 $m^3.m_l.an^{-1}$ au centre d'une barkhane dans la région de Boulanouar[7]. Si on considère que le déplacement réel est une fonction homogène sur toute sa largeur de la hauteur de la barkhane, alors on peut s'en approcher

7. m_l : mètre linéaire.

en pondérant la valeur maximale par un coefficient, noté R, qui correspond au rapport entre :

- la projection de la face sous le vent de la barkhane sur un plan vertical perpendiculaire à la direction du déplacement d'une part ;
- le rectangle enveloppant ce versant, qui a pour longueur la largeur de la dune et pour largeur sa hauteur maximale, d'autre part.

Ce calcul a été effectué sur une barkhane, appelée *dune Coursin* (fig. 1.26). Son déplacement a été suivi par cet auteur puis par les ingénieurs de la Société Nationale des Industries Minières de Mauritanie (SNIMM) depuis avril 1956. Elle présente l'intérêt d'être positionnée au sud de la voie ferrée ce qui l'a protégée des éventuelles opérations de fixation. La forme bien dessinée, proche du type, de cette dune, et son aile est, plus développée que son aile ouest, sont représentatives de l'ensemble des dunes du secteur.

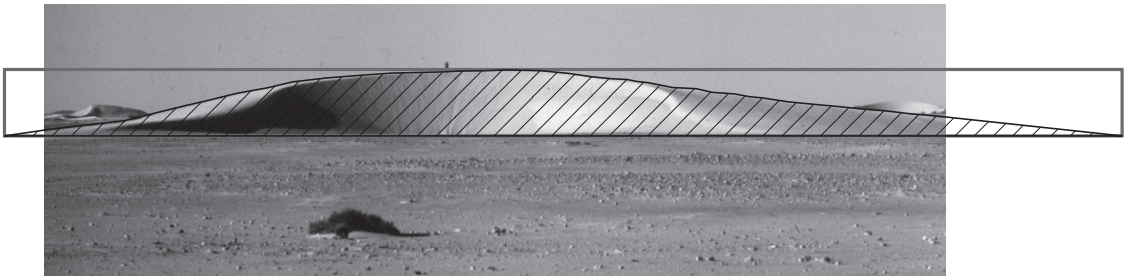


FIGURE 1.26 – *Schématisation du rapport R à partir de l'exemple de la dune Coursin. Cliché : Y. Callot (1996)*

Dans ce cas, $R = 0,56$. Sauermann *et al.* (2000) illustrent les relations géométriques entre les différentes dimensions d'une barkhane et montrent que le volume d'une barkhane est bien une fonction de sa plus grande hauteur. Enfin, ils montrent que la pente des côtés d'une barkhane oscille autour d'une valeur d'équilibre qui, dans leur cas, est de l'ordre de 20°, mais d'autres auteurs trouvent 11° (Hesp et Hastings, 1998). Si on considère d'une part la face avant d'une barkhane comme un triangle isocèle et d'autre part son rectangle enveloppant, alors il est cohérent de trouver un rapport entre leurs deux surfaces de l'ordre de $0,5$. La valeur exacte du coefficient dépendra néanmoins de la forme moyenne des dunes d'un secteur donné, fonction elle aussi du régime des vents. On peut donc considérer que les barkhanes du secteur de Boulanouar déplacent en moyenne : $300 \times 0,56 = 168\ m^3.m_l.an^{-1}$. Cette valeur nous sert de référence dans la suite du raisonnement.

1.3.3 Résultats et perspectives

1.3.3.1 Des volumes aux capacités de transport

La valeur de 168 m^3 de sable déplacé en moyenne par une barkhane sur une largeur d'un mètre permet de retrouver la valeur de Q, le coefficient de Fryberger exprimant la capacité de transport potentiel du vent et autorisant des comparaisons de site à site sur la base de relevés de vents.

En effet, 168 correspond à Q', c'est-à-dire le résultat de la transformation par régression linéaire de la capacité de transport du vent en volume, présentée en section 1.1.1.3. Aussi, en inversant les termes des équations 1.5 et 1.6, on obtient pour une vitesse-seuil de $4,5\ m.s^{-1}$:

$$Q = \frac{Q'}{0,0716} \tag{1.11}$$

Et pour une vitesse-seuil de $6\ m.s^{-1}$ on obtient :

$$Q = \frac{Q'}{0,0692} \tag{1.12}$$

Un volume déplacé de 168 m^3 donne alors une capacité de transport dans le sens de la résultante de **2346** pour une vitesse-seuil de $4,5\ m.s^{-1}$. Cette valeur doit à présent être comparée aux résultats de l'approche par les DPS.

1.3.3.2 Les déplacements potentiels sableux de Nouadhibou

Le traitement statistique des données de vent de la station de Nouadhibou permet de dresser un tableau synthétique des déplacements potentiels sableux dans la région de Nouadhibou (fig. 1.27).

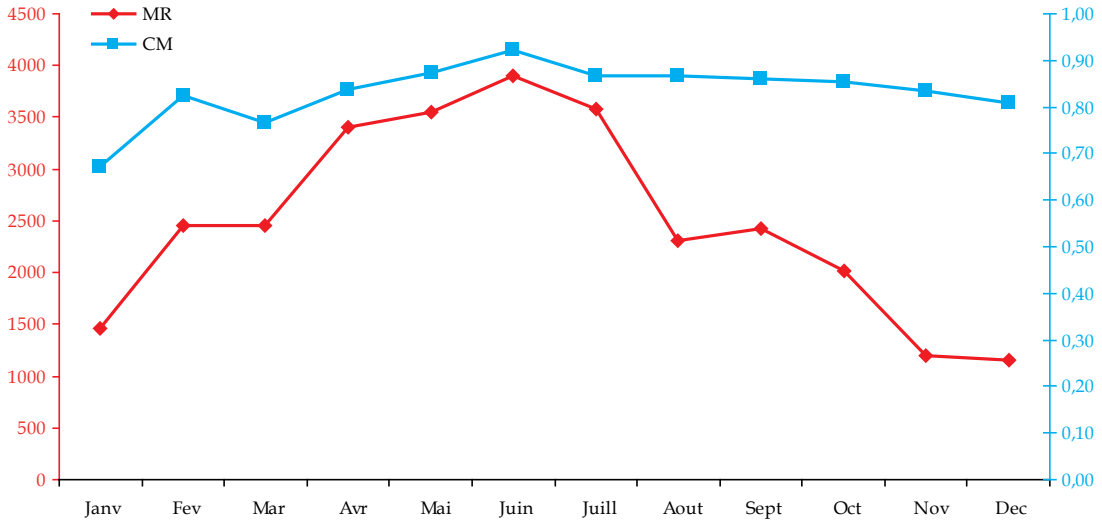
La figure 1.27(a) montre que les DPS annuels semblent se répartir en deux groupes, traduisant sans doute deux saisons : la première, de mars à septembre, est caractérisée par une capacité de transport élevée et un coefficient de migration dans les valeurs hautes de la fourchette. La seconde, d'octobre à février, se traduit par une baisse sensible de la capacité de transport - en moyenne, 1 656 contre 3 088 pour la première partie - et par une variabilité directionnelle plus importante.

La figure 1.27(b) montre, au sein de la journée, des variations typiques de la zone saharienne. Elles se traduisent par une augmentation régulière de la capacité de transport le jour et par une chute pendant la nuit. En revanche, le coefficient de migration est plus faible vers le milieu de la journée alors qu'il se maintient à des niveaux élevés par ailleurs. Cette figure donne du relief à l'importance de disposer de données de vents nocturnes. Globalement, ces courbes sont en accord avec les résultats de Oulehri (1992). Cependant, en s'enfonçant vers l'intérieur des terres, les vents ont tendance à s'affaiblir, traduisant la différence entre les alizés maritimes et continentaux.

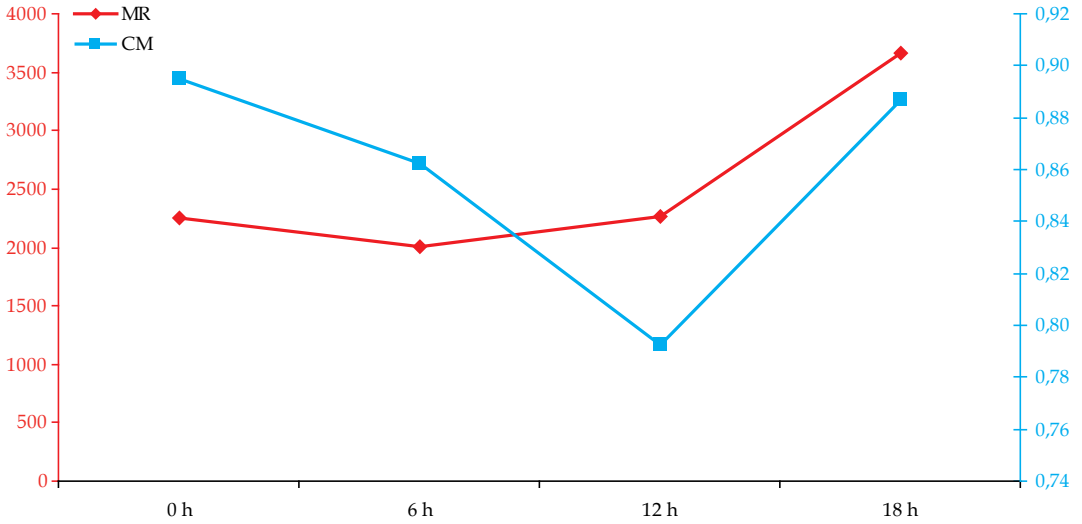
Les DPS calculés pour la période enregistrée montrent que :

- la capacité de transport dans la direction de la résultante est de l'ordre de **2 458** ;
- la direction résultante des migrations est d'origine **1,7°** ;
- le coefficient de migration est de l'ordre de **0,82**.

Ces résultats appellent quelques commentaires. La valeur très élevée du coefficient de migration - Oulehri ne trouve que 0,66 à Laâyoune - s'explique probablement par la position maritime de Nouadhibou. Il n'est pas à exclure qu'une station basée à Boulanouar enregistre des valeurs inférieures. La valeur de la résultante des migrations ne correspond pas exactement à celle des



(a) DPS mensuels



(b) DPS horaires

FIGURE 1.27 – *Variations des déplacements potentiels sableux à Nouadhibou (1985-2005)*

formes obervées sur le terrain, y compris à long terme. Lors de ses travaux dans le secteur, Coursin avait fait bâtir un mur en forme de V très ouvert derrière la barkhane qui est désignée par son nom. En explorant le secteur sous *Google Earth*, nous avons retrouvé ce mur (fig. 1.28) [8] et avons également identifié la position de la dune en 2003 d'après des relevés GPS effectués en 1996 par Y. Callot lors d'une expertise pour le compte de la SNIMM et de l'Institut Géographique National (IGN).

Nous avons ainsi pu mesurer la direction du déplacement de la dune Coursin pendant 47 ans et la valeur obtenue correspond à une résultante de l'ordre de 8°, légèrement différente du résultat de l'approche par les DPS. L'utilisation

8. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 21.274497 N / 16.720097 O

FIGURE 1.28 – *Le mur construit par l'équipe de Coursin en 1956. Capture d'écran* Google Earth *d'une image* QuickBird *de déc. 2003*

des données de Nouadhibou n'est cependant pas aberrante, puisque l'ordre de grandeur reste le même, et ce résultat montre bien que l'avancée dans les terres se traduit par un infléchissement des migrations.

Enfin, la valeur de la capacité de transport est remarquablement proche de celle que nous avons obtenue par l'étude des formes éoliennes : **2 458** contre **2 346**. Elle tend à valider notre approche, sous certaines conditions que nous discutons dans la section suivante.

1.3.3.3 Discussion et perspectives

Le résultat ainsi obtenu doit être apprécié du point de vue thématique et du point de vue qualitatif.

D'un point de vue qualitatif, nous avons essayé de suivre une démarche la plus rigoureuse possible. Certes, l'utilisation de données à référence spatiale de sources diverses introduit des erreurs, mais celles-ci restent limitées (fig. 1.29) [9]. Les méthodes employées ont également permis de réduire l'incertitude liée à la représentativité des mesures.

En revanche, le calcul de R, fondé sur une seule barkhane, est critiquable. Nous allons essayer de pallier cette limite en constituant une base de données photographiques et d'appliquer la méthode pour affiner l'estimation de ce coefficient. Néanmoins, le fait que la barkhane puisse être considérée comme une forme proportionnée avec un type bien identifié et des relations affines entre ses différentes dimensions (Hesp et Hastings, 1998, Sauermann *et al.*, 2000, Zhen-Ting *et al.*, 2007, Bourke et Goudie, 2009) milite en faveur d'un coefficient bien déterminé et proche de 0,5.

Enfin, la proximité des valeurs de Q obtenues par les formes éoliennes et

9. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 27.232047 N / 13.200965 O

FIGURE 1.29 – *Précision de l'approche couplant* Google Earth *et* LANDSAT. *Capture d'écran* Google Earth *d'une image* QuickBird *de décembre 2003*

Le point 1 correspond au marquage d'une barkhane sur l'image LANDSAT de 2000. On constate qu'il se situe bien sur l'axe du déplacement et de surcroît au sommet d'une traîne. Ces traînes successives peuvent elles-mêmes être des indicateurs du déplacement, voire d'épisodes climatiques - pluies - les ayant mises en place.

par les vents est remarquable. La différence entre les deux peut s'expliquer de trois façons :

- les marges d'erreur : explication qualitative ;
- la différence entre la dynamique éolienne à Nouadhibou et à Boulanouar : explication qualitative ;
- le fait que les barkhanes enregistrent des minima des déplacements réels : explication thématique.

Nous avons souhaité effectuer une comparaison entre ces résultats et le secteur de Laâyoune puisque nous disposons des calculs de DPS que Oulehri a effectués pour la période 1980–1989. Nous avons pu mesurer 30 barkhanes sur des images *QuickBird* à 0,6 m de résolution entre le 05/01/2005 et le 30/12/2010. Nous obtenons ainsi : $V \times H = 290$. La conversion en DPS, en retenant 0,56 comme valeur de R, donne un résultat de **2 268**.

Ce résultat est nettement supérieur à celui d'Oulehri qui trouve une valeur de **1 232** pour la résultante des DPS. Il l'est d'autant plus si l'on considère que la capacité de transport totale est en fait supérieure à celle enregistrée par les barkhanes. Deux hypothèses peuvent alors être formulées :

1. Ce résultat peut montrer que la proximité des valeurs constatée sur le secteur Nouadhibou–Boulanouar est une coïncidence liée aux marges d'erreur. Dans ce cas l'approche est invalidée.
2. La différence peut provenir de l'éloignement temporel entre les calculs théoriques d'une part et les mesures de déplacements réels d'autre part. Dans ce cas il faut intégrer le résultat à une approche dynamique.

De fait, Oulehri (1992) constatait une augmentation des capacités de transport sur la période d'enregistrement de ses données (fig. 1.30).

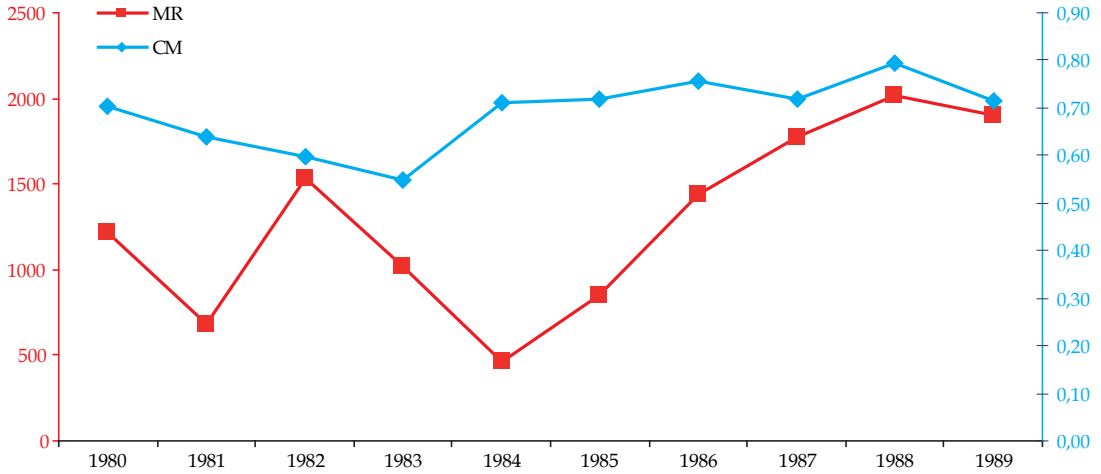


FIGURE 1.30 – *Évolution de MR et CM à Laâyoune entre 1980 et 1989. D'après Oulehri (1992)*

Si l'on considère - mais, pour l'instant, aucune donnée ne nous permet de confirmer cette hypothèse, hormis l'observation des formes éoliennes - que la tendance s'est effectivement poursuivie sur le moyen terme, il est cohérent d'observer quelque 20 ans plus tard une capacité de transport résultante proche de celle de Nouadhibou–Boulanouar alors qu'elle était beaucoup plus faible à l'époque des observations d'Oulehri, en particulier du fait d'une plus grande variabilité directionnelle.

Cette hypothèse, qui vient à l'appui de notre démonstration de départ, nous a conduit à nous intéresser à l'évolution temporelle des DPS pour Nouadhibou. Elle est résumée dans la figure 1.31. Les différentes valeurs de CT traduisent une tendance à la baisse, en particulier à partir de 1989. La tendance est identique à celle que met en évidence Ozer (1996). Elle semble être symétrique de la tendance à la hausse observée à Laâyoune.

La pente de la droite de tendance pour Laâyoune est de l'ordre de **111** quand celle des données de Nouadhibou est de l'ordre de **-104**. Il semble que nous mettons en évidence une évolution opposée entre les deux secteurs, sous réserve que la tendance observée dans les années 1980 à Laâyoune se soit poursuivie. Ce fait d'observation - avec les précautions nécessaires - nous invite à envisager une hypothèse d'explication climatique.

Il est possible, dans le cadre d'un changement climatique, que la zone subtropicale, qui controle en partie les champs de vent, remonte vers le nord. Concrètement, cela devrait également déplacer les profils de vitesse des alizés ; ce qui se traduit par une diminution de leur compétence à Nouadhibou et une augmentation à Laâyoune. Cette hypothèse ne peut pas être plus étayée en l'état, par manque d'homogénéité dans les données dont nous disposons. Elle fait toutefois écho à certaines observations et modélisations effectuées par d'autres auteurs (Vecchi *et al.*, 2006, Tokinaga et Xie, 2011).

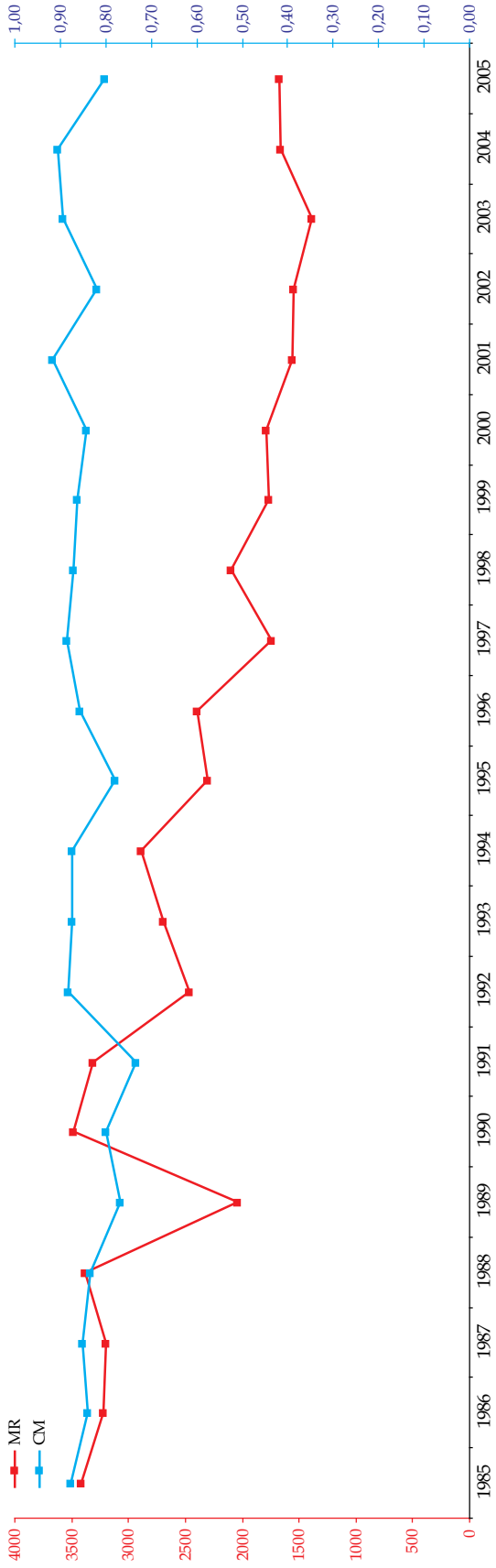


FIGURE 1.31 – *Évolution de MR et CM à Nouadhibou entre 1985 et 2005*

Si la plupart des propositions que nous avons faites restent à l'état d'hypothèses, elles mettent en avant l'intérêt de la démarche que nous avons définie. Le rapport que nous utilisons entre hauteur des barkhanes et volumes transportés n'est pas un fait nouveau (Sauermann *et al.*, 2003). En revanche, ces études sont focalisées sur des barkhanes individuelles suivies très précisément mais durant un temps court. La méthode que nous avons développée, si elle appelle des améliorations, permet :

- d'étudier les déplacements sableux sur une vaste zone, limitée seulement par la possibilité de faire des mesures de formes ;
- de déduire de ces mesures une capacité de transport de sable par le vent qui permet de comparer des sites entre eux et surtout d'obtenir des informations fiables sur le régime des vents ;
- de montrer que les formes enregistrent bien, à le moyen voire long terme, la résultante des déplacements sableux. Si l'évolution symétrique que nous avons décrite est démontrée, alors les formes éoliennes contrôlées par les alizés sont également des bons indicateurs des variations climatiques à grande échelle.

Si la mise en relation du transport réel et des calculs théoriques est généralement difficile à établir (Meur-Férec et Ruz, 2002), les résultats que nous avons présentés sont encourageants et méritent des approfondissements. Trois axes nous paraissent importants à explorer pour que la démarche gagne en robustesse :

- obtenir des données de vent pour la région de Laâyoune qui soient temporellement calées avec celles de Nouadhibou ;
- affiner la détermination de R par le traitement d'un nombre représentatif de photographies de barkhanes vues de face. Dans cette étude, nous n'avons fait varier que la constante de Coursin, alors qu'un régime de vent différent peut se traduire par une allure des barkhanes différente d'un site à l'autre ;
- confronter nos résultats à des données climatiques qui contrôlent la fourniture en sable : température et précipitations, en particulier. Le raisonnement que nous avons fait repose en effet sur une hypothèse de fourniture de sable constante qui reste à vérifier.

À terme, il devrait être envisageable de proposer une conceptualisation théorique des déplacements sableux qui autorise différentes entrées dans le système éolien (fig. 1.32). Certaines des difficultés d'étude des régions désertiques devraient alors pouvoir être levées.

Les perspectives en terme de prédiction, prévention et lutte contre l'ensablement sont particulièrement riches. Dans chacun des secteurs que nous avons évoqués et malgré leur caractère désertique, des enjeux sont présents et menacés par l'ensablement. Si les hypothèses que nous avançons sont vérifiées, il se pourrait aussi que la morphodynamique à l'échelle régionale soit en train de se modifier. L'évaluation d'un tel phénomène nécessite la mise en place d'un suivi appuyé sur des états de référence comparables. Les méthodes que nous avons développées peuvent aider à la mise en œuvre de ce suivi.

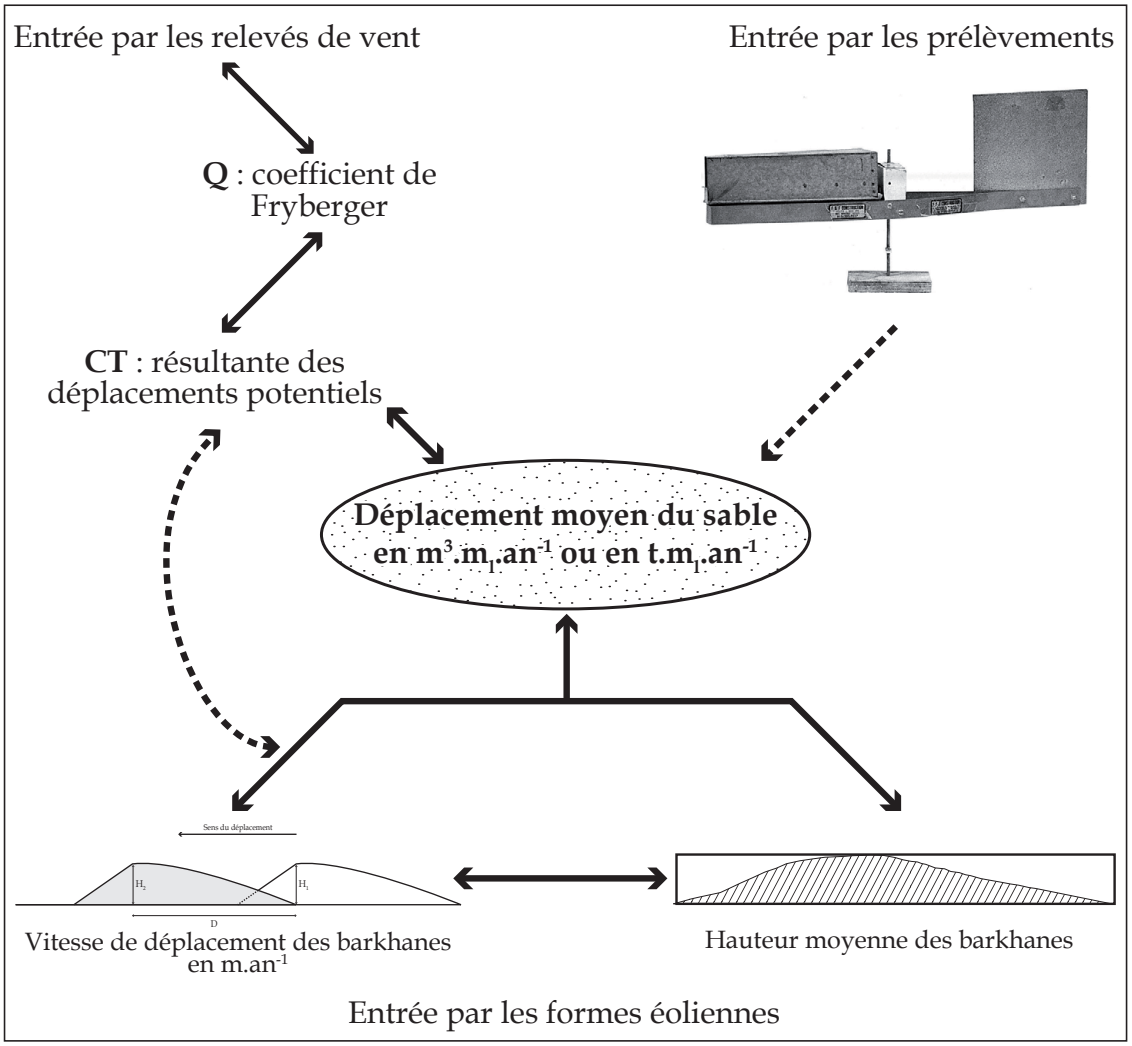


FIGURE 1.32 – *Approche conceptuelle des déplacements sableux en régions désertiques à vent uni-directionnel*

Conclusion du chapitre

Les développements présentés dans ce chapitre ont permis de mettre en avant l'intérêt de l'étude des formes éoliennes pour la caractérisation et le suivi de dynamiques de certaines régions sèches, à différentes échelles spatiales et temporelles. Les différents exemples que nous avons fournis ont en commun d'être localisés dans des secteurs où des raisonnements toutes choses égales par ailleurs sont pertinents en raison de la relative stabilité de la plupart des paramètres, au moins sur le temps court. Dans certaines régions désertiques, il n'est ainsi pas aberrant de considérer que la fourniture de sable est illimitée, ce qui n'est pas le cas dans les régions non-désertiques.

En effet, malgré sa compétence morphogénique, le vent seul est incapable de fabriquer le matériel qu'il transporte, à la différence de l'eau par exemple (Callot, 2008). Son action, pour être efficace, doit être liée à celle d'autre processus. C'est pourquoi, en régions hyper-arides, l'action éolienne peut être d'une

efficacité limitée dans des paysages figés par l'absence d'autres actions météoriques. En revanche, dans les régions semi-arides, où l'impact des activités anthropiques est parfois fort, l'action éolienne peut être extrêmement efficace.

Dans ces régions, de plus, les enjeux liés à la dynamique éolienne peuvent être très importants et les échelles temporelles relativement courtes, contraintes encore par la possible existence de seuils de non-retour, illustrée par le concept de désertification, qui fait l'objet du second chapitre. Enfin, l'exemple d'utilisation des images de télédétection pour le suivi de formes éoliennes a montré les limites des résolutions grossières, y compris dans le cas de formes décamétriques, comme les barkhanes de Boulanouar. Cette contrainte devient rédhibitoire quand il s'agit d'étudier des objets de plus petite taille, comme ceux que nous présentons par la suite.

Chapitre 2

Les contextes des régions sèches non désertiques

Sommaire

2.1 La désertification et ses impacts paysagers 55
2.1.1 Un concept flottant ? 55
2.1.2 Les facteurs de la désertification 62
2.1.3 Une approche complexe 71
2.2 Observer et suivre la désertification : quoi, comment et pourquoi ? 74
2.2.1 Les observatoires de l'environnement 74
2.2.2 Propositions pour de nouvelles approches 77
2.2.3 Télédétection et spécificités des régions sèches non désertiques 81
2.3 Un nouvel indicateur : les formes éoliennes d'obstacle 86
2.3.1 Décomposer les paysages des régions sèches non désertiques 87
2.3.2 Les formes éoliennes d'obstacles 88
2.3.3 Comment en faire des indicateurs ? 92
Conclusion 101

Introduction

Le chapitre précédent a permis de présenter les différents paramètres de contrôle de la morphodynamique éolienne. Leur examen montre que, dès que le milieu se complexifie en terme paysager et d'occupation humaine, la morphodynamique se complexifie aussi et, surtout, convoque des échelles spatiales et temporelles différentes. Les acquis de la recherche en milieu désertique peuvent toutefois servir de socle à l'examen des conditions spécifiques des régions sèches non désertiques, où le critère d'aridité reste commun et est favorable à l'action éolienne.

Les scientifiques ont enrichi la connaissance des contextes et des mécanismes géomorphologiques propres aux régions sèches non désertiques principalement en profitant de trois mouvements successifs : les explorations de l'époque coloniale (Chudeau, 1920), la prospection pétrolière (Beuf *et al.*, 1971) et la lutte contre la désertification pour laquelle des partenariats ont été fondés entre les instituts de recherche des pays occidentaux et ceux des pays touchés. L'actualité de cette dernière est renouvelée par les récents questionnements autour des changements climatiques. Ce phénomène, dont une manifestation spectaculaire est précisément la morphodynamique éolienne, constitue ainsi l'ancrage thématique de notre travail.

Pour l'étudier et en prévenir les effets, des dispositifs d'observation ont été mis en place. Ils ont permis de répondre de façon satisfaisante à un certain nombre de questions structurantes mais atteignent leurs limites quand des besoins d'informations précises ou immédiates sont exprimés puisque leur méthodologie repose précisément sur une logique de long terme. Des propositions alternatives sont ainsi formulées, qui présentent l'avantage d'être pleinement compatibles avec l'étude de la morphodynamique éolienne spécifique aux régions sèches non désertiques.

2.1 La désertification et ses impacts paysagers

2.1.1 Un concept flottant ?

Le terme de concept flottant est proposé à partir des remarques de Bertrand (1984) qui, sans l'utiliser explicitement, analyse la mobilité sémantique et la propension à dépasser les frontières disciplinaires du concept de paysage. Le mot de désertification renvoie en effet à une réalité tangible (le désert) mais il y ajoute la notion de processus que décrit son étymologie (lat. *facere*, être fait, se produire). En raison de ce caractère dynamique, de son utilisation récente et de l'appropriation sociale, politique voire médiatique dont il a fait l'objet lors des trente dernières années, ses définitions sont nombreuses et souvent protéiformes.

2.1.1.1 La dégradation : condition nécessaire, mais non suffisante

Divers exemples démontrent que la dégradation des milieux est un problème ancien qui ne suffit pas à lui seul à définir la désertification. À la tribune du Sénat romain, Cicéron déplorait déjà la dégradation de forêts méditerranéennes disparaissant au profit de zones stériles (Jauffret, 2001). Dans les Préalpes françaises, à partir du XVIII^{e} s., la surexploitation des versants a enclenché des séries de rétro-actions conduisant à leur mise à nu (fig. 2.1) qui joue un rôle prépondérant dans la dynamique des hydrosystèmes et est une des causes des crues catastrophiques du XIX^{e} s. (Landon et Piégay, 1999). Le problème de la dégradation environnementale apparaît dans toutes les sociétés (notamment sédentaires) dans la mesure où elles exploitent les ressources du milieu (Gunnell, 2009). Il diffère néanmoins de la désertification, notamment parce que la capacité de régénération des milieux en climat tempéré, pour reprendre les deux exemples, est plus forte. La dégradation se présente comme une condition nécessaire mais non suffisante de la désertification qui est de surcroît un concept relativement récent et localisé spatialement, au moins dans sa description originelle.

C'est le forestier Aubréville (1949) qui, le premier, utilise le terme de désertification, décrivant « *de vrais déserts qui naissent [...] sous [ses] yeux* ». Il dénonce également l'excessive pression anthropique conduisant à une dégradation du milieu. Cette définition, l'une des premières, sinon la première, est fondée sur les observations de terrain et sur une approche paysagère. C'est en effet l'apparition de caractères paysagers désertiques (érosion éolienne, ensablement, déchaussement de la végétation, etc.) dans des zones qui ne sont pas des déserts qui attire son attention.

Cette première utilisation du terme de désertification introduit aussi une dimension importante du problème qui est le rôle des activités humaines dans un contexte climatique plutôt favorable. Aubréville fait ses observation dans des régions au climat tropical (entre 700 et 1500 mm de précipitations par an). Ce climat humide est bien différent de celui des marges sèches auxquelles le

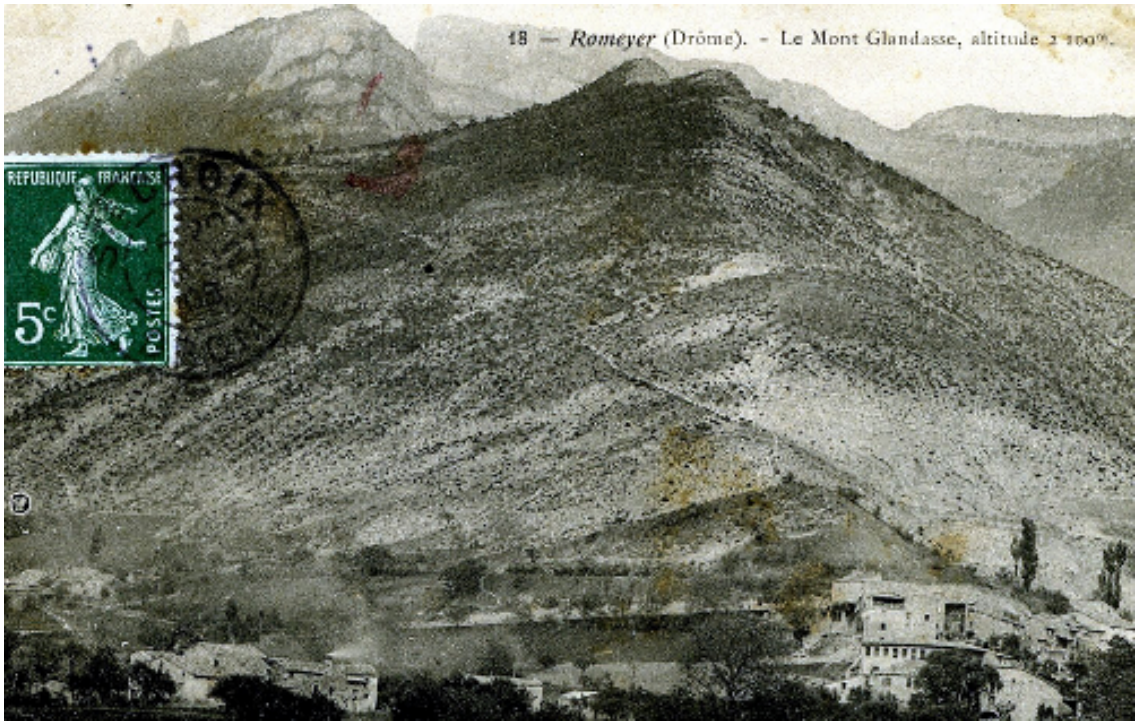


FIGURE 2.1 – *Carte postale photographique illustrant la dégradation des versants à Romeyer (Drôme) au début du XX^{e} s. Droits réservés, aimablement fournie par J-P. Bravard*

concept s'applique fréquemment aujourd'hui. Ce transfert spatial de son champ d'application explique peut-être aussi la multiplication de ses définitions.

2.1.1.2 Une pléthore de définitions

Le terme de désertification n'est en fait que peu employé après Aubréville, jusqu'à ce que les préoccupations environnementales deviennent un enjeu important des débats internationaux, à partir des années 1970. À cette époque, et devant le constat de la dégradation des terres liée à la sécheresse qui sévit au Sahel notamment (1968 – 1973), la Conférence des Nations Unies sur la désertification (UNCOD) propose la définition suivante :

> *La désertification est la diminution ou la destruction du potentiel biologique de la terre et peut conduire finalement à l'apparition de conditions désertiques. Elle est l'un des aspects de la dégradation généralisée des écosystèmes et a réduit ou détruit le potentiel biologique, c'est-à-dire la productivité végétale et animale [...] au moment même où un accroissement de la productivité était nécessaire pour satisfaire les besoins de populations grandissantes aspirant au développement.*

Elle met davantage l'accent sur un état accompli que sur un processus en cours, ce qui est une première illustration de la mobilité sémantique du terme (Kassas, 1995). En 1992, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) reformule cette définition pour la soumettre à l'approbation de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Dévelop-

pement (CNUED) de Rio de Janeiro, qui propose finalement en juillet 1992 la définition suivante :

> *La désertification est la dégradation des terres dans les aires arides, semi-arides et subhumides sèches résultant de facteurs variés, incluant des variations climatiques et des activités humaines.*

D'une définition originelle, mettant en cause les activités humaines dans leurs conséquences paysagères, le terme est ensuite passé dans le champ du politique pour être intégré dans les projets de développement, perspective concrétisée par la création en 1994 de la Convention Internationale de Lutte contre la Désertification dont les 179 pays signataires s'engagent à « *accorder la priorité voulue à la lutte contre la désertification [...] selon leur situation et leurs moyens et à établir des stratégies* » allant dans ce sens. On peut remarquer également le souci de circonscrire l'aire potentielle de la désertification aux zones où l'aridité est un facteur contraignant. En effet, la fragilité environnementale qui en découle semble être le déterminant principal du caractère irréversible du phénomène qui le différencie de la dégradation.

En parallèle de cette prise de conscience politique et internationale, la désertification a été étudiée par des scientifiques d'horizons variés. Ce large spectre de travaux a conduit à l'élaboration de multiples définitions, au minimum une centaine (Rhodes, 1991), que Mainguet (1995) a proposé de rassembler en cinq catégories :

1. Apparition de paysages désertiques hors des déserts, dans leurs marges.
2. Explosion, dans les écosystèmes semi-arides et subhumides secs, de mécanismes physiques de dégradation des terres (érosions éolienne et hydrique) propres aux régions arides.
3. Déclin de la productivité biologique des terres avec détérioration de la couverture végétale et des sols.
4. Dégradation des systèmes socio-économiques par suite de la dégradation environnementale.
5. Stade ultime de la dégradation de l'environnement qui a franchi un seuil d'irréversibilité.

Chacune de ces définitions met en avant un aspect particulier de la dégradation ou de ses causes. Elle traduit fréquemment les affinités disciplinaires de ses auteurs : écologues, pédologues, géographes, socio-économistes, etc. Elle est accompagnée également de la proposition d'une grande variété d'indicateurs : les écosystèmes, la végétation, le potentiel biologique, la productivité, la biomasse (Glantz et Orlovski, 1983), etc. Toutefois, les auteurs ne sont pas unanimes pour parler de processus puisque, pour certains, la désertification est un état (le stade ultime de la dégradation des terres). Mainguet (1995) propose la définition suivante :

> *La désertification, révélée par la sécheresse, est due aux activités humaines lorsque la capacité des terres est dépassée ; elle procède de mécanismes naturels exacerbés ou induits par l'homme ; elle se manifeste par une détérioration de la végétation et des sols et aboutit, à l'échelle humaine de temps,*

à une diminution ou à une destruction irréversible du potentiel biologique des terres ou de leur capacité à supporter les populations qui y vivent.

Cette définition, conçue dans un esprit de synthèse, permet de bien identifier les grands enjeux liés à ce problème. Elle montre l'enchevêtrement des causalités en pointant les interactions qui peuvent se mettre en place entre des milieux fragiles et des activités humaines disproportionnées. Cette définition montre aussi la complexité du problème de désertification qui oblige à convoquer des concepts discutés comme : capacité des terres, irréversibilité. Si l'on envisage par exemple la notion de capacité des terres, Tricart (1968) a souligné la diversité des cas de figure possibles et la difficulté à généraliser un indice. D'après lui, la dégradation peut survenir suite à un dépeuplement et non à une surpopulation dépassant la capacité de charge des terres. Il démontre ainsi que les sociétés humaines peuvent être considérées comme élément de régulation du milieu et non comme un élément nécessairement perturbateur.

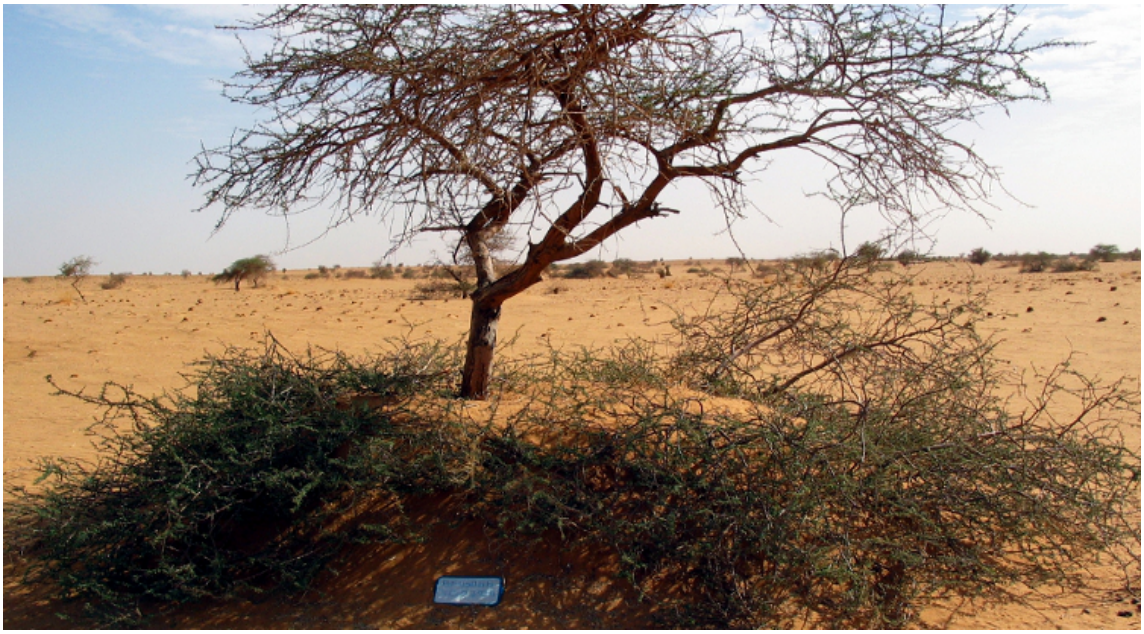
La désertification s'accompagne de transformations paysagères variées. En particulier, l'apparition d'une géomorphologie de surface proche de celle des déserts et liée à la dynamique éolienne peut en être un indice (Floret et Pontanier, 1982). Toutefois, la seule approche géomorphologique ne suffit pas à fonder un diagnostic de désertification. L'enchaînement de plusieurs phénomènes renforce en effet le risque d'erreur lié à la convergence de processus : deux processus ayant des causes différentes peuvent conduire à la même conséquence. La figure 2.2 fournit une illustration de ce problème dans les régions sèches. La photographie 2.2(a) présente un arbre de l'espèce *Balanites aegyptiaca* dont les racines sont déchaussées, ce qui est souvent l'indice d'une dégradation, éventuellement incluse dans un processus de désertification.

La présence, dans le même secteur, d'arbres d'une autre espèce qui forment des accumulations conduit à considérer que c'est la morphologie propre de l'espèce *Balanites aegyptiaca* qui produit localement un phénomène d'érosion que l'arbre semble plutôt bien supporter en raison de sa capacité à développer des racines aériennes (Venard, 2007). Le déchaussement observé n'est alors pas le signe d'une dégradation induite par un dépassement de la capacité de charge du milieu - piétinement intensif par les troupeaux, par exemple - mais bien la traduction d'un fonctionnement propre de cette espèce.

Il faut donc avancer avec prudence dans le diagnostic de désertification, y compris dans la mise en cause des activités humaines, compte tenu de la grande hétérogénéité des terrains concernés. Un exemple d'erreur possible est de considérer que c'est la sur-exploitation des ressources qui est nécessairement responsable de la désertification. On peut en effet envisager que, à pression constante sur la ressource, ce sont les changements climatiques qui enclenchent les processus de désertification. Ce point de vue permet d'intégrer la complexité des évolutions sociales des populations qui vivent dans des régions sèches et qui ont perdu une partie de leur capacité à s'adapter aux pulsations climatiques. On peut ainsi avancer la notion de rigidité dans le fonctionnement des systèmes sociaux introduite par :

– la sédentarisation de populations pour l'essentiel semi-nomades, pour des raisons de géopolitique (Bisson et Callot, 1986) ;

(a) Balanites aegyptiaca



(b) Acacia radiana

FIGURE 2.2 – *Deux effets opposés de la dynamique éolienne pour deux arbres du même secteur. Bamba, nord-Mali*

– l'insertion dans les réseaux de l'économie mondiale, et donc le passage d'une économie de subsistance à une économie d'exportation spécialisée soumise aux fluctuations globales (Loireau *et al.*, 2009) ;
– les corolaires du point précédent que sont la mécanisation, l'intensification, la spéculation, etc. (Genin *et al.*, 2006).

C'est alors moins le dépassement de la capacité des terres qui enclencherait de la désertification, comme si la capacité des terres était un critère figé dé-

pendant exclusivement de paramètres naturels, mais davantage le manque de souplesse du couple nature-société.

2.1.1.3 Le mythe de l'avancée du désert ?

Le terme en lui-même et certaines de ses définitions - apparition de paysages désertiques - ont contribué à entretenir l'idée que la désertification désigne l'extension du désert dans ses marges. Si certaines observations viennent la contredire, il convient de prendre en considération la complexité des milieux du pourtour saharien. L'extension du Sahara, plus grand désert chaud de la planète, est contrôlée par des mécanismes essentiellement atmosphériques qui n'ont pas ou peu évolué depuis le dernier optimum climatique de l'holocène mais qui ont connu des fluctuations antérieures qui expliquent certains paysages actuels (fig. 2.3).

Ainsi sa bordure au sud peut-elle être considérée comme moins nette qu'au nord. Au cours de la dernière période aride du Pléistocène (20 000 BP à 12 000 BP), le Sahara s'est en effet étendu plus loin au sud et à l'ouest qu'actuellement. Des traces de cet erg ogolien (du nom de la région d'Ogol, le long de l'Atlantique) sont encore aujourd'hui visibles sous la forme d'alignements de cordons dunaires (Nguer et Rognon, 1989, Rognon, 1994), au sable de couleur ocre (fig. 2.4). L'amélioration climatique de la période suivante a conduit à la fixation végétale de ces cordons dunaires, rendant possible la colonisation de ces espaces par des populations humaines. Actuellement, lorsque la dynamique éolienne retravaille ces formes héritées, déjà constituées de sables éoliens (Faran Maiga, 2004), donc facilement remobilisables par le vent, faut-il y voir nécessairement un phénomène de désertification ou ne peut-on envisager des évolutions cycliques ? Certains espaces au sud du Sahara ont été des déserts et cette réalité interfère nécessairement aujourd'hui avec les diagnostics de désertification. Ce biais est absent au nord du Sahara qui n'a pas connu de changement climatique radical à l'échelle historique (Ballais, 1991a) et seulement des pulsations à l'échelle géologique (Coque, 1962, Ballais, 1991b).

Au nord du Sahara, il a été démontré que la progression des sables se fait davantage des marges vers le désert que l'inverse (Callot, 1987, Khatelli, 1996), compte tenu des régimes de vents dominants ou efficaces. Dès lors, on ne peut envisager une extension actuelle, et pendant un temps court, des sables désertiques aux marges du Sahara. Dès lors, si les marges sud du Sahara peuvent connaître des épisodes de mobilisation de sables désertiques anciens, les données du problème ne sont pas les mêmes au nord. Du point de vue du diagnostic, il semble alors plus simple d'identifier un phénomène de désertification dans les marges nord qui n'ont jamais été désertiques.

En conclusion, la désertification est un processus déclenché soit par les activités humaines quand le contexte climatique est plutôt favorable, soit par la combinaison d'une péjoration climatique et du manque d'adaptabilité de l'usage des ressources. Elle se traduit par la dégradation des conditions environnementales et socio-économiques dans une logique auto-entretenue. La désertification s'accompagne souvent de l'apparition de processus géomorpho-

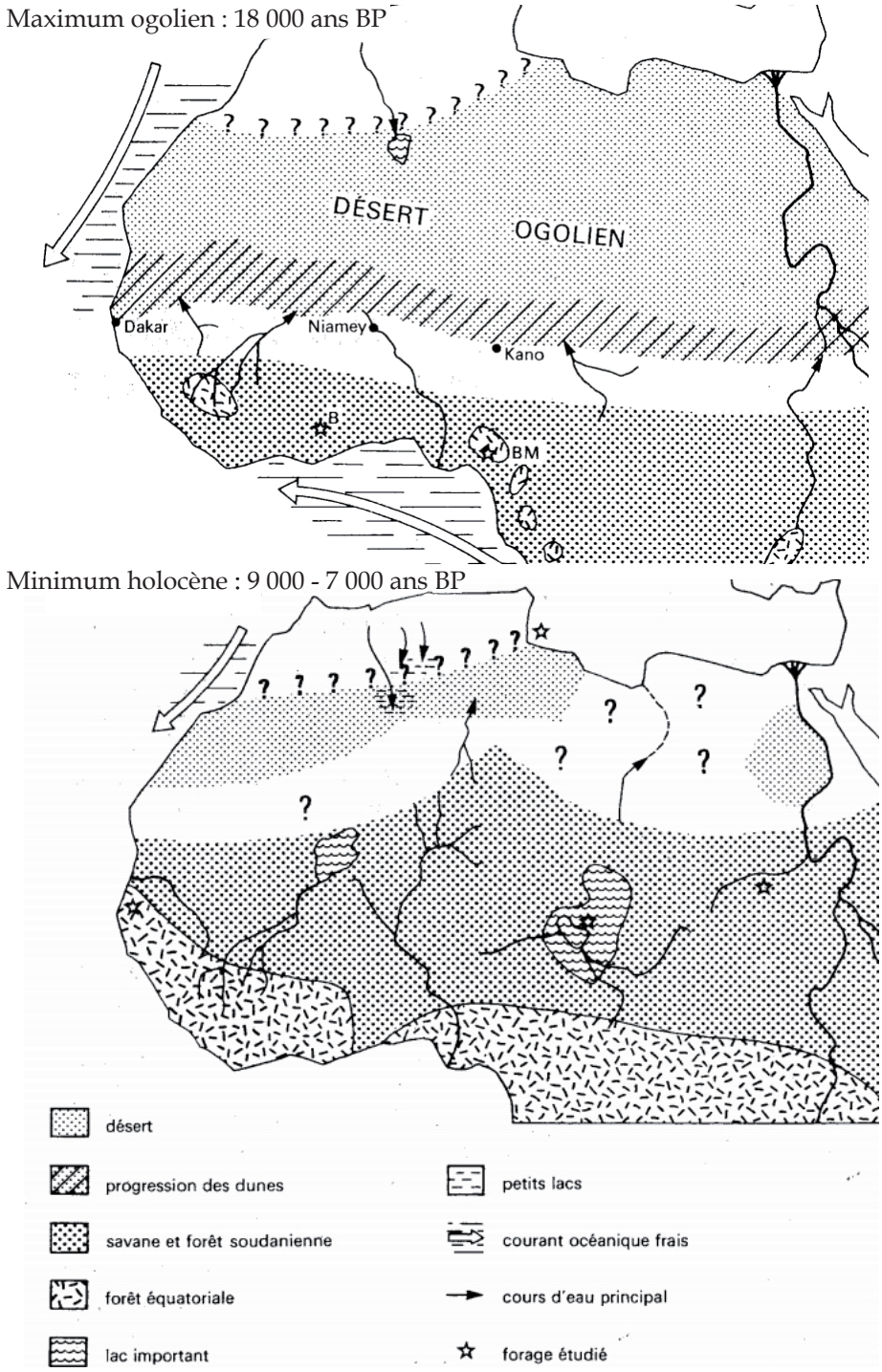


FIGURE 2.3 – *L'extension spatiale maximale et minimale du Sahara depuis 20 000 ans, d'après Rognon (1994)*

logiques propres aux déserts. On peut enfin définir un stade ultime de la désertification qui correspond au passage d'un seuil d'irreversibilité. Nous faisons alors le choix de retenir les deux dimensions du terme : le processus, qui renvoie à la spécificité de la dégradation dans les régions sèches, et le stade ultime.

FIGURE 2.4 – *Les alignements de cordons dunaires hérités de l'erg ogolien dans la région de Bamba, nord-Mali*

2.1.2 Les facteurs de la désertification

Il paraît opportun d'étudier à présent de façon plus détaillée les **facteurs** des mécanismes de désertification, terme moins déterministe que celui de **cause**. Cette section, non exhaustive, vise à présenter ces facteurs et introduira ainsi aux questions méthodologiques de l'étude d'un phénomène complexe. Nous appuierons essentiellement notre argumentation sur l'exemple de la Tunisie pré-saharienne.

2.1.2.1 Les multiples facettes des contraintes climatiques

Le lien entre la désertification et les conditions de précipitations est acté dans les institutions internationales qui travaillent dans les régions sèches, en particulier africaines, via l'adoption d'une convention de classement des terres suivant le degré d'aridité qui a servi de base à la définition de la désertification de la CNUED. Le degré d'aridité est calculé par le rapport entre les précipitations et l'évapotranspiration. Le résultat est simplifié en cinq catégories : terres hyper-arides, arides, semi-arides, subhumides sèches, subhumides et humides (fig. 2.5).

On remarque évidemment une répartition essentiellement circum-saharienne des régions potentiellement concernées par la désertification, d'après la définition de la CNUED. On peut également noter qu'elles sont plus contractées au nord du Sahara qu'au sud, ce qui s'explique par la localisation - la mer Méditerranée est une contrainte, la topographie - le relief plissé de l'Atlas - et les influences tropicales dans la bande sahélienne, qui

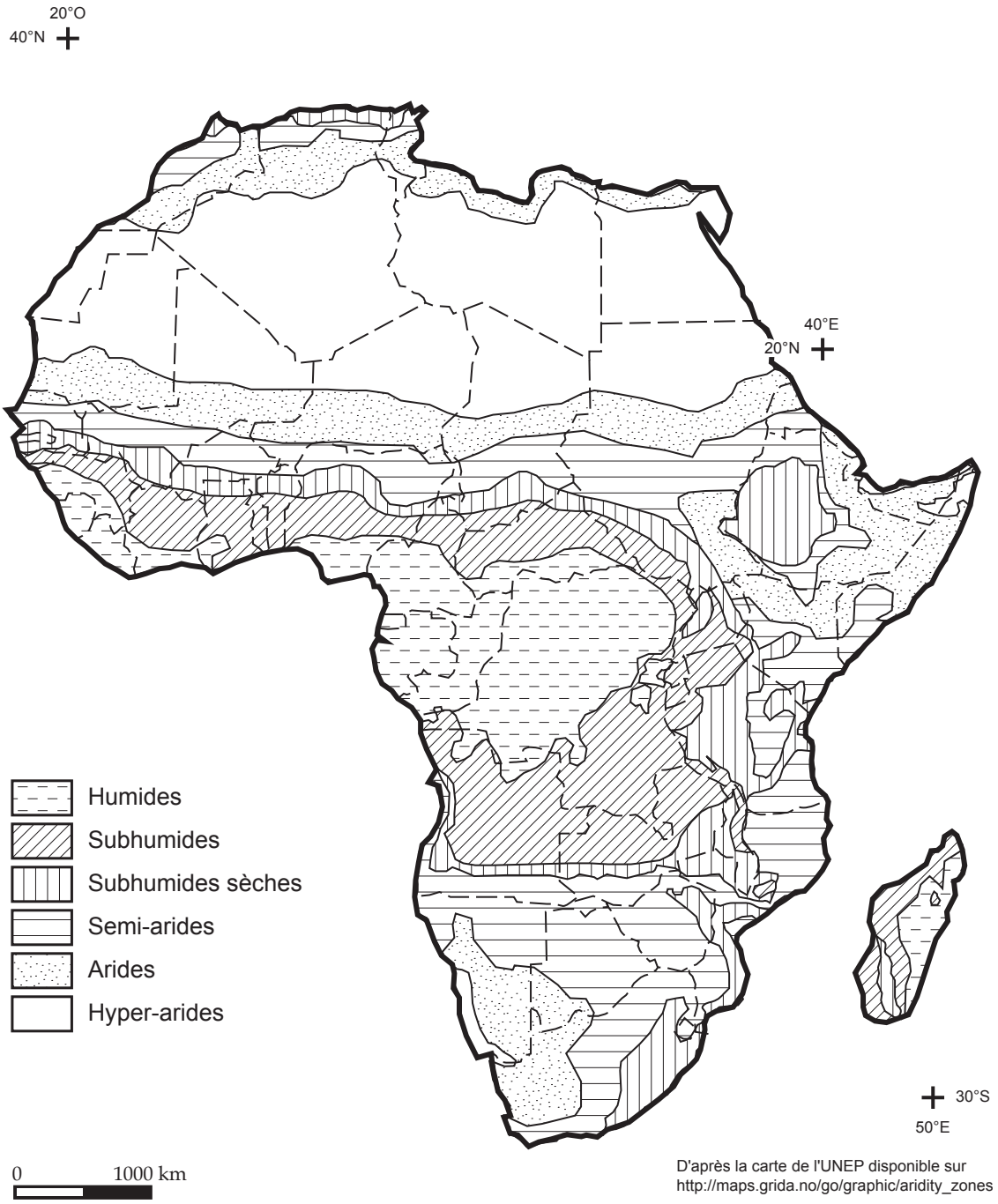


FIGURE 2.5 – *La classification des terres en Afrique suivant un gradient climatique*

combattent l'influence de l'anticyclone saharien et brouillent les frontières. Il est aussi intéressant de noter que, autour du Sahara, un gradient net s'établit, au nord comme au sud, que l'on ne retrouve pas nécessairement dans les autres régions sèches de l'Afrique. Cela met davantage en lumière le lien entre le fonctionnement du Sahara et celui de ses marges, à l'échelle géologique du moins.

Les exemples que nous avons évoqués ont montré qu'il n'y a pas de relation

linéaire et systématique entre les conditions climatiques et la désertification. Les contraintes climatiques sont une constante des espaces concernés et les sociétés humaines ont adapté leur relation au milieu. Il est donc faux de penser que sécheresse implique désertification. Même s'il replace son analyse dans un contexte de baisse des précipitations à long terme, Bernus (1984) montre qu'il faut distinguer désertification et aridification qui est associée à des échelles temporelles longues (de l'ordre géologique). Il montre que ces dernières sont incompatibles avec celles de la désertification.

Il ne faudrait cependant pas estimer que l'aridité ne se mesure que du point de vue quantitatif. En ce qui concerne les activités humaines, une grosse pluie peut être moins bénéfique qu'une pluie de moindre importance, suivant des critères de localisation, d'opportunité temporelle et d'intensité. Le dernier facteur peut même rendre l'épisode catastrophique en provoquant des crues d'oued par exemple. Bisson et Callot (1990) ont ainsi mené une étude des pluies qui met en avant l'importance de leur aspect qualitatif dans la région d'El-Abiodh Sidi-Cheikh, au nord-ouest du Sahara algérien. Ils s'intéressent à la période 1970–1986, pendant laquelle la pluviométrie moyenne est de 103 mm. En rapprochant les quantités et l'appréciation qui en est faite par les populations, ces auteurs montrent que, pour 1981–1982, malgré un total de 168,5 mm, le bilan est très négatif car la plus grande part est tombée en saison froide ou trop tard au printemps ; elle n'a donc pas bénéficié à la végétation. En revanche, 1985–1986 est considérée comme une bonne année malgré un total de 86 mm, soit presque moitié moins : la répartition temporelle des pluies a été meilleure, avec des pluies d'automne et de printemps et surtout non torrentielles, ce qui a permis aux nomades de reprendre leurs activités traditionnelles.

Dans le même ordre d'idées, suite aux démonstrations de nombreux auteurs, parmi lesquels on peut citer Floret et Pontanier (1982) pour la Tunisie, il est nécessaire de distinguer l'aridité de type climatique (strictement liée aux précipitations) qui est un facteur que l'on peut considérer comme imposé, et l'aridité édaphique que l'on peut considérer comme un facteur contrôlé puisqu'il peut être lié aux activités humaines. Ces auteurs démontrent en effet que si le volume des précipitations joue un rôle évident dans la dynamique de la végétation, il ne permet pas d'expliquer à lui seul certaines disparités, en particulier spatiales, qu'ils observent. À régime de précipitations identique, ils montrent que certaines zones réagissent bien tandis que d'autres dépérissent. Ils démontrent alors que le facteur discriminant est la nature des sols qui composent les secteurs étudiés.

Ce qui est essentiel dans la distinction entre ces deux dimensions de l'aridité est que les activités anthropiques peuvent considérablement modifier la qualité des sols et créer les conditions d'une aridité édaphique qui vient s'ajouter aux effets d'une éventuelle aridité climatique. Ces dégradations peuvent favoriser l'érosion éolienne et hydrique, en particulier dans le cas de sols à structure déjà fragile, puisque souvent composés initialement de matériaux fins. Le processus se traduit alors fréquemment par la mise à nu des versants et, en parallèle, par l'accumulation de sables mobiles dans d'autres zones. Ces sables mobiles n'étant favorables qu'à certaines espèces de plantes, leur apparition peut donc

être le signe d'une dégradation. L'ensemble de ces analyses conduit les auteurs à conclure que, lorsque des processus d'aridité édaphique sont enclenchés, **la morphogénèse remplace la pédogénèse**.

En conclusion de ces réflexions concernant l'aridité, on pourra retenir que le climat n'est pas le facteur unique de la désertification, essentiellement parce que depuis les débuts de l'occupation de ces milieux par l'homme la contrainte climatique a été forte (Floret *et al.*, 1986, Mainguet, 1995). Facteur potentiellement aggravant, la péjoration climatique n'est pas seule suffisante pour enclencher un processus de désertification même si elle peut en fournir des conditions objectives. La Tunisie pré-saharienne, par exemple, connaît actuellement une phase d'aridification à l'échelle géologique (tab. 2.1) mis en évidence par Coque (1962) dans un premier temps et confirmé ensuite (Brun, 1987, Ballais, 1991a).

Tableau 2.1 – *Évolution du climat et des occupations humaines de la Tunisie pré-saharienne pendant les derniers 45 000 ans, d'après Coque (1962)*

Évolution du climat	**Datation C^{14} (BP)**	**Industrie**
.....	**44300**	.....
Semi-aride		Moustérien
.....	**14300**	.....
Aride		Lamelles
.....	**8600–6450**	.....
Subaride		Capsien typique
.....	**5650**	.....
		Capsien évolué
Aride	**4000**	.....
		Néolithique
.....	**3050**	.....
Subaride		
.....	**Pér. hist.** [a]	
Aridification en cours		

a. Période historique

2.1.2.2 La gestion sociale du milieu

Si la désertification est un enjeu important surtout depuis la fin de la période coloniale, cela ne signifie pas que des problèmes de dégradation n'existaient pas avant l'indépendance des pays du pourtour saharien. Ainsi Debierre (1931), cité par Floret *et al.* (1986), énumère-t-il les différentes mesures de protection des oasis entourant la ville de Gabès, prises dès la fin du XIX^{e} s. pour lutter contre leur ensablement, lié vraisemblablement à un pâturage trop important. Les mêmes auteurs expliquent que l'on a souvent pointé, lors de la période coloniale, les méfaits du « nomade inconscient » mais qu'en réalité des décisions politiques ont eu aussi un impact important. Assez tôt, afin de faciliter l'administration et le contrôle du territoire, les autorités coloniales ont pris des mesures visant

notamment à sédentariser les populations. En Tunisie, on a ainsi mis en place (Genin *et al.*, 2006) :

- une canalisation des axes de transhumance et la valorisation de l'agriculture sédentaire en incitant à la privatisation des terres collectives ;
- une promotion de l'oléiculture et une politique d'aménagement de petite hydraulique ;
- des pôles de peuplement plus ou moins forcés.

Ces mesures de sédentarisation participent à l'introduction de davantage de rigidité dans la relation entre les sociétés et leurs milieux et donc à la modification de leur capacité d'adaptation aux variations climatiques inéluctables (Floret et Pontanier, 1982). Ces mesures sont renforcées et généralisées à partir de l'indépendance, notamment l'incitation à la privatisation des terres collectives. Auclair *et al.* (1996) ont ainsi montré qu'à partir de 1975 (suite notamment à une loi de janvier 1971 et à une circulaire de mai 1973) la hiérarchie entre la proportion de Surface Agricole Utile (SAU) enregistrée en terres collectives et celle enregistrée en terres privées s'inverse dans la région de Menzel Habib, suivant une tendance qui se poursuit jusqu'au début du XXI^{e} s. Cette course à la terre a engendré des conflits entre les factions claniques qui ont marqué voire marquent encore le paysage (fig. 2.6).

FIGURE 2.6 – *Limite de terres collectives tracée au soc. Menzel Habib, Tunisie*

Cette appropriation de l'espace pose problème dans la mesure où elle se traduit par le défrichement et la mise en culture sédentaire (Floret *et al.*, 1986). Le défrichement a pour conséquence la perturbation des équilibres écologiques et peut enclencher des phénomènes d'aridité édaphique évoqués plus haut. La mise en culture sédentaire de milieux structurellement fragiles car essentiellement sableux, avec ce qu'elle implique en labours, intensification et mécanisation, peut enclencher des phénomènes d'érosion éolienne.

La volonté administrative n'est pas systématiquement responsable et la recherche d'un intérêt individuel ou une situation socio-économique donnée peuvent avoir des conséquences environnementales similaires. En Jeffara tunisienne, deux faits peuvent ainsi expliquer l'extension de l'olivier aux dépends

de la steppe (fig. 2.7), dans des zones marginales voire limites du point de vue des contraintes et des ressources pour son exploitation (com. perso. de M. Abichou, directeur de l'Institut de l'olivier de Zarzis et M. Labiadh, chercheur à l'IRA).

FIGURE 2.7 – *Olivier planté dans un trou creusé dans la steppe. Dar Dhaoui, Tunisie*

Cette extension peut être liée à une logique spéculative souvent associée, dans les discours, aux émigrés ou aux personnes vivant dans la capitale : l'hectare de steppe est acheté aux environs de 300 dinars tunisiens (DT), puis planté en oliviers et les parcelles sont ensuite revendues au nombre d'oliviers plantés dont le prix unitaire peut atteindre 150 DT [1]. Une seconde explication, complémentaire, tient davantage de la géopolitique : dans ce secteur proche de la Libye, de nombreux tunisiens travaillaient de l'autre côté de la frontière. En 1985, suite à des problèmes entre les deux pays, ils ont été refoulés et ont donc exploité davantage l'olivier.

Ces pratiques perdurent et ont les mêmes conséquences environnementales que celles qui ont été évoquées pour Menzel Habib. Elles s'accompagnent de surcroît de pratiques culturales que l'on peut juger inadaptées : labours systématiques après chaque pluie et élimination de toute concurrence végétale participent de la déstructuration des sols et favorisent l'érosion éolienne.

Un dernier élément à prendre en considération dans l'évaluation de la gestion sociale des milieux en régions sèches est le niveau économique et, donc, technologique des sociétés concernées. Si la mécanisation peut être source de problèmes, c'est surtout lorsqu'elle est utilisée sans les mesures qui doivent l'accompagner : protections anti-érosion, irrigation adaptée aux conditions climatiques. Dans la péninsule arabique par exemple, on fait littéralement « fleurir le désert » en ayant recours à des moyens colossaux pour passer outre aux conditions objectives du milieu. Toutefois, dans une approche plus large, il n'est

1. En août 2011, 1 DT vaut env. 0,5 euro et, à titre d'étalon, le salaire mensuel minimum est de l'ordre de 250 DT.

pas à exclure que ces pratiques se révèlent finalement aussi dommageable pour l'environnement que celles qui conduisent à la désertification. Cet exemple extrême permet néanmoins de montrer que la maîtrise de technologies et la mise en œuvre de moyens financiers conséquents sont aussi des éléments importants de la capacité d'adaptation des sociétés aux conditions ou aux évolutions du milieu.

2.1.2.3 L'importance et les modalités de l'action du vent

Le vent est un agent morphogénétique important dans les régions sèches non désertiques en raison de leurs spécificités écosystémiques : couverture végétale éparse offrant une faible protection à l'arrachement des particules, accroissement de la température au niveau du sol qui provoque des turbulences augmentant l'efficacité d'ablation et, surtout, une composition des sols favorable. L'importante amplitude thermique généralement constatée contribue également au phénomène de bourrasque qui peut entrainer la mise en mouvement du matériel (Tricart et Cailleux, 1969).

On comprend alors que la définition d'un vent *efficace* tient finalement moins à ses caractéristiques propres qu'aux conditions des milieux dans lesquels il exerce son action. Dubief (1952) a montré en effet que le régime général des vents n'était pas particulièrement original dans les régions sèches. Les vents les plus fréquents sont les vents faibles à direction dominante. Les régions sèches ne sont pas non plus les endroits où soufflent les vents les plus violents : ce sont les régions polaires où les vents dits *catabatiques* [2] peuvent atteindre 320 km/h (Godard et André, 1999).

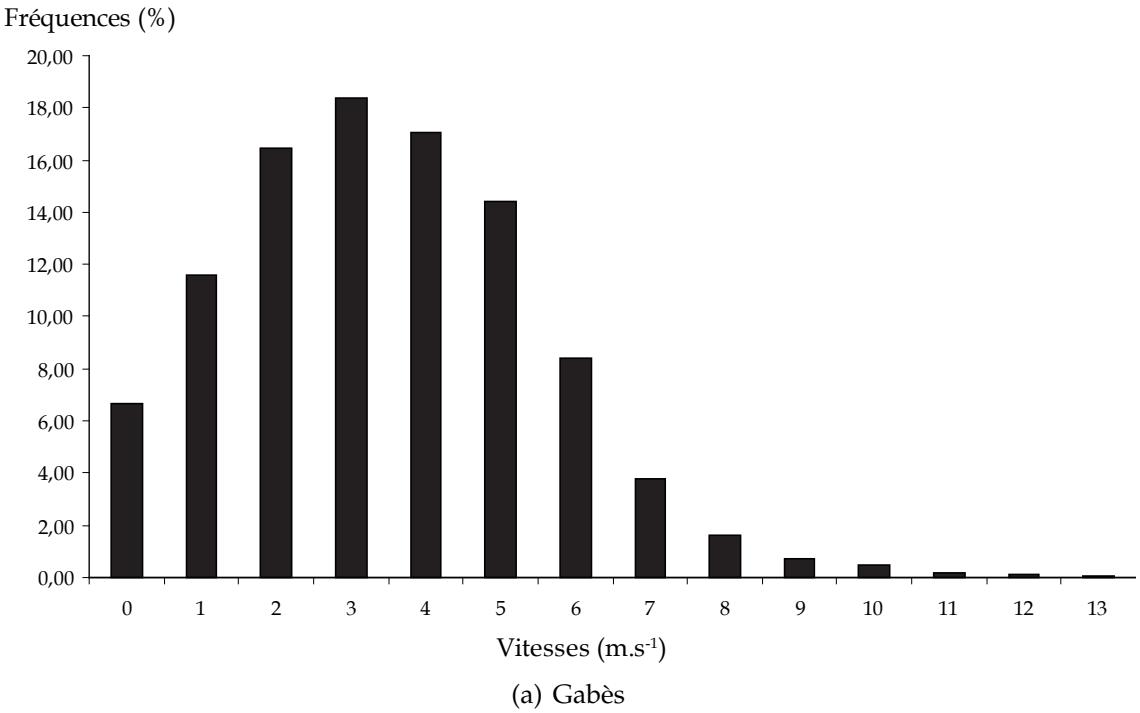
En régions sèches péri-sahariennes, on considère généralement que les vents sont efficaces à partir de 3 $m.s^{-1}$ en raison de la turbulence au niveau du sol (Khatelli, 1996). L'examen des données de la figure 2.8 montre que cette situation se présente fréquemment. Dans les deux, cas les vents faibles sont fréquents mais les vents supérieurs à 3 $m.s^{-1}$ représentent plus de 50 % du total [3]. Si l'on s'en tient aux seuls vents supérieurs à 6 $m.s^{-1}$, on obtient encore une valeur supérieure à 15 %, ce qui est important.

Pour ces deux régions donc, un sixième au moins d'une période donnée peut être considéré comme affecté par un vent très fort, ce qui rend bien compte de son importance potentielle dans les dynamiques environnementales. Par ailleurs, on considère que le pouvoir évaporant de l'air est proportionnel à la racine carrée de la vitesse du vent. Les fortes vitesses de vent jouent donc un rôle dans une aridification des conditions locales, ce qui peut avoir des effets rétro-actifs vis-à-vis de l'érosion éolienne.

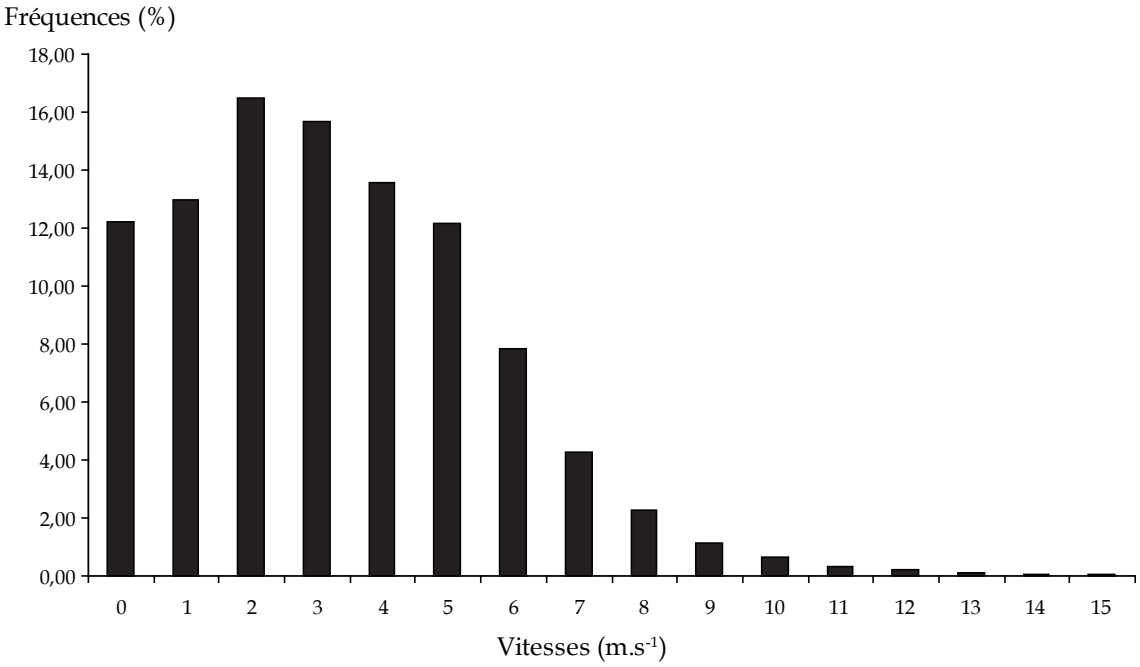
Ses conséquences morphologiques sont parfois spectaculaires et souvent préjudiciables aux activités humaines. Dans un premier temps, l'ablation provoque un départ de matériel, ce qui peut avoir deux conséquences : perte de

2. Vents gravitationnels produits par une masse d'air froid dévalant un relief topographique.

3. Les vents nuls sont comptabilisés. Les données sont issues de mesures instantanées trihoraire provenant du CEPMT. La station de Médenine ne fournit pas de relevés nocturnes (de 21 h à 6 h inclus), ce qui entraîne une sur-représentation des vents forts.



(a) Gabès



(b) Médenine

FIGURE 2.8 – *Fréquences des vitesses de vents enregistrées par deux stations de la Tunisie présaharienne*

productivité biologique des sols (départ des éléments fertiles) ainsi que déchaussement de la végétation (fig. 2.9). Traduisant une perte en sol, quantitative - la hauteur de sol emportée - comme qualitative, l'ablation peut être un indicateur de la désertification.

FIGURE 2.9 – *Racines d'olivier déchaussées par l'érosion éolienne. Ghrabet, Tunisie*

Le transport, quant à lui, présente une certaine originalité d'un point de vue paysager : il est relativement invisible dans des secteurs où aucun obstacle ne vient s'opposer à lui - par exemple là où la végétation est dégradée - mais il se concrétise dès que les obstacles viennent diminuer la capacité de charge du vent. Il peut avoir un autre effet qui est la corrasion : les particules transportées viennent frapper une surface - minérale ou végétale - et l'abîmer. Les plantes peuvent particulièrement souffrir de ce phénomène.

Enfin, le mode de transport joue un rôle particulier dans la mesure où il peut enclencher des processus cumulatifs : en particulier, le transport par saltation peut fragiliser des surfaces et les exposer à l'érosion éolienne alors même qu'aucun autre facteur de fragilisation n'existait (Hupy, 2004). De façon concrète, on peut se représenter des parcelles d'oliviers qui ne seraient pas labourées mais situées sous le vent de parcelles labourées ou de zones intensément pâturées et qui, via la saltation, seraient elles aussi soumises à l'érosion éolienne. Le vent, affectant potentiellement tout point d'une surface donnée, est un facteur de connectivité qui rend nécessaire le recours à l'analyse spatiale de la dynamique éolienne.

L'accumulation est la plus spectaculaire et donc souvent la plus connue des actions éoliennes. Elle se produit quand la capacité de charge du vent diminue et qu'il n'est plus à même de transporter tout le matériel. Ses conséquences peuvent nécessiter la mise en œuvre de moyens importants de prévention ou de curation (fig. 2.10).

La lutte contre l'érosion éolienne dans un contexte de désertification représente un coût non négigeable, en perte et en investissement, pour l'économie de la Tunisie et celles de nombreux autres pays. Selon une estimation du PNUE, en 2004, les pertes annuelles de revenus liées à la désertification sont de l'ordre de

FIGURE 2.10 – *Oliviers dégagés à la pelle mécanique, secteur de Zarzis, Tunisie. Cliché : Éric Delaître (2008)*

42 milliards de dollars pour l'ensemble des pays concernés (Fethoui, 2011). En 2008, la Tunisie prévoyait de consacrer 20,32 millions de dollars US en 4 ans à la lutte contre la désertification dans les gouvernorats du sud du pays [4].

Concernant l'ensablement, la Tunisie a engagé depuis 1990 un programme de lutte dont les objectifs initiaux étaient la mise en place de 4 000 km de palissades protégeant routes, parcelles et oasis et le reboisement de 320 000 ha de terres. Le tableau présenté en annexe C résume les estimation de coûts de ces opérations calculées, pour la Tunisie, par deux sources différentes.

Ces montants indicatifs doivent aussi être évalués à la hauteur de leur durée de renouvellement. Une palissade est rapidement ensablée et doit être régulièrement surélevée, les plantations doivent dans la plupart des cas être accompagnées d'arrosage, au moins dans les premiers temps, etc.

Les manifestations concrètes de la dynamique éolienne, élément de la désertification connecté à la plupart des autres facteurs : le climat, la nature des sols, les modalités d'exploitation du milieu par les sociétés, justifient l'approche géomorphologique adoptée ici. Cette dernière a vocation à être insérée dans une approche systémique des questions de désertification rendue nécessaire par la nature du phénomène.

2.1.3 Une approche complexe

L'étude de la désertification est rendue complexe d'abord parce qu'elle affecte des zones que l'on peut qualifier de *difficiles* pour plusieurs raisons comme le climat et la situation socio-économique ainsi que pour des raisons géographiques et géopolitiques. Les zones concernées peuvent le plus souvent être

4. D'après le rapport d'investissement par pays consultable en ligne à l'adresse suivante : `www.sirtewaterandenergy.org/docs/reports/Tunisie-Rapport2.pdf`

qualifiées de marginales. Cela se traduit par une difficulté d'accès qui entraîne un manque de connaissances et rend délicate la mise en œuvre de programmes de suivi nécessaires au diagnostic et à l'intervention.

Marginales, ces zones le sont aussi par les données disponibles. Enfin, l'instabilité politique qui règne parfois dans les pays concernés par la désertification peut gêner le travail des scientifiques : conflits frontaliers entre la Mauritanie et le Maroc, révoltes nomades - Mali, Algérie - et, plus récemment, le « printemps arabe »- Tunisie, Égypte, sont autant d'impondérables qui peuvent entraver le suivi de ces régions. Nous souhaitions, par exemple, organiser une mission de terrain début 2011 pour valider nos premiers résultats mais la situation politique ne s'y prêtait pas (fig. 2.11).

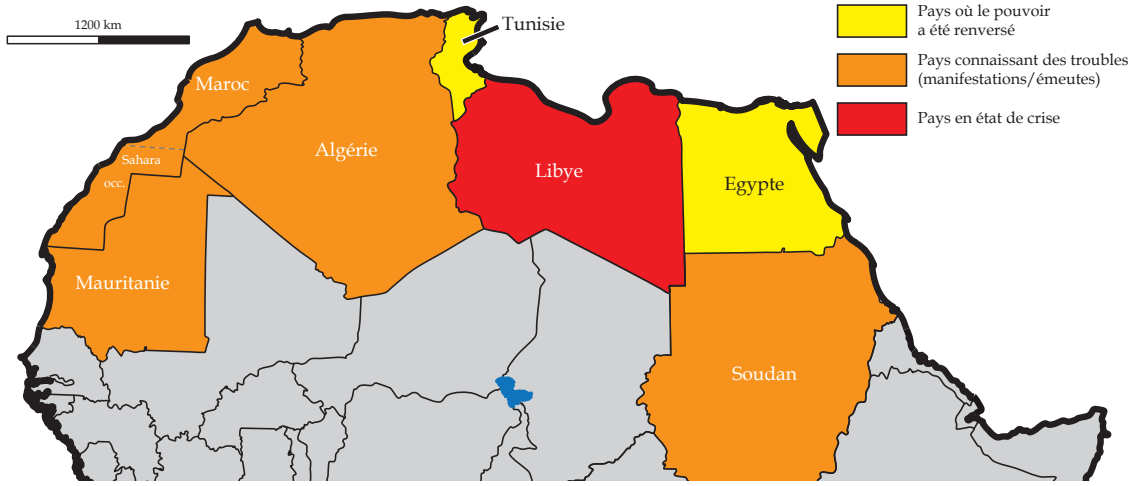


FIGURE 2.11 – *La situation politique des pays de la ceinture septentrionale du Sahara en février 2011*

La désertification et ses impacts paysagers peuvent être considérés comme un ensemble de phénomènes impliquant trois plans d'organisation : le spatial, le temporel - dans lesquels le climat et les ressources ont une place particulière - et les activités humaines. À un certain niveau, cette combinaison n'indique que le fonctionnement du milieu, tandis qu'à d'autres niveaux, elle caractérise la désertification. L'enjeu est donc d'identifier dans quel cas se trouve la situation considérée (fig. 2.12).

Ce système triangulaire permet de rendre mieux compte de l'interaction entre les différentes dimensions du phénomène. Un événement catastrophique par exemple se distingue par la brièveté de son action - mais il peut avoir des conséquences à long terme - et affecte généralement un espace circonscrit : lit majeur, littoral, avec une responsabilité des activités humaines dans l'enclenchement du phénomène qui peut être forte - déversement de polluants dans un lac, par exemple - comme faible voire nul : tsunami. La désertification se définit au contraire par le fait qu'elle concerne un espace plus conséquent, sans être non plus un phénomène global, pendant une durée relativement importante à l'échelle humaine et par la dimension sociale de la relation au milieu et aux ressources.

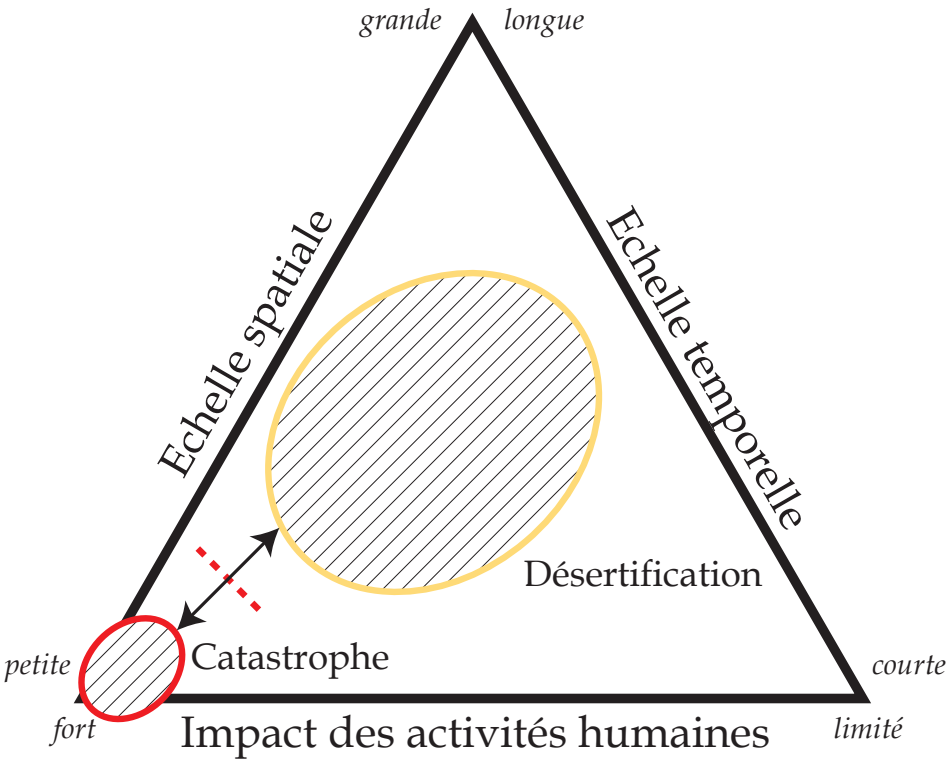


FIGURE 2.12 – *Le jeu des échelles convoquées dans les phénomènes de désertification*

Comme nombre de phénomènes, la désertification est faite de discontinuités, illustrées par les différents seuils évoqués lors de la présentation des définitions. Mêlant les problématiques sociales et naturalistes, l'étude de la désertification ne peut occulter sa dimension non linéaire. Cela fait qu'elle peut, comme tout processus géomorphologique ou non, connaître des phases d'accélération ou de non-retour après le passage d'un seuil (Brunet, 1967) comme des phases d'amélioration lorsque la pression de l'un ou l'autre des facteurs est moindre. Cela affecte ainsi la définition de l'échelle temporelle de la désertification, puisque l'on peut envisager qu'un événement catastrophique soit responsable du passage d'un seuil au-delà duquel on se trouve en situation de désertification, comme dans le cas des sécheresses du Sahel. À l'inverse, on peut aussi envisager qu'un événement qui ne poserait pas de problème socio-environnemental en situation normale prenne une dimension catastrophique dans un contexte de désertification.

Cette section de présentation de la désertification et de la place de la dynamique éolienne nous a permis de montrer que seule une approche systémique permet de bien comprendre le phénomène. La section suivante vise à présenter de manière plus concrète et éventuellement critique les méthodes et les modalités de l'étude de la désertification, tenant compte des diverses contraintes que nous avons établies. Nous présenterons un historique de la démarche d'observatoire de l'environnement, puis nous discuterons l'emploi de la télédétection comme outil priviliégié du suivi de la désertification. Nous introduirons enfin

un objet mal connu et peu utilisé : les formes éoliennes d'obstacle, qui peuvent être d'après nous de bons indicateurs de suivi du milieu.

2.2 Observer et suivre la désertification : quoi, comment et pourquoi ?

2.2.1 Les observatoires de l'environnement

2.2.1.1 Des démarches « lourdes »

La logique de l'observatoire repose sur une conception systémique des phénomènes étudiés afin de favoriser la meilleure compréhension des facteurs qui animent ces phénomènes. La mise en place d'observatoires accompagne en particulier l'émergence des concepts de changements globaux et vise à proposer un appui scientifique aux politiques de développement et d'aménagement, aussi bien dans les zones développées que dans les zones difficiles. Plus cette dimension de développement est importante dans la définition du rôle de l'observatoire, plus il intègre un partenariat large avec des intervenants autres que scientifiques (Loireau *et al.*, 2009).

L'évolution des observatoires en Occident est représentative de cette intégration progressive. À l'origine, au début des années 1990, il s'agissait surtout de dispositifs au service d'une définition stricte de l'environnement considéré dans son aspect biophysique. En France, les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU), dispositifs inclus dans des réseaux internationaux, visent à anticiper l'évolution géophysique de la planète à l'échelle du siècle (Balland *et al.*, 2001). Leur méthodologie ne prend pas ou prend mal en considération l'éventuel rôle des sociétés dans cette évolution.

La seconde étape consiste à envisager les relations entre l'environnement et les sociétés, essentiellement pour évaluer l'impact de ces dernières sur le milieu. La mise en place des Observatoires de Recherche en Environnement (ORE) participe de cette démarche, initiée au début des années 2000 par le ministère français de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Les échelles spatiales concernées sont plus compactes : de la parcelle à la petite région, et les échelles temporelles plus restreintes : de l'ordre d'une dizaine d'années. Le dispositif suit également une démarche de labellisation. On retrouve la plupart de ces éléments dans les observatoires situés dans les pays en développement.

En dernier lieu, la nécessité d'adopter une approche intégrée a conduit à élargir le champ d'application des méthodes d'observatoire et à compiler aussi les échelles, du local à l'international. L'environnement seul n'est plus au centre de l'observation et ce sont les relations dynamiques et bilatérales entre environnement et sociétés qui sont au cœur de la démarche. Ainsi s'explique, d'après Redelsperger *et al.* (2006), l'évolution du programme Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) dans ses phases successives (3 entre 2001 et 2012). Cette logique traduit aussi le fait que, plus la connaissance d'un sujet

grandit, plus sa complexité est mise en évidence, et donc plus son approche doit être élargie.

2.2.1.2 Le programme ROSELT

Créé au milieu des années 1990 à l'initiative de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) autour d'un principe de collaboration multi-disciplinaire et internationale, le programme Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme (ROSELT) fait figure de précurseur dans la mise en œuvre de cette approche intégrée. S'appuyant sur une labellisation homogène, il a pour ambition :

- *d'organiser une surveillance scientifique de l'environnement permettant, d'une part, de caractériser les causes et les effets de la dégradation des terres et, d'autre part, de mieux comprendre les mécanismes qui conduisent à la désertification ;*
- *de viser à fournir des données fiables sur la dégradation des terres en zones arides et des indicateurs biophysiques et socio-économiques pertinents de la désertification et un état de l'environnement de la zone OSS* (Roselt/Oss, 2004).

Pour atteindre ces objectifs, le programme est conçu à une échelle de temps longue : la surveillance est envisagée pendant plusieurs décennies et met en œuvre un système harmonisé de collecte et de traitement des données. Ayant pour principale finalité de comprendre le rôle des interactions milieux/sociétés dans le processus de désertification, ses observatoires sont répartis dans l'ensemble du pourtour saharien et, parmi les 25 observatoires labellisés, 12 ont été qualifiés de « pilotes » pour servir de référence aux méthodologies établies pour ROSELT (fig. 2.13).

La finalité du programme est d'intégrer les échelles, depuis le niveau local des observatoires jusqu'au niveau sous-régional, et les approches scientifiques, techniques et politiques. Afin de remplir au mieux cette vocation, sa méthodologie s'appuie en particulier sur le paysage, considéré comme *la résultante spatiale des interactions entre les systèmes écologiques et les systèmes sociaux*. Autour de cette réalité commune à tous les intervenants, il est possible d'établir les bases d'un dialogue constructif. En tant que matérialisation synthétique des diverses dynamiques qui affectent un espace donné, le paysage en fournit les éléments de compréhension (fig. 2.14).

ROSELT intervient donc à deux niveaux : l'écosystème et la dynamique bilatérale ressources-usages, le premier plan servant d'appui au second. La surveillance de l'écosystème implique d'élaborer des indicateurs de changement qui permettront de constituer des séries historiques. L'approche ressources-usages justifie le premier positionnement scalaire : l'échelle du paysage. L'objectif est de déterminer des espaces homogènes du point de vue biophysique : les Unités Paysagères (UP) et des unités homogènes du point de vue des usages : les Unités de Pratiques Combinées (UPC), définies par les activités humaines. L'intersection de ces deux ensembles permet de définir des Unités Spatiales de

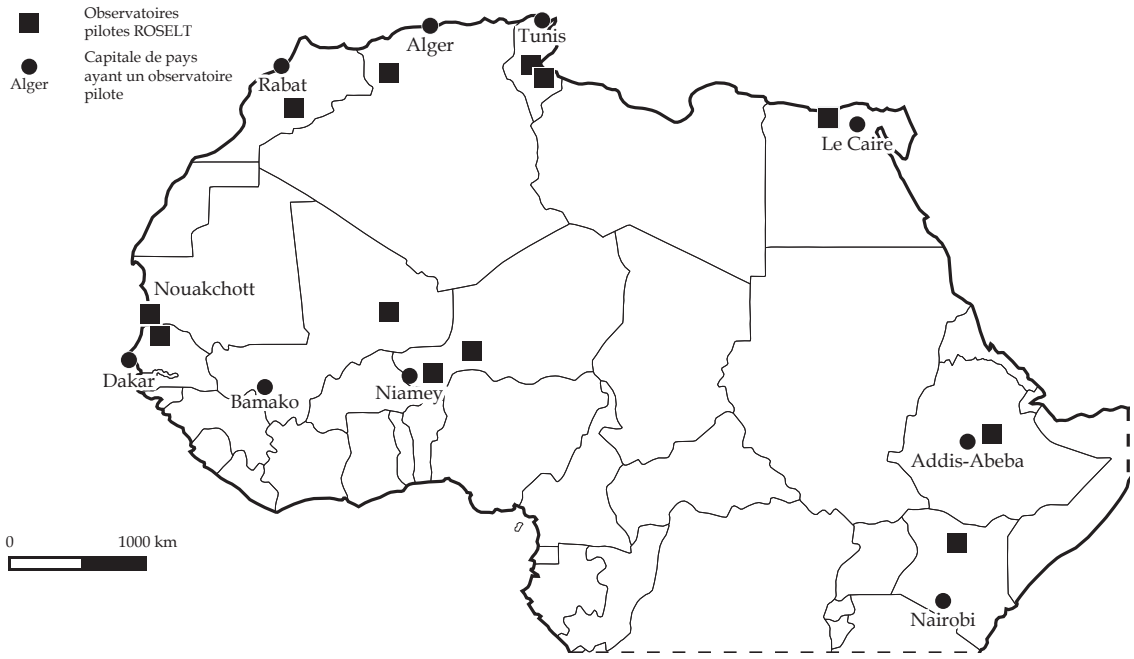


FIGURE 2.13 – *La répartition des observatoires-pilotes de ROSELT, d'après Roselt/Oss (2004)*

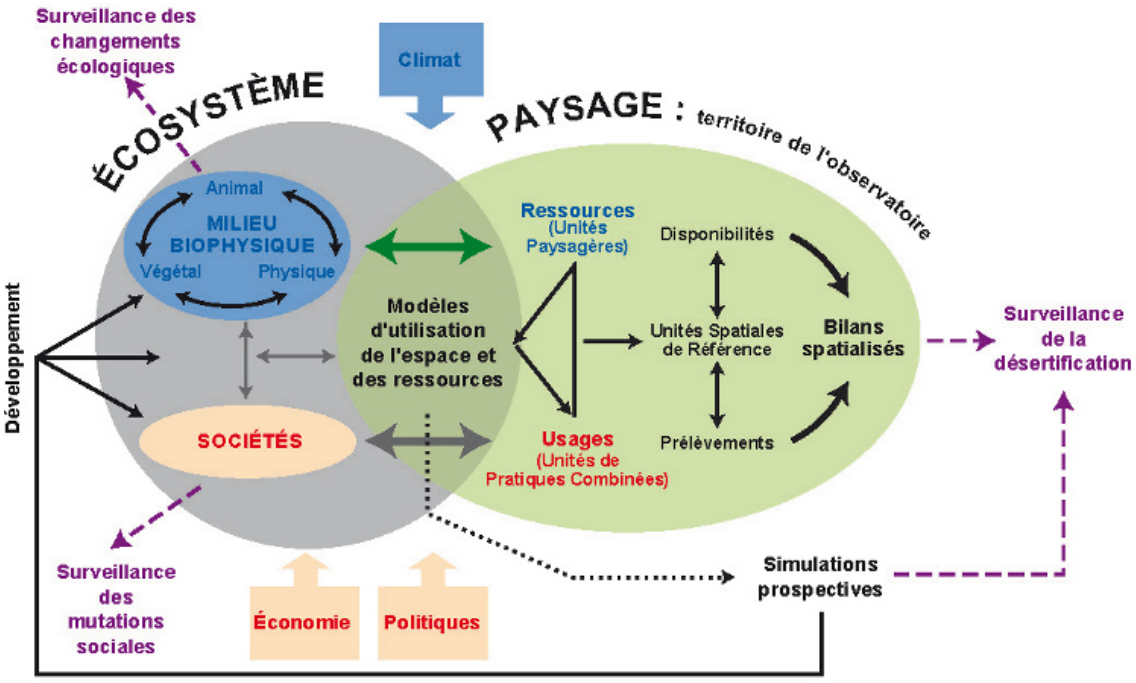


FIGURE 2.14 – *Schéma conceptuel de l'étude des changements environnementaux dans la méthodologie ROSELT*, in *Roselt/Oss (2004)*

Référence (USR) qui doivent servir d'entités élémentaires pour le suivi et dont la combinaison, dans la méthodologie ROSELT, correspond à un paysage.

L'ensemble de ces méthodologies, mutualisé et harmonisé autant que possible entre les membres du réseau, doit permettre de développer deux approches de la désertification :

- une approche synchronique, dans laquelle des espaces sont comparés en fonction d'un facteur de désertification donné (gradient pluviométrique par ex.) et où les autres indicateurs sont considérés toutes choses égales par ailleurs ;
- une approche diachronique où un même espace est envisagé à divers moment à moyen ou long terme. Cette approche correspond à la surveillance et fonde la démarche de diagnostic.

Ces dispositifs ambitieux d'observation, développés à des échelles spatiales et temporelles larges, ont des limites inhérentes à leur conception. Ces limites amènent des questionnements, en particulier concernant leur capacité à répondre effectivement à des demandes sociales en mutation.

2.2.1.3 Limites et contraintes de ces observatoires

Le retour d'expérience du programme ROSELT après une décennie de fonctionnement a permis aux principaux porteurs du projet (notamment l'IRD et l'IRA pour la Tunisie) de faire un bilan opérationnel. Le constat est que, si ces observatoires répondent aux objectifs de connaissance scientifique, leur contribution à la gestion et à l'aide à la décision est moins efficace.

La première limite mise en avant concerne le manque de souplesse du dispositif. Conçu pour étudier des dynamiques au temps long, il est relativement inadapté au suivi de transformations rapides qui sont ou seront plus fréquentes dans un contexte de globalisation économique et de possibilité d'un changement climatique rapide. Au bout de la chaîne d'information et de décision, ce sont les gestionnaires des territoires qui n'obtiennent pas les préconisations nécessaires, ou bien pas en temps utile. En parallèle, des questions méthodologiques n'ont pas été résolues, concernant notamment le suivi et l'actualisation des données. Ainsi les observatoires fonctionnent-ils au rythme de projets successifs qui concernent des enjeux spécifiques, plutôt qu'en assurant un suivi routinier (Loireau *et al.*, 2009).

En parallèle à cette contrainte temporelle, on peut identifier une contrainte liée à l'ancrage spatial. Méthodes, ressources et compétences sont liées au territoire de l'observatoire ; elles sont donc difficilement mobilisables ou transposables dans un autre contexte. Cet ancrage, qui fait de chaque observatoire une petite institution, participe au coût important du dispositif. Cela le rend particulièrement dépendant de la pérennité du financement, donc de la demande sociale et de la volonté politique.

2.2.2 Propositions pour de nouvelles approches

2.2.2.1 La dynamique PASSAGE

Ces différents constats amènent certains partenaires à proposer des méthodes alternatives ou complémentaires. Des membres de l'IRA, de l'IRD et de

l'université française (notamment Avignon) sont ainsi à l'origine d'un groupe de réflexion autour des questions d'observatoire, qui s'appuie en particulier sur les acquis de ROSELT. Cette démarche a trouvé une concrétisation institutionnelle lors du passage au système Unité Mixte de Recherche (UMR) de l'ancienne US 140 de l'IRD, aujourd'hui UMR Espace-Dev, devenant un axe de recherche au sein de la thématique Approche Intégrée Milieux-Sociétés (AIMS), porté par l'équipe pluri-disciplinaire Paysage et observatoire pour la gestion des ressources et des territoires (PASSAGE).

Le principal objectif de PASSAGE est la conception d'observatoires mobiles, en particulier au service du développement des zones difficiles où le manque de données, la difficulté d'accès géographique et thématique sont les principaux obstacles à la gestion et au développement. Cette mobilité se conçoit au plan spatial, avec une autonomie qui permet au dispositif d'être déployé quel que soit le territoire concerné. Elle concerne aussi le plan temporel, avec la possibilité d'intervenir sous la forme de « coups de projecteur » comme en appui à des observatoires installés. Enfin, la mobilité doit aussi être thématique, permettant d'adapter le dispositif aux différentes problématiques qui doivent être intégrées dans une logique de gestion et de développement. L'exigence sous-jacente étant de contruire une méthodologie robuste mais adaptée à la diversité des zones difficiles.

Cet objectif rassemble des chercheurs issus de plusieurs disciplines, de la géographie à la microbiologie en passant par l'informatique et la socio-économie. Les terrains de développement de la méthodologie sont la Tunisie, la France méridionale et le Brésil. Des missions ont déjà été réalisées pour construire la méthode qui s'appuie sur :

- une identification des différents paysages composant le territoire, identification qui doit être commune aux différents acteurs intervenant dans la zone d'étude ;
- une définition des compositions de ces paysages, suivant une logique d'aggrégation : élément > composant > type paysager > paysage ;
- un positionnement scalaire de l'étude par rapport à ces compositions ;
- un suivi des indicateurs retenus selon un pas temporel adapté.

L'ensemble vise à produire une modélisation socio-environnementale au service du diagnostic et de la projection, appuyée sur un Système d'Information sur l'Environnement à l'Échelle Locale (SIEL), développé dans le contexte de ROSELT. La méthode reprend donc en partie la logique des UP et la démarche d'intégration qui lui est associée.

Cette présentation, tant des logiques d'observatoire que de la dynamique de PASSAGE, place le paysage au cœur des propositions, en particulier méthodologiques. L'intérêt de ce positionnement est d'éviter le débat récurrent autour de l'objectivité du paysage et, donc, de permettre de l'utiliser dans une étude. En effet, ici, le paysage n'est pas un objet pré-défini mais davantage une opportunité heuristique et un positionnement méthodologique. Le paysage se conçoit alors à travers un certain nombre de propriétés qui sont autant d'atouts et non selon une définition que l'on voudrait universelle.

2.2.2.2 Les propriétés du paysage dans la démarche PASSAGE

Mode de perception de l'espace relatif aux possibilités de l'observateur, **le paysage est nécessairement limité spatialement**. En fonction des problématiques abordées, ce cadre sera plus ou moins large. Les recherches utilisant l'observation directe depuis le sol définissent ce cadre par défaut : « *le paysage renvoie à une échelle d'intelligibilité de l'espace, qui n'est ni celle de la parcelle ni celle du vaste panorama. Il correspond à un niveau scalaire intermédiaire* (Bachimond *et al.*, 2004) ».

Une seconde propriété du paysage est d'être **une composition réfléchie de dynamiques**, le terme important étant *réfléchie*, puisqu'il renvoie à une synthèse structurée par l'observateur : « *un espace rationalisé plutôt que rationnel* (Avocat, 1982) ».

Cela signifie que l'observateur a tendance à analyser et percevoir l'espace en fonction de ses notions pré-conçues, qu'il s'agisse d'un bagage scientifique comme d'un intérêt économique, voire d'une sensibilité artistique. Ainsi la compréhension commune n'est-elle pas instantanée, comme l'illustre Thesiger (1978)[5] : admirant un paysage du désert saoudien, il fait part de son émerveillement au bédouin qui l'accompagne et reçoit en réponse un « très mauvaise pâture » sans appel.

Cela implique en revanche qu'il est un objet favorisant l'interdisciplinarité. Cela signifie également que le paysage, visuellement cohérent, est un complexe de systèmes relativement autonomes (Bertrand, 1978, Richard, 1989) dont le fonctionnement commun n'est pas évident. L'objet d'une approche paysagère est donc également la mise en évidence des modalités de relations entre les sous-systèmes présentés en fig. 2.15.

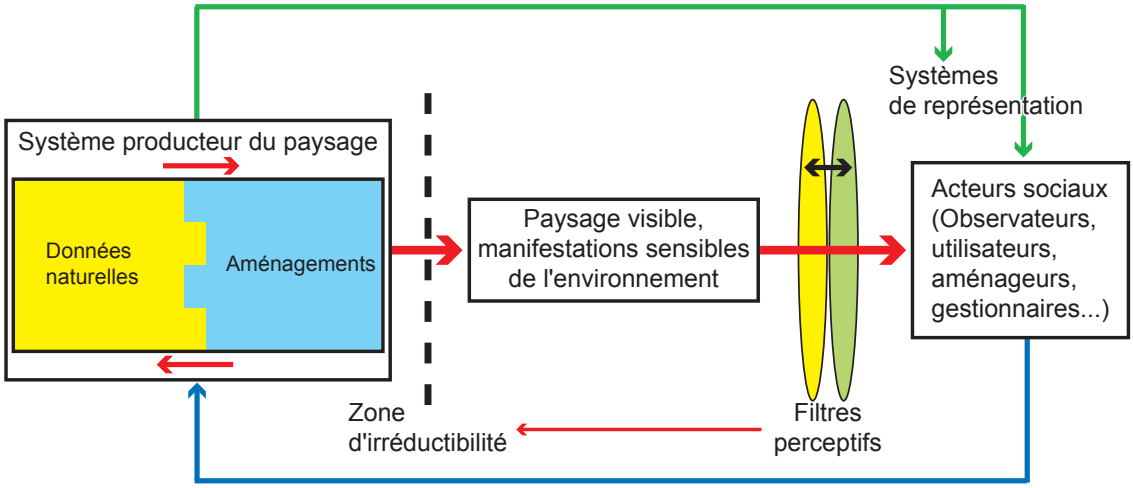


FIGURE 2.15 – *Le système paysager, propositions de l'école de Besançon. Schéma conceptuel de P. Dérioz, d'après Brossard et Wieber (1984)*

L'examen de ce schéma conceptuel permet de préciser l'intérêt de l'utilisation du paysage pour l'étude d'un phénomène comme la désertification. Le bi-

5. Explorateur britannique du milieu du XX^{e} s.

nôme données naturelles/aménagements fonde le système producteur de paysage. La prise en considération des différents acteurs et de leurs intérêts parfois contradictoires est nécessaire quand par ailleurs on envisage l'impact du système producteur de paysage sur leurs actions et inversement. L'intérêt du paysage ainsi envisagé est donc de synthétiser ces différentes problématiques, autour d'une réalité : le paysage visible. Ce dernier, issu d'un système producteur mixte, est une mosaïque de composants, alternant entre fait social et fait naturel. Précisons que Brossard et Wieber (1984) s'appuient sur les techniques quantitatives pour étudier le paysage. Le système qu'ils présentent sous la forme de ce schéma vise donc à permettre l'évaluation quantitative des éléments et des processus qu'il représente.

Les trois dernières propriétés du paysage ont été proposées par Dérioz et Laques (2004) sous le nom des « trois fonctions i » :

- **La fonction initiatrice** : l'expert ou le scientifique confronté à un nouveau champ d'étude est également confronté à la limite de ses sources. Par la vision directe qu'il offre de l'espace considéré, le paysage bien étudié peut alors s'avérer être une entrée efficace et synthétique de ce nouveau champ. Lorsque les données préliminaires elles-mêmes sont fragmentaires, voire inexistantes, le paysage peut également être une source d'informations suffisante pour démarrer une recherche, même s'il n'est que *complémentaire et non exclusif*. Le va-et-vient permanent entre le paysage et les autres sources d'information doit permettre de contracter la zone d'irréductibilité entre paysage visible et système producteur symbolisée dans la figure 2.15 ;
- **La fonction d'indicateur** illustre le fait que le paysage, dans les combinaisons qu'il propose, constitue un outil de suivi territorial et de surveillance des dynamiques qui le façonnent. Donner un **sens géographique aux formes que l'on observe** permet de réaliser cet objectif. Cela implique une démarche en trois temps : identification des combinaisons significatives, association de ces combinaisons à des dynamiques et enfin évaluation et suivi des évolutions du territoire ;
- **La fonction intégratrice**, enfin, renvoie au paysage comme lieu commun, familier, favorisant les échanges entre les disciplines et les acteurs, scientifiques, gestionnaires et exploitants.

2.2.2.3 Les outils proposés

S'appuyant sur cette conception du paysage, les membres de PASSAGE cherchent à mettre au point une « boîte à outils » transposable et facile à mettre en œuvre. Cet ensemble de méthodes et d'outils comprend :

1. La définition paysagère. Elle s'appuie en particulier sur les études de terrain, les échanges avec les gestionnaires et les utilisateurs ainsi que sur des caractères plus ou moins objectifs issus du système producteur du paysage. Ce point implique donc la mobilisation d'indicateurs pertinents. Le recours au GPS, notamment, permet de spatialiser les résultats de cette approche.

2. L'utilisation de la donnée de télédétection qui intervient à plusieurs niveaux. Elle permet d'abord de généraliser spatialement les approches de diagnostic. On l'utilise également pour définir un état de référence des types paysagers. Elle permet enfin de suivre l'évolution de chacun de ces types, au moins d'un point de vue quantitatif. Nous discuterons le point de vue qualitatif dans la section suivante.
3. La spatialisation. Il s'agit de produire des cartes, tant des états de référence que des évolutions, qui soient effectivement utiles aux décideurs et aux gestionnaires, dans un souci de faciliter le transfert de compétences et d'information. La spatialisation des phénomènes et des processus permet de surcroît d'identifier plus facilement les enjeux d'un territoire.
4. La modélisation et la prévision, via l'outil informatique. Nous avons déjà évoqué le projet SIEL dans le cadre du programme ROSELT. À partir de cette base, des développements ont été réalisés, en particulier en Tunisie (Fethoui, 2011). À travers une étude de cas, des indices sont définis : niveau de risque de désertification (NRD), proportion de changement (PC), indice spécifique de désertification (ISD) et indice global de désertification (IGD), appuyés sur les outils précédemments décrits. La combinaison de ces indices avec l'approche par types paysagers permet d'élaborer des projections correspondant à différentes évolutions des paramètres de contrôle établies en accord avec les gestionnaires. L'outil permet ainsi l'interactivité.

Cette présentation des concepts et méthodes de PASSAGE nous permet d'introduire maintenant deux points fondamentaux de notre travail : une discussion de l'utilisation de l'outil de télédétection et la formalisation d'une approche centrée sur les formes éoliennes d'obstacles.

2.2.3 Télédétection et spécificités des régions sèches non désertiques

La télédétection s'impose comme l'outil privilégié de l'étude des zones difficiles. On peut définir thématiquement la donnée obtenue par télédétection comme *un composé instantané du terrain étudié, plus ou moins synthétique suivant la résolution du capteur*. Elle permet alors de travailler à distance et de développer des approches complétant d'éventuels manques dans les mesures de terrain. Dans une certaine mesure, elle fait « venir le terrain au laboratoire ».

Tous ces avantages font que la télédétection est particulièrement utilisée dans l'étude des processus de désertification. Cependant, ces atouts s'accompagnent de contraintes qu'il est nécessaire de prendre en considération. Elles sont d'autant plus importantes dans les régions sèches non désertiques où le milieu réagit rapidement et où la texture de la surface observée par télédétection est hétérogène et fragmentée. Le suivi de la dynamique éolienne par télédétection est particulièrement soumis à ces contraintes.

2.2.3.1 La dépendance d'échelles

Dans une image de télédétection, les réponses spectrales des objets de dimension spatiale inférieure à la résolution seront combinées, pesant d'un poids différent dans la valeur radiométrique d'un pixel. Ce poids est défini par les tailles relatives des composants du pixel et différentes combinaisons peuvent conduire à la même réponse radiométrique. Cela se traduit par une relation radiométrique de fait entre les pixels spatialement proches qui augmente la taille du plus petit objet observable.

Ce dernier, lié à une contrainte technique, a une conséquence thématique puisqu'il définit l'échelle d'interprétation du milieu. De fait, plus la résolution est grossière, plus la taille de l'objet thématique élémentaire est importante. Dans le cas d'images de trame carrée, la résolution est définie par la longueur du côté d'un pixel tandis que la taille de l'objet élémentaire s'estime en surface. La relation entre la résolution et la taille de l'objet thématique élémentaire n'est donc pas linéaire mais exponentielle.

Cette propriété de la donnée de télédétection conduit Burel et Baudry (1999) à définir la dépendance d'échelles : « *En faisant varier les échelles ou, au moins, l'extension ou la résolution, on fait, la plupart du temps, varier le phénomène étudié* » (p. 81). Elle a pour corrolaire une propriété d'autonomie : « *Chacun des phénomènes [étudiés] [...] a ses propres échelles d'espace et de temps de fonctionnement, il a une autonomie qui en fait un niveau d'organisation* [...] ».

Les phénomènes observés à une échelle large ont ainsi plus d'inertie que ceux que l'on observe à une échelle locale. Cela s'explique par le fait qu'il n'y a pas linéarité dans le transfert d'échelle : la dynamique d'un ensemble n'est pas strictement la somme des dynamiques de ses objets élémentaires (Andrieu et Mering, 2008). Si on relie cette propriété aux contraintes thématiques de la donnée de télédétection, on comprend que, si elle présente un certain nombre d'avantages, il ne faut pas oublier qu'elle encadre de fait l'interprétation.

Ces remarques rejoignent celles que formule Puech (1994). Cet auteur estime en effet qu'à chaque objet observé par télédétection correspond un seuil d'homogénéité et un seuil d'hétérogénéité, définis par rapport à la résolution de l'image : en deçà du seuil d'homogénéité, trop de détails polluent la perception de l'objet, au delà du seuil d'hétérogénéité, la réponse propre de l'objet est noyée dans la fusion avec celles de ceux qui l'entoure.

Enfin, la dépendance d'échelle s'applique également si on cherche à caractériser de façon morphologique des objets. Ducrot (2005) démontre ainsi que, suivant l'échelle sur laquelle on se positionne, les éléments observés peuvent avoir une forme euclidienne ou relever de la géométrie fractale. Dans le premier cas, celui de la résolution grossière, on est dans le domaine de formes simples et d'une perception synthétique. Le second cas est celui de formes plus complexes et d'une perception plus fine des phénomènes.

2.2.3.2 Conséquences pour le pas temporel du suivi des changements

Cela pose question lorsqu'il s'agit de suivre des évolutions, ce qui se fait le plus souvent en utilisant des images issues du satellite Landsat. Dans le

meilleur des cas, la résolution spatiale est de 28,5 m par pixel. Les objets susceptibles d'être détectés sont alors, nécessairement, de dimension importante. Si on suit les hypothèses de la dépendance d'échelle, ces objets évoluent donc à des pas de temps plus longs.

Concrètement, ces contraintes devraient se traduire par la nécessité d'espacer de façon conséquente deux images analysées pour mettre en évidence un changement, en particulier dans les régions sèches. Cette hypothèse semble confirmée par la revue bibliographique présentée dans le tableau 2.2, où l'écart moyen entre deux images étudiées est de l'ordre de dix ans.

TABLEAU 2.2 – *Analyse bibliographique des suivis de changements par télédétection*

Article	Type d'images	Nombre de dates	Dates des données
Bensaïd *et al.* (2003)	LANDSAT (MSS et TM)	3	1976, 1986 et 1995
Chesnay (1998)	LANDSAT et SPOT	5	1972, 1978, 1986, 1989 et 1994
Dibi N'Da *et al.* (2008)	LANDSAT (TM et ETM+)	2	1986 et 2003
Hoang *et al.* (2008)	LANDSAT (TM et ETM+)	3	1993, 1999 et 2003
Koné *et al.* (2007)	Landsar (TM et ETM+)	2	1986 et 2000
Mama et Oloukoi (2003)	Photos aériennes, LANDSAT (ETM) et SPOT (XS)	3	1982, 1986 et 1999
Mihai *et al.* (2006)	LANDSAT (TM et ETM+)	2	1989 et 2000
Oloukoi *et al.* (2006)	LANDSAT (TM)	2	1978 et 1998
Oswald *et al.* (2007)	LANDSAT (TM)	2	1986 et 2000
Pham *et al.* (2007)	LANDSAT (TM et ETM+)	3	1988, 1994 et 2001
Taïbi et El Hannani (2004)	Photos aériennes, LANDSAT (TM)	3	1964, 1987 et 1999

Même s'il ne faut pas négliger le fait que, par exemple, les effets de l'activité humaine peuvent amener des objets à forte inertie à réagir rapidement, les résultats des études ainsi conduites portent à moyen voire long terme. Or, comme nous l'avons montré, il existe une demande sociale et scientifique d'analyse à court terme (Loireau *et al.*, 2009).

Dans le cas des dynamiques de désertification, on peut schématiser le problème que pose l'utilisation d'images à résolution grossière de façon graphique (fig. 2.16). Un diagnostic établi à partir de deux images espacées de plusieurs années lisse les évolutions et conduit à présenter une tendance linéaire. La non prise en considération des cycles intermédiaires renforce le risque de mauvais diagnostic qui peut conduire à la mise en œuvre d'interventions inadaptées.

2.2.3.3 Applications à la morphodynamique éolienne

Lorsqu'il s'agit d'analyser les conséquences de la dynamique éolienne dans les régions sèches non désertiques, les contraintes que nous avons mises en évidence sont rédhibitoires. En effet, nous l'avons montré, celle-ci est contrôlée par différents paramètres qui fonctionnent tous à une échelle fine. De plus, ses manifestations n'ont rien à voir, du point de vue des dimensions, avec ce que l'on

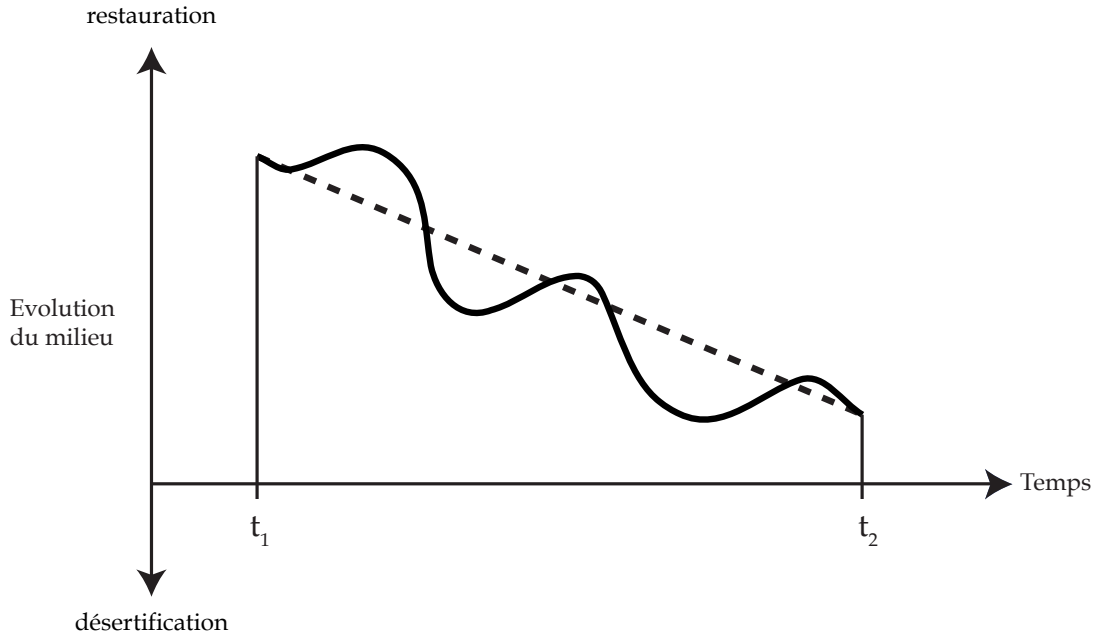


FIGURE 2.16 – *Évolution (en pointillés) d'une dynamique d'un milieu en cours de désertification suivie par télédétection à moyenne résolution*

peut trouver dans les déserts. Les formes submétriques sont la norme, tandis que les formes décamétriques sont l'exception. Ce point, associé à l'existence de seuils de détection, rend très délicate l'évaluation *qualitative* des conséquences paysagères de la dynamique éolienne à partir d'images à résolution décamétrique.

Envisageons à titre d'exemple une surface de 900 m² d'un paysage de région sèche. Cette surface en présente les caractéristiques communes, en particulier une couverture végétale discontinue (fig. 2.17). On considère qu'elle correspond strictement à un pixel d'une image LANDSAT. On l'étudie à deux moments n et $n+1$.

En étudiant, par exemple, l'évolution de l'ensablement et de son paramètre de contrôle principal, la végétation, on parvient à ce raisonnement :

- une surface dont la couverture végétale est inférieure à 20-30 % a la même réponse radiométrique qu'un sol nu (Girard et Girard, 1999). Le phénomène est de surcroît accentué par l'albédo élevé des sols secs et la faible activité chlorophyllienne d'une végétation adaptée aux conditions d'aridité ;
- on peut envisager un cas de figure où, en n, la couverture végétale est de 10 % et où, en $n+1$, elle est de 20 %. Il s'agit là d'une amélioration des conditions environnementales, qui ne sera pas forcément perçue en raison de l'effet de seuil décrit plus haut ;
- on peut envisager également un sol nu en n, avec une forte dynamique éolienne, mais, comme aucun obstacle ne permet au sable de s'accumuler, pas de formes sableuses. En $n+1$, une couverture végétale de l'ordre de 20 % s'est mise en place, avec une densité suffisante pour générer des accu-

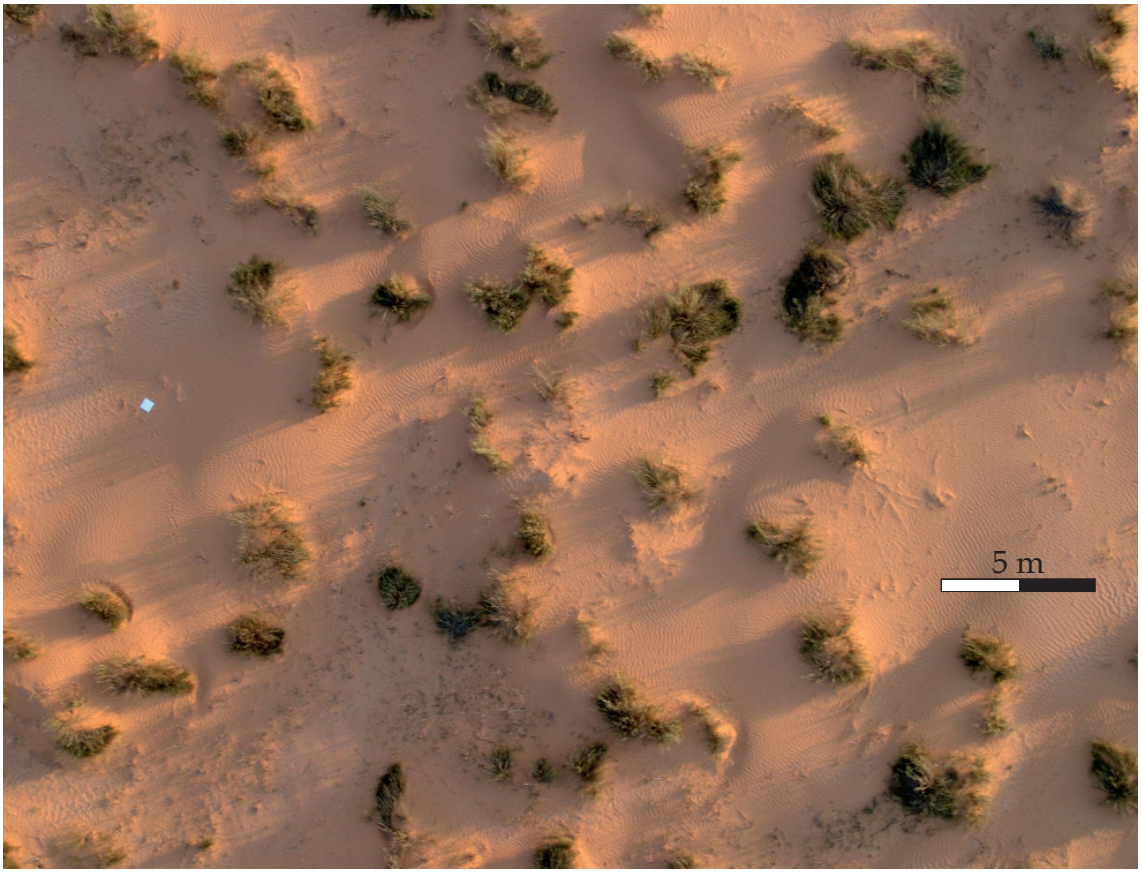


FIGURE 2.17 – *Exemple d'une surface de région sèche. Photographie aérienne prise par le paramoteur* Pixy. *Oglet Merteba, Tunisie. Cliché : É. Delaître (2008)*

mulations sous le vent. La télédétection mettra en évidence l'ensablement, mais pas nécessairement sa cause, qui est l'apparition d'une couverture végétale. Cela correspond à une amélioration de l'écosystème, alors que l'ensablement est plus généralement perçu comme une dégradation ;

– la photographie sur laquelle s'appuie notre exemple illustre également une autre source d'erreur liée à la dépendance d'échelle : dans ce cas précis, les ombres portées des buissons pourraient fausser complètement le calcul d'un indice de recouvrement.

En conclusion, on peut alors faire les remarques suivantes : grâce à une image LANDSAT, les évolutions des objets de taille supérieure à celle d'un pixel peuvent être suivies mais, sauf événement catastrophique, à moyen ou long terme. Des objets homogènes de telle taille restent exceptionnels dans les régions non désertiques. Les objets de taille inférieure à celle d'un pixel évoluent plus rapidement mais comment distinguer les dynamiques propres à chacun de ces objets ? L'évaluation qualitative du changement est quasiment impossible, comme l'a montré par exemple Ouerchefani (2012) concernant les dynamiques d'ensablement en Jeffara tunisienne.

Nous arrivons ainsi à la première proposition méthodologique de ce travail : l'utilisation d'images de résolution fine - métrique à submétrique - pour

caractériser et suivre les paysages des régions sèches non désertiques. Cette proposition est appuyée sur la seconde qui est l'utilisation des Forme Éolienne d'Obstacle (FEO) comme outil de diagnostic et que nous présentons dans la section suivante.

2.3 Un nouvel indicateur : les formes éoliennes d'obstacle

L'observation et le suivi de phénomènes complexes ne peuvent être exhaustifs. Il est nécessaire d'élaborer une approche fondée des indicateurs de fonctionnement du système considéré qui servent de filtres perceptifs et qui sont adaptés à la problématique et aux outils mis en œuvre.

Pour mieux comprendre les enjeux de la définition d'indicateur dans le contexte de la désertification, on peut s'appuyer sur l'important travail de synthèse de Jauffret (2001). Elle indique en particulier qu'un bon indicateur est celui qui combine le maximum d'attributs parmi les suivants :

- utilité : l'indicateur doit répondre aux besoins de l'utilisateur, de façon transparente pour qu'il puisse en apprécier la qualité. La condition d'utilité implique aussi que le nombre d'indicateurs doit rester limité ;
- généralisation : son utilisation doit être possible dans tous les contextes géographiques concernés par la problématique. En l'occurence, toutes les régions touchées par la désertification ;
- pertinence : l'indicateur doit transcrire une image fidèle de l'état de la situation considérée. Dans l'idéal, sa pertinence doit se maintenir à différentes échelles spatiales, du local au régional ;
- prédictibilité : il doit permettre d'établir des pronostics et des scénarios ;
- fiabilité : l'indicateur doit réagir comme le système qu'il décrit. Il doit pouvoir être actualisé facilement ;
- sensibilité : ce dernier attribut est délicat car si l'indicateur doit être suffisamment sensible pour traduire les évolutions du système, sa sensibilité ne doit pas nuire à la possibilité de suivi en interdisant tout établissement d'un étalon significatif de son fonctionnement. Selon Jauffret, une sensibilité temporelle de l'ordre de l'année est souhaitable.

Nous pourrions ajouter une dernière propriété qui serait la cohérence ou la compatibilité. En effet, notre approche, fondée sur l'analyse de la morphodynamique éolienne, est de l'ordre du diagnostic thématique qui est focalisé sur un processus particulier d'un territoire étudié. Néanmoins, pour être utiles au suivi de la désertification, ses résultats doivent pouvoir être articulés à ceux d'autres approches, l'ensemble permettant de fonder un diagnostic territorial (Laques, 2009).

2.3.1 Décomposer les paysages des régions sèches non désertiques

2.3.1.1 Les états de surface

En raison de la nature des environnements des régions sèches, à la fois complexe, hétérogène et fragmentée, et des besoins du suivi, la recherche environnementale a développé des approches fondées sur la définition et l'analyse des État De Surface (EDS). Cette interface entre l'atmosphère, la géosphère, l'hydrosphère et la biosphère est le terrain de nombreux phénomènes parfois problématiques, voire catastrophiques : infiltration, ruissellement, érosion, etc. (Escadafal, 2007). Dans les régions sèches, où la protection offerte par la végétation est plus faible, il est d'autant plus important d'étudier cette surface qu'elle peut être directement au contact de l'atmosphère et beaucoup plus sensible aux altérations liées à la pluie ou à l'érosion éolienne.

Par ailleurs, l'état de surface est soumis aux impacts des activités anthropiques qui se combinent avec les autres actions suivant, parfois, un principe d'effet multiplicateur. Les caractéristiques de son état sont alors, en retour, déterminantes dans le développement des végétaux, dans la résistance des sols à l'érosion, dans leur comportement hydrodynamique. La surface du sol est donc l'objet de nombreuses études en pédologie, écologie, géomorphologie et hydrologie. L'état de surface est un complexe d'État de Surface Élémentaire (ESE) (Escadafal, 1989) et donc un outil de synthèse adapté au suivi de l'environnement, en particulier par télédétection.

2.3.1.2 Les fonctions des EDS

Les EDS ont une première fonction descriptive : ils servent à modéliser les réactions du milieu vis-à-vis d'un phénomène donné. L'approche est alors quantitative, et on mesure la présence et l'abondance des éléments (Asseline *et al.*, 1987, Roose, 1996). Cette approche repose sur la connaissance du rôle de chacun de ces éléments par rapport au processus étudié ou bien vise à le définir. La définition et la classification des composants des états de surface ont fait l'objet de nombreux travaux portant sur la végétation (Abrahams *et al.*, 1995), les divers types de croûtes (Casenave et Valentin, 1990), la granulométrie des éléments grossiers (Casenave et Valentin, 1992a), les diverses pellicules qui peuvent se former (Janeau et Esparza Villareal, 1992), etc.

Une fois les paramètres validés, ils peuvent être utilisés dans le cadre de modélisations portant sur des aires plus ou moins vastes. Callot *et al.* (2000) ont ainsi pu calibrer des modèles établis par des physiciens de l'atmosphère pour cartographier et analyser les zones d'émission de poussières à l'échelle du Sahara. Les hydrologues ont aussi utilisé cette approche pour paramétrer l'estimation du coefficient de ruissellement des sols (Casenave et Valentin, 1992b). Ces divers travaux montrent comment on peut passer de la description initiale à l'intégration des EDS à différentes échelles.

Les EDS ont également une fonction analytique. Leur répartition, diversité, abondance et état constituent des indicateurs que l'on peut suivre pour identifier les dynamiques du milieu. Par la suite, on peut relier ces dynamiques à

des facteurs explicatifs, comme le climat ou les activités anthropiques. Cette démarche se fonde sur un double postulat :

1. Les composants des états de surface réagissent rapidement aux modifications des conditions environnementales, avec des rythmes qui peuvent être différents suivant leur nature.
2. Ils interagissent, ce qui en fait des indicateurs de suivi pertinents. Par exemple, la dégradation de la végétation peut favoriser l'érosion éolienne qui favorise à son tour la colonisation par certains types de plantes. Au contraire, l'accumulation éolienne peut aussi permettre le retour de la végétation en offrant des conditions favorables à la germination de graines. Les plantes peuvent ensuite fixer le sable et enclencher des processus pédologiques. L'identification et la caractérisation des différentes compositions d'états de surface permet ainsi de suivre l'évolution du milieu.

La définition de l'état de surface (notamment élémentaire) dépendra aussi largement de la problématique adoptée : il est avant tout une grille de lecture de l'espace considéré. Le même terme s'applique alors à différentes échelles, depuis la placette de 1 m² jusqu'au carré de 1 degré de côté (env. 100 km $\times$ 100 km). Le choix des paramètres entrant dans la définition des EDS dépendra de la problématique de l'étude. Les hydrologues étudiant le ruissellement intègrent ainsi le critère de pente (Lelong *et al.*, 1993) quand ce paramètre ne sera pas exprimé car non pertinent dans d'autres approches.

2.3.2 Les formes éoliennes d'obstacles

2.3.2.1 Un élément important des EDS

En régions sèches, le suivi des EDS porte surtout sur la végétation. Les observations de terrain montrent pourtant que cette approche doit être complétée par l'étude d'objets liés à la géodynamique externe qui restent mal connus : les Forme Éolienne d'Obstacle [6]. Ces formes sont présentes en grand nombre en raison de la nature sablo-limoneuse des sols et de leur exposition aux action éoliennes (fig. 2.18). Elles sont restées peu étudiées dans le détail malgré l'ancienneté de leur signalement dans les descriptions de terrain, depuis les précurseurs (Gautier, 1916, Chudeau, 1920, Monod, 1928) jusqu'aux travaux plus récents (Shengli *et al.*, 2009).

2.3.2.2 Des objets mal connus : l'exemple de la *nebka*

Une bonne illustration est fournie par le florilège d'emploi et de définitions du terme *nebka*, désignant la forme la plus courante de l'accumulation éolienne sous le vent d'un obstacle (fig. 2.19).

Le premier problème qui se pose concerne son orthographe. Il résulte de la transcription en alphabet latin du terme arabe. On le trouve ainsi écrit :

6. Le terme n'est pas nouveau. Nous l'avons déjà évoqué au premier chapitre, il a été employé par plusieurs auteurs, comme Coque (1962) et Khatelli (1996). L'originalité de notre démarche consiste en un essai de formalisation et de systématisation.

FIGURE 2.18 – *Photographie aérienne prise par le paramoteur* Pixy *d'une surface de région sèche non désertique. Oglet Merteba, Tunisie pré-saharienne. Cliché : Delaître, 2008*

FIGURE 2.19 – *Une forme éolienne d'obstacle typique, la nebka isolée simple (ici sous* Stipagrostis pungens*). L'ellipse rouge correspond à celui de la figure 2.18. Cliché : É. Delaître (2008)*

nebka (Bozou-Moussa et Dan Lamso, 2004), *nebkha* (Tricart et Cailleux, 1969), *nabkha* (Langford, 2000), etc. Cette multiplicité de transcriptions pourrait n'être qu'anecdotique si elle ne participait aussi de la confusion qui accompagne son emploi dans la littérature scientifique. Son sens littéral (*dune*, en arabe) a un

caractère générique qui explique que certains auteurs l'utilisent pour désigner tout type de petite accumulation, de hauteur inférieure au mètre.

Monod (1928) la définit donc ainsi :

> *La nebka est une dune qui s'est formée à l'abri d'un obstacle quelconque, le plus souvent une touffe d'herbe ou un buisson, parfois un simple caillou. [...] Chudeau lui assigne une hauteur de 1 m ce qui n'empêche pas le même auteur d'en signaler ailleurs de 3 m.*

On note que cet auteur relève déjà des incohérences dans la définition et la description de la forme. On retrouve cette relative imprécision jusque dans les manuels de référence en géomorphologie. Ainsi Tricart et Cailleux (1969) proposent-ils trois définitions différentes tout en mentionnant des incohérences dans l'emploi que Coque (1962) fait du terme :

- *p. 60 : nebkas : **microformes épisodiques**, petites accumulations derrière une touffe d'herbe ;*
- *p. 158 : nebkhas : **petites dunes**, hautes de 1 à 3 m ancrées sur des touffes de végétation ;*
- *p. 291 : nebkas : **formes naines** ne dépassant pas quelques décimètres de haut et 1 à 1,5 m de long et allongées en forme de langues sous le vent du végétal.*

On remarquera que le terme microformes épisodiques se différencie sensiblement de petites dunes, ainsi que la différence de taille et de relation à l'obstacle dans les trois définitions, sans oublier enfin le fait qu'une nebka peut se former sous le vent d'un obstacle qui n'est pas végétal - un bloc rocheux par exemple. Cet exemple illustre les difficultés liées à l'utilisation d'un critère de taille dans la classification des formes éoliennes.

2.3.2.3 Les faiblesses interprétatives

Dans les trois définitions précédentes, de même que dans les propositions de T. Monod, on désigne par le vocable de nebka des formes qui dans les faits sont liées d'une part à des conditions préalables différentes - notamment en terme de densité d'obstacles, et, d'autre part, à des dynamiques de milieu d'intensité et de durée différentes (fig. 2.20).

Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre, quand la densité des végétaux atteint ou dépasse un certain seuil, on ne trouvera que le type représenté en 2, sous forme jointive si la quantité de matériel transporté par le vent est suffisante. La figure illustre également la fugacité de la forme. En effet, la flèche sableuse sous le vent n'apparaît que si :

- l'énergie fournie par le vent est suffisante dans une direction constante, soit par la durée - vent peu efficace pendant un temps suffisamment long, de l'ordre de deux ou trois jours, soit par la violence : une tempête de sable peut fabriquer une flèche en moins d'une heure (observation de Y. Callot au N-O du Sahara algérien) ;
- la fourniture de sable est suffisante. Toutefois, si le vent vient à changer de direction, la flèche disparaitra rapidement et seule l'accumulation directement stockée par le végétal se maintiendra.

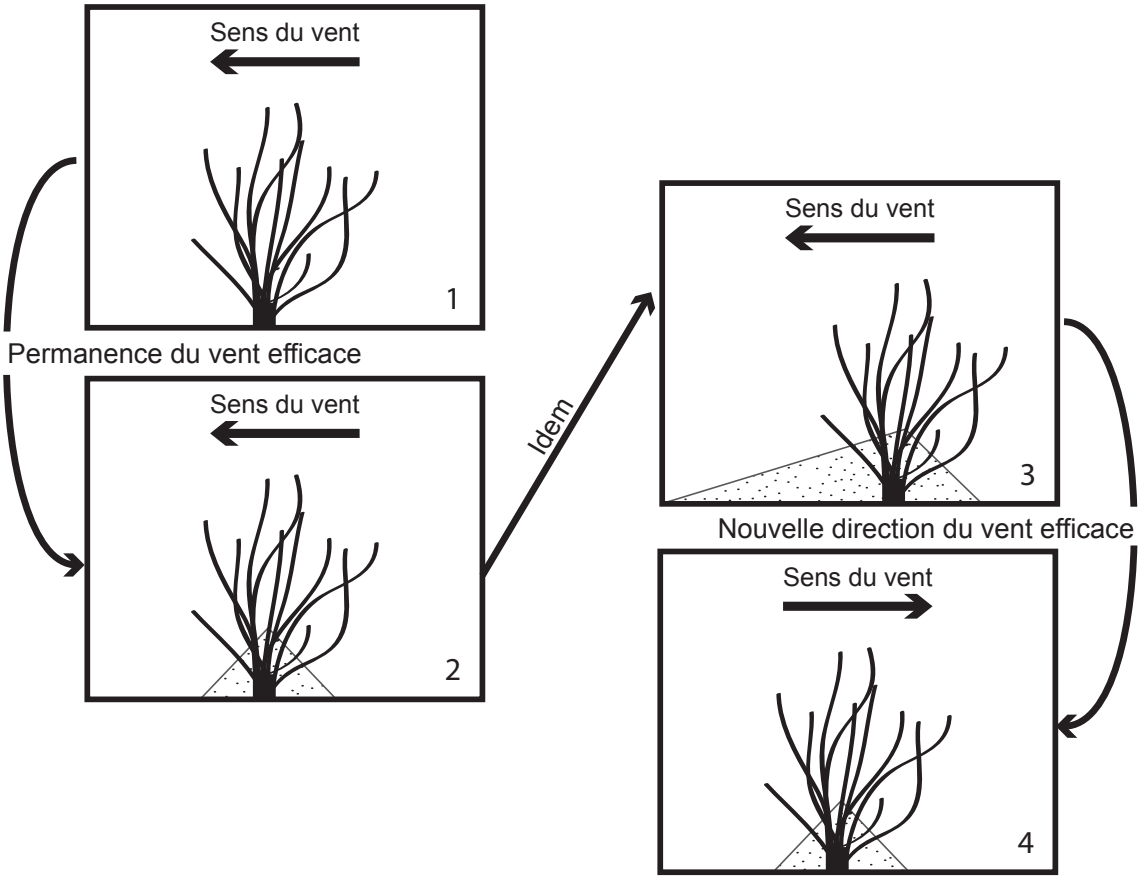


FIGURE 2.20 – *Processus de formation et d'évolution d'une nebka dans un contexte d'obstacle isolé*

La question de l'échelle - spatiale et temporelle - de ces formes n'est pas non plus fixée. En zone sahélienne, Tengberg (1995) appelle *nebka* une association particulière d'une accumulation sableuse et de rejets buissonnants d'arbustes pouvant atteindre de grandes dimensions. Langford (2000) applique le même terme à des formes dont les dimensions peuvent être d'ordre décamétrique. Pour des formes de cette échelle, les variations ne s'étudient pas au cours de quelques jours et des modélisations pour estimer leurs évolutions ont été réalisées en simulant le système pendant plusieurs années voire plusieurs décennies (Nield et Baas, 2008). Il semble que, chez les auteurs anglo-saxons, la différence n'est pas toujours bien nette entre *nebka* et ce qu'ils appellent *coppice dune* qui est une accumulation de sable au centre d'un cercle de buissons.

En conclusion, nous pouvons retenir que ces formes sont mal connues pour trois raisons principales :

1. Elles sont difficiles à caractériser car elles ont rarement une géométrie facile à identifier et sont en général le fruit d'interactions entre plusieurs éléments dynamiques et statiques.
2. Leur taille les rend indétectables par les moyens traditionnels de télédétection. Elles sont ainsi exclues de nombre d'études.

3. Étant liées à un obstacle, leur positionnement est fixe. De ce fait, elles posent peu de problème d'aménagement dans les régions sèches, même si la circulation dans un champ de nebkas n'est guère aisée !

En revanche, elles stockent l'essentiel du sable dans les régions non désertiques et leur petite taille les rend particulièrement sensibles aux variations des conditions du milieu. Cela en fait des indicateurs de suivi pertinents, sous réserve que l'on puisse élaborer des méthodes fiables d'évaluation et de suivi.

2.3.3 Comment en faire des indicateurs ?

Il faut dans un premier temps établir une classification rigoureuse de ces formes, puis détailler les critères de description et enfin envisager leurs liens potentiels avec les dynamiques du milieu. Cette présentation est le fruit d'une réflexion collective conduite pendant plusieurs années et n'est pas nécessairement définitive puisque, nous le montrerons, un certain nombre de points font encore l'objet de discussions.

2.3.3.1 Classification des FEO

À l'instar de ce que nous avons dit dans le premier chapitre, il ne faut pas voir cette classification comme une sectorisation. Les limites entre les formes sont souvent fugaces et, sauf exception, il suffit de peu de variation dans les paramètres de contrôle pour faire passer une forme d'une classe à une autre. Une définition générique des FEO, proposée sur la base de notre expérience du terrain, pourrait être :

> **Les formes éoliennes d'obstacle sont des formes d'accumulation dont la genèse et la disposition spatiale sont liées à un obstacle d'échelle submétrique à métrique situé sur la trajectoire des particules transportées par le vent.**

Nous proposons ainsi une classification qui s'appuie d'abord sur le processus - critère qualitatif qui concernera essentiellement la nature de l'obstacle - pour être ensuite déclinée par la taille - critère quantitatif. Dans un premier temps, nous ne présentons que les formes composées de sables vifs, immédiatement mobilisables par un vent efficace.

La première catégorie ne contient qu'une seule forme : le placage éolien. Il est lié à un accident topographique qui perturbe le flux et provoque le dépôt. Il est observé à différentes échelles : Kardous (2005) note la présence d'un placage éolien dans les sillons des labours, tandis que les billons connaissent des processus d'ablation. Callot (2008) montre que dans le cas d'un obstacle de plus grande dimension, comme une ondulation de terrain, le placage donne des indications concernant la direction et la force des vents efficaces (fig. 2.21).

Dans le cas **1**, le placage commence au pied du versant et s'amincit en direction du sommet. Il indique que l'accumulation se fait de bas en haut et que le vent n'est pas assez compétent pour faire franchir la crête au matériel qu'il

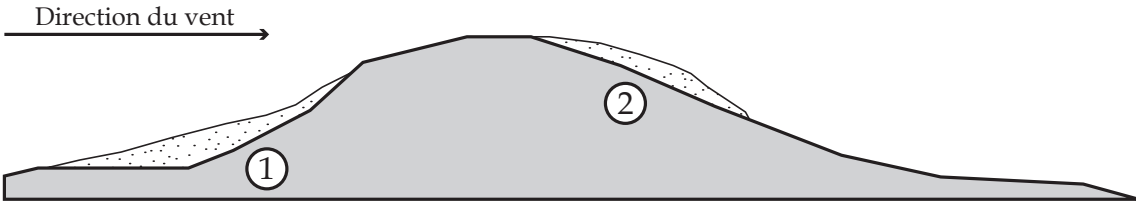


FIGURE 2.21 – *Coupe d'un obstacle topographique perpendiculaire à la direction des vents et deux types de disposition des placages. D'après Callot (2008), modifié*

transporte. Dans le cas **2**, le placage commence après la ligne de crête et s'amincit vers le pied du versant sous le vent. La dynamique éolienne est plus forte puisque le matériel franchit la crête.

La seconde catégorie de FEO est plus complexe. Elle rassemble toutes les variations du type nebka. De notre point de vue, la définition la plus efficace de la nebka est la suivante :

> **Toute accumulation de sable piégé par un obstacle végétal appartenant à la strate herbacée ou arbustive basse ou par un obstacle minéral non structural : cailloux ou blocs**

Par ordre de complexité croissant et en s'en tenant au seul obstacle végétal, on peut ainsi distinguer :

– la nebka isolée simple : un amas hémisphérique piégé dans le plant de végétation (fig. 2.22) ;

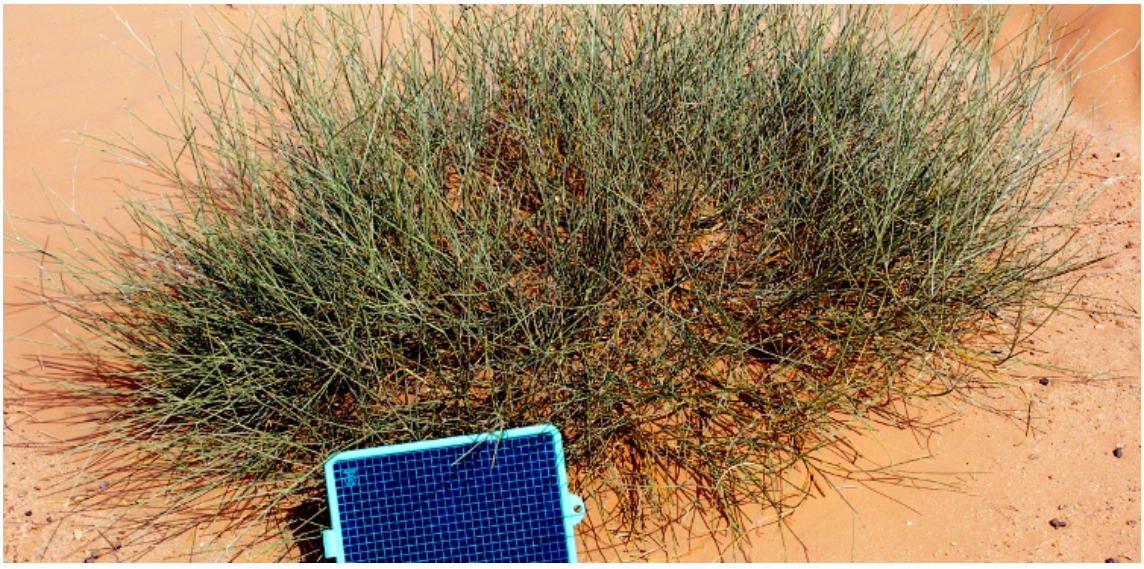


FIGURE 2.22 – *Une nebka isolée simple. Secteur de Ras Elkamen Labiadh, Tunisie*

– la nebka isolée à flèche : l'amas sableux s'allonge en langue dans la direction du vent, avec une arête vive, séparant deux pentes d'équilibre, ne dépassant pas 35° (Coque, 1962), qui rejoint le niveau de référence en pente plus ou moins douce. Lorsque la densité des nebkas à flèche augmente, l'état de surface est désigné par le terme « banc de nebkas » (fig. 2.23) ;

FIGURE 2.23 – *Banc de nebkas de hauteur 30 cm env. Secteur de Bamba, nord-Mali*

– les nebkas jointives (à flèche ou non) : deux plants rapprochés voient leurs accumulations se rejoindre pour n'en former qu'une. Lorsque plus de deux plants sont concernés, on parle de système de nebkas (fig. 2.24).

FIGURE 2.24 – *Un système de nebkas. Largeur : 1 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali*

La troisième catégorie est très proche du système de nebkas mais s'en démarque en raison de ses évolutions possibles. Il s'agit d'une forme que les anglo-saxons appellent *coppice dune* et que, suite à des échanges avec le chef du village de Sagoberi (Mali), nous avons appelée *komo*[7] dans des travaux précédents. Le terme anglais est assez adapté puisqu'il peut se traduire littéralement par « dune de taillis ». Même si le terme de taillis est en principe réservé à la strate arbustive, il peut être retenu ici parce qu'il désigne des rejets partant de la même souche, ce qui peut s'appliquer à des buissons. Le komo est alors une accumulation de sable piégé au centre de buissons en taillis, disposés le plus souvent en cercle grossier (fig. 2.25).

La principale différence avec le système de nebkas est que le komo est un système d'interactions positives entre le(s) buisson(s) et l'accumulation de sable qui le conduit à grandir verticalement, avec des niveaux correspondant aux poussées végétatives se resserrant vers le sommet. Sa stabilité temporelle est

7. *Komo* signifie maison dans un dialecte du Niger et, de fait, la confusion est possible, de loin, entre ces formes et une habitation dans une région où elles sont souvent bâties en terre.

FIGURE 2.25 – *Komo, ou* coppice dune, *du secteur de Bamba, nord-Mali*

donc plus grande. Le caractère enveloppant du taillis différencie le komo du rebdou, plus fréquent en régions désertiques.

La dernière catégorie de forme éolienne d'obstacle est liée aux plantations régulières d'arbres fruitiers, comme les oliveraies du sud tunisien. Nous sommes donc en limite par rapport à notre définition des FEO, d'autant plus qu'il semble que c'est davantage la disposition des oliviers que leur présence en tant qu'individus qui provoque le dépôt. Ce lien, ainsi que les dimensions de ces formes, nous incitent néanmoins à les maintenir dans les FEO. Le type de formes que l'on trouve dans les oliveraies est assez variable : des dièdres barkhaniques à courbure à peine prononcée, des dunes à arête vive transversale et des dunes en tas amorphes (fig. 2.26).

Peu d'approches systématiques ont pris ces formes pour objet, notamment en raison de la difficulté à les caractériser depuis l'observation au sol. Ce travail vise en partie à pallier ces lacunes en s'appuyant sur des données de télédétection.

À la lecture de cette classification, on comprend que les frontières entre les catégories soient floues. Certains processus tendent cependant à accentuer les différences entre les formes. Ces processus peuvent être envisagés, dans une perspective dynamique, comme les moteurs de cycles de vie d'une forme, qui sont essentiels pour les relier aux changements qui affectent le milieu.

2.3.3.2 Le cycle des FEO

Il ne s'agit pas simplement de repérer une forme mais de situer l'état de cette forme dans un cycle d'évolution. Pour reprendre l'exemple de la nebka, pendant la phase de constitution, le sable piégé est très mobile et facilement pris en charge par le vent. À partir d'une certaine taille et quantité de sable piégée, il faut des vents plus forts pour mobiliser davantage que le seul sable superficiel. Enfin, si un épisode humide intervient, la forme peut être stabilisée

(a) dièdre barkhanique. Secteur de Sidi Makhlouf, Tunisie. Cliché : É. Delaître (2008)

(b) dunes à arête vive transversale. Photographie aérienne prise par le *Pixy* (2009), secteur de Dar Dhaoui, Tunisie. Les balises blanches font 50 cm de côté

(c) dune en tas. Secteur de Menzel Habib, Tunisie. Cliché : É. Delaître (2008)

FIGURE 2.26 – *Diversité des FEO dans les oliveraies du sud tunisien*

par induration des couches supérieures. Dans ce cas, elle devient sensible à l'ablation par corrasion (fig. 2.27).

Si l'épisode humide devient une phase et en l'absence de perturbations, cette

FIGURE 2.27 – *Nebka (sous* Hammada scoparia*) indurée et reprise par l'érosion éolienne, Menzel Habib, Tunisie*

induration peut être plus importante et figer durablement la forme, comme le prouve la présence de bioturbations par exemple (fig. 2.28).

FIGURE 2.28 – *Terriers creusés dans un komo en partie induré. Hauteur : 1 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali*

Dans le sens contraire, des formes sédimentées peuvent être réactivées du

point de vue de l'érosion éolienne après intervention d'une perturbation. Celle-ci a une forte probabilité d'être d'origine anthropique, par exemple un piétinement par des troupeaux, car si la sédimentation de la forme est importante, le vent seul n'aura pas la compétence nécessaire pour déstructurer la couche de surface indurée. Au Mali, ce cas se présente assez fréquemment pour des komos entièrement dévégétalisés (fig. 2.29).

FIGURE 2.29 – *Un komo dévégétalisé et induré. Secteur de Bamba, nord-Mali*

L'évolution d'une FEO est étroitement liée à celle de l'obstacle auquel elle se rattache. Si c'est peu pertinent dans le cas d'un placage lié au relief topographique, cela s'applique à tous les autres cas. Concernant le komo, nos observations ont montré que, la végétation disparaissant suite au pâturage et à la coupe de bois de chauffe, il ne reste que ces buttes massives sur lesquelles on identifie bien les différents niveaux liés à la croissance de la végétation. D'après les villageois du secteur, ces buttes sont en place depuis au moins 25 ans, ce qui prouve leur résistance à l'érosion éolienne. La concentration quasi-exclusive de ces buttes « nues » à proximité des villages renforce l'idée qu'elles soient liées aux usages par les populations.

Enfin, s'il n'y a pas eu induration, la disparition de l'obstacle entraîne en principe la disparition de la forme, parce que le piégeage du sable et la perte de compétence du vent ne sont plus actifs. On peut donc envisager une phase de genèse, une phase de croissance, une phase de maturation et une phase de déliquescence des FEO. Certaines formes ne connaîtront pas toutes ces phases, ou en connaîtront certaines en accéléré. La phase dans laquelle se trouve une forme est un indicateur au moins aussi important, si ce n'est plus important, que sa présence.

On peut alors établir une liste de paramètres descriptifs qui permettent de déterminer la forme observée par rapport à la classification des FEO et de la situer dans le cycle (tab. 2.3).

En illustration, on peut reprendre le cas de la figure 2.27 :

TABLEAU 2.3 – *Clés de détermination des formes éoliennes d'obstacle*

Composante	Type de clé	Valeurs possibles
Obstacle	Nature	végétal – minéral – topographique
	Temporalité	pérenne – annuelle – fugace
	Morphologie [c]	orthotropie [a] ou plagiotropie [b] symbiose ou dégénérescence avec l'accumulation racinaire : adventives ou souterraines
Accumulation	Aspect	simple : convexe, demi-sphérique, linguiforme complexe : concavité et creusement arête vive : présence/absence
	Orientation	transversale, longitudinale, indéfinie
	Cohésion	sans (= grande mobilité) forte (= arrêt de la mobilité) superposition : cohérent *supra*, mobile *infra* [d]
	Litage	présence/absence si présence : pente, épaisseur des lamines, etc.
	Bioturbation	densité, disposition, origine, état
	Rapport à l'obstacle	contiguïté ou non sous le vent ou interne vertical : infra (en-dessous) ou supra (recouvre)
	État de la surface	rides : présence/absence, état pellicule : dessication (friable), croûte (résistante)

a. croissance verticale
b. croissance horizontale
c. dans le cas d'un obstacle végétal
d. cas général. Le contraire s'observe aussi

– **obstacle** : végétal, pérenne, croissance par orthotropie en symbiose avec l'accumulation, racines souterraines ;
– **forme de l'accumulation** : linguiforme avec creusement latéral, sans arête vive, orientation longitudinale ;
– **état de l'accumulation** : cohésion forte sans recouvrement vif, litage grossier en pente douce sous le vent. Bioturbation racinaire et par insectes. Contiguë à l'obstacle ;
– **position de l'accumulation** : sous le vent de l'obstacle, en position *infra* ;
– **aspect de l'accumulation** : surface sans ride et présentant une croûte résistante.

Ces propositions constituent la base d'une approche systématique des FEO qui est indispensable pour établir les relations entre leurs évolutions et celles du milieu dont elles sont représentatives.

2.3.3.3 FEO et dynamiques du milieu

Constituant la partie visible du flux de sable déplacé [8], les FEO peuvent être utilisées pour évaluer l'importance des émissions de particules dans les zones-sources. Ouerchefani (2012) a ainsi élaboré une approche au sol permettant, à partir de l'analyse d'un transect, de faire des bilans sédimentaires à l'échelle intra-annuelle. Ses résultats, combinés au suivi des pratiques agricoles et des conditions du climat, sont prometteurs pour un suivi de l'ensablement. Les FEO sont aussi, en tant qu'objets d'interface, potentiellement des indicateurs qualitatifs de l'évolution du milieu.

Elles sont en général associées à une dégradation du milieu suivant la logique : aridification – dégradation (mécanique) des sols – renforcement de l'érosion éolienne (entrainant entre autre un appauvrissement chimique des sols) – ensablement (Tengberg, 1995, Roquet, 2008). Cette relation n'est cependant pas simple à établir et quand des tentatives sont faites dans ce sens elles ne donnent pas nécessairement le résultat attendu. Dougill et Thomas (2002) ont montré, par exemple, que l'on ne peut établir de lien direct entre présence de FEO et une dégradation des propriétés chimiques des sols. En réalité, il semble surtout que la complexité des interactions en jeu dans leurs processus de formation et le flou qui entoure leur définition ne permettent pas à l'heure actuelle de proposer des méthodes de diagnostic fondées sur leur suivi.

La principale difficulté consiste à distinguer les différentes dynamiques. Dans certains cas, l'accumulation de sable peut stocker des graines, freiner le ruissellement, piéger l'humidité et les précipitations et ainsi enclencher une série de rétro-actions positives bénéfiques pour les écosystèmes (Bendali *et al.*, 1990). Dans un secteur sans végétation mais qui voit passer beaucoup de sable, une période humide peut déclencher la germination de graines et donc mettre en place des FEO puisque le sable sera alors gêné dans sa progression. La végétation, en revanche, peut protéger les sols de l'érosion et donc, à terme, l'apparition de FEO peut aussi indiquer une évolution du milieu vers plus de stabilité, puisque, en région non désertique, la fourniture de sable est le plus souvent locale.

Ces différents exemples de la complexité à établir, en l'état actuel des connaissances, des relations robustes entre les FEO et les dynamiques du milieu mettent en lumière la nécessité d'élaborer des méthodes permettant :

1. De caractériser précisément et systématiquement les FEO rencontrées dans les paysages secs non désertiques.
2. De suivre leurs évolutions avec suffisamment de rigueur pour envisager de les corréler aux changements, naturels ou anthropiques, des conditions du milieu.

Pour atteindre ces deux objectifs, la télédétection s'impose comme l'outil le plus adéquat mais son usage doit tenir compte des différentes contraintes que nous avons exposées. Le chapitre suivant présentera en détail les propositions que nous faisons dans ce sens.

8. Comme dans les fleuves de sable, le flux invisible peut être très important

Conclusion : le paysage comme boîte à outils

Ce chapitre nous a permis de présenter les problématiques liées à la désertification, en insistant sur celles qui sont en rapport avec le suivi et l'évaluation des paysages des régions sèches non désertiques. Le retour d'expérience du programme ROSELT a permis de pointer un certain nombre de limites des observatoires des changements socio-environnementaux. Elles sont à l'origine des propositions de l'équipe PASSAGE pour l'utilisation du paysage dans le cadre de processus d'observation plus légers, plus souples, moins coûteux et dans lesquels le transfert de compétences et d'informations est plus facile à réaliser.

La proposition d'utilisation du paysage au service du diagnostic et du suivi implique de développer une méthodologie intégrée, fondée sur la notion de composants du paysage, qui doivent être formalisés en indicateurs pertinents pour répondre aux exigences du « paysage-outil » : description, compréhension, analyse, spatialisation et médiation (Laques, 2009). Ces exigences, examinées à la lumière de l'expérience du terrain, ont permis de cibler un manque dans la connaissance de l'un des composants importants des paysages des régions sèches non désertiques, les FEO.

Ces dernières, formes mal connues mais de dimensions réduites, donc réactives aux changements des conditions du milieu, sont proposées comme des indicateurs intéressants en complément des indicateurs habituels, comme la végétation. Elles stockent la plus grande partie du sable et leurs caractéristiques peuvent être reliées aux zones-source. Elles connaissent également des cycles, en particulier de sédimentation, qu'il est important de suivre pour comprendre les effets du changement climatique vis-à-vis du milieu.

Ces positions conceptuelles, associées aux problématiques concrètes propres aux zones difficiles, ont pour conséquence des impératifs méthodologiques. La télédétection et l'analyse d'images sont particulièrement indiquées parce qu'elles permettent de développer des travaux pertinents malgré l'éloignement et la difficulté d'accès aux terrains d'étude. Toutefois, le suivi des paysages de ces régions à court terme exclut *de facto* le recours à des images de résolution grossière. La mise à disposition récente, par diverses sources, d'images à très haute résolution spatiale permet de mieux répondre aux besoins liés à l'observation fine des changements affectant les zones difficiles.

Chapitre 3

Une échelle, un outil

Caractériser la morphodynamique éolienne en région non désertique à une échelle fine

Sommaire

3.1 Approche stationnelle 105
3.1.1 Les sites de travail 105
3.1.2 Transects de photographies d'échantillons d'états de surface 111
3.1.3 Les vents et le climat 115
3.2 Données de télédétection 120
3.2.1 Le *Pixy* 120
3.2.2 L'imagerie spatiale 124
3.2.3 L'information sur le relief 133
3.3 Traitements de données multiscalaires 137
3.3.1 La Morphologie Mathématique 137
3.3.2 Rugosité et topographie à partir d'images en plan 144
3.3.3 Approches synthétiques des résultats 148
Conclusion 151

Introduction

Les chapitres précédents ont permis de fonder les deux points de vue suivants :

1. L'étude de la morphodynamique éolienne, en région désertique ou non désertique, requiert une approche qui fait varier les échelles, depuis celle des composants des EDS jusqu'à celle du paysage, défini comme une unité homogène du point de vue thématique adopté.
2. Les méthodes et les outils classiquement utilisés ne permettent pas de répondre à cette exigence de façon satisfaisante, en particulier dans la perspective d'un suivi régulier de la morphodynamique éolienne.

Au regard des contraintes établies, notre choix se porte sur l'étude d'images Très Haute Résolution. Ce choix, technique, oriente les choix méthodologiques, tout autant que le font nos objectifs thématiques. Nos travaux s'articulent essentiellement autour de l'analyse d'images, qui permet de travailler avec des échantillons beaucoup plus grands que l'approche-terrain. Cela ne signifie pas pour autant qu'il faut négliger cette dernière. Si nous nous appuyons beaucoup sur les acquis d'autres équipes ou chercheurs, nous avons aussi conduit des prospections sur le terrain appuyées sur un choix de sites de travail. Nous avons cherché à mettre au point des méthodes reproductibles et semi-automatisées de suivi des EDS à l'échelle de la station. Les résultats de la prospection–terrain servent aussi à calibrer les approches par télédétection spatiale ou aérienne.

Ces dernières, qui permettent des généralisations à différentes échelles, doivent répondre aux exigences thématiques : finesse de l'analyse, FEO et souplesse d'utilisation. Pour cela aussi, des méthodes adaptées ont été développées. La très grande quantité d'informations que ces approches permettent de récupérer nous a, enfin, conduit à élaborer des méthodes d'analyse et de présentation synthétique des résultats, préservant la très haute résolution thématique et réduisant les problèmes liés au transfert d'échelles.

Ce troisième chapitre commence par la présentation des sites sur lesquels nous avons effectués nos relevés. De façon générale, la toponymie et son orthographe sont celles de la carte topographique de la Tunisie à l'échelle 1 : 200 000 de 1971. On utilisera le pluriel français dans le cas de termes d'usage courant en géomorphologie, comme *oued*, et on préfèrera le pluriel arabe dans le cas de terme moins usités, comme *jesser* (pl. *jessour*).

3.1 Approche stationnelle

3.1.1 Les sites de travail

Cette étude vise à comparer, du point de vue des FEO, des sites de la Tunisie pré-saharienne, choisis suivant plusieurs gradients liés au climat, à la continentalité et à l'usage des ressources (fig. 3.1). En second lieu, le critère de choix a

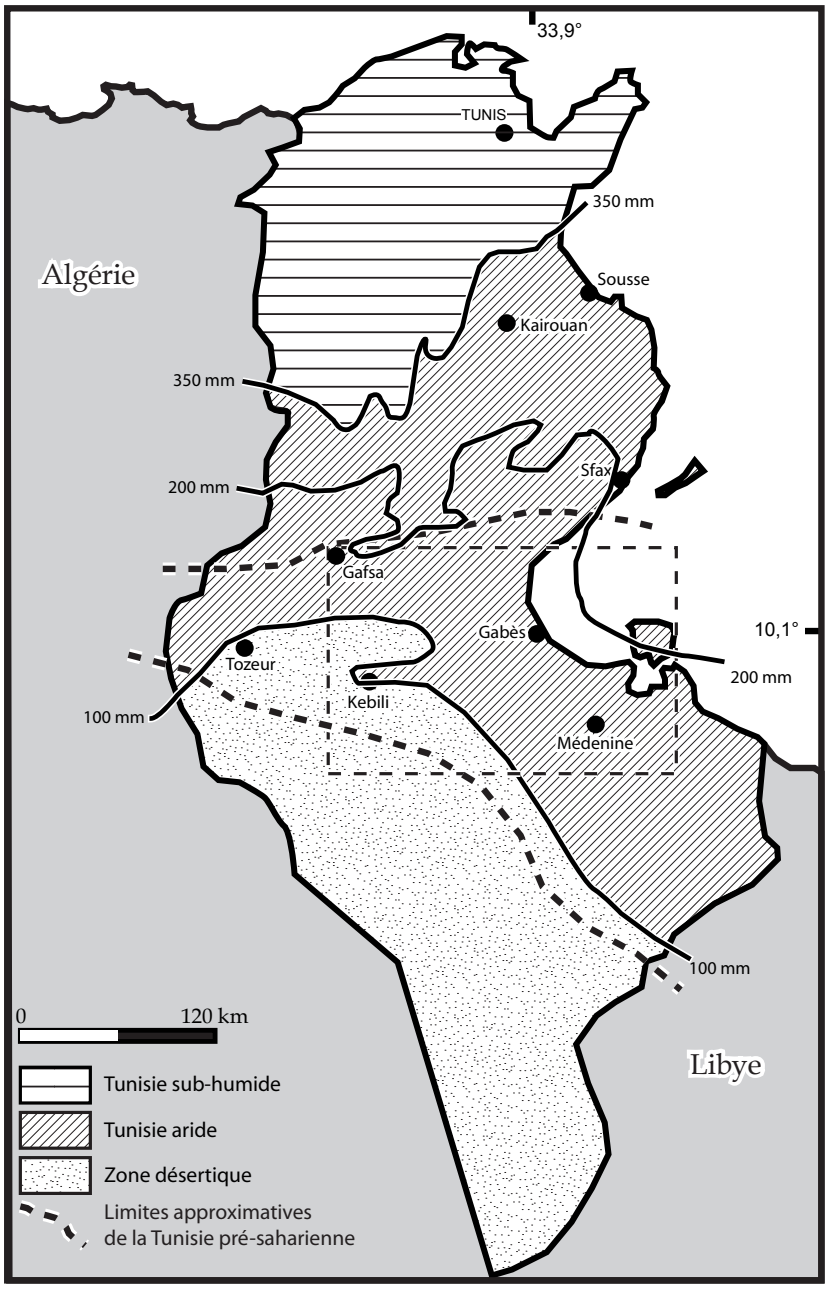


Figure 3.1 – *La Tunisie pré-saharienne, d'après la carte de Le Houérou,* in *Floret et Pontanier (1982)*

été la présence de FEO en nombre et en diversité suffisante pour permettre une

approche systématique comparative. Cinq sites ont ainsi été retenus (fig. 3.2), en fonction soit des connaissances disponibles, soit de leur potentiel pour la problématique, évalué à partir de *Google Earth*©. Les travaux que nous présentons ont été essentiellement développés à Rass Elkamen Labiadh, Dar Dhaoui et Oglet Merteba, les deux autres sites fournissant surtout des éléments de comparaison.

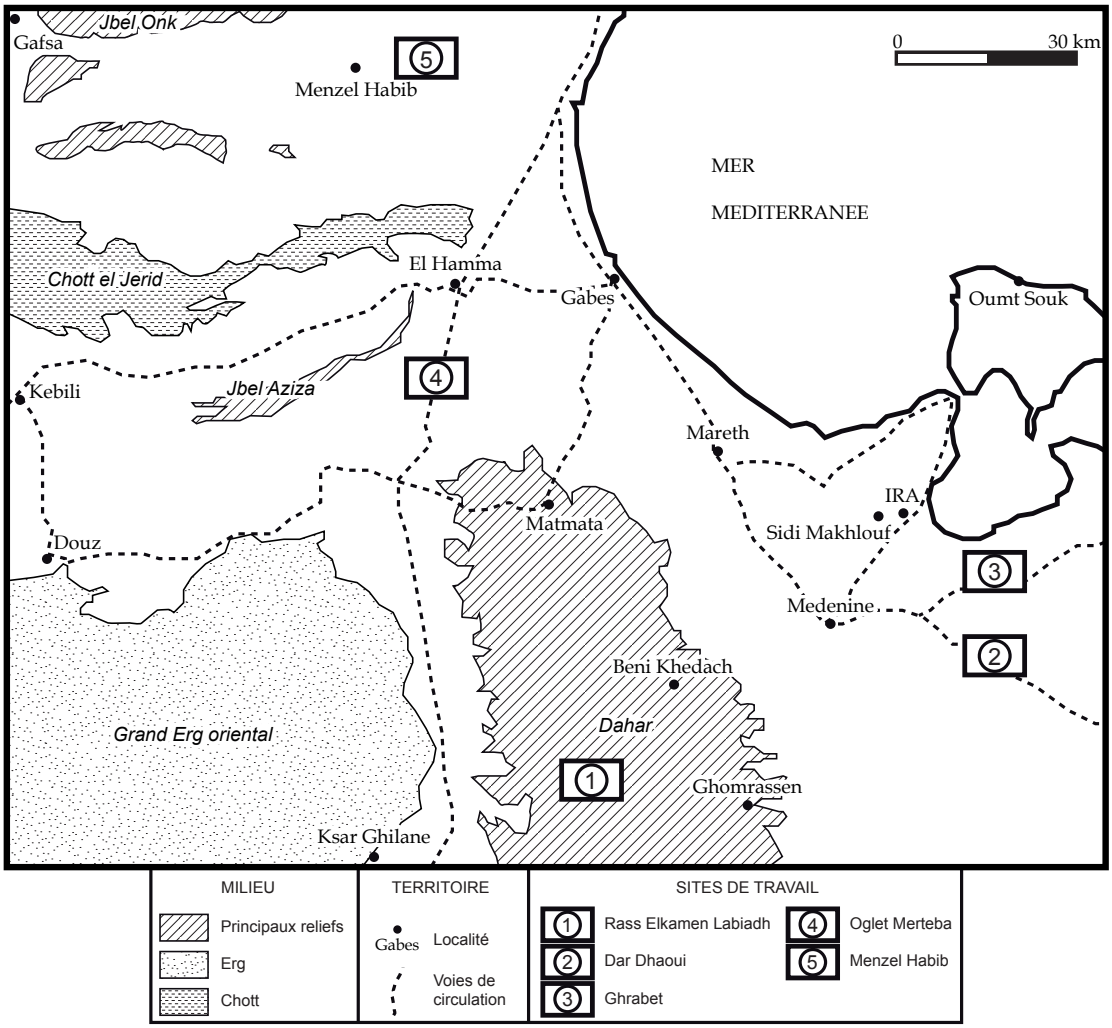


FIGURE 3.2 – *Les sites de travail. Extrait correspondant au cadre de la fig. 3.1*

3.1.1.1 Rass Elkamen Labiadh

Coordonnées lat/long WGS84 en Degrés Décimaux (DD) :
33.117024° N ; 10.052908° E

Ce site est localisé dans la partie occidentale du Dahar, qui est un plateau essentiellement calcaire incliné en pente douce ENE–OSO. Il s'agit d'un secteur où les oueds de différentes dimensions sont nombreux et convergent en direction du Grand Erg oriental. Le site en lui-même est traversé par l'oued Bel

Khachab, à propos duquel Coque (1962) évoque des crues importantes qui atteignent la garet Bou Flidja au contact de l'Erg. Les précipitations, de l'ordre de 100 mm en moyenne, sont faibles. Presque chaque thalweg fait l'objet d'un aménagement en système de tabias–jessour (Bonvallot, 1986) dont la figure 3.3(a) donne un exemple [1]. La combinaison de ces deux facteurs font que les oueds ne connaissent des écoulements que très exceptionnellement.

Dans le secteur, les versants sont très érodés, nus la plupart du temps, et la végétation se concentre dans les oueds, en particulier les gros buissons de *retama rætam* qui piègent de grosses quantités de sable. Il s'agit d'un secteur de parcours extensifs, avec de la culture d'opportunité (fig. 3.3(b)) dans des parcelles en position basse bénéficiant d'un petit bassin d'alimentation. Des forages jalonnent régulièrement les pistes de l'axe Medenine (Jerba) – Ksar Ghilane qui sont très fréquentées en période touristique.

La morphodynamique éolienne du secteur est très diversifiée. On trouve ainsi un petit erg, un col où des barkhanes peuvent se former, des nebkas de tous les types et de toutes les tailles, des cordons transversaux à arêtes vives liés au relief, etc. Cette richesse, associée à la relative faiblesse de la pression anthropique, nous conduit à considérer ce site comme un étalon des FEO en conditions presque exclusivement naturelles.

3.1.1.2 Dar Dhaoui

Coordonnées lat/long WGS84 en DD : 33.287618° N ; 10.785259° E

Ce site est localisé dans la plaine côtière de la Jeffara, au relief marqué seulement par de faibles ondulations, générées par une succession de glacis emboîtés, et par les oueds qui coulent vers la Méditerranée ou vers la sebkha El Mela. La pente générale de la zone est faible et orientée OSO–ENE. Les sols, de texture majoritairement sableuse et fine (Kardous, 2005), sont peu profonds et reposent sur une croûte calcaire villafranchienne (Khatelli, 1996). Malgré leur sensibilité à l'érosion éolienne, ils sont néanmoins considérés comme cultivables en sec dans la carte des sols de la Tunisie établie par Escadafal et Mtimet (1981).

Au plan climatique, le site est classé à l'étage bioclimatique aride inférieur à hivers doux d'après le coefficient d'Emberger. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de 150 mm. L'activité principale dans le secteur est l'oléiculture, mais il est aussi parsemé de zones encore en steppe mais menacées par l'extension de l'olivier comme nous l'avons évoqué au chapitre 2. Dans ce secteur, on trouve des parcelles très ensablées (fig. 3.4(a)) comme des parcelles où le départ de matériel domine (fig. 3.4(b)).

Ce site présente l'intérêt d'avoir été suivi par des membres de l'IRA et leurs partenaires, comme le Laboratoire Inter-universitaire des Système Atmosphériques (LISA). Une parcelle expérimentale de mise en défends est en place depuis plusieurs années et une station météorologique fournit des données locales. Notre étude peut donc s'appuyer sur les résultats de travaux anciens déjà cités comme de travaux plus récents (Kardous, 2005, Labiadh, 2011).

1. Voir annexe D pour une présentation du détail du système.

(a) *Exploitation des thalwegs en jessour dans les hauteurs du site, Extrait* Google Earth *d'une image GeoEye de juin 2010*

(b) *Parcelle de culture d'opportunité au sud du site*

FIGURE 3.3 – *Usages des ressources dans le secteur de Rass Elkamen Labiadh*

3.1.1.3 Ghrabet

Coordonnées lat/long WGS84 en DD : 33.434318° N ; 10.806884° E

Ce site est très semblable à celui de Dar Dhaoui, dont il est spatialement proche. Il s'en différencie par sa position plus sommitale et par la prédominance des formes de déflation. Nous l'incluons dans cette présentation parce que la méthode des transects d'échantillons photographiques d'EDS y a été mise au point et testée.

(a) *Cordons à arête vive transversale*

(b) *Déflation triant les éléments grossiers de la surface*

FIGURE 3.4 – *La mophodynamique éolienne dans le secteur de Dar Dhaoui*

3.1.1.4 Oglet Merteba

Coordonnées lat/long WGS84 en DD : 33.744108° N ; 9.768922° E

Le secteur d'Oglet Merteba est lui aussi bien documenté depuis longtemps. Il est localisé, au sein d'un ensemble de plaines et de plateaux essentiellement calcaires, dans une cuvette (alt. ≈ 100 m.) vers laquelle convergent les oueds de la région. Les sols y sont de texture sableuse à sablo-limoneuse fine à très fine peu structurée et offrant une grande sensibilité à l'érosion éolienne. La

pluviométrie moyenne est de l'ordre de 150 mm et les caractères généraux du secteur le classent en climat désertique atténué (aride), à sécheresse de 4 à 6 mois (Mabbutt et Floret, 1983).

La végétation naturelle est de type steppique à ligneux bas, principalement *Rhanterium suaveolens*, et, dans le cas de secteurs ensablés, de graminées de type *Aristida pungens*, peu appétantes. L'activité principale est le pastoralisme extensif et, de façon marginale, la culture d'opportunité. Suite à des diagnostics de désertification, la zone a fait l'objet d'un grand programme d'aménagement pastoral du début des années 1970 au milieu des années 1980 financé par la Tunisie et par la communauté internationale. L'aménagement portait sur 20 000 ha de parcours et visait à introduire de la mixité par la mise en place de périmètres irrigués. Le projet a été abandonné, sur un constat d'échec, en 1986 (fig. 3.5) [2]. D'après Abaad *et al.* (1995), cet échec est lié à la méconnaissance des pratiques réelles de pastoralisme et à la contradiction entre les objectifs du projet et l'évolution des aspirations des populations et de l'environnement social en général.

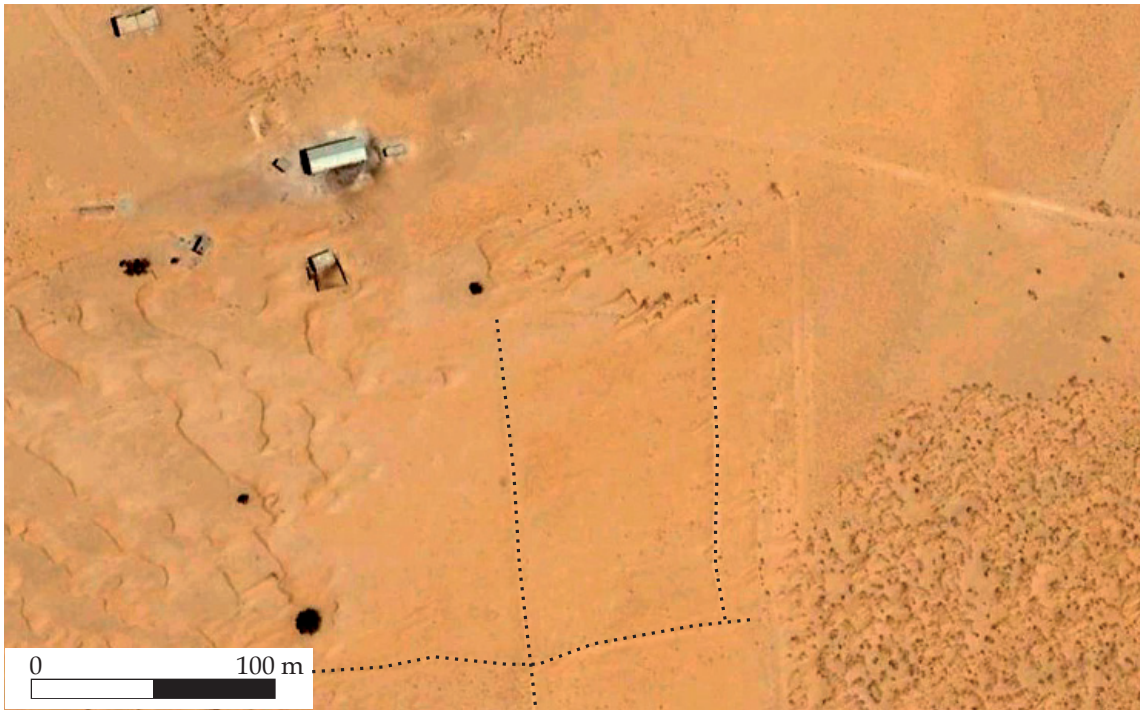


FIGURE 3.5 – *Bâtiments et parcelles (délimitées en pointillés) de l'ancien périmètre irrigué de Oglet Merteba, aujourd'hui très ensablé. Extrait* Google Earth *d'une image* QuickBird *de juin 2003*

Concernant la morphodynamique éolienne, notre étude bénéficie, en particulier, des résultats du très important travail de Ouerchefani (2012), qui a réalisé des bilans sédimentaires, le long d'un transect, une fois par saison pendant deux années consécutives.

2. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 33.744774 N / 9.769687 E

3.1.1.5 Menzel Habib

Coordonnées lat/long WGS84 en DD : 34.230777° N ; 9.670382° E

Menzel Habib est un observatoire qui fait l'objet d'un suivi continu depuis les années 1970, dans le cadre de différents programmes dont, pour les plus récents : *Dynamiques des Populations et Évolution des milieux Naturels (DyPEN)* entre 1989 et 1996, suivi de *Changement dans les écosystèmes méditerranéens arides à long terme et observation de la terre (CAMELEO)* entre 1997 et 2001, et *ROSELT* pour le dernier. De nombreuses études sont donc disponibles pour caractériser de façon générale le secteur. Ce dernier a connu une sécheresse prononcée, dans les années 1980, qui est en partie responsable de l'enclenchement de processus de désertification (Ghram-Messedi et Delaître, 2007).

Le climat se classe dans l'étage méditerranéen aride inférieur à hiver doux (Le Floc'h *et al.*, 1995) et se caratérise, du point de vue des précipitations, par une importante variabilité inter et intra-annuelle. Si la pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 170 mm, le rapport de variabilité annuelle est proche de 15 mais peut atteindre 50 à l'échelle mensuelle (Ouled Belgacem *et al.*, 2006). Le régime se caractérise aussi par une très forte concentration temporelle : 70 % des précipitations annuelles peuvent ainsi tomber en 24 h.

Le secteur est recouvert de sols sableux épais ayant une forte capacité de rétention d'eau mais très sensibles à l'érosion éolienne dès lors que la protection offerte par la végétation diminue ou disparaît (Auclair *et al.*, 1996). Le secteur connaît une mutation forte des usages des ressources, passant d'un pastoralisme extensif à une agriculture pluviale intensive, avec arboriculture et périmètres irrigués (Sghaier *et al.*, 2007).

Des références pourront être faites à d'autres sites, soit du Mali soit de la Tunisie, en particulier le site de Sidi Makhlouf, à proximité de l'IRA, où des tests méthodologiques ont été effectués lors de l'année de Master 2. Les sites de Rass Elkamen Labiadh, Dar Dhaoui et Ghrabet ont fait l'objet d'une description plus précise, de type stationnel, à l'aide de la fiche de terrain présentée en annexe E. 30 stations ont ainsi été décrites et plus de 600 photographies représentant ces stations, du point de vue d'un observateur au sol, sont disponibles.

3.1.2 Transects de photographies d'échantillons d'états de surface

3.1.2.1 Pourquoi explorer cette voie ?

Le suivi des états de surface en régions sèches non désertiques se fait par estimation des surfaces relatives occupées par chacun des composants. En général, cette estimation est visuelle, appuyée sur des échelles d'appréciation qui varient suivant les auteurs et suivant les disciplines.

C'est en particulier ainsi qu'est estimé le recouvrement de la végétation, indicateur important de l'état du milieu en régions sèches non désertiques (Aronson *et al.*, 1993). Le problème posé par une telle estimation est qu'elle est biaisée, d'une part par son caractère subjectif, d'autre part en raison des contraintes de

la vision oblique qu'un observateur a de la surface et qui conduisent en général à surestimer le recouvrement. Pour dépasser ces contraintes, des méthodes d'estimation plus objectives ont été mises au point, en particulier la méthode des points quadrats.

Cette dernière, décrite initialement par Levy et Madden (1933), consiste à compter la fréquence de points de contact entre une aiguille descendue à intervalle régulier le long d'un transect, par exemple tous les 10 cm, et l'élément de la surface du sol dont on cherche à évaluer le recouvrement. En réalité, cette fréquence est assimilée à un recouvrement, et la méthode est ainsi critiquable comme toutes les méthodes qui conduisent à une extrapolation. La parade consiste à multiplier les mesures, mais alors, même si Jauffret (2001) a montré que 5 lignes suffisaient pour décrire une station de façon satisfaisante, le travail devient très chronophage. Se pose donc la question, que Ouerchefani (2012) illustre, de sa répétitivité spatiale qui conditionne fortement sa représentativité.

Pour répondre au besoin de méthodes souples d'observation, il faut donc trouver un juste milieu entre l'estimation visuelle et les points quadrats, difficiles à répéter temporellement - problème de l'actualisation - et spatialement - problème de représentativité, de reproductibilité et de souplesse. Par les perspectives d'automatisation qu'elle offre, l'analyse d'images apparaît ainsi particulièrement indiquée. Dans d'autres discipline, elle est déjà utilisée avec succès.

3.1.2.2 État de l'art

Escadafal (1989) fait figure de pionnier (fig. 3.6). Ses propositions sont restées sous forme d'ébauche en raison des difficultés, à l'époque, à traiter de façon quantitative et automatisée les photographies d'EDS obtenues. Cet auteur a donc développé une méthode de description à partir de prélèvements qui fait référence. Dans cette optique, la photographie n'est qu'un éventuel complément.

Plus récemment, toujours dans le contexte des régions sèches, Kardous (2005) a développé une approche permettant de suivre l'évolution d'un échantillon d'EDS à partir de photographies verticales. L'objectif visé consistait à modéliser le comportement du flux d'érosion en fonction de la nature de la surface du sol. Aussi la méthode a-t-elle été élaborée et utilisée dans un contexte de laboratoire : surface nue couverte par des grains sélectionnés et colorés, seulement deux classes de grains et soufflerie pour simuler le comportement de la surface vis-à-vis d'une dynamique de type vannage.

C'est dans le contexte de l'hydromorphologie fluviale que les développements les plus importants ont été réalisés. Les chercheurs ont besoin de caractériser la granulométrie des fonds de lits ou des bancs de galets pour modéliser et étudier les écoulements. Il leur est alors nécessaire de développer des méthodes non intrusives qui préservent la répartition du sédiment. L'analyse d'image est donc utilisée, avec de bons résultats puisque Buscombe *et al.* (2010) avancent une erreur moyenne, après correction, de l'ordre de 11 % ; l'erreur descend même à 5 % pour certains types de sédiments : graviers de rivières et sable de plage.

Les résulats des travaux effectués pour établir et améliorer la méthode nous

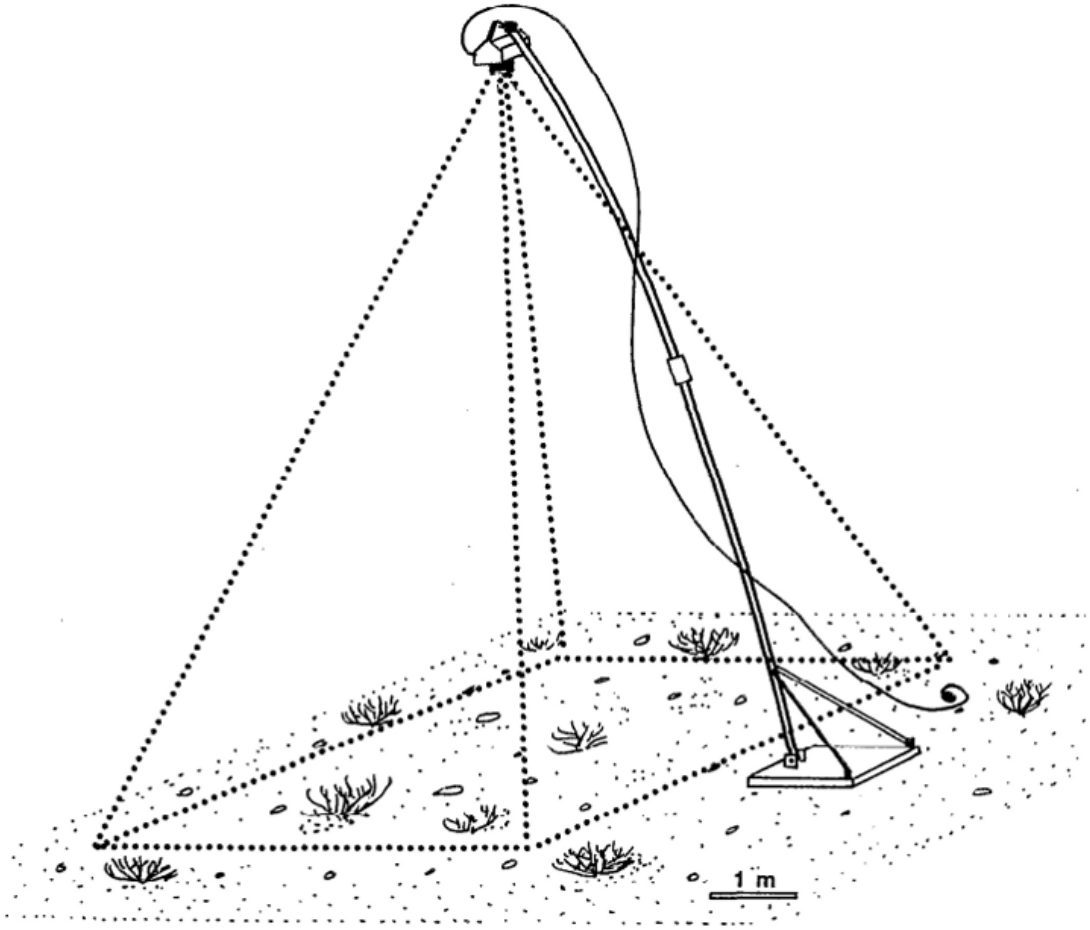


FIGURE 3.6 – *Dispositif mis au point par Escadafal pour obtenir des images nadirales d'EDS. D'après Escadafal (1989)*

fournissent de précieuses informations, même si le contexte et les objectifs poursuivis ne sont pas strictement identiques. Ainsi Graham *et al.* (2010) ont-ils montré que, pour être réprésentative, la surface de la photographie analysée doit être 200 à 400 fois plus grande que la surface du plus gros élément de l'EDS. L'utilisation des outils morphologiques d'analyse d'images (Graham *et al.*, 2005) est aussi un point commun avec notre approche. Dans le même article, ces auteurs montrent qu'il est relativement simple de définir une méthode pour des images d'un même site, mais plus compliqué de mettre au point une méthode identique pour des sites différents.

L'ensemble des points soulevés dans ces études nous conforte dans l'intérêt de l'utilisation d'une telle technique pour évaluer et suivre les EDS en régions sèches.

3.1.2.3 Méthode d'acquisition et développements potentiels

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas pris le temps de développer un outil de prise de vue verticale. Le protocole d'acquisition est plutôt artisanal et consiste à tenir l'Appareil Photographique Numérique (APN) à bout de bras au-

dessus de la surface à capturer qui contient un élément, de dimensions connues, donnant l'échelle (fig. 3.7). L'angle de visée n'est donc pas strictement vertical, mais la petite taille de l'emprise au sol limite les déformations qui pourraient en découler.

FIGURE 3.7 – *Acquisition des photographies d'échantillon d'EDS*

Cela permet d'obtenir facilement et rapidement des images dont la résolution varie dans des proportions raisonnables, comme l'illustre la figure présentée en annexe F. L'intervalle de confiance à 95 % de la résolution moyenne, pour l'ensemble des images ainsi capturées, est [0,426–0,450] (en mm), ce qui signifie que la dispersion des valeurs est relativement faible et que retenir la moyenne, soit, dans le cas de ces deux échantillons, 0,440 mm par pixel comme référence est pertinent. Pour une taille de 3 000 col. × 2 000 l. (fig. 3.8), cela signifie que les photographies couvrent en moyenne une surface de l'ordre de 1 m², ce qui est l'emprise couramment retenue par les écologues lorsqu'ils développent des approches par placettes dans les régions sèches.

La méthode a été appliquée à tous les sites étudiés, pour avoir au moins un échantillon par station décrite et, sur certaines stations, des transects ont été réalisés dans des contextes variés : oliviers, lits d'oued, etc. À partir de ces données, on peut envisager de décrire quantitativement :

- le recouvrement de la végétation, avec une erreur inférieure à 10 %, comme nous l'avons montré dans des travaux précédents ;
- le pourcentage de la surface couverte par un voile éolien ;
- le pourcentage de la surface couverte par des rides éoliennes ;
- la granulométrie des éléments grossiers de la surface, qui permet d'évaluer l'intensité du tri éolien.

Les séquences d'analyse des images, utilisant en particulier la Morphologie

FIGURE 3.8 – *Exemple d'échantillon photographique d'EDS*

Mathématique, sont présentées dans la section consacrée à cette discipline (sec. 3.3.1.2). Le principal avantage de cette méthode est la possibilité de développer des macros qui permettent de travailler sur de grandes quantités d'images de façon automatique.

3.1.3 Les vents et le climat

Pour élaborer une analyse de la morphodynamique éolienne, il est essentiel de disposer de séries de données météorologiques tout à la fois les plus fiables, les plus longues et les plus complètes possibles. La connaissance des vents est essentielle, mais celle de la pluviométrie et des températures l'est autant dans la mesure où elles affectent les paramètres de contrôle de la morphodynamique éolienne, comme la végétation et la sensibilité des sols à l'érosion. Nous avons eu accès à deux types de données météorologiques : des données générales et des données locales.

3.1.3.1 Les données générales

Compte tenu de l'isolement de certains sites, notamment ceux situés dans le Dahar, nous ne pouvons en général nous appuyer sur des enregistrements locaux. En revanche, des séries de données sont disponibles depuis le site du Centre national des données climatiques (NCDC) [3], dépendant du ministère du

3. Adresse du site internet : `http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html`

commerce américain. On y trouve en téléchargement depuis un serveur FTP les données provenant de l'ensemble des stations météorologiques de la planète labellisées par l'Organisation mondiale de la météorologie (WMO). Concernant le sud de la Tunisie, des données sont disponibles pour les villes de : Gabès (depuis 1973), Tozeur (depuis 1973), Médenine (depuis 1977), Kébili (depuis 1988) et Tataouine (depuis 1989).

Il s'agit de moyennes journalières, avec toutefois des instantanées pour les maxima et les minima. Elles sont parfois incomplètes, un certain nombre de jours n'ayant aucun enregistrement. L'absence d'explication de ces défaillances nuit à la qualité de cette donnée. Néanmoins, la longueur des séries disponibles (20 ans au moins) peut permettre de pallier ce problème. Ces séries proposent des enregistrements des températures moyennes, maximales et minimales, de la température du point de rosée, de la vitesse moyenne et maximale du vent, des précipitations quotidiennes. Ces données sont suffisantes pour établir un tableau climatique. En revanche, le fait qu'il s'agisse de moyennes journalières et l'absence de directions excluent *de facto* une utilisation pour des calculs de DPS.

Pour l'étude des vents, les données des stations de Gafsa, Gabes, Kebili et Medenine, fournies par le CEPMT, sont utilisées. Elles ont fait l'objet d'un nettoyage identique à celui présenté au chapitre 1, section 1.3.2.2. Le tableau 3.1 présente un résumé de ces données. Trois point sont à mettre en avant : la bonne répartition géographique des enregistrements (cf. *supra*, fig. 3.2), la longueur des séries temporelles qui en assure la représentativité et la qualité globale des fréquences d'enregistrements, jamais inférieure à 84 %.

Tableau 3.1 – *Principaux caractères des données de vents disponibles en Tunisie pré-saharienne*

Station	**Période**	**Heures des relevés**	**Nb valeurs**	**Qualité (%)**
Gafsa	1985–2005	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	58 457	95
Gabes	1979–2005	0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	72 996	95
Kebili	1994–2005	6, 9, 12, 15, 18	18 009	84
Medenine	1982–2008	6, 9, 12, 15, 18	44 834	90

On peut ainsi envisager d'étudier les DPS de la Tunisie pré-saharienne. Cela constituera une base fiable sur laquelle des études ultérieures pourront s'appuyer. Ces données fournissent aussi un tableau de la dynamique éolienne qui pourra être utilisé pour distinguer des types de formes observés sur les images. Il faudra toutefois optimiser l'utilisation de ces résultats en essayant de

les rendre locaux par la prise en considération de la topographie, en particulier, des sites d'étude qui ne sont pas toujours proches des stations d'enregistrement.

Pour des études de détail, nous avons eu accès à un jeu de données locales.

3.1.3.2 Les données locales

Pour le site de Dar Dhaoui, cette étude a pu utiliser les enregistrements de la station météorologique gérée par le laboratoire d'Érémologie de l'IRA. Ces données couvrent une période courte (janvier 2008–décembre 2009) mais elles sont enregistrées à un pas de temps horaire. Nous disposons donc de 16 850 valeurs, ce qui permet d'obtenir des résultats représentatifs aux échelles, spatiale et temporelle, considérées. Les tableaux recensent les précipitation (mm), les températures moyennes, minimales et maximales, les vitesses et directions de vent moyennes, pour chaque heure écoulée.

On peut donc craindre que les données, en particulier de vents, soient lissées par rapport à des données instantanées qui sont en principe utilisées pour ce genre d'analyse. Or, un tel lissage ne pourrait qu'être préjudiciable à la qualité de l'analyse dans la mesure où, selon la formule de Fryberger, présentée au premier chapitre, le déplacement potentiel du sable est une fonction cubique de la vitesse du vent. Ainsi, si les valeurs maximales sont trop lissées, l'essentiel du déplacement potentiel est masqué. Le fait que les directions soient, elles aussi, « moyennées » est un point négatif de plus.

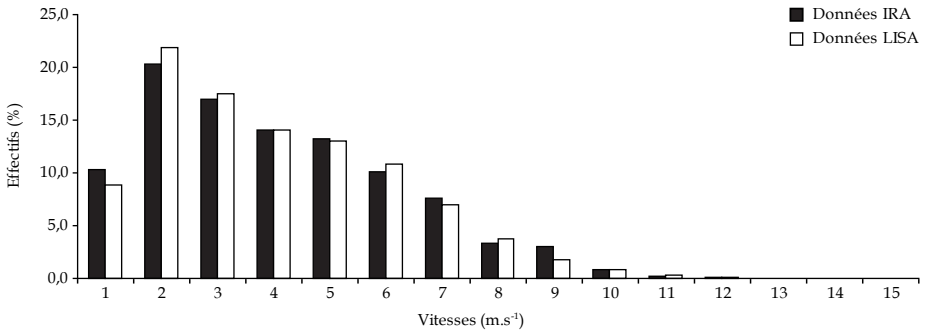
Grâce à l'aimable coopération du LISA, qui a réalisé une campagne de mesures de vents dans le cadre de la thèse de Labiadh (2011), nous avons eu accès à des enregistrements instantanés. Ils sont relevés toutes les deux minutes, entre le 7 mars et le 30 mai 2008, à plusieurs hauteurs dont l'une est identique à celle de la station de l'IRA.

La compatibilité méthodologique, la proximité spatiale des instruments et la concordance temporelle des relevés nous conduisent à envisager de comparer les deux jeux de données pour estimer dans quelle mesure les moyennes relevées par la station de l'IRA nuisent aux résultats. La fiabilité de cette comparaison est cependant limitée par des étalonnages, et donc des sensibilités de mesure, différents entre les deux stations. En raison de trous dans les séries du LISA, la comparaison ne concerne que les données relevées entre le 16 mars et le 30 mai 2008. Elle porte ainsi sur 1 800 valeurs pour la station de l'IRA et 54 000 pour les enregistrements du LISA.

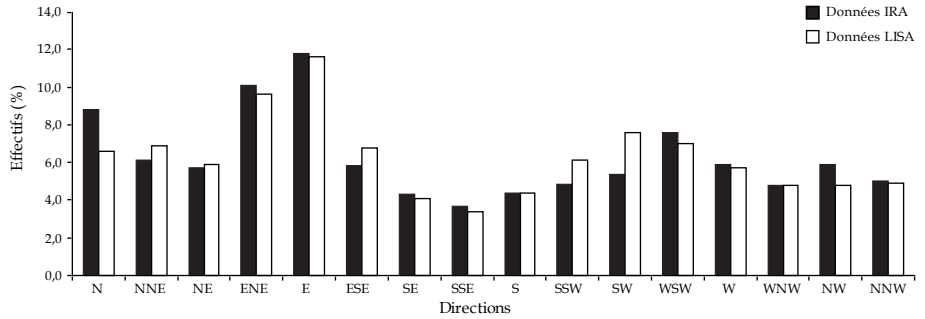
3.1.3.3 Estimation de la qualité des données de vent de la station de Dar Dhaoui

Dans un premier temps, nous avons comparé les distributions des valeurs des deux sources, pour chaque intervalle de vitesses et pour chacune des seize directions de la rose des vents (fig. 3.9).

L'analyse de ces graphiques montre que les valeurs des deux jeux de données suivent une distribution similaire. Il n'y a donc pas de contradictions flagrantes entre les données instantanées et les moyennes horaires. Les vitesses suivent une distribution unimodale avec un maximum de fréquence pour la



(a) *Fréquences des vitesses*



(b) *Fréquences des directions*

FIGURE 3.9 – *Comparaison des données de l'IRA et des données du LISA pour le site de Dar Dhaoui*

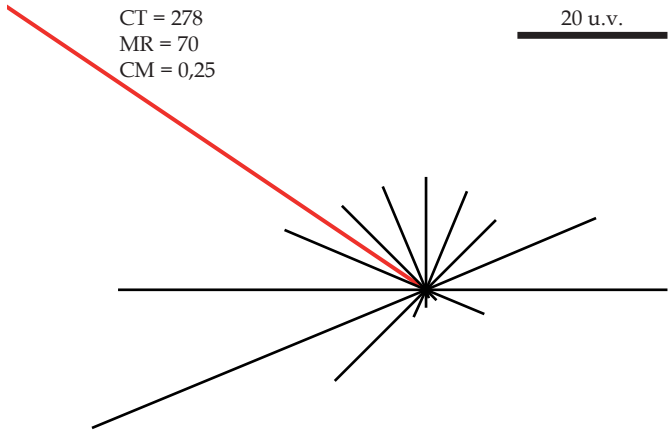
valeur 2 $m.s^{-1}$ dans les deux cas. Les directions suivent une distribution davantage bimodale, avec un maximum de fréquence pour les vents de secteur est dans les deux cas, et un second pic pour les vents de secteur sud-ouest.

Le lissage est toutefois visible dans les extrêmes, puisque la vitesse maximale enregistrée par la station de l'IRA est de $11,1$ $m.s^{-1}$ contre $14,21$ $m.s^{-1}$ pour les données du LISA. Les valeurs supérieures à 11 $m.s^{-1}$ représentent ainsi près de 0,5 % de l'échantillon LISA quand elles ne représentent que 0,2 % de l'échantillon IRA.

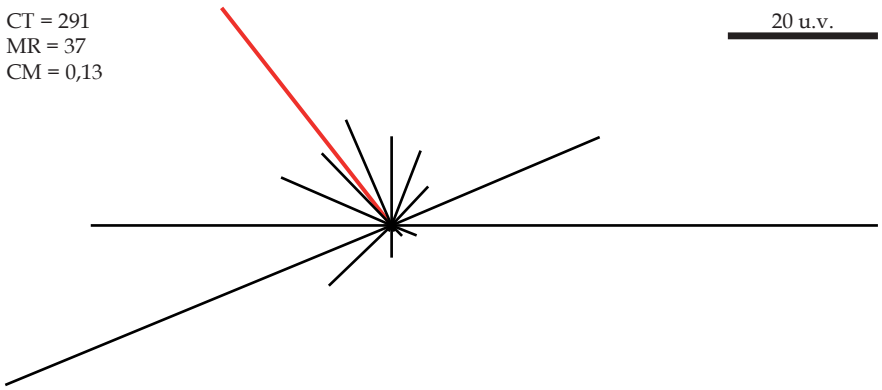
Concernant les directions, on constate que les données de la station de l'IRA sous-estiment les vents de secteur sud-ouest, le deuxième pic apparaissant pour les vents de secteur ouest-sud-ouest. Les vents de secteur nord-ouest à nord sont, en revanche, sur-représentés. Ces écarts peuvent toutefois être attribués, en partie du moins, aux différences d'étalonnage entre les appareils de mesure.

La seconde approche de validation consiste à appliquer la méthode des RDPS à chacun des jeux de données et à en comparer le résultat (fig. 3.10). Cela nous permet d'en estimer la conformité et d'envisager des hypothèses d'explication des différences. La vitesse-seuil retenue pour les calculs est de 4 $m.s^{-1}$, en accord avec les résultats de Kardous (2005), qui a travaillé sur le même site.

Les deux roses se classent dans la catégorie complexe (Fryberger, 1979), où aucune orientation définie ne se dégage. La capacité de transport totale est sensiblement identique. La principale différence porte sur la migration résultante, qui est le double, en module, dans le cas des données du LISA. On remarque



(a) Données du LISA



(b) Données de l'IRA

FIGURE 3.10 – *Comparaison des roses de déplacements potentiels calculées à partir des données de vent relevées entre le 16 mars et le 30 mai 2008 à Dar Dhaoui. En rouge, la résultante des déplacements potentiels*

également une légère différence dans la direction de chaque résultante : 304° pour les données LISA et 322° pour les données IRA.

La proportion de vents nuls est du même ordre de grandeur : 2,09 % contre 2,18 %. Si on pouvait craindre que les moyennes de l'IRA ne minorent les résultats, ce qui semble confirmé par la comparaison des migrations résultantes, on pouvait, à l'inverse, craindre que ces mêmes moyennes, en effaçant des vents nuls, n'aient au contraire un effet amplificateur. Il semble que ce biais soit évité.

De façon générale, on peut souligner que, hormis la différence de migration résultante, les écarts entre les deux résultats sont faibles et peuvent être raisonnablement attribués à la différence d'appareillage et de disposition, en particulier par rapport aux alignements des oliviers qui peuvent créer des couloirs de vent.

Ces éléments tendent à montrer que l'on peut utiliser les données de l'IRA, avec certaines précautions, pour caractériser, à une échelle fine, la dynamique éolienne du secteur de Dar Dhaoui.

L'ensemble des données acquises à l'échelle stationnelle est intégré aux ap-

proches développées à partir des images de télédétection. Dans un souci de réduire les incertitudes liées aux transferts d'échelle, nous avons choisi d'utiliser deux niveaux de résolution : le premier, ayant une précision proche de celle du terrain, est acquis par le paramoteur *Pixy*, et le second, acquis par le satellite *QuickBird*, correspond à une échelle proche de celle du paysage.

3.2 Données de télédétection

La prise en considération des contraintes liées aux spécificités des régions sèches nous a conduit à privilégier les images THR, afin de pouvoir aborder la complexité des paysages et des EDS arides ou semi-arides. Pour analyser ces surfaces dans leur hétérogénéité, il faut utiliser des images qui, en plus des atouts de la vision verticale qu'elles offrent, permettent de descendre à l'échelle des objets élémentaires composant le paysage.

3.2.1 Le *Pixy*

3.2.1.1 Un outil de télédétection rapprochée

La télédétection traditionnelle, fondée sur l'exploitation d'images satellitaires ou de photographies aériennes présente un certain nombre de contraintes. Ces contraintes sont : le coût de la donnée brute, la relative faiblesse de la fréquence de prises de vue pour certains phénomènes, un certain manque de souplesse dans l'acquisition de la donnée et enfin une résolution des images encore trop faible pour permettre l'identification et l'étude de formes centimétriques dans le cas des images satellitaires.

Les développements en cours en matière de télédétection rapprochée : ULM, drone et, plus récemment, microdrones de type hexacoptère [4] ont permis de lever un certain nombre de ces contraintes. Ces diverses plate-formes, permettant d'acquérir des images de télédétection rapprochée, sont utilisées aujourd'hui dans des domaines variés, comme le suivi des forêts alluviales (Delacourt *et al.*, 2009) ou de l'érosion des côtes (Casson *et al.*, 2005).

Pour développer de nouvelles approches des paysages des régions sèches, nous avons utilisé le *Pixy* , un paramoteur radiocommandé mis au point par Jean Asseline, ingénieur IRD. Un exemplaire se trouvait en Tunisie dans le cadre de coopération entre l'IRD et ses partenaires tunisiens. Cet engin, de dimensions réduites, est facilement et intégralement démontable pour être transporté dans une caisse conforme aux exigences du fret aérien, ce qui constitue un atout d'opérationnalité. Il est propulsé par un moteur thermique, suspendu à une voile, et permet d'emporter une charge utile de l'ordre de 3 kg, ici constituée par un APN de marque Sony, modèle DSCF828, sur lequel est fixé un bras déclencheur télécommandé par l'opérateur au sol (fig. 3.11).

Le *Pixy* permet de réaliser de façon relativement aisée des prises de vue aériennes, dans la mesure où les conditions atmosphériques sont optimales (vent

4. Voir par exemple : `http://microdronestore.free.fr`

FIGURE 3.11 – *Le paramoteur* Pixy

faible), avec pour seule contrainte les réglementations locales de la navigation aérienne. Il permet ainsi d'obtenir assez facilement des images de très haute résolution spatiale, comprise entre 3 et 6 cm pour un pixel (Lejot *et al.*, 2007) en planimétrie et d'ordre décimétrique en altimétrie lors de l'utilisation de couples stéréoscopiques (Raclot *et al.*, 2005). L'intérêt de telles images est de pouvoir étudier très finement les secteurs considérés tout en ayant une vue verticale, adaptée à l'analyse spatiale des phénomènes ainsi qu'au suivi de leur évolution temporelle.

3.2.1.2 Contraintes d'exploitation et conséquences méthodologiques

Malgré ses atouts, le *Pixy* présente un certain nombre de contraintes propres qu'il ne faut pas négliger dans la conception d'un protocole d'étude qui l'intègrerait. La première de ces contraintes est mécanique : petit et léger, le *Pixy* ne dispose pas d'un moteur très puissant ce qui, couplé à l'utilisation d'une voile, le rend très difficile à utiliser lorsque le vent dépasse 15 km/h - soit environ 4 $m.s^{-1}$ - au sol. Dans ces conditions, le *Pixy* ne peut plus remonter au vent et, par vent de travers, la nacelle est trop secouée pour que les images restent exploitables.

Le décollage et l'atterrissage sont également rendus plus délicats. Cette contrainte est levée par les appareils de dernière génération, de type microdrone, qui seraient opérationnels jusqu'à une vitesse de vent de 70 km/h, soit environ 20 $m.s^{-1}$ (com. perso. de J. Lejot).

La seconde est administrative et est liée à son utilisation en Tunisie. La photographie aérienne y est une activité contrôlée par l'armée et le *Pixy* y est considéré comme un avion. Toute mission nécessite donc le dépôt d'un plan de vol, d'un équipage et doit être accompagnée par un militaire du CNT de Tunis. Ces formalités limitent la souplesse d'utilisation qui est un atout important du *Pixy*.

De ces contraintes propres à l'appareil découlent des contraintes d'exploitation qui doivent être prises en considération lors de la mise en forme et de l'utilisation des images obtenues.

Dans un premier temps, le profil de répartition des vitesses de vent au long de la journée montre que les périodes favorables pour faire voler le *Pixy* sont le matin avant 10 h et le soir après 19 h (fig. 3.12). Cela s'explique par l'augmentation des températures liée à la course du soleil qui crée des phénomènes convectifs renforçant le vent (Khatelli, 1996). En conséquence, la plupart des images capturée pendant ces périodes sont polluées par de nombreuses ombres portées (végétation, accumulations sableuses, etc.) mais, surtout, il faut être présent au moment opportun, ce qui n'est pas toujours aisé dans le cas de sites difficiles d'accès.

L'éloignement des sites retenus pour faire voler le *Pixy*, associé à la répartition journalière des vents en Tunisie pré-saharienne, constitue une autre contrainte dans la mesure où il apparaît très compliqué, sinon impossible, de préparer les sites à l'avance. Si, en régions sèches, il est rarement nécessaire de dégager une piste de décollage, il est en revanche important de disposer au sol un certain nombre de balises permettant :

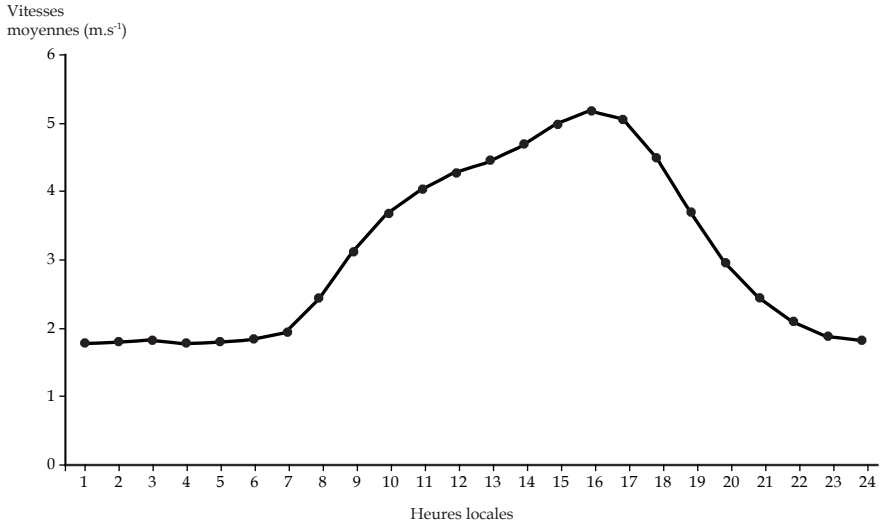


FIGURE 3.12 – *Répartition des vitesses moyennes de vent pour le secteur de Dar Dhaoui au cours de la journée (2008-2009)*

- de repérer les images les unes par rapport aux autres et donc de faciliter le travail d'assemblage en mosaïque ;
- de donner une échelle indicative puisque la taille de ces balises est précisément connue ;
- éventuellement, de servir de points de repère pour le géoréférencement des images et pour leur calibration radiométrique.

Par manque de temps, les balises n'ont pu être disposées en nombre suffisant pour remplir cette dernière fonction. Il faudrait pouvoir les installer la veille, de façon structurée, en relevant à chaque fois leur position au GPS. Cela implique également de rester sur place pour la nuit, sans quoi le risque est grand que les cibles soient enlevées. Cette dernière contrainte s'accomode mal des conditions d'organisation des vols et surtout de la relative incertitude liée au vent.

Considérant les difficultés rencontrées pour mettre en place les vols que nous avons réalisés, nous avons cherché à les rentabiliser au maximum et pour cela nous avons dû faire un choix concernant le format d'enregistrement des prises de vues par l'APN. Le meilleur format du point de vue de l'analyse d'images, en particulier radiométrique, est la norme Tagged Image File Format (TIFF) parce qu'elle ne compresse pas l'image et altère donc peu le profil radiométrique des objets capturés. Ce format se traduit néanmoins par des images de taille importante et limite donc le nombre de prises réalisables en un seul vol.

Le plus difficile étant le décollage, lorsque les conditions ne sont pas optimale, faire atterrir le *Pixy* pour décharger les images est un risque que nous ne pouvions pas prendre. Nous avons donc choisi d'utiliser le format JPEG, à qualité maximale, qui permet de stocker, dans une même carte mémoire, jusqu'à quatre fois plus d'images que le TIFF.

3.2.1.3 Données récoltées

Lors du séjour en Tunisie, en 2009, nous n'avons pu réaliser que 3 vols au mois de novembre, sur deux sites différents. Cependant, nous disposons également d'images acquises lors de missions antérieures.

223 images ont été ainsi capturées par É. Delaître sur le site de Menzel Habib, lors d'un vol effectué en décembre 2005. La station survolée est caractérisée par une végétation disposée en bandes, légèrement concentriques, qui justifient son appellation de « steppe tigrée » parce qu'elles rappellent les brousses tigrées sahéliennes (Delaître *et al.*, 2007).

Pour le site d'Oglet Merteba, 200 images ont été acquises lors d'un vol effectué en avril 2008. Nous en avons sélectionné 10, dont les résolutions sont comprises entre 6 et 10 cm par pixel, qui permettent de donner une vision d'ensemble du site (fig. 3.13).

Les nouvelles images, acquises en 2009, concernent d'abord le site de Dar Dhaoui, où le *Pixy* a survolé une parcelle d'oliviers particulièrement ensablée, au sud du site. 160 images ont ainsi été capturées et 14 ont servi à réaliser une mosaïque. Leurs résolution sont comprises entre 8 et 9,5 cm. La moins grande dispersion des valeurs de résolution est liée aux bonnes conditions de vent le jour de la prise de vue.

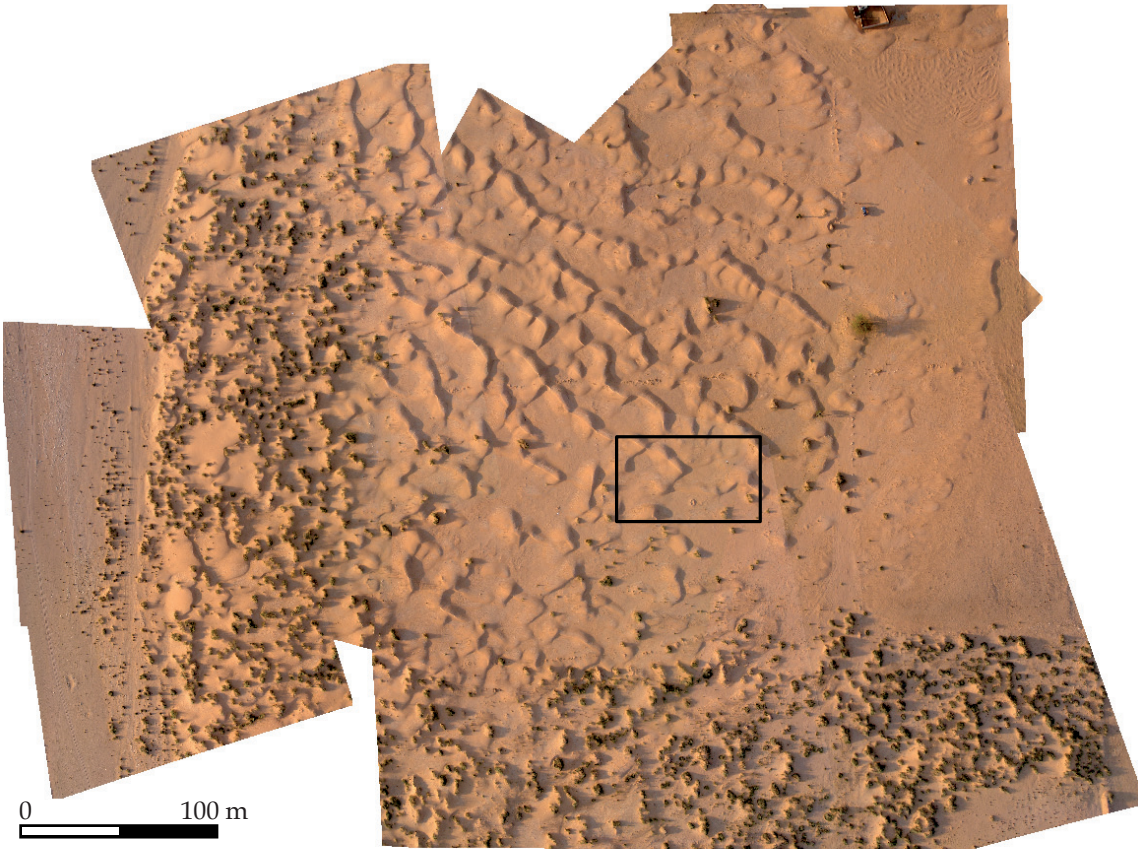
Le second jeu d'images a été obtenu au-dessus de deux stations de Rass Elkamen Labiadh. La première est un transect dans le lit moyen de l'oued Ben Khachab. 145 images ont été acquises et 19 ont été assemblées en une mosaïque couvrant la longueur du transect. La seconde station est un col assez resserré où des barkhanes se forment épisodiquement (fig. 3.14) [5]. En raison des conditions climatiques défavorables - vent fort et en rafales - 82 images seulement ont été acquises avant qu'il ne devienne nécessaire de faire atterrir le *Pixy*.

Les secteurs pour lesquels nous disposons de photographies aériennes à très haute résolution acquises par le *Pixy* permettent d'envisager la diversité des faciès paysagers de la Tunisie pré-saharienne. La variété des résolutions, liée à la hauteur de prise de vue, renvoie à autant d'échelles d'appréciation. Les mosaïques servent à repérer les points d'intérêt mais ne sont pas analysées sous cette forme, en raison des incertitudes liées à la radiométrie, aux résolutions, etc. Les images seront donc traitées par lots. Enfin, le dernier intérêt de ces images est leur compatibilité avec des images issues de satellites d'observation de la Terre.

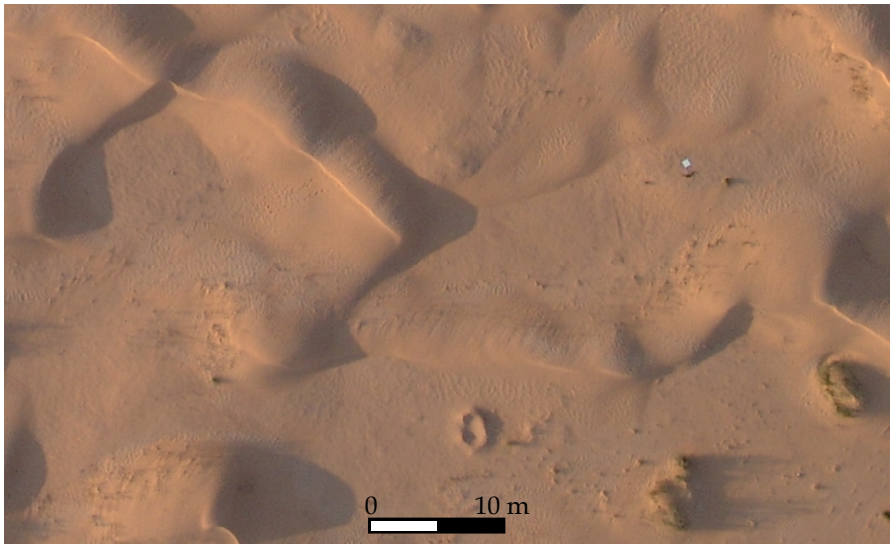
3.2.2 L'imagerie spatiale

Les images satellitales utilisées dans ce travail ont été capturées par le satellite *QuickBird*, exploité par la société DigitalGlobe©. Elles ont deux provenances : *Google Earth* (images gratuites) ou des images d'archives originales, achetées pour les besoins de l'étude.

5. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 33.123382 N / 10.044707 E



(a) *Vue générale*



(b) *Zoom correspondant au cadre de la figure 3.13(a)*

FIGURE 3.13 – *Le site d'Oglet Merteba, mosaïque d'images capturées par le* Pixy. *Clichés : Delaître (2008)*

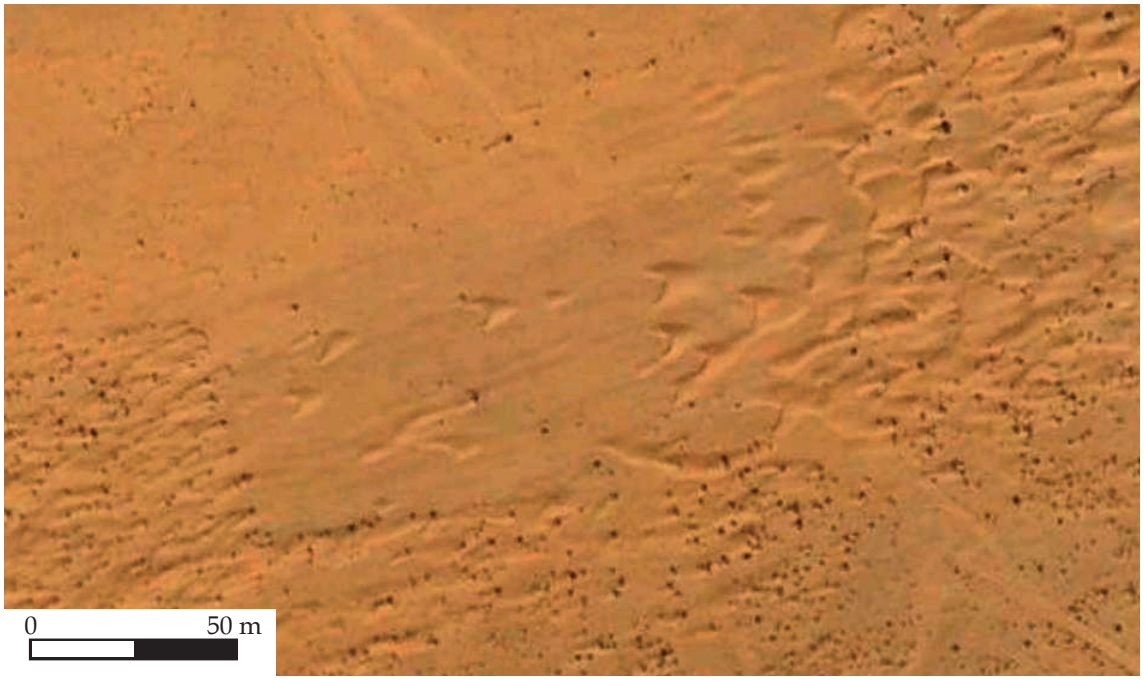


FIGURE 3.14 – *Col, à Rass Elkamen Labiadh, où des barkhanes peuvent se former. Extrait* Google Earth *d'une image* QuickBird *de septembre 2006*

3.2.2.1 *Google Earth*

La plate-forme logicielle *Google Earth*, offrant au grand public l'accès à la visualisation de données spatialisées de natures diverses, connaît un succès croissant depuis sa création. Son utilisation s'étend progressivement à la communauté scientifique qui l'utilise en appui à la recherche, pour partager des données et des résultats (Conroy *et al.*, 2008), en appui à l'enseignement (Lisle, 2006), voire comme source de données. Cette tendance est encouragée par Google©, qui fournit régulièrement de nouvelles fonctionnalités, et par les grands éditeurs de logiciels, en particulier SIG, qui développent des outils d'interaction entre leur plateforme et celle de *Google Earth*.

Les médias ont également de plus en plus recours à cette plate-forme pour localiser rapidement un point d'intérêt à la surface du globe. Google© rend également son outil interactif avec l'actualité, comme en témoigne la mise à disposition quasi-immédiate d'images très haute résolution permettant d'effectuer une comparaison « avant–après » le tsunami du 11 mars 2011 au Japon.

Nous avons évalué le potentiel de *Google Earth* pour la recherche en géographie, en particulier dans des espaces difficiles d'accès et peu renseignés. L'objectif était d'arriver à mettre au point une méthodologie qui permette d'obtenir des images à très haute résolution et à référence spatiale, à moindre coût, exploitables soit en préparation au terrain soit comme support d'analyses thématiques tenant compte de leurs limites.

Concernant la méthodologie d'extraction, on pourra se reporter à la publication associée (Venard *et al.*, 2010) qui la présente en détail. On en retiendra essentiellement les points suivants :

- il est possible d'obtenir des mosaïques de différentes résolutions, suivant l'échelle de visualisation à laquelle on se positionne. Néanmoins, il semble plus rigoureux de chercher à retrouver la résolution des images originales ;
- la méthode suivie permet de retrouver avec une grande précision le positionnement spatial intégré dans *Google Earth*. L'Erreur moyenne quadratique (RMS) [6] associée aux manipulations ne dépasse jamais 0,2 (en pixel). Cela signifie concrètement que l'extraction et le géoréférencement ainsi réalisés permettent de retrouver le même positionnement des images que celui de *Google Earth* ;
- le positionnement spatial récupéré depuis les repères de *Google Earth* est correct, en tout cas dans une marge d'erreur raisonnable par rapport à une autre source de données spatialisées, le GPS à main commercial ;
- l'incertitude liée aux traitements radiométriques (fusion des images multispectrale et panchromatique, étalement des valeurs, gestion des bandes, etc.) contraint à une grande prudence dans l'utilisation des traitements standards (classifications pixellaires), *a fortiori* compte tenu de la faible résolution spectrale des images obtenues ;
- en revanche, la haute résolution spatiale, là où elle est disponible, permet de repérer les objets d'intérêt, de localiser les sites à prospecter et éventuellement de développer des analyses orientées – objets ;
- en conséquence, *Google Earth* est un outil adapté à une approche thématique, centrée autour d'un objet, et moins aux approches territoriales, spatialement contraintes. Cette limitation a tendance à se réduire à mesure que la couverture dans *Google Earth* par des images THR s'améliore.

Le résultat obtenu est satisfaisant et permet d'envisager des traitements orientés–objets précis, comme l'illustre la figure 3.15 [7], où l'image d'origine est une fusion entre le panchromatique, à 0,6 m de résolution, et le multi-spectral, à 2,4 m de résolution, du satellite *QuickBird*. Cela permet d'obtenir une image multispectrale de très haute résolution.

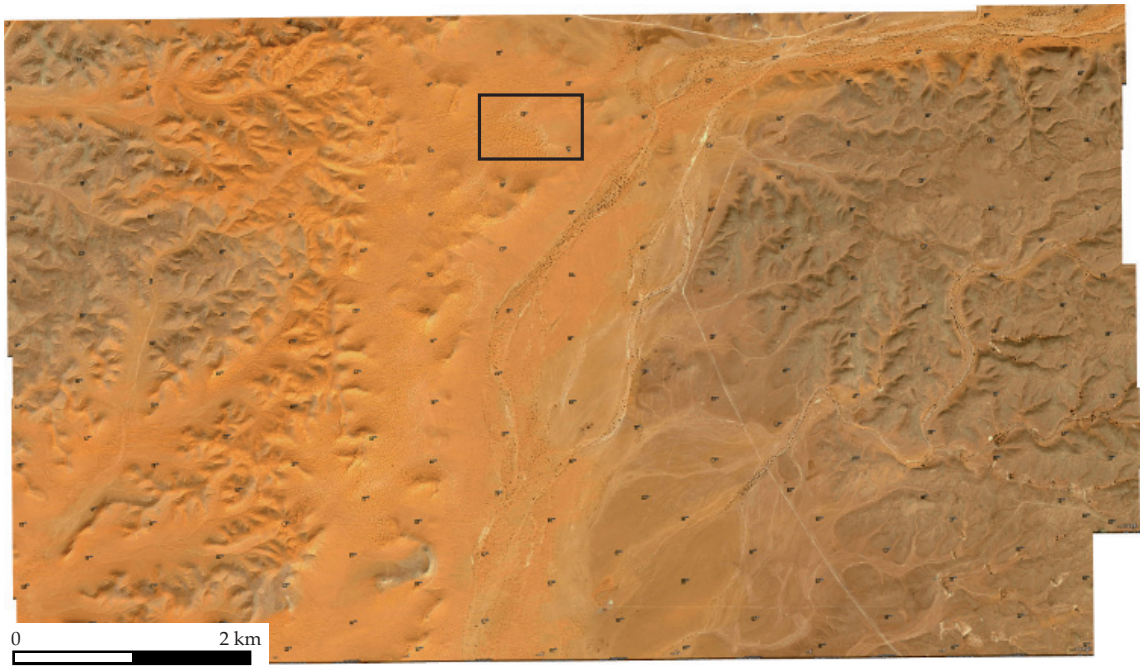
Depuis la mise au point de ces travaux, des progrès notables ont été accomplis. Des logiciels, payants, ont ainsi été développés pour télécharger des images géoréférencées, directement depuis le système de capture d'écran de *Google Earth* [8]. En outre, *Google Earth* dispose désormais d'une fonction d'affichage d'images historiques, permettant de naviguer dans les archives de la plate-forme, particulièrement utile pour un travail diachronique sans extraction ni géoréférencement.

Les images ainsi obtenues nous ont servi, dans un premier temps, à repérer des secteurs d'intérêt pour les approches que nous souhaitions développer. C'est ainsi que les sites de travail initiaux ont été choisis. Elles constituent, en parallèle, autant d'états de référence pour des approches diachroniques de

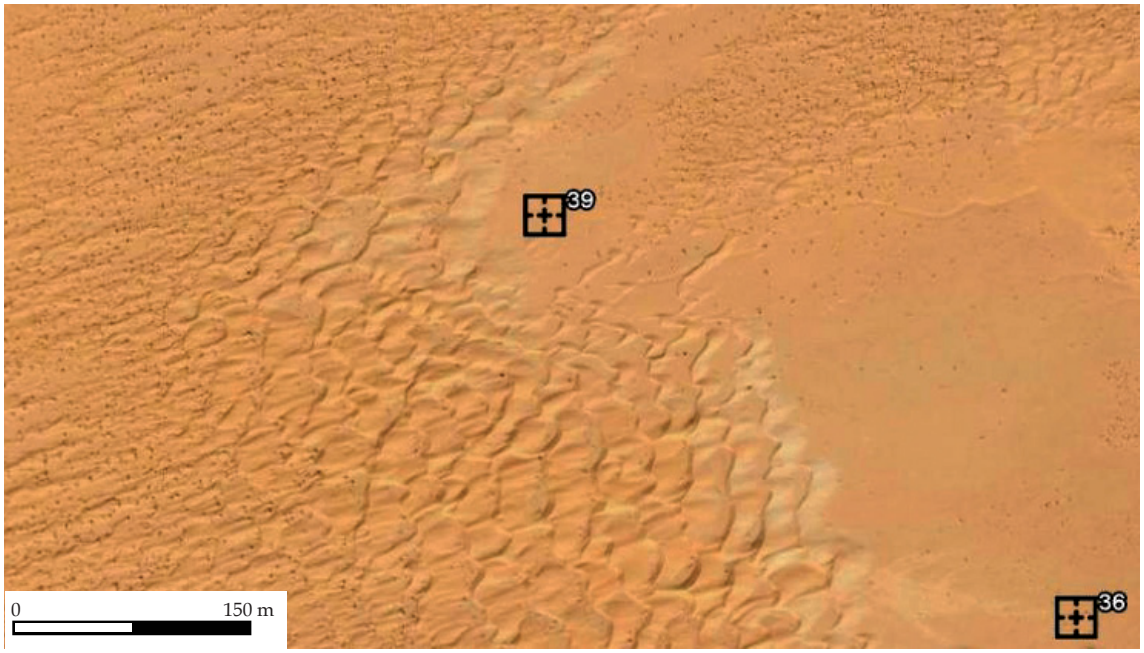
6. Le résidu des transformations de l'image qui ne peuvent dépasser un certain seuil sans en altérer la géométrie et la qualité.

7. Latitude et longitude du centre de l'image (degrés décimaux, WS84) : 33.108653 N / 10.061641 E

8. Voir par exemple le plug-in *Shape2earth* : `http://myshape2earth.appspot.com/globe`



(a) *Mosaïque de captures d'écran d'une image de septembre 2006*

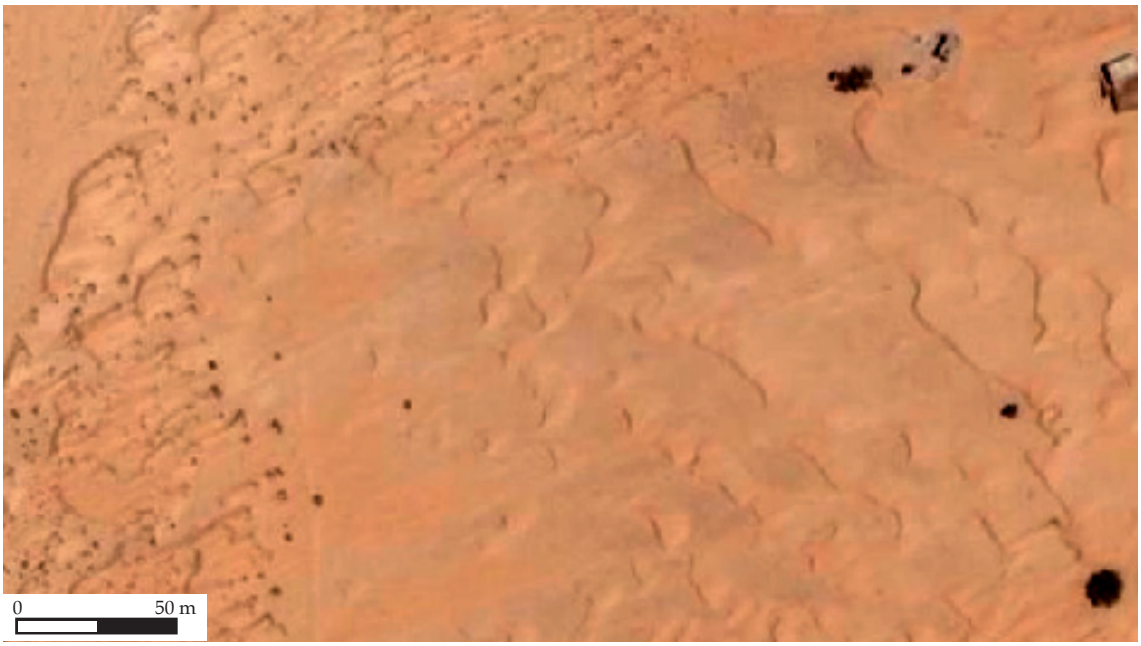


(b) *Zoom correspondant au cadre dans la figure précédente*

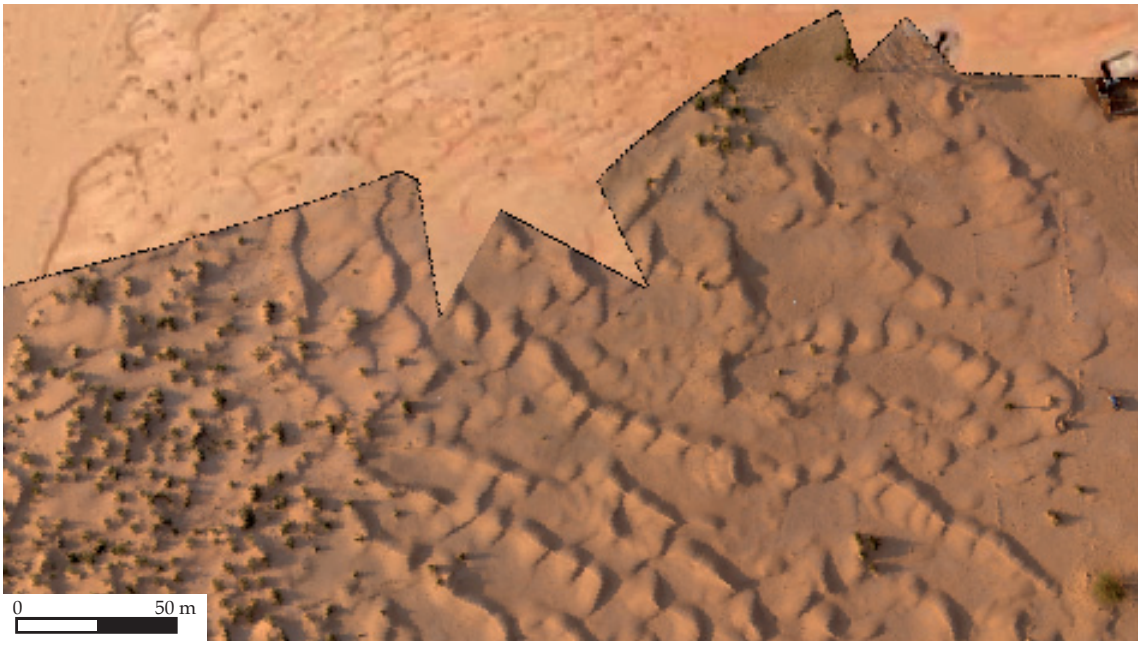
FIGURE 3.15 – *Résultat de l'extraction d'images* Google Earth, *d'après la méthode de Venard* et al. *(2010). Exemple du site de Rass Elkamen Labiadh*

chaque site. La mise au point de ces approches a motivé l'acquisition d'images *QuickBird* d'archive originales plus récentes. Enfin, pour le site de Rass Elkamen Labiadh, *Google Earth* a été mis à jour avec une image de juin 2010, ce qui permet d'envisager des approches temporelles.

Elles ont enfin servi à géoréférencer les images du *Pixy* que nous avons présentées plus haut, selon une logique descendante : les extraits *Google Earth* permettent de géoréférencer les images à résolution plus grossières qui, à leur tour, servent de support au géoréférencement des images aux résolutions les plus fines (fig. 3.16).



(a) *Captures d'écran* Google Earth *d'une image* QuickBird *de juin 2003*



(b) *Images du* Pixy *géoréférencées à partir des captures d'écran* Google Earth

FIGURE 3.16 – *Utilisation des images extraites de* Google Earth *pour le géoréférencement des images du* Pixy. *Exemple pour le site d'Oglet Merteba*

3.2.2.2 *QuickBird* : images satellitales à très haute résolution spatiale

L'acquisition d'images d'archives, motivée par la possibilité de développer des approches diachroniques, se justifie aussi par le besoin d'établir une comparaison entre les extraits de *Google Earth* et des images originales. La présentation des caractéristiques des images *QuickBird* (tab. 3.2) permet de préciser les pro-

Tableau 3.2 – *Caractéristiques de l'imagerie* QuickBird *pré-traitée au niveau standard, d'après le guide des produits Digital Globe*

Générales	
Emprise minimale de la commande	25 km^2 en archive, comme en programmation
Cadrage	Emprise de la commande
Temps de retour	À la latitude 40° : 8 jours pour une image capturée avec un angle de 0 à 15°
Traitements	
Précision absolue de la géolocalisation (au nadir)	23 m CE90 pour *QuickBird*, sans tenir compte des effets du terrain
Corrections géométriques	Incertitude liée à l'orbite et à l'angle de prise de vue du satellite, rotation de la Terre, courbure de la Terre, distortions panoramiques, relief (grossier)
Informations de géolocalisation ajoutées	Éphémérides et angle, rotation et projection cartographique
Informations de terrain	Altitude moyenne à partir d'un MNT grossier
Paramètres du produit	
Options	Panchro, 4 bandes, 8 bandes, panchro + 4 bandes, pan + 8 bandes, couleurs naturelles, couleurs infra-rouges, fusion MS–panchro
Bits par pixel	8 ou 16
Méthodes de rééchantillonnage	Convolution cubique 4×4, plus proche voisin, noyau MTF, noyau amélioré
Taille du pixel	0,6 m en panchro et 2,4 m en MS
Couverture nuageuse	0–15 % par défaut, autres valeurs sur demande
Conditions de livraison	
Support physique	Téléchargement FTP, DVD, disque dur externe
Format image	NITF 2.0, NITF 2.1, GeoTIFF 1.0
Données annexes	
Fichiers fournis au client	Readme (livraison et produit), fichier de configuration, shapefile, image vignette, fichier de métadonnées, fichier RPCooB (projection) et fichier de licence
Télémétrie	Angle et éphéméride ajustées utilisés pour créer le produit

blèmes posés par l'utilisation des extraits *Google Earth*.

Google Earth met à disposition des images multispectrales à 0,6 m de résolution. Or, celle-ci n'est disponible qu'en mode panchromatique. Cela signifie

qu'un algorithme de fusion a été appliqué. Le plus couramment utilisé est l'algorithme de Gram–Schmidt [9]. La méthode consiste à :

1. Simuler une bande panchromatique à partir des bandes multispectrales à faible résolution spatiale.
2. Appliquer une transformation Gram–Schmidt à la bande panchromatique simulée et aux bandes multi–spectrales, en utilisant la bande panchromatique comme première bande dans la transformation.
3. Remplacer la bande panchromatique simulée par la bande panchromatique originale à très haute résolution.
4. Appliquer la transformation inverse de Gram–Schmidt pour générer des bandes multispectrales à très haute résolution spatiale.

L'opération est non linéaire, ce qui signifie qu'elle produit un résultat cohérent pour une image, mais que chaque jeu d'images panchro–multispectrale que l'on cherche à fusionner produit un résultat unique dans la transformation de Gram–Schmidt. Cela rend la comparaison entre deux images, espacées dans le temps, très aléatoire. De surcroît, nous ne maîtrisons pas les traitements effectués par Google avant la mise à disposition des images. Ces éléments font que les classifications pixellaires risquent de produire des résultats au mieux difficiles à interpréter, au pire incohérents et rendant toute comparaison impossible. Ce dernier point explique le choix d'autres méthodes d'analyse d'image que nous développons dans la section suivante.

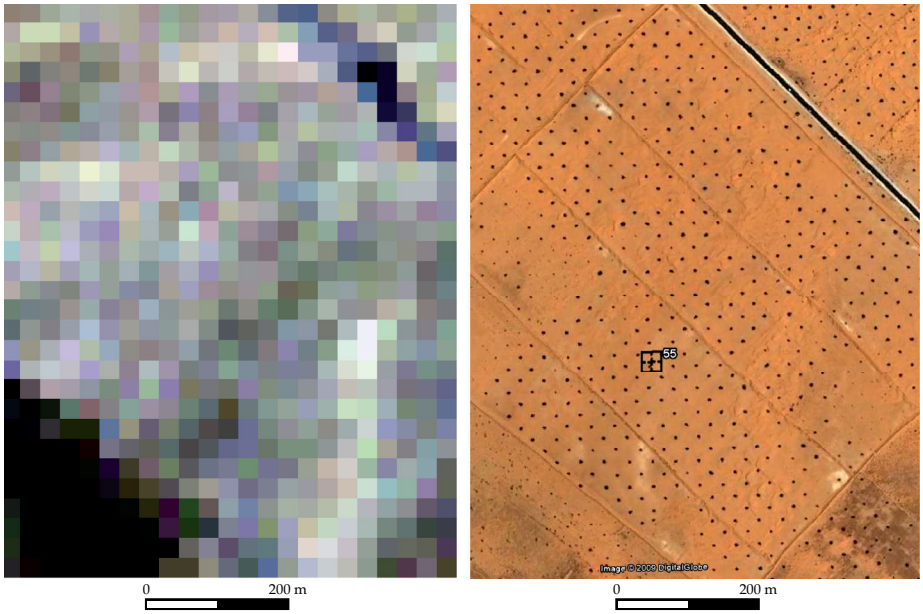
Deux jeux d'images, panchromatique et multispectrale, ont été acquis, grâce à la participation financière du laboratoire ArchéOrient. Le premier, au-dessus du site de Rass Elkamen Labiadh, pour une superficie de 50 km^2, à la date du 26 mars 2009. Le second couvre le site d'Oglet Merteba, pour une surperficie de 25 km^2, à la date du 11 décembre 2009. Le coût d'acquisition de ces images est de 17 $ US, soit environ 13 €, le km^2.

3.2.2.3 Conclusion sur l'utilisation d'images THR

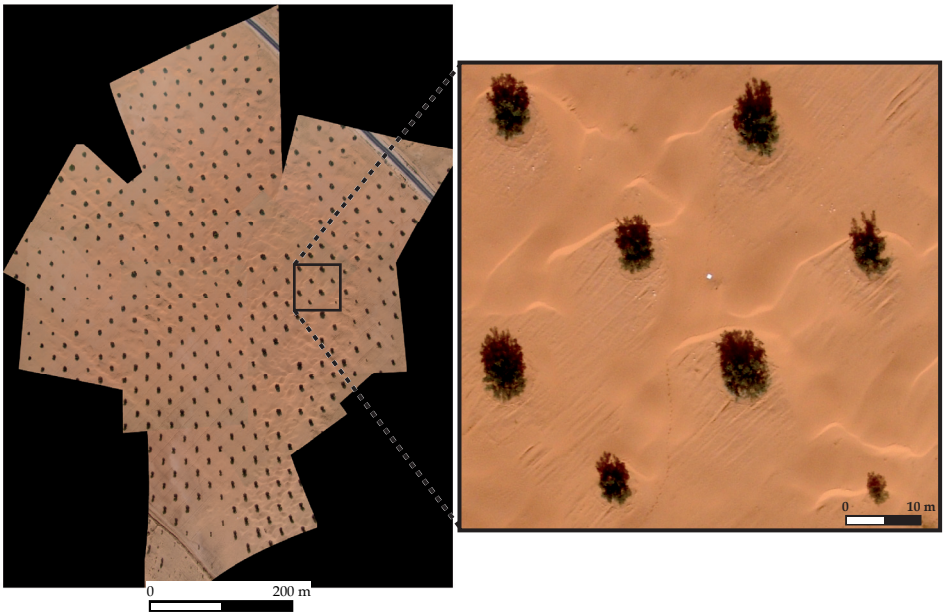
Nous avons évoqué les contraintes, pour la télédétection, des spécificités des régions sèches non désertiques. En particulier, l'hétérogénéité de la surface, perçue par des images à résolution moyenne, peut conduire à des confusions que même des traitements comme la déconvolution (Jauffret, 2001) ne peuvent à notre sens réduire de façon satisfaisante.

Cette même propriété des surfaces arides ou semi-arides se révèle être un atout lorsque, par des images THR, on accède à une échelle plus fine. En effet, la surface y est composée d'objets qui, par contraste avec la matrice généralement sableuse du sol, sont particulièrement bien définis. Ainsi la THR permet-elle d'accéder à une information masquée dans les images de résolution moyenne, mais elle facilite aussi l'analyse qui se fait à l'échelle des objets élémentaires des EDS (fig.3.17). Sur l'image LANDSAT, on identifie trois éléments du paysage : la route au NE, la zone de steppe au SO et la parcelle d'oliviers au centre. Sur

9. L'algorithme a fait l'objet d'un dépôt de brevet par Laben et Brower (2000). Il peut être consulté en détails à l'adresse : `http://www.freepatentsonline.com/6011875.html`



(a) *Extrait* Landsat *de déc. 1999* (b) *Extrait* Google Earth *d'une image* QuickBird *de juin 2003*



(c) *Mosaïque d'images du* Pixy *de nov. 2009*

Figure 3.17 – *L'emboîtement des échelles lié à la résolution des images dans le site de Dar Dhaoui*

l'image *QuickBird*, on arrive à identifier l'ensablement et les oliviers ; on peut faire des analyses fines sur la zone de steppe, puisque les touffes apparaissent. Enfin, le *Pixy* permet d'étudier le paysage au niveau des éléments des EDS.

Sur les deux images THR, les objets élémentaires sont bien distincts de la matrice, relativement uniforme, ce qui constitue un atout pour leur extraction dans

une démarche d'analyse d'images. En revanche, la finesse des résolutions a une conséquence du point de vue des traitements qui doit être prise en considération. En effet, les méthodes usuelles en télédétection classifient pixel à pixel, en fonction de critères pré-établis, statistiquement comparés aux valeurs du pixel à classer. En d'autres termes, l'opération concerne l'ensemble de l'image. Dans le cas d'images THR, le résultat est d'autant plus difficile à interpréter qu'elles permettent d'accéder à une plus grande complexité thématique. Nous en tirons les conséquences méthodologiques en section 3.3.1.2.

3.2.3 L'information sur le relief

3.2.3.1 Quel usage potentiel ?

Pour analyser la morphodynamique éolienne, il est essentiel de disposer d'information sur le relief. Disponible sous forme numérique, on peut envisager de l'utiliser à différentes échelles. Associée, par exemple, aux données de vent générales, elle doit permettre de définir des couloirs éoliens, ainsi que les zones où un effet Venturi dû à la disposition topographique est probable.

Cette information a également été utilisée pour la caractérisation géomorphologique, par exemple l'interprétation structurale de terrains complexes, l'estimation du volume d'une chaînes de volcans ou la détection et la morphométrie d'un système hérité de formes éoliennes de grandes dimensions (Bubenzer et Bolten, 2008).

L'information numérique concernant le relief est contenue le plus souvent sous la forme d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Il s'agit d'un semis de points dont les coordonnées spatiales et l'altitude sont connues. Les données sont disponibles soit sous la forme de fichiers texte, de type Ascii, ou sous un format Raster. Dans ce dernier cas, l'information ponctuelle est interpolée au niveau d'une cellule dont la taille est calculée en fonction de la distance entre deux points. Ce dernier paramètre définit la résolution planimétrique du MNT.

La disponibilité de cette donnée sous forme de Raster spatialisé permet de la croiser avec d'autres couches d'informations. À l'instar des autres données de télédétection, ellle constitue un atout indéniable pour étudier les zones difficiles et pour généraliser une approche spatiale.

Les modes d'obtention d'un MNT sont nombreux : GPS différentiel, digitalisation de courbes de niveaux à partir de cartes topographiques, couplage d'images orthorectifiées (stéréoscopie), radar ou laser (LIDAR). Ils permettent d'obtenir une large gamme de résolutions planimétriques et altimétriques. La plupart sont très onéreux ; mais deux types de données sont aujourd'hui disponibles gratuitement : le MNT issu de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) et le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) [10] Aster–Gdem, issu d'une collaboration entre le ministère de l'Économie, du commerce et de l'industrie

10. Un MNT donne image « nette » de la surface observée, sans végétation ni bâti. Un MNE, en revanche, donnera par exemple l'altitude de la canopée au-dessus d'une forêt, ou bien d'un immeuble au-dessus d'une ville.

japonais et l'Agence spatiale et aéronautique nationale des États–Unis (NASA). Ce sont ces deux jeux de données que nous allons comparer à présent.

3.2.3.2 Critique comparée des données gratuites disponibles

Les dalles SRTM sont disponibles au téléchargement gratuitement depuis l'adresse suivante : `http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp`. Les dalles ASTER–GDEM, également gratuites, peuvent être téléchargées moyennant une inscription à l'adresse : `http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp`. Le tableau 3.3 présente quelques caractéristiques de chacune de ces sources d'information sur le relief.

TABLEAU 3.3 – *Caractéristiques comparées du MNT SRTM et du MNE* ASTER–GDEM, *d'après Bubenzer et Bolten (2008)*

	SRTM v. 3	ASTER–GDEM v. 2
Méthode	Radar embarqué sur la navette spatiale Endeavour, mission de fév. 2000	Stéréoscopie à partir de deux bandes dans le visible du satellite ASTER
Résolution	3 arc sec. $\approx$ 90 m	30 m
Sources d'erreurs	Pixels manquants, en particulier dans les régions à sols sableux	Qualité des bandes utilisées : nuages, atmosphère, etc.
Disponibilité	Entre les lattitudes 60° N et 56° S	Globale
Taille de la dalle	$1° \times 1°$	60 km $\times$ 60 km
Précision verticale	$\pm$ 6 m	$\pm$ 10 m
Précision horizontale	$\pm$ 15 m	$\pm$ 30 m

Au vu de ces caractéristiques, il semble que les sources d'erreur des deux données sont davantage préjudiciables dans le cas de la SRTM. En effet, si les sols sableux ont un comportement réflectif qui perturbe le signal radar, dans les secteurs que nous étudions, le risque d'erreur, ou de pixel manquant, est élevé. Pour renseigner les pixels manquant, une interpolation a été réalisée, mais cela engendre de l'erreur supplémentaire.

En revanche, la présence de nuages au-dessus des régions sèches est, par définition, assez rare. La meilleure résolution planimétrique est un argument supplémentaire. La précision altimétrique de la SRTM est un atout mais, dans la mesure où nous nous proposons surtout de travailler en relatif, en définissant par exemple des cartes des pentes, elle n'est pas essentielle dans notre démarche.

Le fait que la donnée ASTER–GDEM soit un MNE n'est pas non plus préjudiciable dans la mesure où, dans les secteurs où nous travaillons et à la résolution

de 30 m, ni la canopée ni le tissu urbain ne sont un problème. En revanche, la précision horizontale du MNE ASTER–GDEM peut être une limite forte si la comparaison avec les résultats de traitement d'images THR n'est, de ce fait, pas possible.

3.2.3.3 Choix et validation des données

Le seul obstacle étant, à ce niveau, la compatibilité entre le MNE, et ses incertitudes, et la très haute résolution des autres images que nous allons utiliser, un test simple a été effectué. Nous avons extrait les courbes de niveaux depuis le MNE. Le résultat est ensuite comparé à l'image *QuickBird* (fig. 3.18), pour éva-

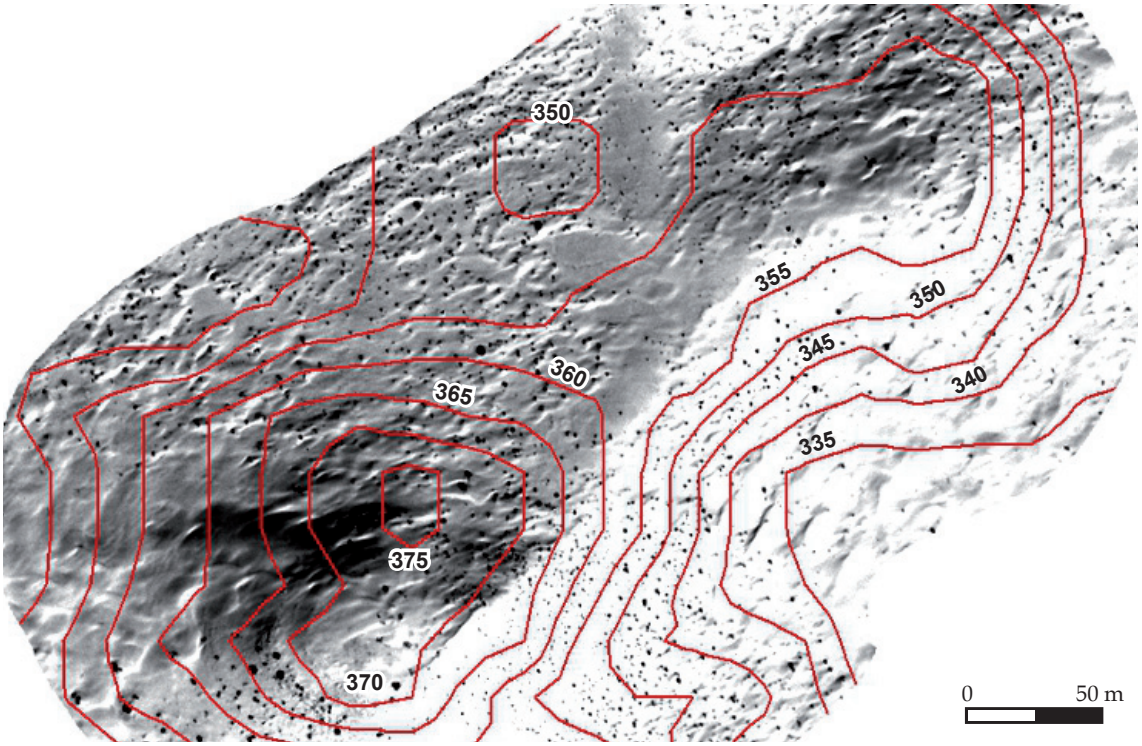


FIGURE 3.18 – *Comparaison entre les courbes de niveaux extraites depuis le MNE et les objets géomorphologiques visibles sur l'image* QuickBird *de Rass Elkamen Labiadh*

luer dans quelle mesure les formes que l'on peut identifier depuis l'image sont restituées avec fidélité par les courbes de niveaux.

L'image *QuickBird* n'ayant pas été capturée alors que le soleil était parfaitement vertical au-dessus de la zone, des ombres sont visibles et dessinent assez nettement le relief, qui est constitué de deux buttes reliées par une crête. Les courbes de niveaux suivent bien les contours des deux buttes et la ligne de crête est également visible. Un décalage semble être systématique, les courbes de niveaux se trouvant à environ 20 m au NNE par rapport à ce que l'on perçoit du relief sur l'image. Cela signifie que l'on est dans la marge d'erreur. Aussi, l'utilisation de cette donnée et l'interprétation des résultats obtenus devront prendre en considération ce fait. Il faut cependant considérer que, s'agissant de données

spatialisées de sources et de natures diverses, l'erreur horizontale est, dans tous les cas, inévitable.

Enfin, la version 2 connaît un certain nombre d'améliorations [11] :

- la résolution a été augmentée grâce à un meilleur algorithme de génération ;
- le nombre de pixels manquants a été considérablement réduit par l'ajout de 350 000 nouveaux couples stéréoscopiques ;
- le nouvel algorithme représente désormais les surfaces en eaux comme étant parfaitement planes ;
- l'ajout de nouvelles scènes a permis de corriger des artefacts dans les secteurs où l'information manquait, en particulier les régions sèches.

Ces arguments nous ont conduit à opter pour le MNE Aster–Gdem. 12 dalles ont ainsi été téléchargées et assemblées en mosaïque. Elles complètent et finalise la base de données Raster qui est résumée dans le tableau 3.4. À l'exception des

Tableau 3.4 – *Résumé de la base de données d'imagerie utilisée pour les applications en Tunisie pré-saharienne*

Type	**Capteur**	**Mode**	**Rés. spatiale**	**Format**	**Nb**
Phot. d'états de surface	Sony DSCF828	RVB	variable (mm)	Jpeg	610
Phot. aériennes *Pixy*	Sony DSCF828	RVB	variable (cm)	Jpeg	930
Mosaïque d'images GE	*QuickBird*	RVB	0,6 cm et 1 m	Jpeg	4
Archives Digital-Globe	*QuickBird*	Pan	0,6 cm	GeoTiff	2
Archives Digital-Globe	*QuickBird*	MS	2,44 m	GeoTiff	2
MNE	Aster–Gdem	n.p. [a]	30 m	GeoTiff	12

a. non pertinent

photographies d'échantillons d'EDS, toutes les images utilisées sont géoréférencées dans le système UTM, zone 32 N, fournissant des coordonnées métriques, et en utilisant le *datum* officiel de la Tunisie qui est le *datum* Carthage.

Les différentes données rassemblées nous permettent de développer des approches multi–critères emboîtant les échelles. Une telle démarche ne peut se faire sans une réflexion sur l'outil d'analyse à employer qui, dans la mesure du possible, doit être le même pour chaque échelle étudiée. Ce point fait l'objet de la section suivante.

11. D'après la page détaillant ces améliorations sur le site d'Aster–Gdem : `http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/4_1.html`, consultée le 19/12/2011.

3.3 Traitements de données multiscalaires

Il a déjà été démontré que les méthodes classiques de l'analyse d'images de télédétection, en particulier les méthodes de classification multispectrales, étaient peu probantes dans les contextes de substrats sableux, comme les ergs (Callot *et al.*, 1994). Cette contrainte perdure dans les régions non désertiques même si elle est moins prégnante.

La très haute résolution spatiale, si elle est accompagnée d'une profondeur spectrale suffisante, devrait permettre de lever cette contrainte, mais nous avons montré les difficultés méthodologiques qui entourent les opérations de fusion, en particulier dans une perspective de suivi et de répétition des opérations d'analyse.

Dans le cas des images THR, nous avons montré que la classification orientée – pixels en rendait l'interprétation difficile en raison de leur propre complexité thématique. La démarche de formalisation d'indicateurs, fondée sur le suivi d'objets du paysage, que nous développons, associée à ces contraintes méthodologiques, nous amène à explorer les possibilités offertes par les méthodes d'analyse d'images orientées – objet.

3.3.1 La Morphologie Mathématique

3.3.1.1 Les problèmes liés aux images

Indépendamment des raisons déjà avancées : problèmes liés à la fusion et complexité thématique des images THR, d'autres éléments militent en faveur de l'utilisation d'outils complémentaires des outils classiques.

Dans un premier temps, la taille des images pose un problème de traitement. L'image panchromatique *QuickBird* de Rass Elkamen Labiadh contient 16 365 col.$\times$9 567 l. Pour 50 km^2, cela donne donc déjà plus de 150 millions de pixels. Dans l'hypothèse où nous effectuerions une fusion pour obtenir une image multispectrale THR, il faudrait multiplier ce chiffre par trois. Une classification pixel à pixel prend alors un temps considérable, sans compter le temps d'interprétation, de post-classification, d'ajustement des éventuelles régions d'intérêt d'une classification supervisée, etc.

En second lieu, on peut avancer une contrainte thématique : puisque les images permettent d'envisager le milieu à l'échelle des objets élémentaires qui le composent, est-il pertinent d'utiliser des méthodes qui correspondent à une échelle synthétique ? Le regroupement statistique de pixels en classes se justifie quand ces derniers décrivent déjà une composition qui ne correspond pas strictement à un objet thématique (Mering, 1991). En revanche, dans le cas où la résolution des images permet de voir les objets que l'on souhaite analyser, il est plus pertinent d'envisager des méthodes qui permettent de structurer ces images pour en extraire seulement ces objets. Ce point constitue le cœur de la démarche développée ici. En effet, il ne s'agit pas d'identifier des objets mais de les extraire du reste de l'information contenue dans les images. Cela fonde un second point de différenciation avec les approches par classifications, qu'elles

soient orientées-pixels ou objets, qui renvoient un résultat contenant toute l'information de l'image, donc complexe. Les méthodes utilisées ici, s'appuyant sur des transformations en *tout ou rien* (cf. *infra*), produisent des résultats plus faciles à interpréter.

Enfin, les objets qui nous intéressent sont, pour la plupart, essentiellement définis par leurs caractéristiques morphologiques, et non par leur signature spectrale. C'est relativement évident dans le cas des FEO, qui sont discriminées par leur forme et dont le comportement spectral peut être, en revanche, considéré comme homogène dans la mesure où elles sont constituées de sables, éoliens de surcroît, c'est-à-dire bien triés. Cela s'applique également à la végétation : notre objectif n'est pas de discriminer des espèces entre elles suivant leur signature spectrale, mais plutôt de les décrire mophologiquement et d'analyser leurs relations avec les FEO qu'elles contribuent à former.

Parmi les méthodes disponibles, la Morphologie Mathématique est celle qui répond le mieux aux différentes contraintes que nous posons :

- *efficacité* : les images contiennent une très grande quantité d'informations, il faut pouvoir travailler seulement avec les objets qui nous intéressent ;
- *reproductibilité* : la méthode doit s'appliquer à différentes images et pouvoir être répétée dans le temps ;
- *compatibilité scalaire* : dans l'idéal, la méthode doit pouvoir réduire les problèmes liés aux transferts d'échelles ;
- *transparence* : il faut réduire autant que faire se peut les « angles morts » de la méthode, ou son aspect « boîte noire », qui illustre le fait qu'un jeu de données est traité selon des processus non maîtrisés par l'interprète des résultats ;
- *approche objet et morphologique* : la méthode doit, au moins dans un premier temps, préserver les objets en tant qu'entités individuelles et permettre de les caractériser morphologiquement pour définir des indicateurs.

3.3.1.2 Présentation générale de la Morphologie Mathématique

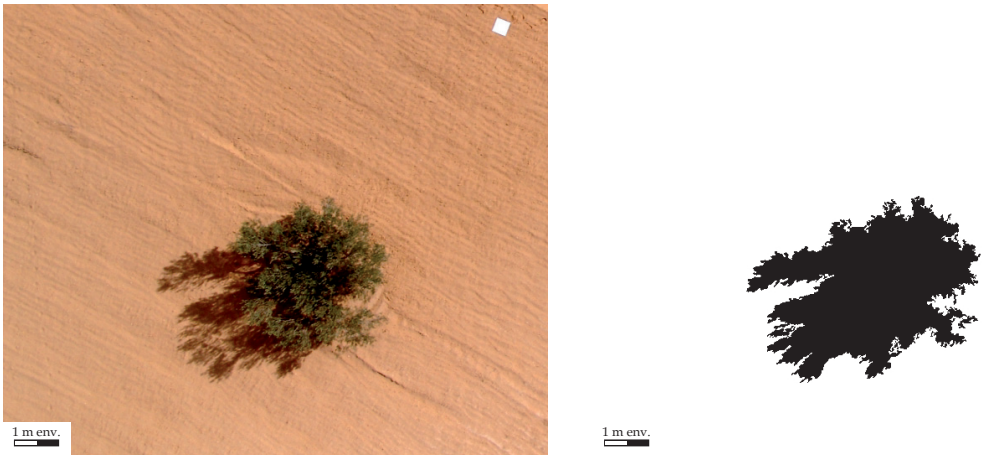
La lecture des travaux de Mering (1998) et de Drouot (1994), sur lesquels nous nous appuyons ici, complètera utilement cette présentation qui est synthétique. La Morphologie Mathématique (MM) est une discipline de l'analyse d'image, fondée par Matheron et Serra, de l'École des Mines de Paris, dans le but de répondre à un besoin quantitatif. Il s'agit de la première théorie nonlinéaire en analyse d'image et elle établit une synergie entre la théorie, les algorithmes et les applications (Serra, 1982), qui sont nombreuses. La MM est un *corpus* de méthodes qui s'appliquent à des images binaires ou en niveaux de gris, et permettent de réaliser des opérations de filtrage ou d'extraction.

La logique de la démarche en MM est de structurer progressivement une image selon des critères, morphologiques, jugés pertinents par l'opérateur qui, à chaque étape, fait intervenir son expertise thématique pour analyser et valider le résultat obtenu, avant de passer à l'étape suivante.

Ainsi définit-on des *séquences*, chaînes d'opérations efficaces pour atteindre

le but fixé. Une fois validées, ces séquences sont reproductibles pour toute image qui contient le type d'objet qui intéresse l'opérateur.

Les méthodes de la MM reposent sur la théorie des ensembles. Il est plus facile de les expliquer en prenant l'exemple d'une image binaire (fig. 3.19). Dans



(a) (b)

FIGURE 3.19 – *Image multi–spectrale et image binaire de l'objet d'intérêt utilisé pour illustrer les outils de la MM. Extrait d'une photographie aérienne du* Pixy *à Dar Dhaoui*

l'image binaire (fig. 3.19(b)), les pixels qui correspondent à l'olivier et à son ombre forment un ensemble, noté X, sur lequel on effectue un certain nombre d'opérations, après avoir défini un *Élément Structurant (ES)*.

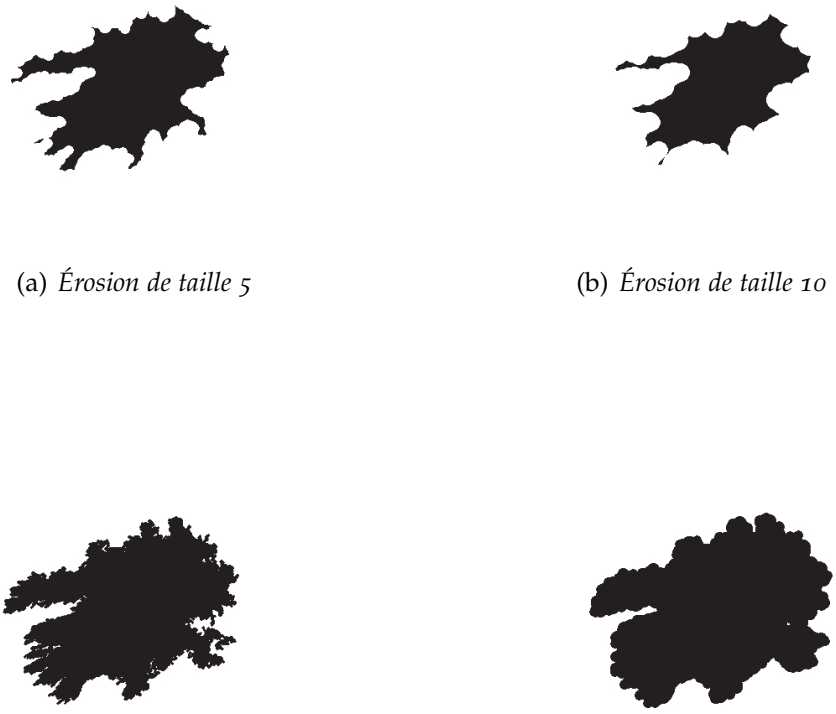
Un ES est un objet de forme simple : disque, carré, ligne, etc. ayant un point d'origine. Sa taille est définie par ce point d'origine et dépend ensuite de la forme de la trame de l'image, hexagonale ou carrée. Ainsi, dans une image de trame carrée, un ES convexe (disque) de taille 1 correspond au plus petit disque ayant un pixel central, soit un disque de 3 pixels de diamètre.

Les opérations de base en MM consistent à déplacer le centre de cet ES, noté B, sur chaque point x de l'image à analyser (l'ensemble X) et à établir si B et X vérifient certaines *relations ensemblistes* : union, intersection ou inclusion. Le résultat est une réponse soit négative, soit positive, ce qui conduit à définir les opérations de MM comme des transformations en tout ou rien.

Les opérateurs de base sont alors :

– l'érosion : si B, centré en x, n'est pas inclus dans X, on attribue à x la valeur 0. Les points pour lesquels B est inclus dans X, dont la valeur est 1, forment un nouvel ensemble, noté Y, qui a une surface plus petite que X, tout en ayant la même structure. La surface de Y sera d'autant plus petite que l'ES sera grand (fig. 3.20(a) et 3.20(b)) ;
– la dilatation : un nouvel ensemble Y est formé par tous les points pour lesquels l'intersection de B et de X est différente de l'ensemble vide. Y a une surface plus grande que X (fig. 3.20(c) et 3.20(d)).

À partir de ces opérateurs de base, on peut définir des opérations plus complexes :



(a) *Érosion de taille 5*

(b) *Érosion de taille 10*

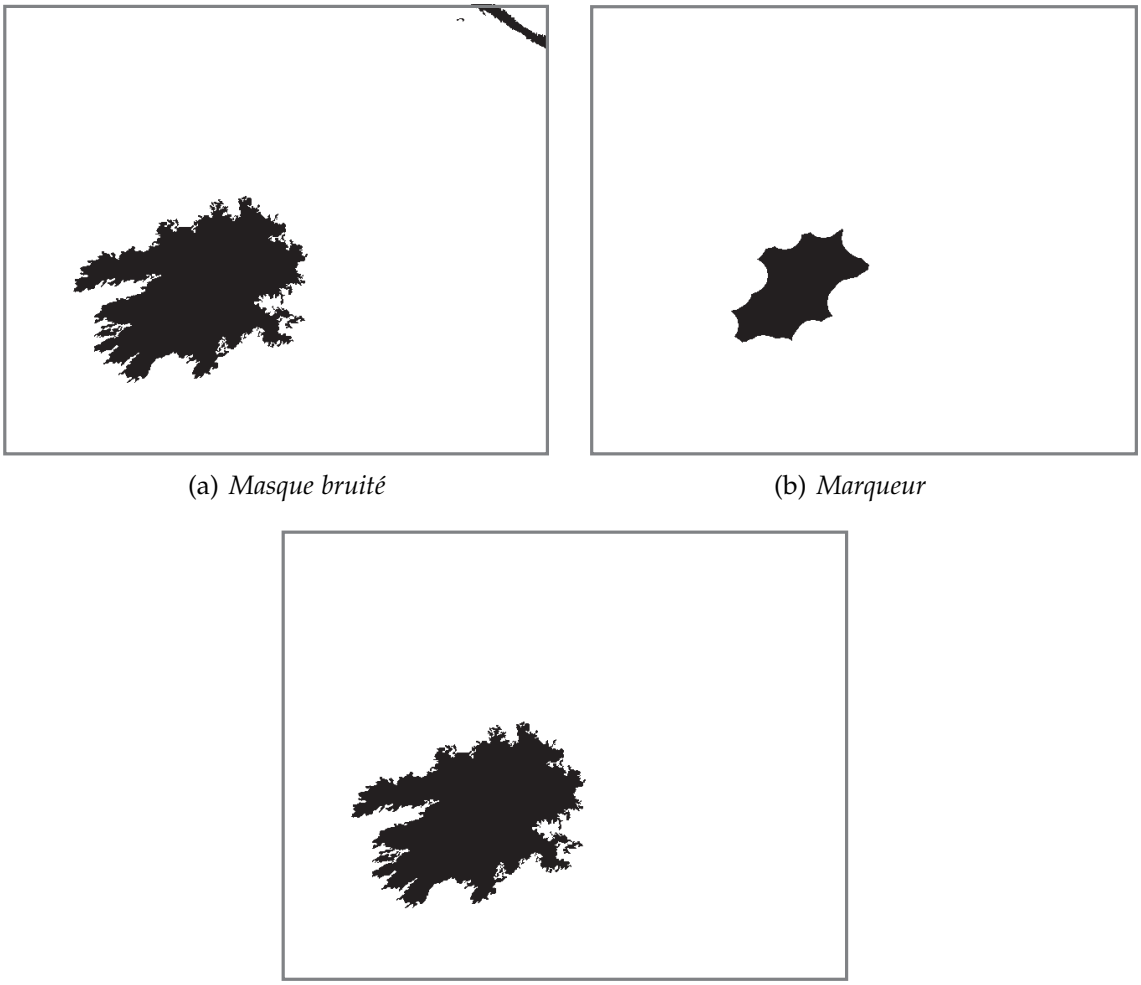
(c) *Dilatation de taille 1*

(d) *Dilatation de taille 5*

FIGURE 3.20 – *Exemple de transformations en Morphologie Mathématique, avec un ES circulaire, appliquées à la figure 3.19(b)*

- l'ouverture, qui consiste à éroder puis à dilater X par le même ES B. Elle « ponce » les contours, déconnecte les liaisons étroites, supprime les petits objets isolés et les « caps » étroits. L'ensemble ouvert est plus régulier et moins détaillé que l'ensemble initial et a une surface plus petite ;
- la fermeture, qui consiste à dilater puis à éroder X par B. Elle comble les concavités des contours, en partie les trous, et connecte les objets proches.
- la reconstruction : qui permet de ne conserver que les ensembles les plus importants, en nettoyant les petits objets, que l'on assimile à du bruit. On définit pour cela un marqueur, noté M, qui est un sous-ensemble de X, le masque. Ce sous-ensemble a été nettoyé à l'aide, par exemple, d'une érosion. La forme des objets d'intérêt de X a cependant été altérée par le nettoyage. La reconstruction consiste à dilater le marqueur jusqu'à ce que son intersection avec le masque cesse de croître. On retrouve ainsi la forme initiale des objets d'intérêt en ayant éliminé le bruit (fig. 3.21).

Ces différentes opérations, définies pour des images binaires, peuvent être appliquées à des images en niveaux de gris. Pour cela, on définit une fonction f



(a) *Masque bruité*

(b) *Marqueur*

(c) *Reconstruction du marqueur dans le masque*

FIGURE 3.21 – *La reconstruction en Morphologie Mathématique appliquée au nettoyage d'une image*

associée à l'image en niveaux de gris ; $f(x)$ représente alors la valeur numérique, le niveau de gris, du pixel x de l'image. La courbe rassemblant tous les couples $[x\,;\,f(x)]$ définit le graphe de la fonction, qui délimite deux ensembles : les points situés au dessus de la courbe et les points situés en dessous de la courbe : le sous-graphe de f.

On peut alors redéfinir l'érosion et la dilatation en niveaux de gris. En associant, à chaque point x, un ES B, on définit un domaine dans lequel $f(x)$ a une valeur supérieure et une valeur inférieure, qui correspondent respectivement à la dilatation de la fonction f par B, notée $D^B f$, et à l'érosion de la fonction f par B, notée $E^B f$ (fig. 3.22).

Ainsi peut-on également définir l'ouverture, notée f_B, et la fermeture, notée f^B, d'une image en niveaux de gris. Elles ont un effet sur les niveaux de gris locaux. L'ouverture arase les pics acérés et la fermeture comble les vallées étroites, si l'on considère le sous-graphe de f comme un relief. On peut enfin utiliser ces propriétés pour définir des *filtres morphologiques*, parmi lesquels nous utiliserons

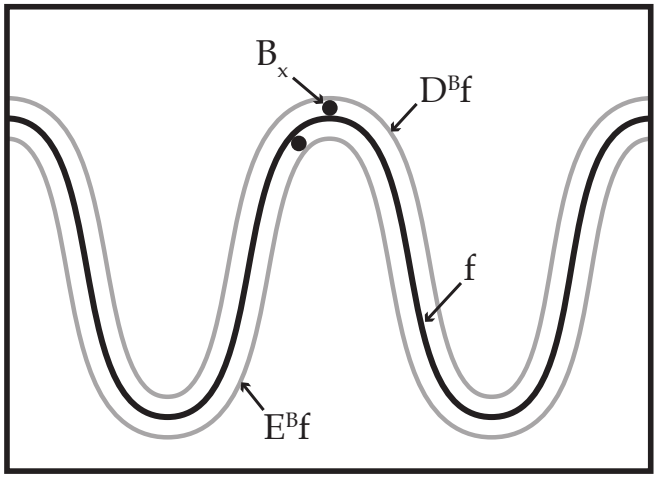


FIGURE 3.22 – *Représentation schématique de l'érosion et de la dilatation d'une image en niveaux de gris. D'après Callot* et al. *(1994)*

surtout le *chapeau haut de forme*, blanc ou noir selon qu'il extrait les pixels clairs ou sombres de l'image. Il est noté WTH (de l'anglais White Top Hat) ou BTH (Black Top Hat) et est ainsi définit :

$$WTH_{(f)} = f - f_B$$

et

$$BTH_{(f)} = f - f^B$$

Le WTH extrait les pics dont l'épaisseur est inférieure à la taille de l'ES, donc les objets clairs de l'image de dimension inférieure à cet ES. Le BTH extrait les vallées dont l'épaisseur est inférieure à l'ES, c'est-à-dire les objets sombres de l'image plus petits que l'ES (fig. 3.23).

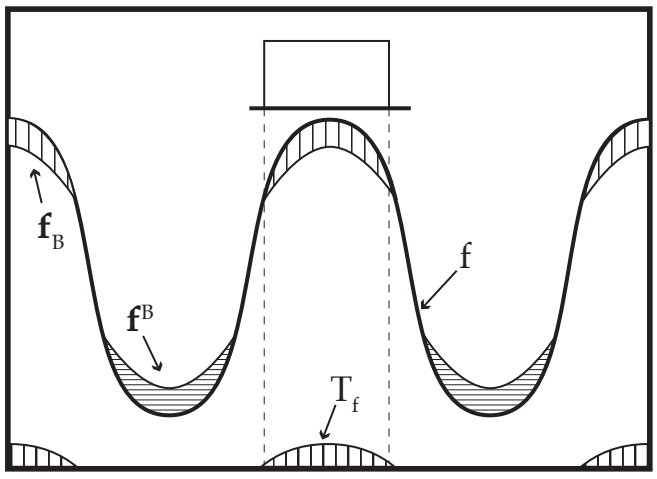


FIGURE 3.23 – *Ouverture, fermeture et chapeau haut de forme blanc d'une image en niveaux de gris. D'après Callot* et al. *(1994)*

De nombreux autres outils fondés sur les principes de la Morphologie Mathématique existent, parmi lesquels on peut nommer le *filtre automedian par reconstruction*, qui rehausse les contrastes locaux sans lisser les niveaux de gris et,

donc, sans faire disparaître les contours des objets les plus fins. Il peut s'écrire ainsi :

$$AutomedianRec(Im) = inf(sup(Im, inf(OR.CR.OR(Img), C.O.C(Im))), sup(OR.CR.OR(Im), C.O.C(Im)))$$

avec

Im	:	l'image à traiter
OR	:	ouverture par reconstruction
CR	:	fermeture par reconstruction
inf	:	compare deux images point à point et retient, pour chaque pixel, la plus petite valeur
sup	:	compare deux images point à point et retient, pour chaque pixel, la plus grande valeur

La richesse des outils disponibles a permis d'envisager un certain nombre d'applications, même si on peut regretter que l'application des méthodes de la Morphologie Mathématique soit, aujourd'hui encore, relativement marginale dans les géosciences.

3.3.1.3 Applications de la Morphologie Mathématique et évaluation qualitative

Initialement développée pour répondre à des besoins d'analyse de la structure des matériaux, la MM a progressivement été utilisée dans des champs les plus variés. Elle est, en particulier, fréquemment employée en analyse d'imagerie médicale pour la détection et la caractérisation de cellules, de bactéries, etc. (Ballarò *et al.*, 2008). En télédétection appliquée aux géosciences ou aux sciences humaines et sociales, son utilisation reste relativement confidentielle, alors que la diversité de ses applications potentielles plaide en sa faveur.

Ainsi a-t-elle été utilisée pour cartographier un réseau de canaux d'irrigation et en identifier la structure, dans une perspective archéologique (Debaine *et al.*, 1988). Elle a permis d'étudier la morphologie urbaine avec plus de précision que les méthodes d'analyses spectrales (Benblidia *et al.*, 2006, Kombé et Assako Assako, 2007). Dans le domaine de la télédétection appliquée à la gestion de crise en milieu marin, la MM apporte également un surcroît d'efficacité (Kanaa *et al.*, 2004). Elle est également utilisée en écologie du paysage, comme aide à la cartographie automatique (Vogt *et al.*, 2007).

Cette revue illustre la plasticité des méthodes de la MM qui en fait un atout dans une perspective de suivi : le jeu d'outils permet, potentiellement, d'étudier un très grand nombre d'objets divers. La robustesse des résultats est soulignée dans la plupart des études. La comparaison entre la cartographie par photo-interprétation et la cartographie automatique par MM des aires de déflation du Grand Erg occidental, effectuée par Callot *et al.* (1994), révèle une erreur qui ne dépasse pas 11 %, dans un contexte où la détection est complexe.

Une fois l'objet d'intérêt identifié et paramétré, les outils permettent de structurer l'image et, donc, de hiérarchiser l'information qu'elle contient. L'interprétation et l'évaluation des résultats sont donc facilitées. La MM permet de ne pas séparer l'interprétation et le traitement de l'information. Lors de chaque étape, en effet, l'opérateur fait appel à son expertise thématique pour valider

le résultat obtenu et décider de l'étape suivante. La manipulation d'un ES dont la taille varie introduit un facteur scalaire contrôlé qui renforce l'efficacité et la pertinence de l'analyse.

La simplicité de la plupart des opérateurs et la grande place que tient la logique dans l'élaboration des séquences sont des atouts supplémentaires. Une fois les objets extraits, il est enfin possible de travailler sur les caractéristiques de ces objets en passant en mode vectoriel, pour affiner encore, si besoin, la procédure. Pour toutes ces raisons, la MM nous paraît particulièrement adaptée à l'analyse d'images THR de diverses natures et résolutions pour l'étude des FEO et de leurs paramètres de contrôle.

Le logiciel utilisé pour développer les analyses d'images en MM est *Aphelion*™, édité par la société Adcis. Le langage utilisé pour l'écriture des macros est le *BasicScript*, un langage proche du *VisualBasic*.

3.3.2 Rugosité et topographie à partir d'images en plan

La présentation de la base de données d'imagerie utilisée dans ce travail a montré que l'information concernant le relief n'est disponible qu'à une résolution incompatible avec les échelles des FEO ou de la végétation. Pourtant, nous avons montré dans le premier chapitre en quoi la dimension verticale est essentielle dans l'étude de la morphodynamique éolienne. C'est pourquoi il apparaît nécessaire d'essayer d'extraire cette information de la façon la plus rigoureuse possible. En cela, la très haute résolution spatiale, en particulier des images du *Pixy*, se révèle à nouveau très utile.

3.3.2.1 Les contraintes de la réalisation de MNT sub-métriques

Les MNT disponibles gratuitement ont des résolutions incompatibles avec l'analyse de petits objets, d'ordre centimétrique à métrique. Les applications du LIDAR sont de plus en plus nombreuses et permettent d'obtenir des MNT centimétriques, mais cette méthode reste relativement onéreuse et difficile à mettre en œuvre de façon répétée. Une autre possibilité serait de générer des couples stéréoscopiques à partir des images du *Pixy*, mais Lejot (2008) a montré la difficulté de la méthode et elle ne pouvait s'appliquer aux conditions dans lesquelles nous avons réalisé nos clichés.

Une dernière possibilité est celle offerte par les principes de la photogrammétrie. Ils permettent de générer des MNT à une échelle très fine, à partir de photographies calibrées, que l'on appelle aussi Modèle Numérique de Surface (MNS). La méthode consiste dans un premier temps à calibrer l'appareil photographique numérique en prenant des vues sous différents angles de trois ensembles de cibles, puis à photographier la surface à modéliser, préalablement quadrillée avec le même type de cibles. La superficie couverte n'est pas limitée, dans la mesure où l'on peut voir au moins un jeu de cibles dans l'emprise de l'image obtenue.

Les images sont ensuite traitées par informatique à l'aide de plusieurs logiciels dont le principal est celui spécialisé en photogrammétrie. Il va générer

des points de coordonnées x, y et z (altitude) couvrant l'ensemble de la surface de l'image. Les cibles servent au logiciel à calibrer les déformations de l'appareil photographique et à calculer les différents angles de prises de vues. Parmi toutes les images prises, le logiciel retient les deux meilleures pour générer un MNS par photogrammétrie.

Les contraintes de la méthode tiennent à la logistique, puisqu'il faut transporter des planches pour les cibles qui doivent être imprimées sur un tissu spécial pour ne pas réfléchir trop de lumière et saturer l'image. La calibration de l'appareil doit de plus se faire sans que les cibles ne bougent, condition parfois difficile à obtenir.

Actuellement, les modélisations de surface les plus fines se font au laser mais Rieke-Zapp *et al.* (2001) ont comparé les deux méthodes, à l'avantage de la photogrammétrie qui se révèle plus rapide en termes d'acquisition des résultats, plus pratique pour couvrir de grandes surfaces (le laser limitant la surface traitée à 16 m²) et qui permet d'obtenir une meilleure précision relative.

On peut également envisager d'appliquer cette méthode à des images de paramoteur pour analyser des rugosités plus grossières. Il faudrait pour cela mettre au point un protocole de vol avec des pistes disposées au sol permettant de diriger le paramoteur vers les zones à traiter, préalablement quadrillées par des cibles. Ainsi un suivi de l'ensablement, à différents moments d'une même année et d'une année à l'autre, peut être possible pour des sites expérimentaux. Cette approche a été tentée avec un certain succès pour le suivi de l'érosion dans des Badlands, en France (Jacome *et al.*, 2007). Malgré tout, elle suppose une certaine logistique difficile à mettre en œuvre ailleurs que dans des sites préparés à l'avance et on rejoint alors la limite d'exploitation du *Pixy* décrite précédemment. C'est pourquoi nous avons essayé de développer des approches permettant d'obtenir une information tridimensionnelle directement par l'analyse des images à notre disposition.

Compte tenu des conditions requises pour faire voler le *Pixy*, les clichés ont été réalisés soit le matin, soit le soir, lorsque le soleil projette des rayons obliques sur la surface terrestre. De ce fait, les ombres portées des objets capturés : arbres, buissons, dunes, etc. sont nombreuses sur les images obtenues. Généralement considérées comme des obstacles à l'analyse (Lejot, 2008), les ombres ont ici été envisagées comme un indicateur permettant de détecter une information non directement visible dans une image en plan : la rugosité induite par la végétation et la micro-topographie liée aux formes éoliennes.

3.3.2.2 Principes de l'estimation de la hauteur d'un objet grâce à la longueur de son ombre portée

Le principe d'une telle démarche est simple : les rayons du soleil frappent la surface de la terre avec un certain angle. Le calcul de cet angle et la mesure de l'ombre permettent de calculer la hauteur de l'objet considéré. En pratique c'est un peu plus complexe : l'angle d'incidence des rayons du soleil dépend du lieu, de l'heure, mais aussi du relief de la zone et de la forme de l'objet qui influencent la projection des ombres sur le sol.

La forme des obstacles dans leur dimension verticale joue également un rôle sur cette projection. Dans l'illustration de la méthode que nous proposons ici, nous nous intéressons aux obstacles végétaux présents dans les sites de travail sous forme de buisson. Leur forme dans un plan vertical peut être approximativement comparée à une portion d'ellipse (Escadafal, 1989, Marticorena *et al.*, 2006), comme l'illustre la figure 3.24.

FIGURE 3.24 – *Inscription d'un buisson de* Retama rætam *dans une portion d'ellipse*

Si l'on peut rapprocher les objets d'une forme géométrique, on peut alors envisager de faire des calculs de hauteur. La figure 3.25 résume les données du problème qui renvoie à de la géométrie de base (trigonométrie).

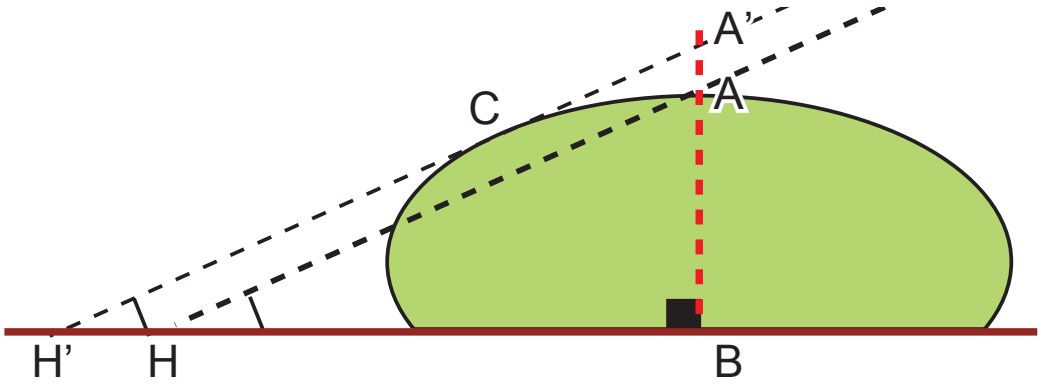


FIGURE 3.25 – *Schéma illustratif du raisonnement suivi pour calculer la hauteur des objets en fonction de la longueur de leur ombre avec les images du* Pixy

A	:	sommet de l'objet considéré ;
B	:	projection de A sur l'horizontale ;
C	:	point de l'ellipse intersecté par le rayon du soleil correspondant à l'ombre portée ;
(HB)	:	plan horizontal schématisant le sol ;
$\widehat{BHA}$	:	angle d'incidence des rayons du soleil ;
BH	:	longueur théorique de l'ombre portée ;
BH'	:	longueur observée, dans les images, de l'ombre portée ;
BA	:	hauteur réelle de l'objet ;
BA'	:	hauteur calculée à partir de la longueur observée de l'ombre.

Il peut être nécessaire de corriger les résultats en fonction de la pente générale de la zone. En effet, les calculs donnent l'angle des rayons du soleil par rapport à l'horizontale. Si la pente est significative, elle entraîne un biais : l'ombre portée sera plus longue si la pente est descendante dans la direction de l'ombre et, inversement, elle sera plus courte si la pente est ascendante. Dans les applications qui seront présentées ici, la correction des longueurs des ombres ne sera pas nécessaire. Les pentes des secteurs étudiés sont relativement faibles, hors versants. Le biais qu'elles représentent, compte tenu des hauteurs des objets considérés, donc des longueurs des ombres portées, peut être considéré comme négligeable. De plus, les calculs nécessaires à la correction ajoutent au potentiel d'erreur et pourraient donc être contre-productifs.

En revanche, la figure 3.25 montre un biais important lié à la forme générale des objets mesurés, allongés et aplatis dans une direction. Les rayons du soleil n'intersectent pas le sommet du buisson mais plus probablement le point d'inflexion de la courbe C. Les calculs donnent donc une hauteur majorée BA' qu'il faut corriger du rapport AA'/BA' en application du théorème de Thalès. Pour estimer ce rapport, nous avons dessiné la portion d'ellipse circonscrite à un buisson représentatif et deux rayons d'angle 32°. La correction à adopter est plus ou moins significative suivant l'angle des rayons. Elle l'est particulièrement avec cette valeur de 32°, elle le serait moins avec une valeur plus élevée (un soleil plus bas à l'horizon). Ainsi la valeur de correction est-elle contingente : elle dépend de l'angle des rayons du soleil, donc de l'heure de prise de vue et de la position du site. Avec ces données, le calcul du rapport entre les deux hauteurs donne une valeur de l'ordre de 0,7. Il est bien entendu que cette correction ne supprime pas la marge d'erreur mais la réduit considérablement.

3.3.2.3 Le calcul de l'angle des rayons solaires

Une fois les éventuelles corrections apportées aux valeurs des longueurs des ombres, il faut calculer les paramètres nécessaires : angle d'incidence par rapport à l'horizontale, ou hauteur solaire, déclinaison et angle horaire. La présentation qui suit, et les calculs effectués par la suite, s'appuient sur les échanges fructueux avec V. Bourdin, ingénieur de recherche au Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI) [12].

La hauteur solaire (H) vérifie la formule suivante :

$$\sin(H) = \cos(L) \times \cos(d) \times \cos(A_H) + \sin(d) \times \sin(L) \tag{3.1}$$

avec

L	:	la latitude du lieu
d	:	la déclinaison
A_H	:	l'angle horaire

La déclinaison correspond à l'angle entre les rayons du soleil et l'équateur

12. Et sur les documents qu'il rend disponibles à l'adresse : `http://perso.limsi.fr/Individu/bourdin/master/`

au jour considéré. Cet angle varie entre - 23°27′ et + 23°27′. Une approximation de la déclinaison est possible à l'aide de la formule suivante :

$$d = 23,45 \times \sin(2 \times \pi \times \frac{(J + 284)}{365}) \tag{3.2}$$

J correspondant au numéro du jour dans l'année, 1 pour le 1er janvier et 365 pour le 31 décembre

L'angle horaire (A_H) est l'angle entre la projection des rayons solaires et la direction sud. Il varie de 15° par heure et vaut par convention 0° à midi. La valeur de l'heure retenue doit toutefois être corrigée en fonction de la longitude du site d'étude et des éventuels choix politiques, comme l'application d'une heure « d'été ». Après avoir calculé la longueur de l'ombre corrigée et la hauteur solaire, on peut estimer la hauteur de l'objet projetant une ombre par trigonométrie. En effet, en se reportant aux données de la fig. 3.25, on a :

$$\tan(\widehat{BHA}) = \frac{BA}{BH} \tag{3.3}$$

D'où

$$BA = \tan(\widehat{BHA}) \times BH$$

Cette méthode peut compléter utilement les mesures que l'on peut effectuer à partir de la longueur de la pente croulante d'une forme éolienne (*cf.* chap. 1, sec. 1.2.3.2). L'emboîtement scalaire, sans solution de continuité, au moins pour certains objets, entre les images du *Pixy* et les images de *QuickBird*, permet d'envisager de généraliser une approche de la rugosité induite par la végétation, en appliquant le calcul de la densité d'obstacles présenté au chap. 1. Cet emboîtement, ainsi que la très grande quantité d'informations susceptibles d'être extraites des images dont nous disposons, rendent nécessaire le recours à un Système d'Information Géographique (SIG) pour la compréhension et la modélisation des espaces étudiés.

3.3.3 Approches synthétiques des résultats

3.3.3.1 De l'intérêt d'un SIG

La THR spatiale des images, associée à des traitements orientés–objets, fournit une masse d'information considérable. Comme nous le montrerons dans le chapitre suivant, l'extraction des buissons depuis l'image *QuickBird* du site de Rass Elkamen Labiadh produit plus de 800 000 entités, pour lesquelles différents paramètres morphologiques sont ensuite calculés. La gestion d'une telle base de données pose problème.

De plus, le fait de positionner l'analyse à l'échelle de l'objet élémentaire du paysage, par exemple le buisson ou la FEO, produit un résultat qui n'est pas immédiatement interprétable à l'échelle du diagnostic paysager. Il est nécessaire de mettre au point une démarche dite de « bottom–up » (Escadafal, 1989) qui permette de réaliser une synthèse interprétative des résultats.

Pour réaliser cet objectif, la constitution d'un SIG apparaît nécessaire. Outre sa fonction initiale : permettre de croiser des couches d'informations de sources et de natures diverses partageant une même référence spatiale, il est un outil de modélisation efficace. En particulier, la possibilité de convertir les résultats obtenus en mode RASTER au format vectoriel ouvre des perspectives intéressantes. On peut également obtenir la localisation précise, sous forme de coordonnées [X,Y] de chaque objet.

Le SIG utilisé a été réalisé sous ARCGIS® 9.3 (ESRI™). Un certain nombre de traitements, en particulier les changements de systèmes de coordonnées, ont été réalisés sous ENVI™ 4.5 (EXELIS INC.).

3.3.3.2 La fonction K de Ripley

Les coordonnées extraites du SIG peuvent être analysées suivant la méthode de Ripley, méthode d'analyse des motifs ponctuels utilisée, en particulier, en écologie du paysage (Haase, 1995). Une description détaillée de la fonction K de Ripley peut être consultée dans Picard et Bar-Hen (2002). Celle-ci consiste à recenser, à partir d'un point donné de l'espace, la proportion des autres points qui tombent à l'intérieur de classes de distances définies en faisant varier le rayon r d'analyse centrée sur le point étudié.

Des considérations de précisions d'analyse conduisent à corriger certains effets de bord dûs à la compilation des fréquences dans un cercle de distances. Le résultat en sortie est une courbe, représentant les valeurs de la fonction de Ripley pour chaque distance analysée. Cette courbe est ensuite comparée à une enveloppe de valeurs, correspondant aux probabilités d'observation de fréquence dans le cas de distribution aléatoire du phénomène modélisé. Quand la courbe est au dessus de l'enveloppe de confiance, on considère que le motif ponctuel est agrégé, quand elle est en dessous, le motif ponctuel est considéré comme régulier.

Cette méthode, décrite dans le cas d'un motif de point uni-marqué, c'est-à-dire décrivant la répartition d'un seul type d'individu, peut être étendue à un motif bi-marqué, c'est-à-dire décrivant la répartition de deux types d'individus. On étudie alors une fonction appelée *pair correlation function* (PCF) (Stoyan et Stoyan, 1994), qui permet d'étudier une éventuelle répulsion ou attraction entre deux distributions spatiales de points. Des valeurs de PCF supérieures à 1 suggèrent une attraction entre les deux phénomènes étudiés, des valeurs inférieures à 1 suggèrent une répulsion.

Cette approche de statistique spatiale a été testée dans ce travail en utilisant le logiciel libre *R* (R Development Core Team, 2011), dont le module *spatstat* propose tous les outils nécessaires à son application, ainsi que la documentation nécessaire à l'interprétation des résultats.

3.3.3.3 Analyse par mailles

On peut également modéliser la répartition spatiale d'un ensemble d'objets individuels en les agrégeant au niveau d'une trame pré-définie correspondant à

une niveau d'échelle supérieur. Les informations obtenues au niveau des objets sont compilées pour chaque maille. On obtient ainsi un résultat synthétique, qui permet un changement d'échelle tout en réduisant les incertitudes liées au transfert.

Dans certains cas, cette modélisation peut se faire en prenant comme maille, irrégulière, une unité homogène du paysage identifiable. La méthode, mise au point dans des travaux précédents (Venard, 2008), permet par exemple de modéliser l'ensablement et les pratiques agricoles à l'échelle des parcelles d'oliviers (fig. 3.26). Dans cet exemple, les parcelles ont été digitalisées par photo-

FIGURE 3.26 – *Parcelles agricoles regroupées en familles d'après les résultats d'une classification ascendante hiérarchique. Secteur de Sidi Makhlouf, près de l'IRA de Medenine*

interprétation pour servir de support à l'analyse synthétique. La même démarche a été appliquée aux parcelles de l'oliveraie de Dar Dhaoui.

L'analyse par mailles, régulières ou non, permet de croiser les informations extraites depuis les images, à l'échelle des objets, avec des informations externes, par exemple issues de l'analyse du MNE, ainsi que des cartes thématiques disponibles sur les sites d'étude. Ainsi pouvons-nous évoquer la carte des ressources en sols de la Tunisie, établie par Escadafal et Mtimet (1981), à l'échelle 1 : 200 000 pour les données pédologiques.

Enfin, le résultat, vectoriel, d'une analyse par maille, dans le cas d'une trame régulière, peut être converti en RASTER et donner lieu à des comparaisons avec des images satellitales de résolution plus grossière, de type LAND-

SAT par exemple. Ainsi l'objectif de réduction des incertitudes liées au transfert d'échelles peut-il être poursuivi.

Conclusion du chapitre

Cette présentation des méthodes peut apparaître quelque peu abstraite, mais c'est délibérément que nous avons séparé les concepts méthodologiques des applications concrètes qui en ont été faites. Notre travail s'articule en effet essentiellement autour de questions méthodologiques. Le chapitre suivant présentera donc ces applications, que nous commenterons tout autant que les résultats qu'elles auront permis d'obtenir.

D'autres approches auraient pu être explorées, en particulier les méthodes de classifications orientées–objets qui se développent avec la multiplication des sources d'images THR. La simplicité et l'efficacité des outils de la Morphologie Mathématique, ainsi que le fait que les objets qui nous intéressent se distinguent davantage par leur forme que par leurs caractéristiques spectrales, nous ont conduit à privilégier cette voie. Ce choix contribuera peut-être aussi à diffuser les potentialités de ces outils dans la communauté des géographes.

Le dernier chapitre de ce mémoire présente donc les applications, pour les sites de la Tunisie présaharienne, des méthodes qui ont été retenues. Ces applications se déclinent à différentes échelles et c'est à travers ce prisme scalaire que nous essaierons d'en évaluer l'intérêt et la qualité.

Deuxième partie

Applications en Tunisie pré-saharienne

Chapitre 4

L'échelle stationnelle

Dynamiques et modelés éoliens associées

Sommaire

4.1 Les vents en Tunisie pré-saharienne 157
4.1.1 Du littoral à l'intérieur des terres 157
4.1.2 La variabilité temporelle des DPS 160
4.1.3 La station de Dar Dhaoui 164
4.2 La densité granulométrique des EDS 167
4.2.1 Protocole suivi pour les échantillons photographiques . 167
4.2.2 Application à la compréhension des mécanismes locaux 171
4.3 L'approche par les transects d'EDS 177
4.3.1 Évolution des EDS le long d'un transect et dans le temps 178
4.3.2 Les DPS des périodes étudiées 180
4.3.3 Synthèse 182
Conclusion 184

Introduction

Les chapitres 1 et 2 ont posé les fondements conceptuels de l'approche que nous souhaitons développer pour répondre aux problématiques posées par l'étude de la morphodynamique éolienne à l'échelle des formes éoliennes d'obstacles. Nous avons posé la nécessité de nous appuyer sur des données de vent compatibles avec une approche par les DPS et élaboré une base de données dans ce sens. Nous avons également montré l'inadéquation de nos problématiques avec des images satellites de résolution moyenne. Nous nous appuyons donc sur des images très haute résolution et ce choix oriente nécessairement les méthodologies d'analyse utilisées.

Le premier chapitre de cette partie, consacrée aux résultats de nos approches, présente donc une application de ces méthodes à l'analyse des déplacements

potentiels sableux de la Tunisie pré-saharienne, organisée autour d'une approche stationnelle. Même si nous essayons de généraliser les résultats obtenus, ces derniers restent ponctuels et leur portée générale n'a qu'une valeur indicative, appuyée cependant sur la longueur des séries disponibles.

En revanche, les résultats obtenus pour les données de la station de Dar Dhaoui ont une moins grande représentativité temporelle, en raison de la brièveté de la série. Leur association aux images, aux prospections de terrain et aux résultats des études précédents sur le site leur confère néanmoins un intérêt particulier pour une étude locale d'un site mieux documenté que d'autres.

4.1 Les vents en Tunisie pré-saharienne

L'analyse des données météorologiques et, en particulier, des données de vents, permet de dresser un tableau par station et, ainsi, de présenter de façon synthétique le phénomène éolien à l'échelle de la Tunisie pré-saharienne. L'aspect diachronique sera également présenté et, enfin, nous analyserons les résultats à l'échelle locale de la station de Dar Dhaoui.

4.1.1 Du littoral à l'intérieur des terres

La méthode des DPS permet de comparer des données entre plusieurs stations, sous réserve qu'elles répondent aux mêmes critères techniques, en particulier la hauteur des anémomètres et le rythme d'échantillonnage, ce qui est le cas pour les données dont nous disposons.

Le tableau 4.1 donne un aperçu des résultats qui sont présentés sous la forme des roses en fig. 4.1.

Tableau 4.1 – *Les déplacements potentiels sableux en Tunisie pré-saharienne*

Stations	**CT**	**DR**	**MR**	**CM**
Gafsa	858	88	518	0,6
Gabes	238	34	22	0,1
Kebili	1769	57	1443	0,8
Medenine	324	321	74	0,2

On constate que deux catégories peuvent être définies : d'une part les stations du littoral et, d'autre part, les stations plus continentales. Les roses de ces dernières, Gafsa et Kebili, sont du type **unimodal étroit** et traduisent une forte concentration du potentiel de capacité de transport. En revanche, les roses des stations littorales, Gabes et Medenine, sont du type **complexe**. Aucune direction préférentielle ne se dégage. Cette distinction semble légitimée par la comparaison entre les roses de Gabes et Medenine. On observe en effet que le coefficient de migration est significativement plus important à Medenine qu'à Gabes. Or, la station de Medenine est située plus à l'intérieur des terres que celle de Gabes qui est en position côtière.

La figure 4.1 invite également à considérer un deuxième facteur d'explication possible des différences entre les deux catégories de stations. La carte met en évidence le rôle probable de la disposition du relief. Elle semble, en effet, confirmer l'hypothèse de l'existence de couloirs de vents, particulièrement dans le cas de Gafsa, qui se situe au débouché d'un couloir formé par deux reliefs marqués. Ainsi le contexte géographique peut-il expliquer une partie des différences entre les stations.

On peut enfin remarquer que les sites où nous travaillons sont, à l'exception de celui de Rass Elkamen Labiadh, plutôt proches du littoral. Ces sites sont,

rappelons-le, historiquements étudiés dans le cadre du suivi de la désertification, en particulier du point de vue éolien. Il est intéressant de comparer leurs dynamiques respectives avec celle d'autres sites dans la mesure où cela montre que ce ne sont *a priori* pas les endroits où la dynamique éolienne est la plus forte. Cette observation peut être affinée par l'analyse des variations temporelles de la dynamique éolienne.

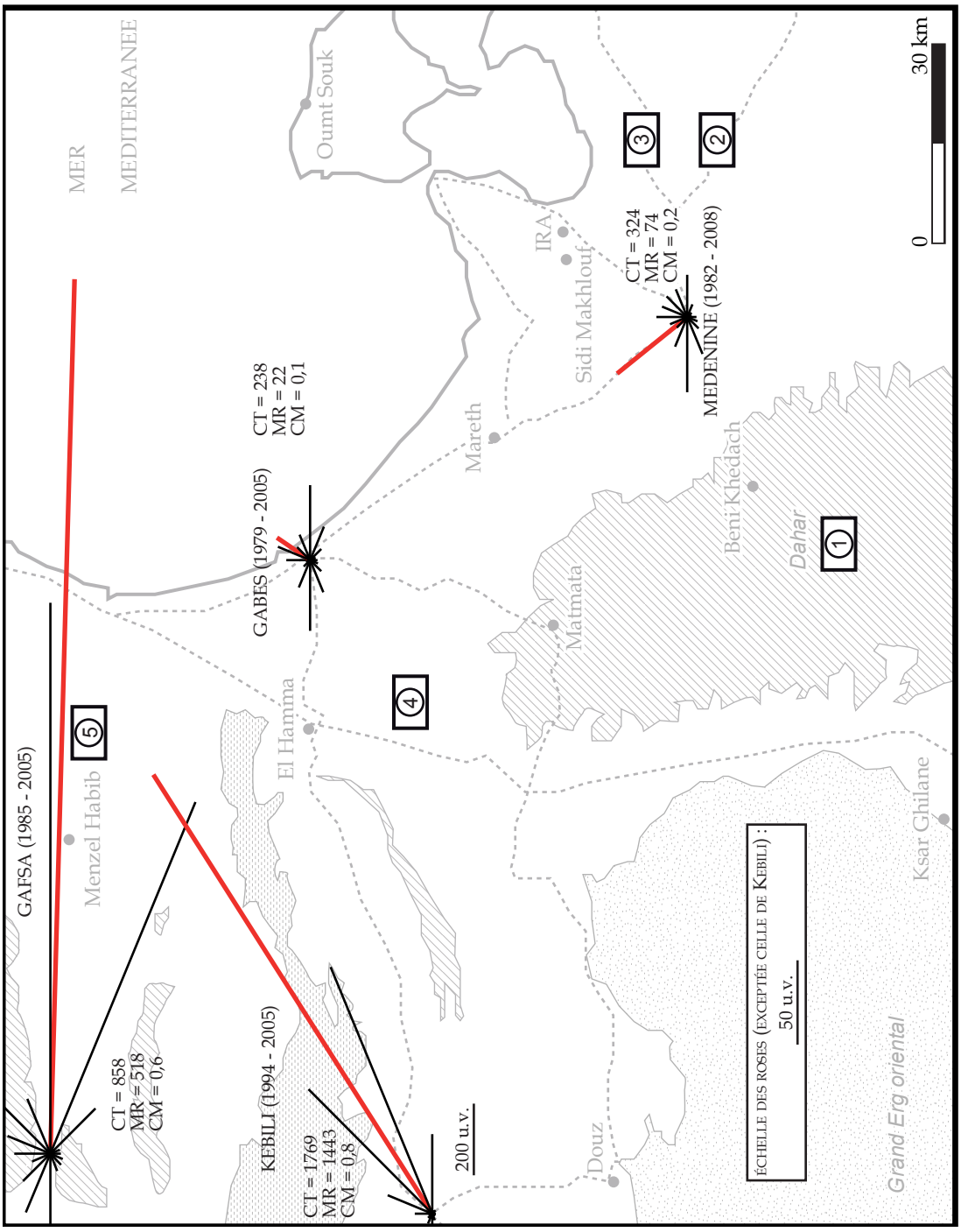
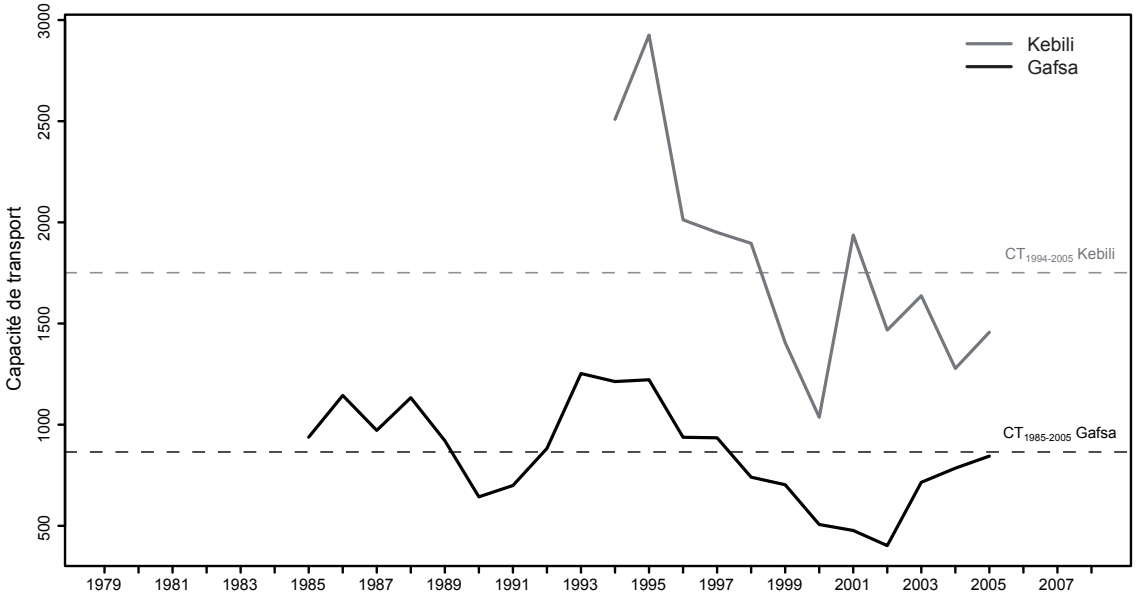


FIGURE 4.1 – *Les roses des déplacements potentiels sableux des stations de la Tunisie pré-saharienne pour la période 1979-2008*

4.1.2 La variabilité temporelle des DPS

La figure 4.2 compare deux-à-deux les évolutions inter-annuelles des DPS des stations de la Tunisie pré-saharienne. Ce regroupement repose sur la différence entre le littoral et l'intérieur des terres. Celle-ci écrase les évolutions de Gabes et Medenine dans une figure unique. En revanche, le fait de présenter séparément les deux groupes permet de bien lire la dynamique de chacun.

(a) sur le littoral



(b) à l'intérieur des terres

FIGURE 4.2 – *Évolution inter-annuelle des capacités de transport des stations de la Tunisie pré-saharienne*

Globalement, les deux figures montrent que la capacité de transport poten-

tielle connaît une forte variabilité inter-annuelle, sans commune mesure avec ce qui a pu être observé dans d'autres stations du pourtour saharien (Callot et Oulehri, 1996). Une telle variabilité conduit à reconsidérer la notion de risque éolien dans la région, puisque ce dernier doit se concevoir dans sa dimension temporelle et en relation avec d'autres facteurs de risque.

En fonction des stations, les variations sont plus ou moins prononcées. Kebili et Medenine présentent ainsi les plus forts écarts inter-annuels, tandis que les courbes de Gafsa et Gabes sont plus lisses.

Concernant les stations du littoral, on remarque que la courbe de Medenine est, hormis pour le début de la période, d'aspect sensiblement identique à celle de Gabes, mais décalée vers le haut. Cela peut, en partie, s'expliquer par la moins bonne qualité globale des données de Medenine qui ne comprennent pas d'enregistrements nocturnes, au contraire de celles de Gabes. La situation est identique pour Gafsa et Kebili, mais la différence entre les deux courbes est telle qu'elle ne peut s'expliquer seulement par le manque d'enregistrements nocturnes. Un point est commun aux quatre courbes : entre 1992 et 1997 [1], elles dépassent toutes la valeur de l'ensemble de la période, représentée par les pointillés.

Ce pic éolien peut être mis en relation avec l'importance plus grande donnée aux problématiques liées à l'action du vent pendant cette période. Auclair *et al.* (1996), Khatelli (1996), en particulier, insistent sur ce point. Le programme ROSELT est lancé au milieu des années 1990 avec le secteur de Menzel Habib comme observatoire-pilote, notamment sur les problèmes d'ensablement. On remarque également que pour Medenine et Gabes, qui sont, en général, des stations où les DPS sont faibles, cette période connaît des valeurs beaucoup plus fortes, allant jusqu'à plus du double de la valeur lissée sur 25 ans. On peut alors envisager que la dimension problématique, voire catastrophique de la dynamique éolienne soit limitée dans le temps, si elle est considérée du seul point de vue de la compétence du vent.

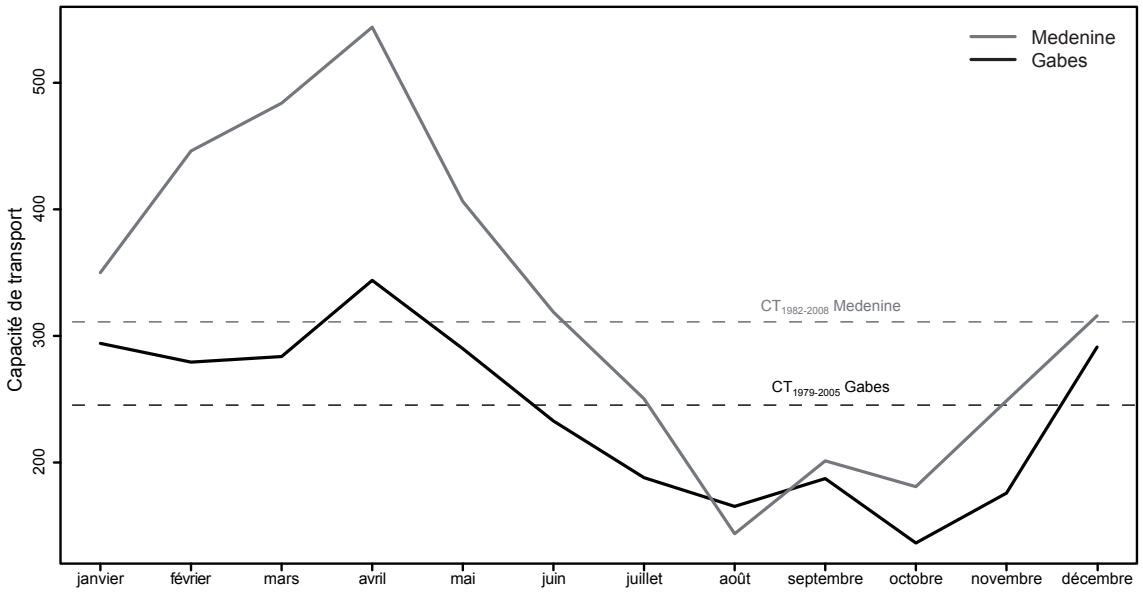
Ce pic de dynamique éolienne entre bien dans le cadre du modèle présenté au chap. 2 (fig. 2.16). On peut, en effet, envisager qu'il entraîne le passage d'un seuil après lequel la situation s'est dégradée sans que, toutes choses restant égales par ailleurs, elle puisse revenir au *statu quo ante*. Nous manquons de recul, mais il serait intéressant de voir si cette situation se répète de façon régulière et si on peut la relier à d'autres paramètres, comme par exemple les précipitations et la température [2]. Un tel contexte renforcerait l'argument selon lequel la rigidité d'un système de mise en valeur se heurtant à une variabilité importante des conditions du milieu est un des critères de définition de la désertification.

La variabilité temporelle des DPS est aussi présente à l'échelle mensuelle, comme l'illustre la figure 4.3. L'année-type peut ainsi être découpée en deux saisons, en prenant comme critère la valeur globale de CT de chaque station. Si ce découpage est valable pour les deux groupes, sa position dans l'année est, en revanche, décalée : la période de forte intensité commence et se termine plus

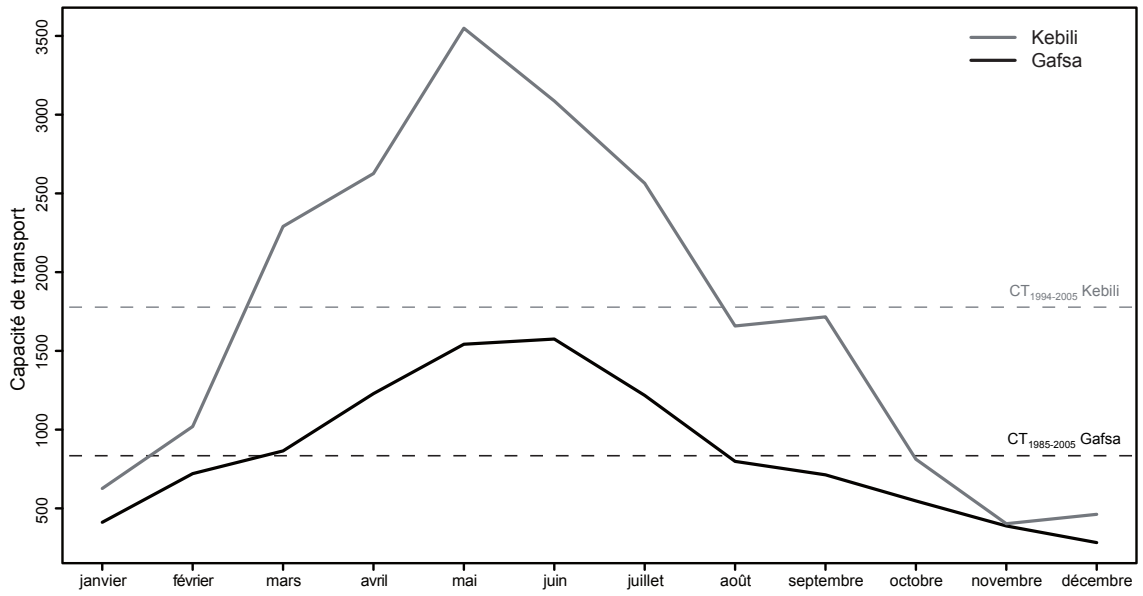
1. Entre 1994 et 1997 pour Kebili.

2. Les seules données à notre disposition, celles de la WMO, présentées sous forme de moyennes quotidiennes, ne sont pas concluantes de ce point de vue.

tard pour les stations de l'intérieur que pour celles du littoral. On remarque, en



(a) sur le littoral



(b) à l'intérieur des terres

FIGURE 4.3 – *Évolution mensuelle des capacités de transport des stations de la Tunisie présaharienne*

effet, que les courbes des CT mensuels passent au dessus de la ligne représentant la valeur globale de CT entre novembre et décembre à Gabes et à Medenine, et entre février et mars à Gafsa et à Kebili. Elles atteignent leur maximum en avril sur le littoral et entre mai et juin à l'intérieur des terres. Enfin, elles repassent en dessous de la valeur globale pendant le mois de juin à Gabes et Medenine et pendant le mois d'août à Gafsa et Kebili.

Ces remarques sont importantes dans la mesure où on peut mettre en relation cette variabilité des capacités de transport du vent avec les pratiques agricoles. Dans la région de Medenine, en particulier, Kardous (2005) indique que les sols cultivés en oliviers sont fréquemment labourés, au moins deux fois par an. Or, ces deux labours interviennent, en général, avant les pluies d'automne et au printemps. Cela signifie que les sols sont déstructurés, une première fois, juste avant le début de la période de forte capacité de transport du vent et, une seconde fois, au moment où cette capacité de transport atteint son maximum.

Cette déstructuration détruit les pavages de déflation qui ont pu se former et qui protégeaient le sol de l'érosion éolienne, comme nous l'avons montré au chap. 1. Certes, les précipitations, plus importantes sur la période, peuvent renforcer la cohérence des sols en augmentant les forces de capillarité, mais l'effet d'impact des gouttes peut aussi contribuer à déstructurer le sol. Kardous (2005) a ainsi montré que l'érosion éolienne était considérablement renforcée dans les quelques heures qui suivent le labour.

Il existe donc un faisceau de facteurs convergents, liés aux conditions du milieu comme aux usages des ressources, qui est favorable à l'érosion éolienne. Cela peut expliquer, au moins en partie, les problèmes rencontrés dans des secteurs où, en absolu et en instantané, on peut considérer que les valeurs de DPS ne sont pas particulièrement élevées. On peut compléter ces observations avec l'analyse du comportement du coefficient de migration (tab. 4.2). Ces valeurs

TABLEAU 4.2 – *Les coefficients de migration mensuels en Tunisie pré-saharienne*

Stations	jan.	fév.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Gabes	0,66	0,53	0,22	0,25	0,44	0,83	0,85	0,79	0,62	0,27	0,52	0,70
Medenine	0,64	0,61	0,39	0,15	0,25	0,67	0,47	0,65	0,41	0,13	0,52	0,75
Gafsa	0,19	0,23	0,47	0,44	0,74	0,86	0,93	0,86	0,76	0,68	0,19	0,32
Kebili	0,48	0,53	0,85	0,78	0,87	0,92	0,92	0,93	0,85	0,80	0,33	0,39

montrent que, au moins pendant le début de la période de forte capacité de transport, les coefficients de migration sont plus élevés que pour le reste de l'année. À Medenine, par exemple, décembre, janvier et février sont des mois à plus de 0,6 [3]. Les mois printaniers connaissent en revanche des valeurs plus faibles. Ainsi peut-on dire que le risque éolien atteint un maximum pendant la période hivernale, quand le labour intervient sur des sols déssechés et que le vent est à la fois plus compétent et plus « orienté ». En effet, lorsque les valeurs du coefficient de migration sont plus faibles, comme pendant le printemps, même si le vent mobilise des particules, elles ne sont pas transportées dans une seule direction et les pertes locales doivent être plus faibles.

Pour une fenêtre temporelle plus courte, les données de la station de Dar Dhaoui permettent de spécifier l'analyse sur un site précis pour lequel on dispose, par ailleurs, de données images.

3. Le CM du mois d'août est également élevé, en revanche la CT est plutôt faible.

4.1.3 La station de Dar Dhaoui

Comme nous l'avons montré au chap. 3, les données de la station de Dar Dhaoui sont davantage sujettes à caution. Les DPS obtenus sont fondés sur des moyennes. Nous avons cependant validé leur utilisation sous certaines conditions. Leur analyse présente un intérêt particulier en raison de leur résolution, puisque nous disposons d'une valeur par heure, et grâces aux possibilités de comparaison offertes par les images et les relevés de terrain disponibles pour le même site. Ainsi peut-on envisager de mettre en relation ces deux sources d'informations, exercice qui est plus incertain pour les autres sites.

L'évolution intra–annuelle des capacités de transport (fig. 4.4) suit la même tendance que celle de Medenine, avec un passage au dessus de la valeur globale de CT entre février et juin. La courbe est cependant moins régulière, ce qui peut être lié aux moyennes qui sont utilisées. Le maximum se situe en mars, avec un pic très prononcé. En effet, l'observation des données montre que l'on retrouve pour ce mois 9 observations, soit 0,6 % de l'échantillon, qui contribuent à 40 % de la valeur globale de CT. Ces 9 valeurs sont concentrées dans le quart S–O des directions, ce qui explique que la MR du mois de mars se situe dans cet intervalle. Cette observation confirme également le rôle prépondérant des vents les plus violents dans les déplacements sableux et met en lumière les apports spécifiques de l'approche par les DPS, par rapport à des approches par moyennes par directions (fig. 4.5).

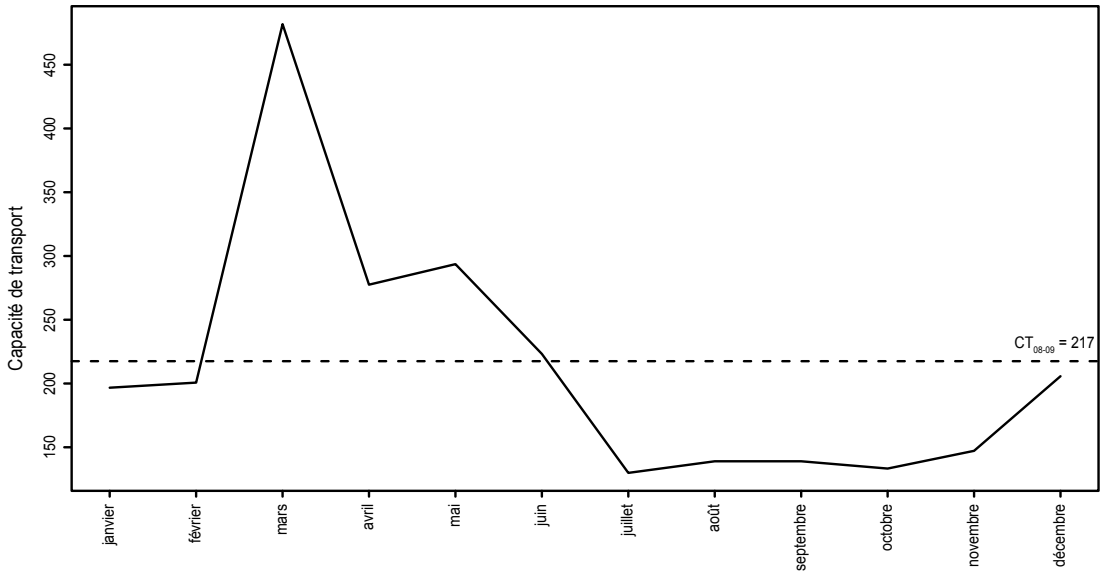


FIGURE 4.4 – *Évolution mensuelle des capacités de transport de la station de Dar Dhaoui*

L'analyse des roses mensuelles montre que les directions résultantes sont, elles aussi, réparties en deux classes de valeurs opposées. De novembre à avril, la migration résultante est comprise dans l'intervalle 260–300° et dans l'intervalle 40–80° de mai à octobre.

Cette saisonnalité des directions de migration résultante explique la faiblesse du coefficient de migration annuel. Ce dernier reflète cet effet d'antagonisme

entre deux directions dominantes qui sont concurrentes à l'échelle d'une année. Ainsi, dans le cas de Dar Dhaoui, qui est proche du cas de Medenine et de Gabes, une faible valeur annuelle de CM ne signifie pas que le potentiel de migration, à une échelle temporelle plus fine, n'est pas important.

La lecture des coefficients de migration mensuels (fig. 4.5) montre que, à l'exception des mois d'avril, mai, septembre et octobre, les valeurs sont plutôt élevées, toujours supérieures à 0,63. La représentation des 12 roses mensuelles met bien en évidence le balancement entre les deux directions dominantes. Elle permet de montrer également que les mois où les valeurs de CM sont les plus faibles sont précisément les mois où s'effectue la transition d'une direction dominante à une autre.

Nous pouvons ainsi affiner l'analyse des données régionale. Si les données de Dar Dhaoui confirment que les valeurs de DPS sont globalement faibles dans le secteur, le fait que les migrations soient concentrées dans deux directions est un élément supplémentaire à intégrer dans le faisceau de facteurs convergents que nous évoquions. À nouveau, ces résultats mettent en lumière un risque éolien accru, du fait de la concentration des déplacements potentiels pendant la période où, du fait de l'usage des ressources, la vulnérabilité du milieu est importante.

Enfin, la cohérence des résultats obtenus pour la station de Dar Dhaoui avec ceux de la station proche, à l'échelle régionale, de Medenine, permet de valider davantage l'utilisation des données, même sous forme de moyennes. Ainsi pourrons-nous tenter de corréler des orientations ou des morphologies observées sur les images locales avec les valeurs des DPS de la station. En effet, l'approche par les données météorologiques n'est pas suffisante, comme les développements des chapitres précédents l'ont montré, et il est important de définir d'autres indicateurs permettant d'estimer la capacité du vent à différentes échelles spatiales et temporelles.

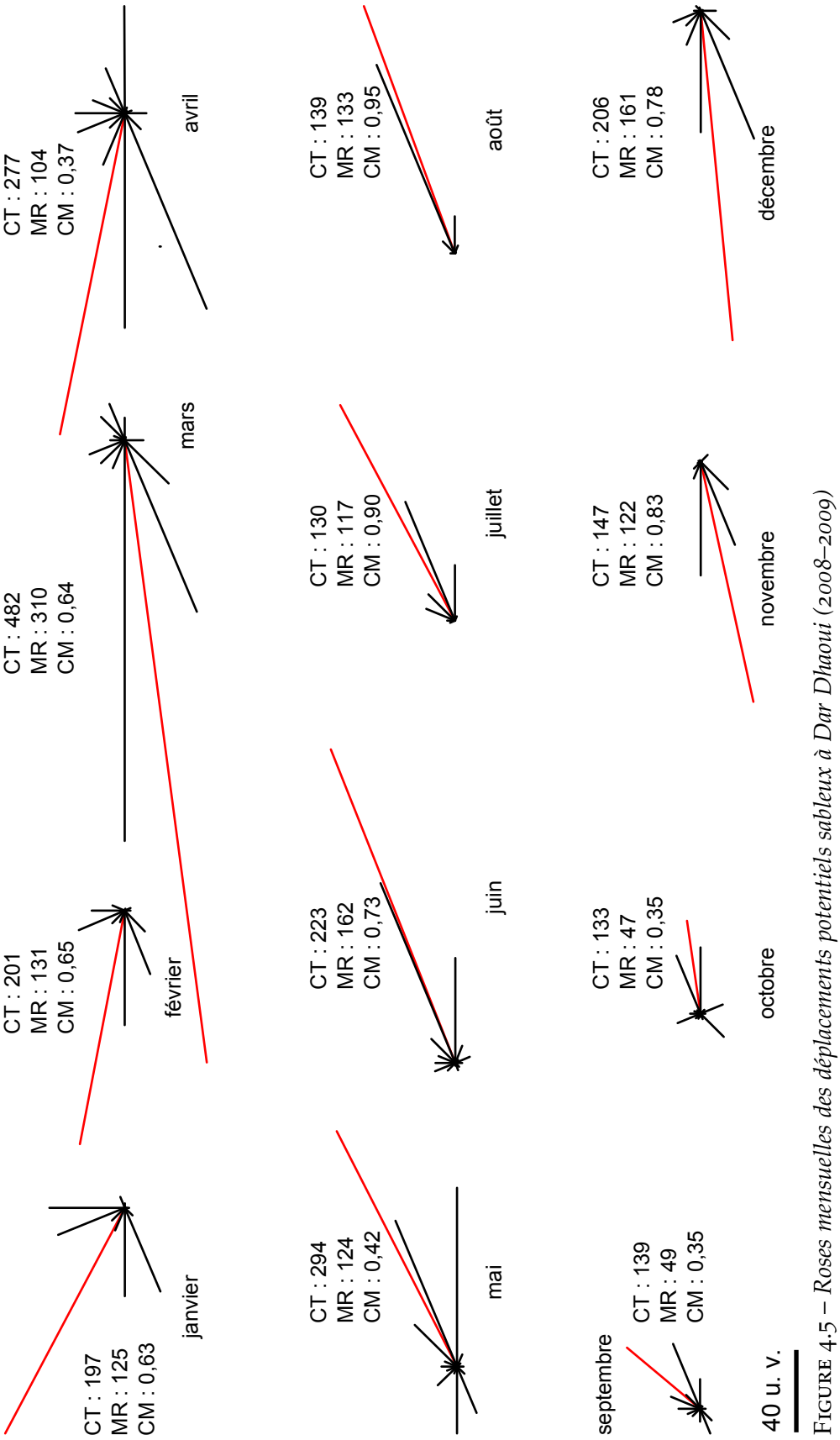


FIGURE 4.5 – *Roses mensuelles des déplacements potentiels sableux à Dar Dhaoui (2008–2009)*

4.2 La densité granulométrique des EDS

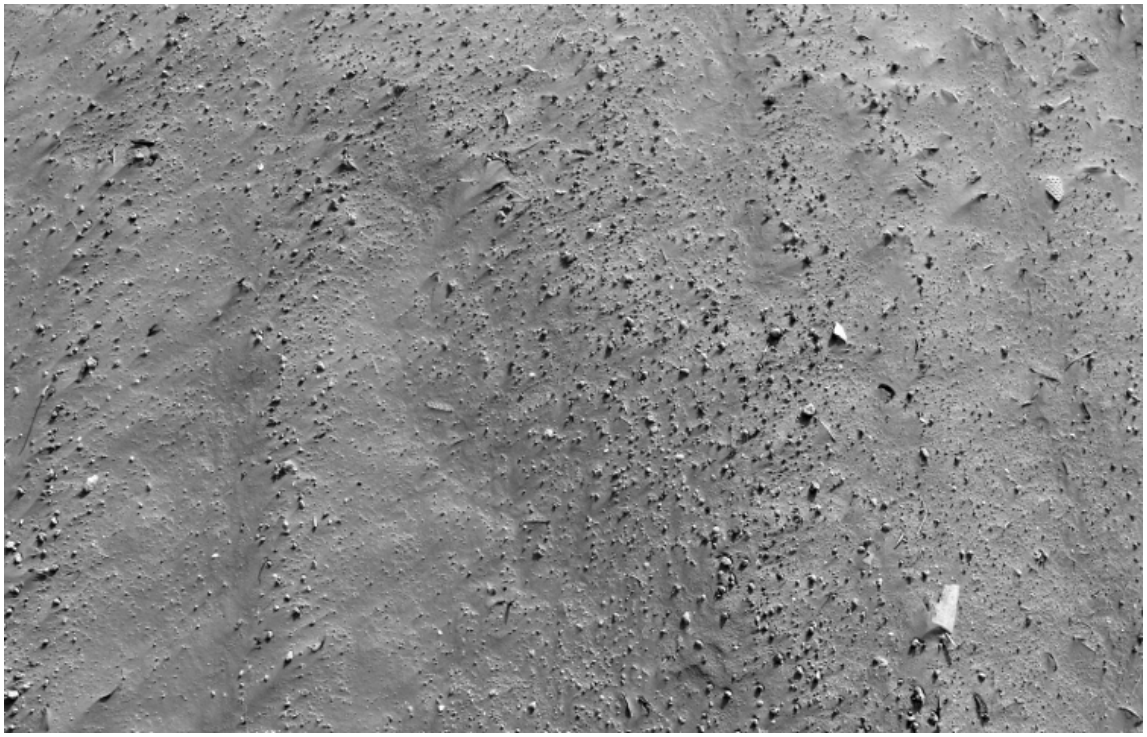
Nous avons montré dans les chapitres 1 et 2 que l'une des actions du vent sur les surfaces de régions sèches se traduisait par un tri des éléments grossiers. Ces surfaces de tri sont des éléments des EDS dont nous avons par ailleurs montré qu'ils constituaient des indicateurs pertinents et couramment utilisés dans le suivi des milieux. Au cours du chapitre 3, nous avons élaboré les contours d'une méthode de traitement semi-automatique d'images permettant d'analyser rapidement et de façon reproductible des échantillons non perturbés des états de surface. Cette section présente les résultats commentés de cette approche, appliquée à l'échelle stationnelle.

4.2.1 Protocole suivi pour les échantillons photographiques

Rappelons que la méthode s'appuie sur l'analyse d'images comparables à celle présentée en figure 4.6(a). À partir de ces images, et en appliquant des outils de la Morphologie Mathématique, on structure l'information qu'elles contiennent afin d'en extraire seulement les objets qui nous intéressent. Dans le cas présent, l'extraction des éléments de rugosité (fig. 4.6(b)) résulte d'un processus relativement simple. Les éléments de rugosité, pour l'essentiel des cailloux, graviers ou grains grossiers, qui ont un albédo particulièrement élevé. Ils sont donc, en particulier lorsqu'ils sont disposés sur une matrice sableuse, les régions claires des images, avec des valeurs radiométriques élevées voire maximales.

Nous avons donc appliqué un filtre *automedian* qui permet de rehausser les contrastes en conservant les formes des régions traitées. Un seuillage simple a ensuite été appliqué, dont on fait seulement varier les bornes pour adapter l'extraction aux cas particuliers qui peuvent se présenter ou bien au fait que, les images des différentes stations n'ayant pas été toujours capturées dans les mêmes conditions, des différences de luminosités peuvent engendrer des différences de valeurs radiométriques. L'image seuillée est enfin traitée avec un opérateur de MM, appelé *ImageHoleFill*, qui permet de combler des trous éventuels dans des régions d'une image binaire.

Le résultat est considéré comme satisfaisant. Tous les éléments de rugosité ne sont certes pas extraits et l'estimation quantitative est à la fois complexe et hasardeuse. En revanche, on peut évaluer thématiquement la qualité du résultat. En effet, on peut constater, d'une part, que la densité des éléments extraits correspond à la densité des éléments présents dans l'image initiale et, d'autre part, que la répartition spatiale de ces éléments est également la même. Cette répartition spatiale est enfin cohérente avec des observations réalisées par ailleurs. Dans le cas de l'image 4.6(a), on remarque que les éléments de rugosité suivent une répartition qui correspond, pour l'essentiel, à celle des billons plus ou moins effacés d'un ancien labour. Cela rejoint les conclusions de Kardous (2005) qui démontre que les sommets des billons connaissent la plus forte exposition à l'érosion, tandis que les sillons connaissent davantage des phénomènes de dépôt. Ainsi, peut-on considérer que la démarche que nous suivons n'altère



(a) image originale (dim. 1 305×836 mm)

(b) image binaire résultat du traitement par MM

FIGURE 4.6 – *Élément grossiers d'un échantillon d'état de surface. Exemple pris sur une station du site de Dar Dhaoui*

pas la qualité de l'information contenue dans les images, même si un protocole de comparaison quantifiée manque ici. Le résultat est probablement moins précis qu'un échantillonnage rigoureux, en particulier lorsque les pédologues creusent quelques centimètres sous la surface pour analyser la dynamique de tri. Cependant, la facilité de mise en œuvre de la méthode pour fournir rapidement des résultats est un atout certain.

Une fois que l'on a extrait les éléments grossiers dans une image binaire, il faut définir la meileure méthode à appliquer pour évaluer leur répartition granulométrique. La première question que l'on peut se poser est : que quantifier ? Il peut sembler évident de comptabiliser et de discrétiser le nombre d'objets extraits. Pourtant, ce n'est pas nécessairement le meilleur choix. Au plan strictement méthodologique, tout d'abord, quelle que soit la méthode retenue pour discrétiser, il existe le risque qu'elle génère des objets en cours de procédure. L'opérateur *érosion*, par exemple, déconnecte les liaisons étroites. Si un élément de rugosité est ainsi constitué de deux masses reliées par une liaison étroite, le traitement supprimant la liaison comptabilisera, en sortie, deux objets au lieu d'un seul.

On peut ensuite envisager la question sous l'angle thématique : quelle dynamique décrire ? La présence d'éléments grossiers dans un échantillon d'état de surface marqué par l'action éolienne peux être analysée de deux façons. La première consiste à évaluer l'efficacité du vent efficace en mesurant les proportions relatives d'éléments de petite et de grande taille. Cette analyse est plutôt valable lorsque les éléments de petite taille dominent.

La seconde approche considère le degré de protection du sol par les éléments grossiers qui le recouvrent. Elle s'applique davantage aux états de surface où les éléments de dimensions importantes dominent. Dans les deux cas, une approche comparant la surface initiale des éléments de rugosité et la surface supprimée par chaque opération paraît pertinente. Si une image présente beaucoup d'éléments de petite taille, alors la courbe des fréquences cumulées obtenue aura une pente très forte pour les premières opérations, et beaucoup plus faible ensuite. Au contraire, l'analyse d'une image avec peu d'éléments de taille importante produira une courbe plus régulière du début à la fin. En fonction de l'allure de la courbe, il sera ainsi possible de fournir une première interprétation de la dynamique éolienne enregistrée par l'échantillon d'état de surface.

La seconde question est celle de l'opérateur à utiliser. Parmi les outils de la Morphologie Mathématique, deux semblent adaptés aux traitements que nous voulons effectuer : *l'érosion* et *l'ouverture*. Mais le choix de travailler avec les surfaces nous conduit à retenir le second parce que *l'érosion* conduirait alors à un résultat relativement linéaire (chaque itération supprime une part de surface proportionnelle à la taille de son éléments structurant), alors que *l'ouverture* aura un comportement plus proche d'un tamis « physique » puisqu'après chaque érosion, une dilatation sera appliquée aux objets qui n'auront pas été supprimés. L'utilisation de *l'ouverture* permet donc d'intégrer les caractéristiques des objets.

Analyser les surfaces permet donc de discriminer les espaces où la déflation domine des espaces où l'accumulation domine. Une telle approche conduit à

étudier ce que l'on peut appeler la densité granulométrique de l'état de surface considéré : le pourcentage de la surface considérée qui est occupé par les éléments de rugosité. Cet indicateur primaire peut être complété en analysant sa répartition en classes, pour réaliser une courbe de synthèse.

Pour obtenir ce résultat, on calcule donc la surface initiale des éléments de rugosité, puis on applique à l'image binaire des *ouvertures* successives avec un ES de taille croissante. Après chacune des ouvertures, on calcule la surface n'ayant pas été supprimée et on peut ainsi établir des courbes de fréquences cumulées qui synthétisent l'information obtenue (fig. 4.7). L'axe des abscisses présente les ouvertures successives dont le rang peut être simplement converti en millimètres en utilisant le rapport scalaire de chaque image.

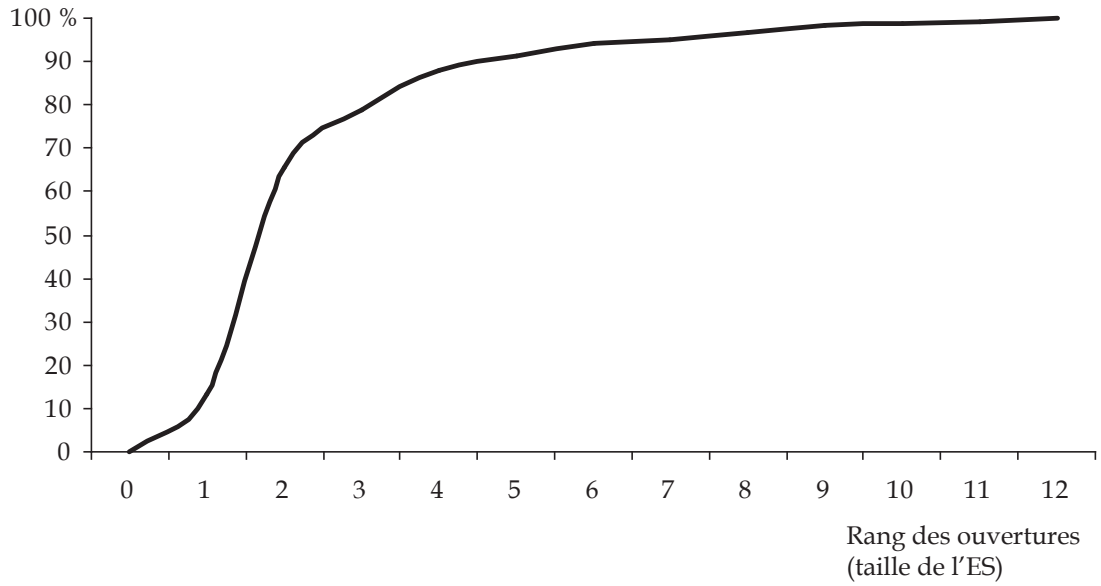


FIGURE 4.7 – *Fréquences cumulées de surface supprimée par chaque itération d'ouverture de l'image 4.6(b)*

Dans l'exemple que nous présentons ici, on remarque que la première ouverture n'a pas éliminé un pourcentage très important de surface d'éléments grossier. En revanche, la courbe suit une pente ascendante très forte ensuite et dès l'ouverture de rang 4 90 % de la surface des éléments grossiers a été supprimé. Cette courbe décrit donc un état de surface où de nombreux éléments de taille intermédiaire sont présents. Cette configuration peut indiquer une dynamique de tri : le vent a la capacité d'emporter les éléments les plus fins mais pas les éléments ayant une certaine taille. Un pavage de déflation se met donc en place, que la figure 4.6(a) illustre bien et qui est correctement restitué par l'approche que nous avons développée.

L'intérêt de la méthode réside également dans sa reproductibilité qui permet de l'appliquer à de nombreuses images et ainsi comparer entre elles diférentes stations, en analysant la surface en place, sans perturbations liées au prélèvement et, surtout, en restant au niveau superficiel, c'est-à-dire celui qui est affecté par l'action du vent. Ainsi avons-nous appliqué la démarche aux sites de Rass

Elkamen Labiadh et de Dar Dhaoui. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

4.2.2 Application à la compréhension des mécanismes locaux

Dans un souci de clarté, nous ne présentons les résultats que pour un échantillon des stations. L'objectif est de montrer comment, par la spatialisation d'un indicateur relativement simple à obtenir, on peut fournir une grille de lecture de la morphodynamique éolienne. La localisation des résultats s'impose donc mais il n'est pas possible de fournir toutes les informations dans une carte sans en rendre la lecture impossible. C'est pourquoi les résultats sont d'abord présentés dans le tableau 4.3 puis localisés sous une forme synthétique : la courbe des fréquences cumulées de surface supprimée après chaque ouverture. La lecture

Tableau 4.3 – *Densités granulométriques de quelques stations de Rass Elkamen Labiadh*

Station	DG [a]	Nb d'objets	O1 [b]	Ouvertures
REL002	0,7	1345	9,2	23
REL004	1,2	22019	89,2	2
REL005	1,2	16434	70	5
REL007	1,2	50135	8,6	14
REL008	13,7	7710	16,7	39
REL009	4,1	56144	55,2	14
REL011	5	44104	46,3	15
REL016	3,4	36090	51,6	13
REL018	3,7	78547	70,5	8

a. Densité granulométrique
b. Pourcentage de surface supprimé par la première ouverture

du tableau montre que la seule courbe des fréquences cumulées ne suffit pas à interpréter le résultat, ni à rendre compte de sa richesse. On peut ainsi identifier des cas particuliers :

- l'échantillon d'état de surface de REL004 présente une densité granulométrique faible mais portée par un nombre relativement élevé d'objets, loin du minimum. Cela se traduit par la suppression de la totalité de la surface des éléments de rugosité après l'application d'une ouverture de rang 2 et la quasi-totalité a disparu après une ouverture de niveau 1. Ainsi peut-on en déduire un état de surface caractérisé par la présence de nombreux éléments de très petite taille ;
- en revanche, l'échantillon d'état de surface REL008 présente une densité granulométrique très importante, portée par un nombre d'éléments plutôt faible, de l'ordre de trois fois moins important que REL004. Le nombre

d'ouvertures nécessaire à la suppression de la totalité des éléments de rugosité très élevé permet de conclure à la présence d'éléments de taille importante.

La méthode suivie permet donc de produire des résultats interprétables en lien avec la morphodynamique éolienne, dans la mesure où tous les échantillons ont une matrice sableuse commune. Le cas de REL008 décrit une situation qui correspond à un pavage de déflation, où le départ de matériel domine : le vent emporte les éléments les plus fins ne laissant que les éléments les plus grossiers. Le cas de REL004, en revanche, décrit une situation où, *a minima*, l'effet de protection domine : la configuration locale peut anihilier les effets du vent et la matrice sableuse n'est pas affectée par l'érosion. Plus probablement, on peut envisager que le vent dépose du matériel plus qu'il n'en emporte, recouvrant ainsi les éléments de rugosité les plus importants, tandis que des éléments moins gros peuvent être déplacés par roulage et s'accumuler dans la zone où la compétence du vent diminue. Cet échantillon d'EDS décrirait ainsi une dynamique d'accumulation.

On peut alors localiser ces différents résultats pour les appréhender dans leur ensemble et fournir une interprétation plus générale de la structure de la morphodynamique éolienne (fig. 4.8). L'interprétation de ce document est faite en nous appuyant aussi sur les fiches de description de stations que nous avons renseignées lors des prospections de terrain. Le premier cas intéressant concerne le groupe de trois stations localisées au sud et au centre du secteur : REL002, REL004 et REL005. Nous avons déjà commenté les caractéristiques de REL004 et nous pouvons constater que REL005 présente des caractères proches. Cependant, les résultats obtenus pour REL002 sont nettement différents : une densité granulométrique et un nombre d'objets faibles pour un nombre d'ouvertures élevé traduisent une prédominance de l'érosion. Or, l'observation de la carte montre que, d'une part ces trois stations sont très proches et que, d'autre part, elles ne semblent pas, à première vue, présenter de différences géomorphologiques susceptibles d'expliquer les différences de morphodynamique éolienne.

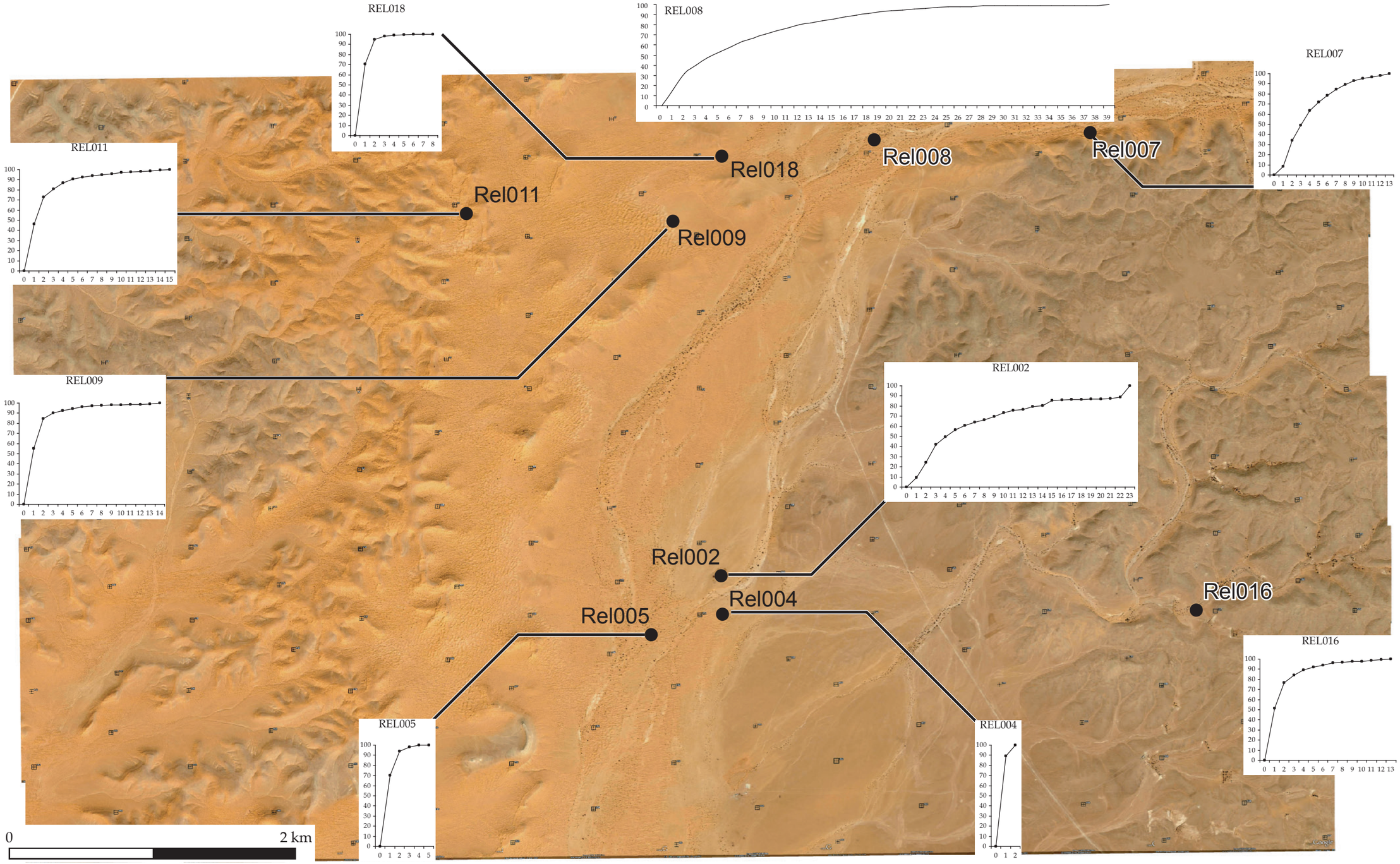


FIGURE 4.8 – *Courbes granulométriques de quelques stations du site de Rass Elkamen Labiadh.*
Fond : mosaïque d'extraits Google Earth *d'une image* QuickBird *du 22 sept. 2006*

Les trois stations sont en effet situées sur une zone d'interfluve, entre des bras de l'oued Ben Khachab. Les altitudes fournies par le MNT sont comparables : 320 m pour REL002 et REL004 et 315 m pour REL005. La proximité des stations, enfin, rend peu probable l'existence de différences pédologiques aussi marquées. Ainsi faut-il trouver d'autres éléments d'explication à ces différences et ceux-ci font intervenir les activités humaines.

En effet, REL002 est un site de stabulation des troupeaux qui parcourent le secteur. On identifie sur l'image satellite des taches sombres qui ne correspondent pas à des buissons et que l'on retrouve sur l'image de 2009. Les prospections de terrain ont permis d'identifier ces taches comme des abris qui étaient dans un état témoignant d'un entretien régulier, même si un effondrement avait eu lieu récemment (fig. 4.9). Outre l'abri, nous avons retrouvé des

FIGURE 4.9 – *Abri de pasteurs de la station REL002*

fagots d'*alfa* récents qui prouvent également que le site est effectivement utilisé temporairement par des pasteurs.

La morphodynamique éolienne locale n'est pas modifiée par effet Venturi puisque, là où l'abri est effondré, du sable s'est accumulé. Si les indicateurs liés à la densité granulométrique traduisent, pour cette station, une dynamique d'érosion forte, c'est probablement en raison du pâturage important autour du campement qui, comme la photo l'illustre, a éliminé la plupart des buissons importants. De fait, à l'exception de quelques plantes annuelles, nous n'avons pas observé de peuplement végétatif significatif, tandis qu'à REL004 et REL005, nous avons relevé la présence de belles touffes de *Retama retam*, *Stipagrostis pungens*, *Hamada scoparia*, etc.

On peut ainsi constater ici que, du point de vue de la morphodynamique éolienne, l'indicateur qui pointe vers une dégradation du milieu est celui qui traduit l'importance de l'érosion.

Le cas extrême de REL008, que nous avons commenté plus haut, peut être expliqué par la localisation dans un bras principal de l'oued Ben Khachab. L'état de surface analysé y est donc en grande partie hydromorphe, constitué de galets roulés de taille importante et de blocs. Une analyse plus fine de sa localisation montre que la station est située dans une zone où la couverture végétale est plutôt faible, comparée au reste de l'oued, ce qui peut expliquer que, ne bénéficiant pas d'effet d'abri, l'état de surface se rapproche d'un pavage de déflation.

Un autre cas intéressant est celui de REL018, qui présente une densité granulométrique plutôt élevée, avec un nombre d'éléments très important, qu'une ouverture de rang 8 fait intégralement disparaître. On identifie ici plutôt une dynamique de tri, des éléments de taille intermédiaire restant en place. En revanche, l'absence d'éléments de taille importante montre que la station ne fonctionne pas non plus complétement en bilan négatif. Sa localisation est intéressante de ce point de vue, puisqu'il s'agit du petit col où des barkhanes peuvent se former dont nous avons parlé lors de la présentation du site de Rass Elkamen Labiadh.

Ces observations permettent d'envisager trois dynamiques, ou ensembles d'états de surface associés à la morphodynamique éolienne. On identifie des secteurs d'ablation, de départ de matériel, comme REL002 ou REL008. On identifie également des secteurs d'accumulation, de dépôt de matériel, comme REL005 ou REL004. Mais on peut enfin identifier des secteurs de transport, où le vent, bien que compétent, ne dépose ni n'érode, en tout cas pas de façon significative à l'échelle de l'état de surface. Dans ce type de secteur, la morphodynamique éolienne dépend moins du milieu local - couverture végétale, rugosité de la surface - que de la fourniture en matériel.

Pour un certain niveau de fourniture, le sable transporté passe librement - on n'observe alors pas de barkhanes - si la fourniture augmente, des barkhanes vont commencer à se former. Comme nous l'avons montré au chap. 1, ces dernières peuvent être définies comme des *stocks mobiles de sable*. Cela signifie donc qu'elles se forment lorsque, en un lieu précis, le milieu fournit plus de matériel que le vent n'a de compétence pour le transporter ou bien lorsque, pour des raisons locales - un obstacle topographique par exemple, à volume constant, le vent perd de la compétence et ne peut plus transporter. Il forme alors des barkhanes qui stockent localement une partie du matériel pour que le transport puisse continuer autour. Quand la fourniture de sable diminue, le vent a tendance à se recharger localement, d'où la disparition des barkahnes et la présence d'indicateurs de tri. Le passage d'une dynamique à l'autre semblant être régulier à l'échelle d'une année, l'état de surface traduit plutôt un équilibre.

Le cycle d'apparition et de disparition des barkhanes peut ainsi permettre de suivre les évolutions du milieu à une échelle plus large puisque, en cas par exemple de sécheresse ou de surexploitation, la sensibilité à l'érosion augmente, tandis qu'elle diminue en période plus humide où lorsque la pression sur le milieu diminue. Ces barkhanes épisodiques, que l'on retrouve dans d'autres sites de la Tunisie pré-saharienne (Khatelli, 1996, Ouerchefani, 2012), peuvent ainsi être considérées comme des indicateurs pertinents de l'évolution du milieu.

Au terme de cette présentation, il apparaît que la méthode donne des résultats à la fois robustes et concluants par rapport à la réalité et à la subtilité du terrain analysé. C'est pourquoi nous avons choisi de la systématiser afin de pouvoir la reproduire de façon efficace. La procédure a donc été codée sous forme de deux macros :

1. La première (annexe G) automatise partiellement l'extraction des éléments grossiers de toutes les images en niveau de gris placées dans le dossier défini dans l'en-tête ;
2. La seconde (annexe H) automatise l'extraction des indicateurs permettant de définir la densité granulométrique de toutes les images binaires placées dans le dossier défini dans l'en-tête.

Grâce à cette automatisation, même partielle, la procédure a pu être appliquée à de nombreuses images et, en particulier, à l'analyse et à la comparaison temporelle de transects de photographies d'états de surface. Les résultats de cette approche sont commentés dans la section 4.3.

4.3 L'approche par les transects d'EDS

Une dernière application de la méthode d'analyse des photographies d'échantillons d'EDS permet d'évaluer les éventuels impacts, à une échelle locale extrêmement fine, de la composition des éléments du paysage sur la morphodynamique éolienne. Elle complète l'approche initiale dans la mesure où elle sort de sa logique ponctuelle : les échantillons d'états de surface ne sont plus considérés individuellement, mais dans un ensemble cohérent et structuré. Une approche par les transects de photographies d'EDS permet d'intégrer la dimension spatiale dans le raisonnement et la comparaison formelle du même transect étudié à deux moments permet d'intégrer la dimension temporelle.

Cette approche a été testée dans différentes stations des sites de Dar Dhaoui, Ghrabet et Rass Elkamen Labiadh. Elle s'appuie sur les résultats des traitements d'images ainsi que sur les fiches de renseignements complétées pour chaque transect, qui permettent d'aider à l'interprétation. Un exemple vierge de cette fiche est disponible en annexe I. Dans cette présentation, nous développerons les résultats obtenus pour un transect levé à Dar Dhaoui, pour la station DHA001. Il s'agit d'un transect court, de l'ordre de 50 m, levé suivant une orientation NE–SO au centre d'une parcelle d'oliviers et qui part d'un olivier, en passe un et s'arrête au niveau du troisième. Une photographie d'échantillon d'EDS a été prise tous les 3 m environ. L'objectif était d'analyser les éventuels effets des arbres sur l'état de surface, et de montrer si des différences pouvaient être établies entre, par exemple, la partie sous le vent d'un olivier et sa partie au vent.

Le transect a été levé une première fois le 26 mai 2009 et une seconde fois le 24 septembre 2009. L'intervalle entre les deux relevés correspond donc à la période estivale. La méthode d'extraction de l'information est la même que celle présentée dans la section précédente. La représentation des résultats change, puisqu'elle consiste à les figurer à la fois dans l'espace et dans le temps. Les

figures présentent ainsi les résultats du point de vue de la densité granulométrique, du nombre d'ouvertures nécessaires pour supprimer tous les objets et du pourcentage de surface supprimée par la première ouverture. Enfin, nous utiliserons les résultats des DPS de la station de Dar Dhaoui pour asseoir notre interprétation.

4.3.1 Évolution des EDS le long d'un transect et dans le temps

La figure 4.10 présente l'évolution de la densité granulométrique des états de surface du transect entre les deux dates de relevé. L'image 1 est prise au niveau du premier olivier, l'image 8 au niveau de l'auréole de déflation du second et l'image 14 au niveau du troisième.

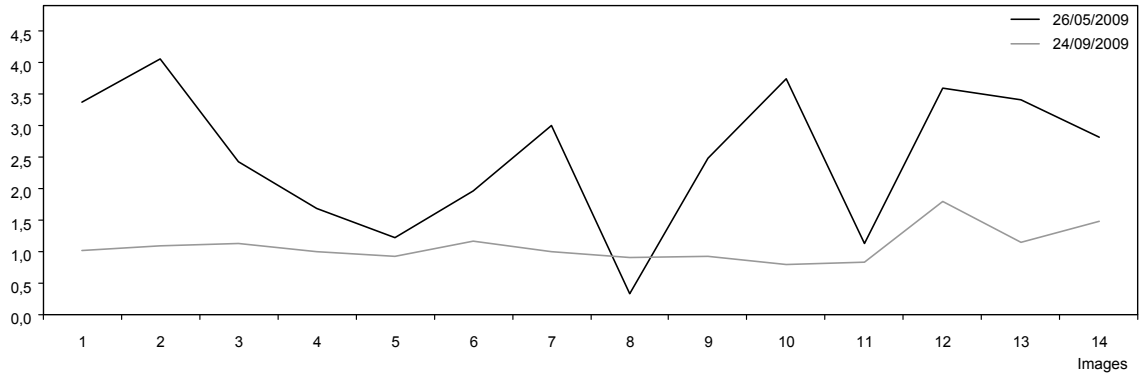


FIGURE 4.10 – *Évolution spatiale et temporelle de la densité granulométrique du transect étudié*

On remarque que, du point de vue de ce premier indicateur, les différences entre les deux dates sont sensibles. La densité granulométrique du transect au 26 mai est nettement plus élevée qu'au 24 septembre et, de surcroît, elle est beaucoup plus contrastée. En particulier, on note un creux au niveau de l'auréole de l'olivier central et une évolution en lien avec la disposition des oliviers peut être identifiée. En revanche, la densité granulométrique du transect levé en septembre est beaucoup moins contrasté. La courbe est presque plane et on n'identifie plus de variations liées aux oliviers et, donc, à la dimension spatiale des échantillons analysés.

Les résultats présentés en figure 4.11 sont moins contrastés entre les deux dates d'analyse. La figure présente l'évolution du pourcentage de surface supprimée par la première ouverture, dans l'espace et dans le temps. On identifie encore un effet de l'olivier central dans le transect correspondant au mois de mai, ainsi qu'un léger effet d'augmentation pour les échantillons qui correspondent aux oliviers du début et de la fin du transect. Le schéma est sensiblement le même pour le transect correspondant au mois de septembre, malgré une tendance au lissage qui, dans une certaine mesure, rappelle les résultats présentés dans la figure précédente.

Enfin, la figure 4.12, qui représente le nombre d'ouvertures nécessaire à la suppression de la totalité de la surface des éléments grossiers, semble montrer deux tendances opposées entre les deux dates. On identifie toujours l'olivier

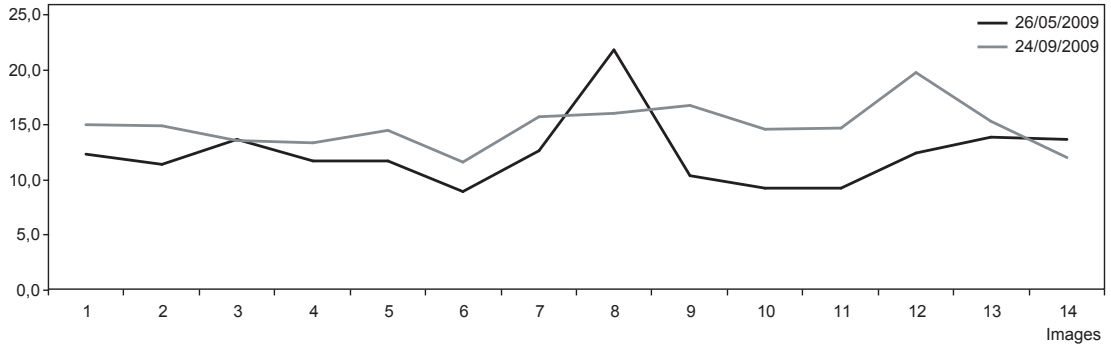


FIGURE 4.11 – *Évolution du pourcentage de surface supprimé par la première ouverture*

central par un pic pour le transect du mois de mai, cependant les oliviers du début et de la fin sont moins visibles. La courbe des valeurs obtenues pour le

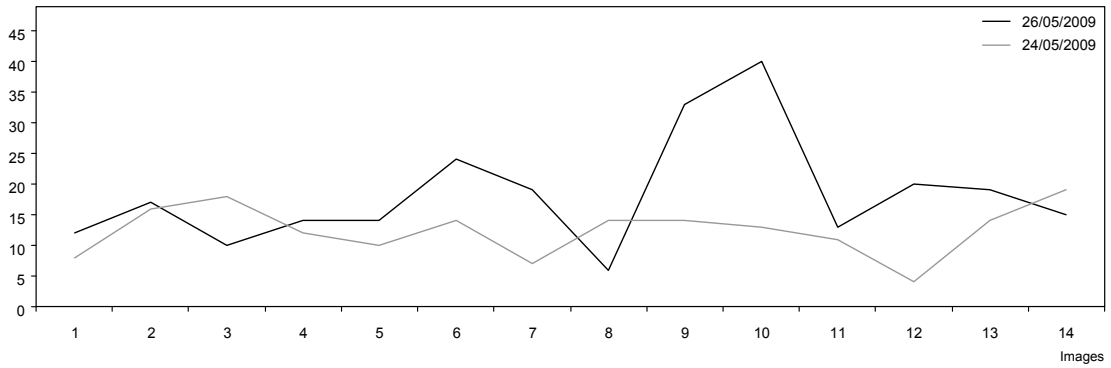


FIGURE 4.12 – *Évolution du nombre d'ouvertures nécessaire à la suppression complète de la surface des éléments grossiers*

mois de septembre est, en revanche, presque construite en miroir de la première, même si, de façon générale, elle est surtout moins contrastée et plus écrasée. On n'identifie plus, par exemple, l'effet de l'olivier central sur la courbe.

L'interprétation de ces résultats doit s'appuyer également sur les renseignements de la fiche qui permettent de faire le lien avec le terrain. On peut alors identifier certains points importants du transect. Ainsi, l'image 4 correspond-elle, pour le transect du mois de mai, à un échantillon d'état de surface de type nappe éolienne, et donc à un secteur d'accumulation. L'image 6, toujours pour le transect de mai, est un échantillon d'état de surface de type secteur de tri, avec un retour des éléments grossiers, absents dans le secteur d'accumulation précédent. L'image 8 renvoie à l'auréole de l'olivier, secteur mixte, plutôt de tri mais avec la présence d'un léger voile. Ce système, propre à l'auréole, se poursuit pendant plusieurs mètres sous le vent pour évoluer vers un secteur de tri plus important à partir de l'image 12. Juste avant l'olivier final, les images 13 et 14 contiennent des rides éoliennes, orientées ENE–OSO, qui indiquent un renforcement de l'action éolienne.

Pour le transect du mois de septembre, deux points doivent être précisés : d'une part, les images ont enregistré l'effet d'une pluie récente, puisqu'une lé-

gère pellicule de battance avec des indicateurs de splash est présente ; D'après les données de la station de l'IRA, il est, en effet, tombé 22 mm entre la veille et l'avant-veille. D'autre part, un labour a été effectué sur la parcelle, sans que nous sachions s'il a eu lieu avant ou après la pluie. Cependant, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il a eu lieu au moins plusieurs jours avant. Deux arguments valident cette hypothèse (fig 4.13) :

1. Le labour n'est pas frais, sa structure est dissoute de façon nette, on n'identifie pas de mottes liées au retournement du sol.
2. On peut identifier la répartition de la morphodynamique éolienne typique d'un état de surface labouré (Kardous, 2005), avec une dynamique de tri au sommet des billons et une accumulation au creux des sillons. Cela ne serait pas possible si la pluie avait figé les états de surface avant le labour, sauf si le sable transporté vient de loin et d'un endroit qui n'a pas reçu de précipitations, ce qui semble peu probable compte tenu des résultats de l'analyse des DPS pour la période considérée.

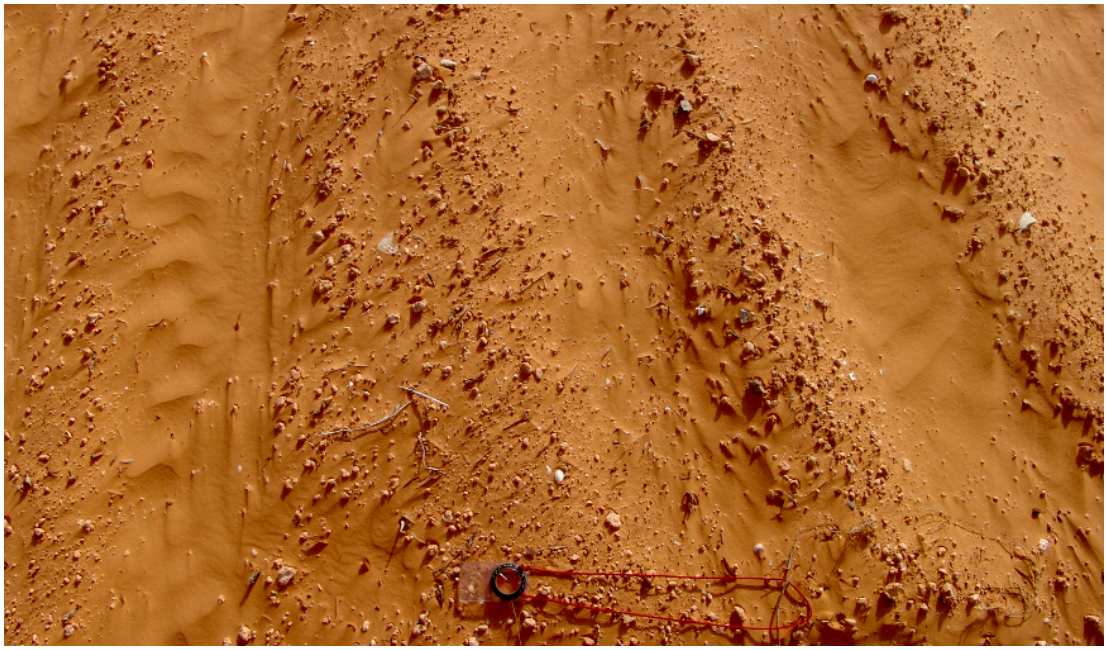


FIGURE 4.13 – *Exemple d'un échantillon d'état de surface du transect de septembre 2009 à Dar Dhaoui*

4.3.2 Les DPS des périodes étudiées

L'intérêt de la station étudiée est que nous disposons des données de vent fournies par l'anémomètre de l'IRA, distant de seulement quelques dizaines de mètres. Aussi pouvons-nous considérer qu'il est légitime de présenter les résultats d'une approche fine par les DPS pour chacun des transects. Nous avons choisi de n'étudier que les données des jours proches de la date des transects. En effet, comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents, les états de

surface, en particulier éoliens, réagissent rapidement aux évolutions des conditions du milieu. De ce fait, les images que nous avons traitées ont très probablement enregistré les derniers effets de la dynamique éolienne. Il n'est donc pas nécessaire d'intégrer une trop grande profondeur temporelle, d'autant moins que cela fait courir le risque de bruiter les résultats et, donc, de rendre leur interprétation difficile et non pertinente.

La figure 4.14 présente donc les déplacements potentiels sableux de la station de Dar Dhaoui pour les cinq jours précédant la levée des transects. À l'instar des transects de photographies, les deux résultats sont nettements différents. La rose du mois de mai, ainsi que les indicateurs associés, montrent une dynamique éolienne relativement forte et concentrée dans une direction préférentielle. Le cœfficient de migration, en particulier, est très proche de 1, avec une migration résultante qui est supérieure à la moyenne constatée sur les deux années de mesure (2008–2009). De façon générale, on a montré que le mois de mai correspondait à une période d'activité éolienne plutôt intense dans le secteur (cf. fig 4.4). Ainsi, les états de surface du premier transect ont-ils enregistré les conséquences d'un pic de dynamique éolienne, ce que confirme l'orientation des rides que l'on peut voir sur certaines images et qui est cohérente avec la direction résultante de la période.

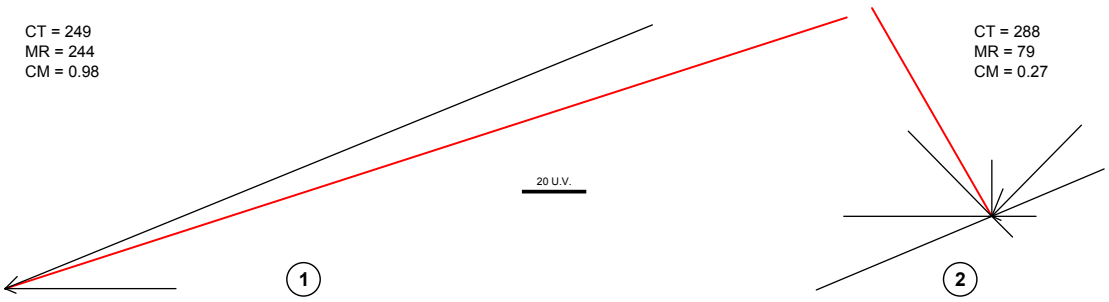


FIGURE 4.14 – *Les roses des déplacements potentiels à Dar Dhaoui pour les 5 jours précédant le transect de mai (1) et le transect de septembre (2)*

La rose et les indicateurs associés à la période qui précèdent le transect du mois de septembre décrivent une activité éolienne forte mais non-concentrée. Les déplacements globaux semblent relativement élevés pour un mois de septembre, mais la migration résultante est, en revanche, faible. Cela indique que le sable, s'il se déplace, a tendance à tourner en rond. Cet effet peut être accentué dans le contexte d'une oliveraie, où la disposition régulière des arbres génère probablement des effets locaux de déviation, d'accélération, etc. Surtout, la quantité de précipitations tombée immédiatement avant la levée du transect a nécessairement eu un impact localement. Le fait que les DPS suivent un schéma complexe appuie l'argument selon lequel il est peu probable que le vent ait transporté du matériel venu d'un secteur où la pluie ne serait pas tombée.

4.3.3 Synthèse

Il peut y avoir deux façons d'interpréter les résultats que nous venons de présenter. La première concerne l'intérêt de la méthode sur le plan de la compréhension fine de l'influence d'une composition paysagère particulière : l'oliveraie, sur la morphodynamique éolienne. En effet, le transect du mois de mai, qui correspond à une situation idéale du point de vue de l'activité éolienne : moins de 1 mm de précipitations dans les 15 jours précédant le recueil des données, des DPS importants et, surtout, concentrés, pas de perturbations extérieures, comme le labour. De ce fait, on peut considérer cette situation comme une situation-étalon, où le principal facteur de répartition des modelés éoliens est la disposition des composants paysagers qui sont, dans ce cas, réduits aux seuls oliviers.

La figure 4.15 est une tentative de synthèse des résultats de l'interprétation thématique des images. Il s'agit d'une répartition en classes des états de surface observés le long du transect. Cette méthodologie avait déjà été expérimentée avec un certain succès pour interpréter, du point de vue de la morphodynamique éolienne, la répartition des états de surface éolisés le long d'un transect au Mali (Venard, 2007). La figure, dont l'échelle est cohérente avec celle des courbes présentées plus haut, permet de mieux visualiser les évolutions qui se produisent le long du transect.

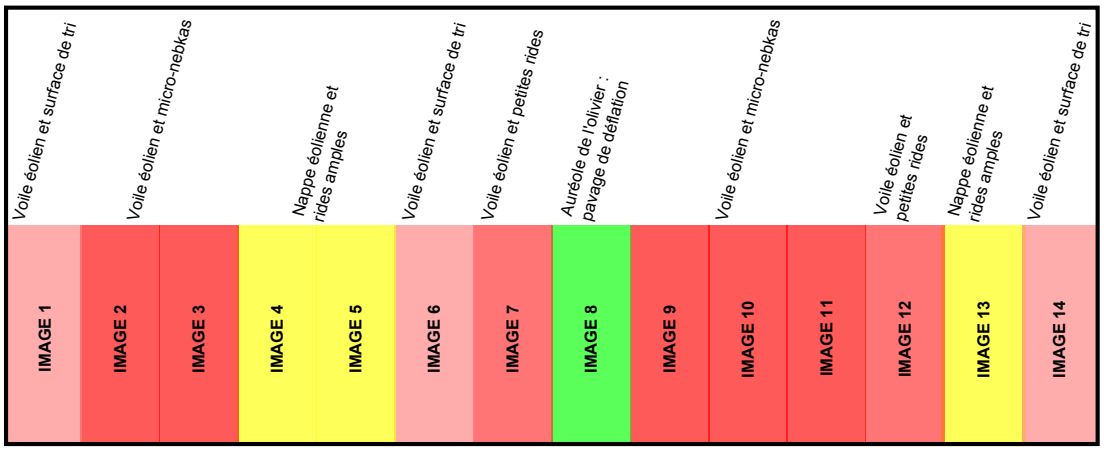


FIGURE 4.15 – *La répartition spatiale des états de surface le long du transect du mois de mai*

La figure montre bien qu'un schéma semble se reproduire à l'identique d'un olivier à un autre. Certes, les dimensions des secteurs obtenus ne sont pas strictement identiques, mais cela peut venir principalement de l'échantillonnage « manuel » qui, nécessairement, fait courir le risque de suréchantillonner à certains endroits et sous-échantillonner à d'autres. Ce schéma peut être ainsi décrit :

1. L'auréole de l'olivier est le lieu d'une érosion éolienne plus intense : un pavage de déflation se met en place, même si un léger voile est présent. En effet, l'auréole d'un olivier est une surface de creusement ayant la forme d'une ellipse disposée plutôt sous le vent de l'arbre (Mainguet, 1995, Fehri, 2003).

2. Un peu plus loin sous le vent de l'olivier, l'accumulation commence à s'affirmer. On identifie un voile plus ou moins important ainsi que des micro-nebkas derrière les petits obstacles qui peuvent être présents.
3. En s'éloignant encore de l'olivier, l'accumulation domine très nettement, avec une nappe épaisse, qui peut, parfois, prendre la forme d'une dune transversale avec une arête vive lorsque l'apport de matériel est important. Cette nappe est, dans notre cas, recouverte de rides éoliennes de direction ENE–OSO correspondant à la direction résultante des DPS.
4. Enfin, en se rapprochant de l'olivier suivant, la dynamique s'équilibre à nouveau entre accumulation et tri. L'accumulation reprend une forme de voile plus ou moins important et des surfaces de déflation sont visibles. Par la suite, le schéma se répète à l'identique.

Ainsi, cette première approche de nos résultats permet-elle d'analyser de façon fine l'effet des oliviers sur la morphodynamique éolienne locale. On voit que la distribution est, à cette échelle, relativement équilibrée entre accumulation et déflation. Cela met en avant l'intérêt de la méthode qui permet de bien rendre compte de cette distribution. Au plan des échelles temporelles, on peut également dire que les états de surface ont enregistré une distribution d'ordre structurel, celle qui est liée à la répartition en fonction de la distance aux oliviers, ainsi qu'une distribution d'ordre plus conjoncturel, illustrée par les rides résultant des derniers jours de vent. Dans les résultats quantifiés que nous avons présentés sous la forme des courbes, il est délicat d'estimer quelle est la part de l'une et de l'autre. Cependant ils rendent bien compte, au moins, de la distribution structurelle.

Un second niveau d'interprétation des résultats concerne l'évolution entre les deux transects. Nous avons montré que le transect du mois de septembre enregistrait beaucoup moins de contrastes entre les différents secteurs. l'analyse thématique des images permet d'expliquer pourquoi : alors qu'au mois de mai, les états de surface analysés étaient surtout le résultat de processus géomorphologiques, ceux du mois de septembre enregistre les effets d'une activité agricole : le labour. Cette dernière homogénéise les surfaces et, donc, il est cohérent d'obtenir des courbes homogènes pour les indicateurs étudiés. Cet effet du labour est de surcroît renforcé par la pluie de deux jours précédant le recueil des données. Le lissage des courbes est, en particulier, très net pour celle de la densité granulométique (cf. fig. 4.10).

Ainsi l'approche par les transects apparaît-elle pertinente dans ce contexte. Il est envisageable de la compléter par l'analyse - automatique - du recouvrement de la végétation que nous avons testée et présentée par ailleurs (Venard *et al.*, 2009). Cette approche donne de bons résultats, supérieurs à ceux de l'interprétation visuelle, qui peut être biaisée par la vision oblique, ce qui conduit à surestimer le recouvrement local. En combinant des indicateurs qui évaluent l'effet de protection et la morphodynamique éolienne locale, on se rapproche de la précision de l'excellent travail de Ouerchefani (2012) sur les transects d'états de surface éolisés, analysés selon la méthode des points quadrats.

Les deux approches peuvent même être considérées comme complémentaires. En effet, l'auteur évoque la difficulté à reproduire régulièrement dans le

temps le recueil des données. En définissant un rythme cohérent d'acquisition de données par points quadrats, espacée dans le temps en raison de cette difficulté, et en la complétant par des transects de photographies d'échantillons analysés en laboratoire, on peut envisager de mettre en place assez facilement une surveillance fine des états de surface pour des stations représentatives, en particulier dans un contexte d'observatoire de l'environnement. Comme il a été montré que la méthode permettait d'enregistrer aussi bien les modifications géomorphologiques que les modifications anthropiques des conditions du milieu, elle ouvre des perspectives particulièrement riches en matière de suivi.

Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre, nous avons montré que l'analyse d'indicateurs paysagers simples permet de retrouver des informations sur les vents, en particulier sur leur intensité. Nous avons également posé les premiers jalons d'une utilisation de ces indicateurs pour une évaluation qualitative des dynamiques du milieu en général et de la morphodynamique éolienne en particulier. Cependant, les analyses proposées connaissent des limites de représentativité. L'approche par les données météorologiques a le mérite de s'appuyer sur une certaine profondeur temporelle : de ce point de vue elle est robuste. En revanche, elle produit des résultats ponctuels difficilement généralisables du point de vue spatial.

L'approche par les échantillons d'états de surface permet, à l'échelle d'un site, de multiplier les points de mesure et d'assurer une plus grande représentativité spatiale. En revanche, sa représentativité temporelle peut être limitée par l'aspect instantané de la donnée analysée. Cette limite s'atténue dans le cas des transects que l'on peut répéter, mais il faudrait systématiser l'approche pour disposer de plus de recul sur la méthode et la valider avant de pouvoir l'utiliser dans des secteurs où nous ne disposons pas de données météorologiques.

Les approches développées dans ce chapitre ont également permis de poser les fondements d'une analyse par le paysage des caractéristiques de la morphodynamique éolienne. L'objet du chapitre suivant est d'approfondir cette démarche en proposant des indicateurs pertinents de suivi de la morphodynamique éolienne à des échelles plus larges. En emboîtant les échelles et les approches adaptées, nous pourrons proposer une méthodologie d'intégration d'échelles.

Chapitre 5

Paysages et morphodynamique éolienne

Approches par les composants paysagers

Sommaire

5.1 La végétation, élément de contexte 186
5.1.1 Les difficultés posées par les images du *Pixy* 187
5.1.2 Les buissons des secteurs de steppes 188
5.1.3 Les oliviers des secteurs agricoles 192
5.2 Les modelés éoliens 195
5.2.1 Problématiques rencontrées 195
5.2.2 les pentes croulantes des formes éoliennes d'obstacle . . 197
5.2.3 Application aux images *QuickBird* 204
5.3 Synthèse des questions posées par les échelles 207
5.3.1 La dépendance d'échelles temporelle 207
5.3.2 Analyse comparée de la distribution spatiale de deux jeux de données 212
5.3.3 Vers une intégration d'échelles : l'analyse par mailles . . 216
Conclusion 222

Introduction

En nous appuyant sur les arguments développés dans les chapitres précédents, nous cherchons à montrer comment on peut approcher la morphodynamique éolienne à une échelle intermédiaire, entre celle du terrain et celle de l'imagerie spatiale à couverture moyenne, de type Landsat. Pour cela, nous introduisons de nouveaux objets, de dimensions plus importantes qui appartiennent à la catégorie des éléments du paysage définit par Laques (2009).

La présentation rapide des problématiques et des méthodes portées par l'équipe PASSAGE (cf. chap. 2) a permis de poser les fondements conceptuels

d'une approche de la morphodynamique éolienne par les éléments du paysage. L'approche plus pragmatique de la section précédente a montré combien il était important de considérer les modelés éoliens en relation avec les éléments du paysage et ce à différentes échelles. Ce chapitre présente les résultats des analyses menées à partir des images *Pixy* et *QuickBird*. Nous nous intéresserons plus particulièrement à deux éléments :

1. un élément de contexte, la végétation, qui permet de comprendre une grande partie de la distribution spatiale de la morphodynamique éolienne, comme les premières approches présentées au chapitre 4 l'ont déjà montré.
2. le cœur de notre travail : les modelés éoliens.

Au terme de la présentation des problèmes rencontrés lors de l'analyse des images, ou lors de l'interprétation des résultats obtenus, nous reviendrons sur les notions de dépendance d'échelle et de seuils d'homogénéité et d'hétérogénéité qui constituent une part importante du socle conceptuel de cette thèse. En effet, les méthodes que nous développons permettent d'analyser le paysage au niveau de ses éléments : la végétation et les formes éoliennes, mais ce positionnnement souffre d'une limite : les informations recueillies sont tellement nombreuses qu'il est nécessaire, pour les présenter comme pour les analyser, de les agréger à un niveau supérieur. Cette démarche a cependant un aspect positif qui est essentiel de notre point de vue : en agrégrant depuis le niveau le plus bas, on contrôle les transferts d'échelle.

Ce chapitre s'organise donc en deux ensembles. Dans le premier, nous présentons les résultats bruts des extractions de la végétation et des formes éoliennes, en insistant sur les problématiques rencontrées. Dans le second, nous appliquons les principes liés à la dépendance d'échelle et aux seuils d'homogénéité/hétérogénéité pour analyser les résultats obtenus.

5.1 La végétation, élément de contexte

Deux raisons nous conduisent à nous intéresser à l'analyse de la végétation à partir d'images à très haute résolution spatiale. La première est liée au fait qu'il s'agit d'un indicateur commun à de nombreuses disciplines et à de nombreux projets scientifiques. Son étude, dans le domaine de la télédétection, s'appuie généralement sur des images de résolution plus grossières, comme les images Landsat. Il est donc intéressant d'explorer les possibilités offertes par la THR en complément des approches classiques. La seconde raison est que s'agissant des formes éoliennes d'obstacles, notre objet d'étude principal, nous avons montré au chapitre 2 le lien étroit qu'elles ont avec la végétation, au moins depuis un point de vue « terrain » et ponctuel. Dans la mesure où la méthodologie développée ici permet d'extraire les deux objets de manières distincte, il est envisageable de comparer les deux jeux de données obtenus pour en étudier les relations sur un grand échantillon.

5.1.1 Les difficultés posées par les images du *Pixy*

À l'échelle des images du *Pixy*, l'extraction de la végétation pose des problèmes. En effet, la très haute résolution spatiale se traduit par une forte hétérogénéité spectrale de l'objet considéré. Comme le montre la figure 5.1, on peut difficilement trouver deux seuils satisfaisants pour n'extraire que le buisson. Même en utilisant une méthode de classification pixel à pixel, le résultat

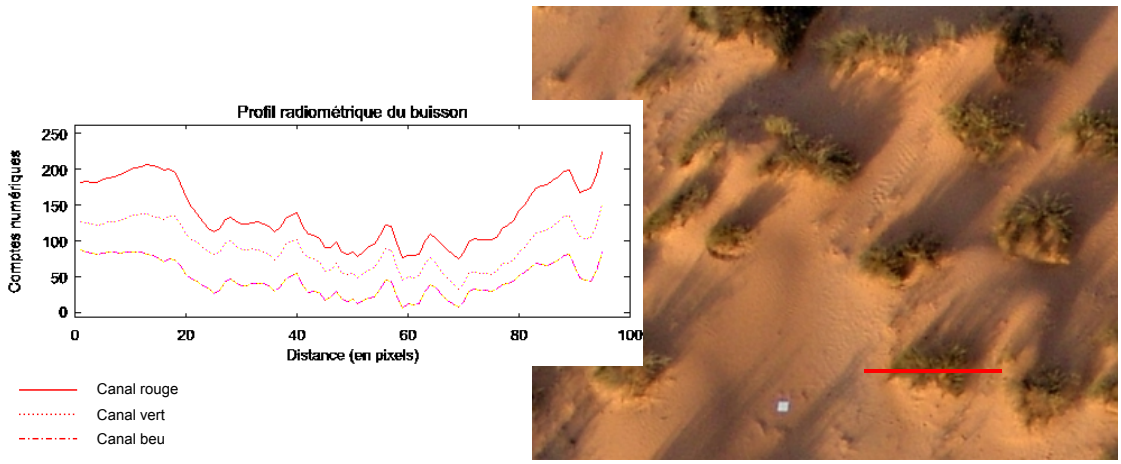


FIGURE 5.1 – *Profil radiométrique (de gauche à droite) d'un buisson. Extrait d'une image* Pixy *prise le 2 avril 2008 à Oglet Merteba. La balise blanche fait 50 cm de côté*

est hasardeux puisque se mêlent des ombres, des accumulations sableuses, des rameaux de couleur et donc de réflectance différente. En d'autres termes, extraire la végétation depuis les images du *Pixy* est complexe parce que leur précision même entraîne un risque important de confusion avec d'autres objets. Cela ne signifie pas qu'elle est impossible, mais elle nécessiterait un dispositif méthodolgique important, avec une succession de filtres et probablement des allers-retours entre différents résultats. Le risque d'une telle démarche est d'obtenir un résultat impossible à reproduire, parce que la procédure, établie pour répondre à un cas posant des problèmes spécifiques, ne donnera pas le même résultat sur un autre cas.

Il est, en fait, question ici d'échelle de perception de l'objet. Un buisson est, à l'échelle fixée par la résolution des images du *Pixy*, de l'ordre de 8 cm, un objet relativement important. Ainsi, il est constitué d'objets élémentaires, parfois parasites, comme les ombres ou le sable accumulé. Il est alors plus difficile d'extraire une information cohérente. Par ailleurs, l'objet de l'extraction de la végétation, dans notre cas, est de fournir un élément de contexte, pas d'étudier très finement ses caractéristiques, suivre son évolution brin par brin, ce qui aurait pu justifier l'investissement méthodologique décrit plus haut. Notre objectif premier est plus basique : il s'agit surtout de localiser les éléments de végétation pour analyser les éventuels liens avec les modelés éoliens.

C'est pour ces différentes raisons que nous avons travaillé à partir des images *QuickBird*, dont la résolution plus grossière fait basculer les buissons ou les oliviers, pour lesquels la problématique est identique, d'une catégorie

d'objets complexes à une catégorie d'objets élémentaires. De ce fait, leur extraction en est simplifiée.

Deux familles d'objets, correspondant à deux situations différentes, ont été analysées :

1. Les buissons, de différentes tailles et espèces, couvrent des surfaces importantes dans les sites où le paysage est de type steppique, comme Rass Elkamen Labiadh ou Oglet Merteba.
2. Les oliviers, qui ont une morphologie homogène et dont la répartition est organisée en parcelles, constituent le peuplement quasi-exclusif des secteurs d'oliveraies, puisque la pratique agricole dominante consiste précisément à éliminer toute concurrence.

Une méthodologie spécifique à chacune de ces deux familles a été élaborée. Nous présentons en premier lieu celle concernant les buissons, en prenant comme exemple le cas de Rass Elkamen Labiadh.

5.1.2 Les buissons des secteurs de steppes

Sur une image panchromatique, comme l'image *QuickBird* de mars 2009, à 60 cm de résolution, les buissons apparaissent comme des régions sombres, de forme circulaire. Une extraction utilisant les outils de la *Morphologie Mathématique*, en particulier le *chapeau haut-de-forme noir* (BTH), avec un ES circulaire, devrait donner de bons résultats tout en restant simple à mettre en œuvre et reproductible.

En revanche, la très grande quantité d'informations stockées dans cette image THR fait que les limites de performance des machines dont nous disposions ont été atteintes. Il a été impossible de traiter l'image dans son ensemble. C'est pourquoi elle a été découpée en 4 parties : quart N-O (image 1), quart N-E (image 2), quart S-O (image 3) et quart S-E (image 4). Cela a servi la qualité des traitements puisque les problématiques d'extraction ne sont pas les mêmes en tous points de l'espace considéré. En effet, dans la partie ouest par exemple, les buissons sont majoritairement de petite taille, tels *Hamada scoparia*, ou *Stipagrostis pungens*. En revanche, au niveau de l'oued Bel Khachab, on trouve en majorité des buissons de type *Retama retam*, qui ont des dimensions beaucoup plus importantes et qui, surtout, peuvent être jointifs et donner des formes non-circulaires. C'est ainsi que, finalement, le découpage en quatre images a bénéficié à la qualité de l'extraction. À titre d'exemple, voici la procédure mise au point pour l'image 1 :

Séquence d'extraction des buissons pour le quart N-O de l'image *QuickBird* du 26 mars 2009

BTH avec un disque de taille 10 de l'image source panchromatique
⇓
Seuillage
⇓
Création d'objets et calcul de leurs paramètres morphologiques
⇓
Filtre sur le paramètre de circularité. Valeurs retenues : $C \geq 0,75$
⇓
Écriture du résultat dans une nouvelle image et importation du fichier .tfw correspondant

Le filtre sur la circularité, avec un seuil assez élevé, présente un avantage particulier : il élimine les ombres portées par le relief ou les objets géomorphologiques, comme les dunes de taille conséquente. En effet, l'image ayant été capturée vers 10h30, les rayons du soleil ont un angle de l'ordre de 56°, ce qui génère des ombres. Dans le cas des buissons, cela n'est pas préjudiciable dans la mesure où on peut considérer que la forme générale des buissons [1] fait qu'il existe une compensation entre l'avant et l'arrière, dans le sens des rayons. La forme générale des objets extraits, circulaire, tend à confirmer cette hypothèse. En revanche, dans le cas de dunes ou de rebords cela génère des artefacts.

L'image 1, représentant la partie où les buissons ont de plus petites tailles, est davantage concernée par la problématique des ombres portées par les dunes. L'image 2 couvre, quant à elle, la zone où les buissons ont de plus grandes dimensions et où ils peuvent être jointifs et être ainsi représentés par des régions moins circulaires. Dans ce secteur, néanmoins, les rebords de l'oued projettent des ombres très linéaires qu'il convient de filtrer au maximum. Ainsi le découpage en quarts de l'image permet-il d'affiner la procédure d'extraction en l'adaptant aux spécificités de chacun des secteurs obtenus. Dans le cas de l'image 1, un filtre très haut permet d'éliminer les ombres qui pourraient être presque circulaires, dans le cas de l'image 2, un filtre plus bas permet d'éliminer les ombres très linéaire en préservant des buissons, ou des groupes de buissons, moins circulaires.

Nous arrivons ainsi à filtrer les ombres des rebords de l'oued, tandis que l'essentiel des buissons est conservé, même si on peut aussi noter que de petites régions de pixels qui pourraient être des buissons mais qui sont moins sombres que les buissons importants ne sont pas extraits. Le conditionnel s'impose cependant puisque, à cette échelle et à cette résolution, il est délicat de discriminer avec certitude des objets aussi précis.

En raison de cette dépendance d'échelle, il est difficile d'estimer une erreur moyenne de la procédure d'extraction. En effet, comment dire alors si un pixel isolé qui n'a pas été extrait et qui semble sombre correspond à un buisson ou bien s'il correspond à une ombre portée par un autre élément du paysage ? En fonction du choix de critères restrictifs ou permissifs, on peut considérer que

1. Leur forme, dans un plan vertical, est comparable à une ellipse, cf. chap. 3

l'erreur, en nombre d'objets est comprise entre 5 et 20 %. En considérant un second critère, important pour les développements présentés par la suite, qui est la surface des objets, cette erreur est plus faible. En effet, les objets qui ne sont pas extaits sont, pour l'essentiel, de très petite taille, l'erreur du point de vue de la superficie est alors de l'ordre de 3 à 5 %.

On obtient alors une image binaire contenant 788 391 régions, correspondant à autant de buissons individuels (fig. 5.2). Cette quantité d'information est en elle-même gage de la qualité du résultat dans la mesure où elle permet d'envisager que, même si l'extraction a échoué pour certains objets, la répartition spatiale et les densités locales sont conservées. La figure présentant le résultat de l'extraction pour l'ensemble du site est disponible en annexe J.

En second lieu, l'intérêt de la procédure est d'obtenir des individus sur lesquels on peut faire des calculs et des caractérisations morphologiques. On peut par exemple calculer la superficie de chacun des buissons. Compte-tenu de l'étendue de l'échantillon, des applications statistiques pertinentes peuvent ensuite être envisagées, comme nous le présenterons dans la dernière section de ce chapitre. Ainsi, moins de 0,4 % des objets du jeu de données présente une superficie qui semble aberrante. Pour l'essentiel, ces cas concernent des buissons groupés, ou tellement rapprochés que l'on ne peut différencier les individus.

Enfin, la dernière étape de la procédure consiste à réimporter les informations de géoréférencement de l'image. En effet, l'image d'entrée a une référence spatiale, définie dans un fichier annexé à l'image qui porte l'extension *.tfw*. Comme la procédure suivie consiste seulement à structurer l'information présente dans l'image pour ne conserver que celle visée, aucune modification n'est apportée aux dimensions de l'image. On peut donc facilement duppliquer le fichier *.tfw* de l'image d'entrée pour l'appliquer à l'image résultat, ce qui permet de conserver la référence spatiale et d'exploiter le résultat dans un SIG pour le croiser avec d'autres données.

FIGURE 5.2 – *Extraction des buissons par les outils de la Morphologie Mathématique. Exemple pris sur l'image* QuickBird *de mars 2009 pour le site de Rass Elkamen Labiadh*

5.1.3 Les oliviers des secteurs agricoles

Les oliviers sont un cas particulier intéressant de peuplement végétal. Deux caractéristiques de ce peuplement sont ici exploitées : il est stucturé en parcelles et il est homogène du point de vue temporel - on peut raisonnablement émettre l'hypothèse que les oliviers d'une parcelle ont été plantés au même moment - et du point de vue morphologique ce qui est une conséquence de l'hypothèse précédente ainsi que du fait que la pratique agricole est gloablement identique sur un secteur considéré.

À partir de ce constat, nous avons élaboré une procédure d'extraction en deux temps dont nous présentons les résultats pour l'exemple du site de Dar Dhaoui. Le premier temps de la procédure utilise le parcellaire agricole de la zone considérée. Ce dernier a été dessiné par photo-interprétation de la mosaïque d'extraits *Google Earth*, dont la résolution permet d'identifier les parcelles par les *tabias*, des levées de sable, souvent végétalisées. Ce travail, manuel, est nécessaire pour optimiser l'extraction des oliviers. 193 parcelles ont ainsi été vectorisées (fig. 5.3).

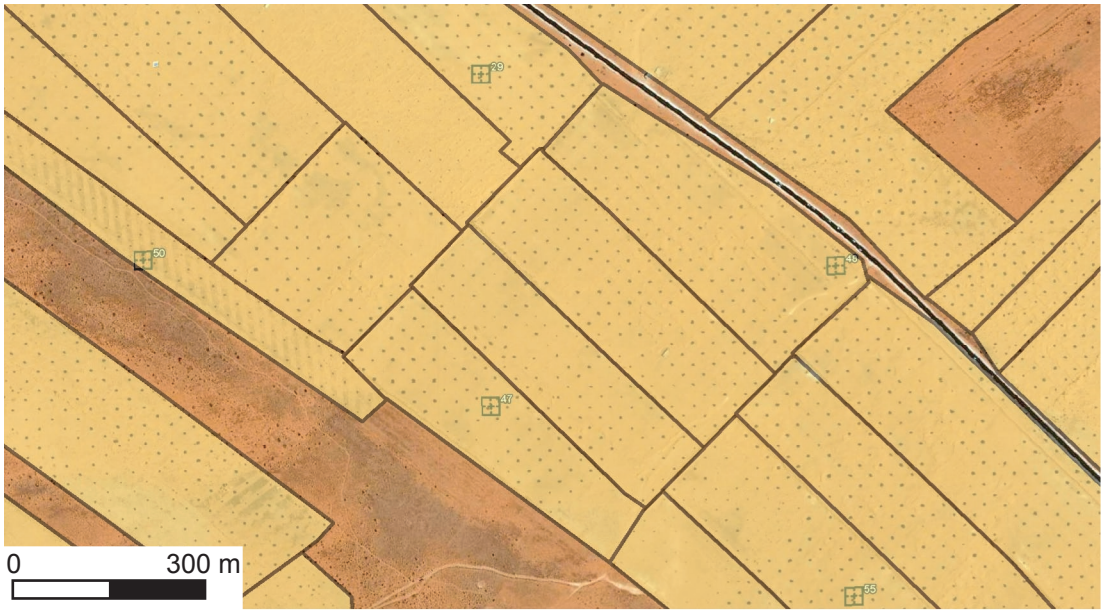


FIGURE 5.3 – *Exemple de parcelles dessinées par photo-interprétation pour le site de Dar Dhaoui, à partir de la mosaïques d'extraits* Google Earth *de juin 2003*

Une fois cette donnée obtenue, nous pouvons l'utiliser pour concentrer la procédure d'extraction. En effet, on peut définir un masque qui sert à extraire, depuis la mosaïque d'extraits *Google Earth*, uniquement les parcelles agricoles qui contiennent donc les oliviers. Cela diminue la quantité d'information à traiter et, donc, accélère la procédure d'extraction tout en diminuant le risque de confusion, puisque, à l'intérieur des parcelles ne se trouvent en principe que des oliviers. Pour extraire ces derniers, la démarche suivie est la suivante :

Séquence d'extraction des oliviers depuis la mosaïque d'extraits *Google Earth*

BTH avec un disque de taille 4 de l'image source

⇓

Seuillage haut (création d'un marqueur) et bas (création d'un masque)

⇓

Recontruction du marqueur dans le masque

⇓

Filtre sur deux paramètres morphologiques : l'orientation des régions obtenues et leur élongation

⇓

Écriture du résultat dans une nouvelle image et importation du fichier .tfw correspondant

L'application de cette séquence à un extrait de la mosaïque est présentée en annexe K. Nous avons présenté la méthode dans des travaux précédents (Venard, 2007, Venard *et al.*, 2009 ; 2010),aussi ne la développons-nous pas davantage ici. On peut cependant rappeler certains éléments :

- les filtres utilisés ont un sens précis : l'élongation est un paramètre calculé dont la valeur tend vers 0 pour un disque parfait et vers 1 pour une ellipse étroite et allongée. Elle renvoie donc à l'aspect général des oliviers L'orientation est obtenue à partir de la mesure de l'angle de l'axe principal des objets. Or, chaque olivier projette une ombre portée qui est extraite avec l'arbre. De ce fait, on peut déduire une orientation moyenne des oliviers depuis le jeu de données ;
- l'erreur liée à la procédure a été évaluée. Elle est de l'ordre de 3 %, ce qui est satisfaisant, dans la mesure où la méthode est relativement simple. Cette valeur est à comparer, par exemple, avec celle obtenue par Gonzalez *et al.* (2007). Ces auteurs appliquent une méthode différentes à une image *QuickBird* comparable du sud de l'Espagne. À partir de la définition d'un schéma de répartition et d'orientation des oliviers dans une cellule de référence et des caractéristiques spectrales d'un olivier considéré comme typique, ils élaborent une démarche basée sur le test de chaque candidat et de sa probabilité à être un olivier suivant qu'il correspond aux critères. Au terme de cette procédure, le taux de détection est de l'ordre de 98,5 %. Ce résultat est supérieur au nôtre mais la complexité de la procédure et le fait qu'elle repose sur une hypothèse qui ne doit pas se vérifier partout - les oliviers sont strictement alignés de la même façon - sont, de notre point de vue, un obstacle à sa reproductibilité et à son application à différents contextes.

Au terme de la procédure, on obtient en résultat une image binaire où les oliviers sont représentés par des régions de pixels (fig 5.4). De la même façon que pour les buissons à Rass Elkamen Labiadh, l'information de géoréférencement n'est pas perdue. On peut donc importer le résultat dans un SIG et facilement convertir les régions de l'image en objets vectoriels. Dans le cas présenté ici, ce sont près de 15 000 oliviers qui ont été extraits.

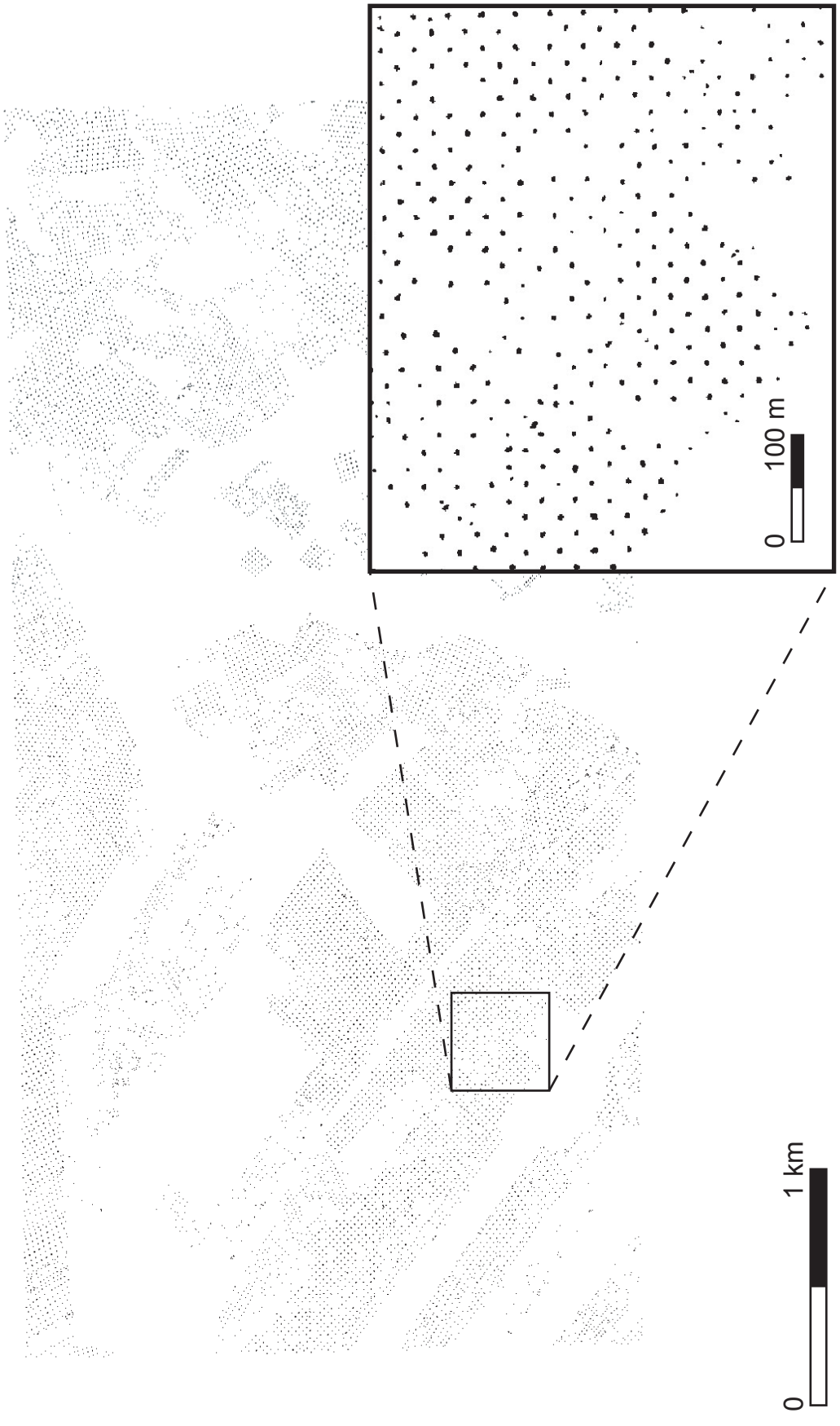


FIGURE 5.4 – *Résultat de la procédure d'extraction des oliviers appliquée à la mosaïque d'extraits* Google Earth *du site de Dar Dhaoui*

L'extraction simplifiée des arbres d'une image satellite peut répondre à de nombreux objectifs d'un observatoire, pas nécessairement liés à l'étude de la morphodynamique éolienne. Identifier le nombre de plants d'une parcelle permet de calculer des volumes d'irrigation nécessaire, de doser l'amendement, etc. Le suivi de l'évolution du nombres de parcelles, de la densité de plantation, permet d'identifier les secteurs de conquête et de mise en culture. Ces différentes problématiques sont communes, dans le contexte des régions sèches, à bien des environnements. En particulier, l'identification des arbres comme objets uniques est utile dans le suivi des oasis. Elle rend possible un suivi individualisé, un repérage sur le terrain facilité qui permettent de développer plus facilement des approches d'analyse épidémiologiques par exemple. Enfin, l'agrégation du résultat sous forme de carte de densité, méthodologie que nous présentons plus loin, fournit une base de comparaison avec d'autres indicateurs potentiels, comme le rendement à l'hectare, les pratiques observées sur le terrain, etc. L'ensemble de ces points mériterait un traitement plus détaillé qui n'est pas l'objet de cette présentation.

Cette section présentant les procédures et les résultats de la structuration de l'information des images à très haute résolution pour isoler l'objet végétation s'achève donc sur ce constat d'une efficacité et d'une reproductibilité renforcée quand on s'appuie sur les images *QuickBird*, par rapport aux images *Pixy*. Comme la section suivante le montrera, des problématiques différentes se posent lorsque l'on cherche à isoler les formes éoliennes.

5.2 Les modelés éoliens

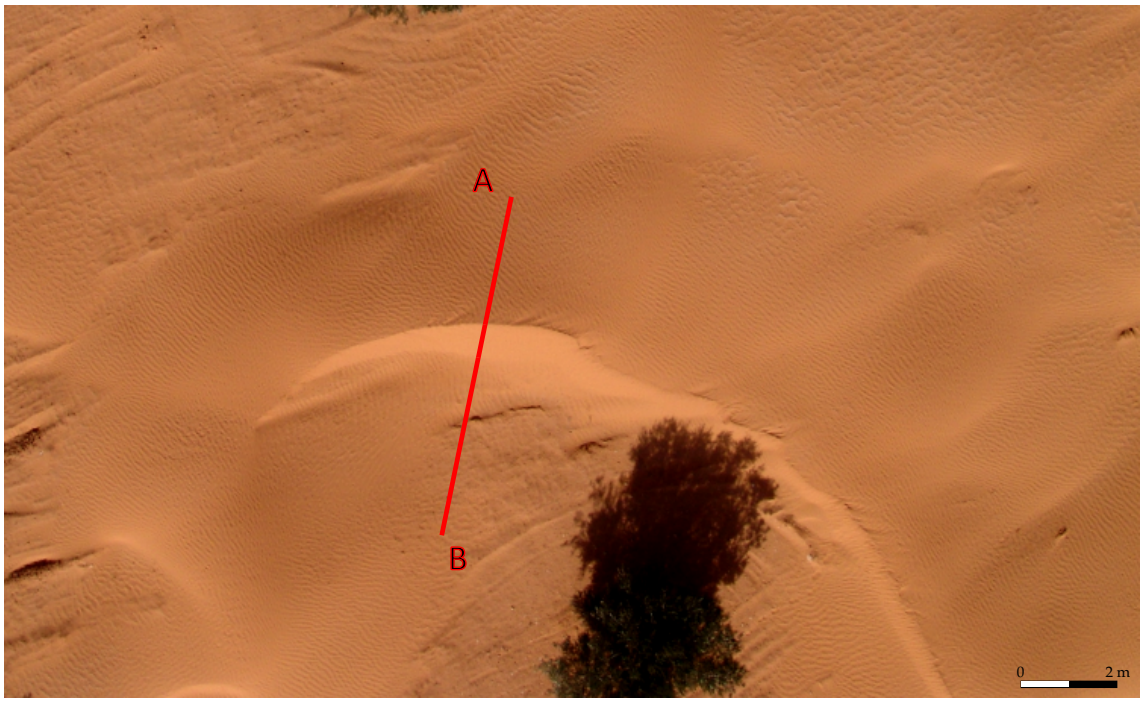
La seconde famille d'objets d'intérêt que nous souhaitons analyser à partir des images sont les modelés éoliens. Le travail a porté sur les formes éoliennes d'obstacle d'accumulation. Ces dernières se rencontrent à différentes échelles et une procédure adaptée à chacune de ces échelles a été mise au point.

5.2.1 Problématiques rencontrées

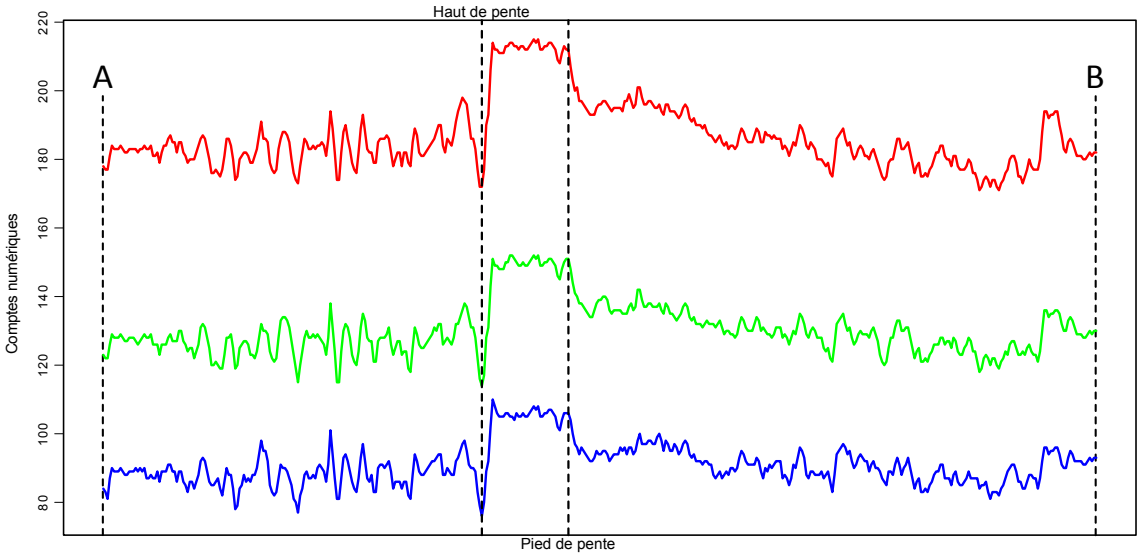
Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'est pas simple, en première approche, d'extraire des formes éoliennes sableuses, même avec la très haute résolution dont nous disposons. La raison est quasi-évidente : le sable, souvent éolien, constitue la matrice principale de tous les secteurs que nous étudions. Les formes complètes se confondent donc souvent avec cette matrice. En revanche, un élément des formes éolienne est généralement bien visible sur les images de télédétection : les pentes croulantes, comme nous l'avons montré au chap. 1. Nous nous étions jusqu'alors contenté de relever ce point qu'il faut maintenant fonder conceptuellement, pour dépasser le stade de l'observation.

Les dunes transversales à arête vive, de la famille des barkhanes, présentent deux pentes disymétriques. La pente au vent est plus longue et douce, avec un angle de l'ordre de 10 à 15° suivant les cas, la pente sous le vent est plus courte et plus forte, avec une valeur d'équilibre autour de 31°. Cette différence d'angle

joue dans la façon dont chaque élément de la dune renvoie les rayons du soleil et la réflectance différenciée génère un effet de contraste qui fait ressortir la pente croulante. Cela se voit particulièrement en observant les valeurs radiométriques obtenues pour un transect suivant une trajectoire normale à la pente croulante d'une forme (fig. 5.5).



(a) transect longitudinal



(b) profil radiométrique du transect

FIGURE 5.5 – *Le comportement spectral d'une pente croulante. Exemple d'un cordon à arête transversale du site de Dar Dhaoui*

Le transect radiométrique montre bien que les valeurs des pixels qui consti-

tuent la pente croulante sont plus fortes, dans les trois canaux, que dans les autres secteurs de la forme, avec une rupture nette qui devrait faciliter l'extraction. On peut également voir que la réflectance chute au début de la pente croulante, ce qui correspond à une petite zone d'ombre en arrière de cette dernière. Elle peut répondre à deux interprétations morphologiques :

1. Un vent soufflant dans une direction contraire à celle de la pente croulante a pu mettre en place une contre-pente en arrière qui projette alors cette ombre portée ;
2. la pente croulante n'atteint pas le sommet de la dune, et l'arête vive est en léger décalage par rapport au point le plus haut de la forme, ce qui génère cette ombre.

Sur la base de cet effet de contraste, nous pouvons assez facilement définir une procédure d'extraction d'un indicateur qui, s'il ne s'agit pas de la forme complète, permettra d'estimer un certain nombre de critères de taille, de direction, éventuellement de taux de présence par unité de surface, etc. En revanche, il est évident que cela exclut, *de facto*, les formes qui ne présentent pas de pentes croulantes. Mais on peut envisager d'extraire les rides éoliennes, qui permettent d'identifier les zones où la dynamique éolienne est particulièrement intense, et les formes de dimensions plus conséquentes présentant une pente croulante : barkhanes, dunes transversales dans les oliviers, formes éoliennes d'obstacles sous le vent des buissons dans les secteurs steppiques.

Le même raisonnement s'applique, globalement, aux images *QuickBird*. Nous avons déjà montré que celles dont nous disposions n'avaient pas été capturées avec des conditions d'éclairement optimales. De ce fait la pente croulante idéalement orientée par rapport à l'angle d'éclairement sera mise en valeur. Le résultat ne pourra donc pas être interprété en terme de volume de sable par exemple. En revanche, il sera utile pour localiser les formes éoliennes et, dans le cas de formes orientées, pour analyser cette orientation. À terme, la possibilité de localiser précisément les formes éoliennes ouvre la voie à des approches de statistiques spatiales et de comparaison de répartition avec d'autres indicateurs, comme la végétation par exemple. L'approche a d'abord été mise au point pour les pentes croulantes des formes identifiées sur les images *Pixy*, puis étendue aux formes des images *QuickBird*. Comme la problématique est sensiblement identique pour les rides éoliennes, nous avons également cherché à extraire cet indicateur qui permet d'étudier la morphodynamique éolienne à une échelle plus fine.

5.2.2 les pentes croulantes des formes éoliennes d'obstacle

Les pentes croulantes ont été extraites des images *Pixy* en appliquant les méthodes de la MM. La séquence retenue est la suivante :

Séquence d'extraction des pentes croulantes des dunes transversales depuis les images du *Pixy*

Filtre automedian par reconstruction

⇓

Seuillage haut (marqueur) et bas (masque)

⇓

Reconstruction du marqueur dans le masque

⇓

Calcul de paramètres sur les régions obtenues : surface (en pixel) de chaque région, hauteur, largeur et orientation de leur plus petit rectangle enveloppant (MBR)

Le filtre automedian par reconstruction (cf. chap. 3, sec. 3.3.1.2) permet de rehausser le contraste entre les pentes et le reste de la matrice sableuse. Il facilite la suite de la procédure d'extraction. Au terme de celle-ci, on obtient en sortie un ensemble de régions de pixels, ainsi que des caractéristiques morphologiques associées à chacune de ces régions. Appliquée, par exemple, à la figure 5.6, la séquence donne le résultat présenté en figure 5.7.

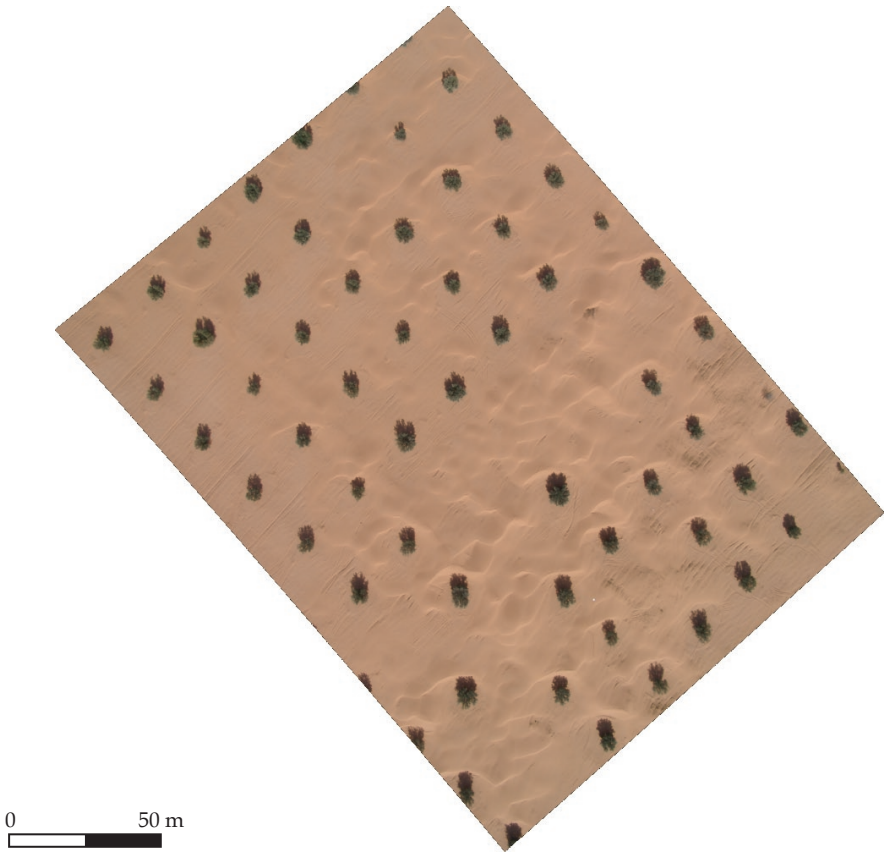


FIGURE 5.6 – *Image* Pixy *du 4 nov. 2009 à Dar Dhaoui. Parcelle d'oliviers présentant des dunes transversales à arête vive*

Répété pour toute les images couvrant un secteur donné, ce traitement permet de décrire avec précision la répartition spatiale des formes éoliennes consi-

FIGURE 5.7 – *Résultat obtenu après application de la séquence d'analyse à la fig. 5.6*

dérées. Ainsi peut-on envisager de suivre l'évolution de cet indicateur de façon relativement simple, à la seule condition de disposer d'images ayant des caractéristiques de prise de vues comparables. Le fait de pouvoir calculer des paramètres morphologiques sur les objets obtenus permet d'aller plus loin dans certaines analyses, comme par exemple celle des orientations des formes.

Cette orientation est donnée, pour chaque objet, par l'angle du MBR avec un axe horizontal (fig. 5.8). On peut se référer à l'hypothèse, présentée au chap. 1, concernant les orientations des dunes transversales pour traduire cette orientation en une résultante des déplacements sableux effectifs. De plus, compte-tenu du temps qu'il faut pour construire des formes de dimensions importantes, on peut envisager de discriminer les dunes en fonction de leur taille, que l'on considère relative à la surface de la pente croulante, et d'essayer de relier les classes obtenues aux données de vents dont nous disposons par ailleurs. Pour cela, nous avons considéré la surface médiane de chaque groupe de pentes associé à une direction donnée. L'intérêt de cette valeur est que, moins sensible aux extrêmes, elle permet de lisser les erreurs d'extraction, comme de petits artefacts en très grand nombre, par exemple.

L'analyse des images *Pixy* du secteur de Dar Dahoui et la synthèse des informations morphologiques propres à chaque objet extrait donne les résultats suivants (tab. 5.1) : 346 pentes ont été extraites, et l'échantillon présente une surface médiane de 9,4 m², ce qui est une valeur plutôt élevée, indiquant que

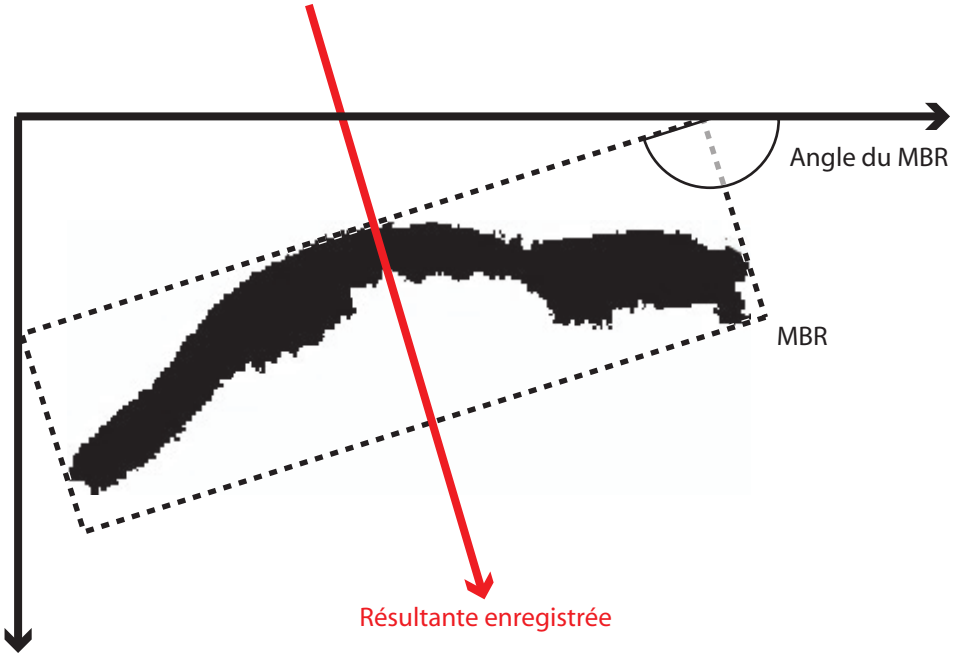


FIGURE 5.8 – *L'orientation du MBR d'une pentre croulante extraite par MM et son rapport à la résultante des déplacements sableux*

les formes étudiées ont des dimensions importantes. L'analyse de la répartition des directions résultantes enregistrées par ces pentes croulante fait apparaître une variabilité assez marquée, puisque 10 directions sont représentées parmi lesquelles 5 ont une fréquence supérieure à 13 %.

TABLEAU 5.1 – *Caractéristiques des pentes croulantes extraites des images* Pixy *de Dar Dhaoui*

Dir. (°)	Nombre	Fréq. (%)	Surf. méd. (m²)
0	69	19,9	10,0
15	30	8,7	9,7
30	19	5,5	25,1
45	4	1,2	30,8
60	2	0,6	69,2
90	2	0,6	24,9
300	5	1,4	11,5
315	45	13	2,7
330	85	24,6	7,9
345	85	24,6	15,1

Cependant, cette variabilité doit être relativisée, pour deux raisons :

1. Elle était plus ou moins attendue, dans la mesure où, en étudiant des

images à très haute résolution spatiale, l'analyse intègre une complexité de causalité qui dépasse le seul cadre des DPS. D'autres facteurs peuvent en effet, localement, expliquer les directions, comme la disposition des oliviers, par exemple, ou la densité et la taille des formes éoliennes, qui jouent le rôle d'obstacles et perturbent le flux éolien ;

2. Un groupe majoritaire se dégage néanmoins : les pentes ayant une direction comprise entre 330 et 345 degrés représentent 49 % de l'échantillon. En tenant compte de la remarque n° 1, on peut même élargir ce groupe. En effet, pour lisser les effets locaux, on peut rassembler les directions obtenues par quadrants. Ainsi obtient-on un groupe de directions allant de ONO à N qui représente 84 % de l'échantillon.

Les pentes ayant enregistré une résultante des déplacements sableux de secteur NO, globalement, sont donc majoritaires. On peut alors analyser les données réelles de vent dont nous disposons pour la station de Dar Dhaoui, afin d'identifier à quelle profondeur temporelle les données obtenues pour les formes éoliennes peuvent faire référence. Les résultats de cette analyse temporelle fine des données de vent sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 – *Caractéristiques des DPS de la période précédant le 3 nov. 2009 à Dar Dhaoui (cumul des n jours précédents)*

Durée	Dir (°)	MR	CM	Durée	Dir (°)	MR	CM
1 jr	231	31,6	0,9	12 jrs	327	80,5	0,8
2 jrs	216	14,3	0,7	13 jrs	323	73,7	0,7
3 jrs	305	13,1	0,4	14 jrs	322	64,4	0,6
4 jrs	310	13,1	0,5	15 jrs	322	60,1	0,6
5 jrs	310	10,5	0,5	1 mois	333	29,6	0,6
6 jrs	329	13,1	0,6	1,5 mois	298	33,7	0,3
7 jrs	340	21,0	0,7	2 mois	325	23,8	0,2
8 jrs	346	31,1	0,8	2,5 mois	30	29,7	0,3
9 jrs	340	97,2	0,9	3 mois	50	44,7	0,4
10 jrs	336	101,1	0,9	3,5 mois	54	43,3	0,4
11 jrs	336	91,9	0,9	4 mois	59	61,1	0,5

Son examen apporte un certain nombre d'enseignements. En premier lieu, on constate que les valeurs de direction résultante calculées à partir des données de vents qui se rapprochent le plus de celles estimées à partir des images sont comprises entre 7 et 15 jours avant la prise de vue. Ces valeurs sont cohérentes du point de vue des directions, mais également du point de vue de la migration résultante - il faut que du matériel ait effectivement été déplacé pour pouvoir modifier l'aspect des pentes croulantes - ainsi pour les coefficients de migration,

qui permettent de savoir si les déplacements se sont faits dans une direction préférentielle et, donc, si la direction résultante traduit un déplacement réel.

On constate, en second lieu, que la valeur de direction résultante obtenue pour le mois précédant la prise de vue est elle aussi cohérente avec les orientations générales des pentes croulantes. Si on remonte plus loin dans le temps, on remarque que les directions ne sont plus cohérentes avec les données obtenues par analyse d'image et, de plus, que les coefficients de migration sont faibles, ce qui renvoie aux résultats de l'analyse annuelle des DPS de la station de Dar Dhaoui, qui montrait que, à l'échelle d'une année, deux directions concurrentes faisaient mécaniquement baisser la valeur de CM. En remontant encore plus loin que les données présentées dans le tableau, on retrouve une valeur de direction résultante proche de celles des images pour les 8 mois précédant la prise de vue.

Un dernier résultat peut être présenté. Nous avons montré (chap. 1) qu'à partir de la longueur de la pente croulante, on peut calculer la hauteur d'une forme avec une précision satisfaisante. C'est indirectement possible avec les données dont nous disposons. On peut mesurer automatiquement la largeur du plus petit rectangle enveloppant (MBR) mais elle ne correspond pas toujours à la longueur de la pente croulante, en raison de la courbure de cette dernière (fig. 5.8). En revanche, on peut mesurer également la longueur du MBR et donc calculer sa surface. Le ratio entre cette valeur et la valeur de surface obtenue pour la pente croulante permet d'appliquer une correction, approchée mais cependant pertinente, à la valeur de largeur du MBR.

On peut ainsi estimer la hauteur maximale de la forme associée, en convertissant la largeur du MBR en une estimation de la hauteur par produit avec la tangente de son angle. Cette opération peut aussi bien être effectuée sur chaque forme ou sur l'ensemble de l'échantillon, en retenant la valeur médiane de la largeur du MBR. Ici, cette valeur est de $1,5\ m$ ce qui représente, après conversion, une hauteur médiane pour les dunes transversales de cette parcelle d'oliviers de l'ordre de $0,9\ m$. De plus, 95 % des résultats obtenus correspondent à une hauteur inférieure à $2\ m$. Ces valeur sont cohérentes avec les observations de terrain, comme l'illustre la fig. 5.9.

Au plan thématique, l'interprétation de ces résultats peut se faire à deux niveaux. Du point de vue instantané, ils indiquent, en plus de la compétence du vent, une disponibilité du matériel éolien. Celle-ci peut se comprendre soit par l'absence de précipitations qui auraient pu figer les formes, soit par l'activité agricole. La période considérée est, en effet, celle pendant laquelle les labours d'automne ont lieu. La combinaison de ces labours, de la sécheresse - les données de la station de Dar Dhaoui indiquent qu'il est tombé moins de 10 mm de pluie sur le mois précédent la prise de vue, dont 8,5 mm en une seule averse - et de la capacité importante de transport par le vent permettent d'expliquer l'aspect exemplaire des formes éoliennes. Ainsi l'approche développée permet-elle, à travers l'analyse des formes éoliennes, de retracer des évolutions ou des caractéristiques de l'environnement dans lequel elles ont été formées. Cela valide leur utilisation comme indicateurs de suivi de la dynamique du milieu et leur sensibilité aux modifications qui l'affectent.

(a) taille la plus fréquente

(b) taille maximale

FIGURE 5.9 – *Aperçu des différentes hauteurs des dunes transversales de la parcelle d'oliviers survolée par le* Pixy *à Dar Dahoui*

Au plan méthodologique, ces deux familles de résultats démontrent l'intérêt de la démarche proposée. Elle répond aux critères, présentés au chap. 2, qui définissent la qualité d'un indicateur. À partir d'une séquence de traitements relativement simple, on extrait deux paramètres :

1. Le premier permet d'estimer les directions des déplacements sableux depuis la quinzaine jusqu'au mois précédant l'observation ;
2. Le second permet de d'évaluer la morphologie générale des formes analysées.

Chacun de ces paramètres est générique, et la reproductibilité de la méthode permet d'envisager des comparaisons entre sites différents et, surtout, de la répéter à intervalles réguliers correspondant à sa résolution temporelle. Les

possibilités ouvertes, en particulier le calcul de volumes, laissent entrevoir des développements ultérieurs du point de vue de l'évaluation quantitative de l'ensablement.

5.2.3 Application aux images *QuickBird*

Une approche similaire a été adoptée pour extraire les formes éoliennes depuis les images *QuickBird*. Cependant, des différences de résultats importantes doivent être précisées :

1. En premier lieu, le fait que les images n'ont pas été capturées avec un éclairement zénital perturbe la procédure. Pour schématiser, dans le contexte d'une forme présentant différents plans inclinés (pentes croulantes ou non), seul le plan éclairé est bien différencié du reste de la forme et de la matrice (fig. 5.10).

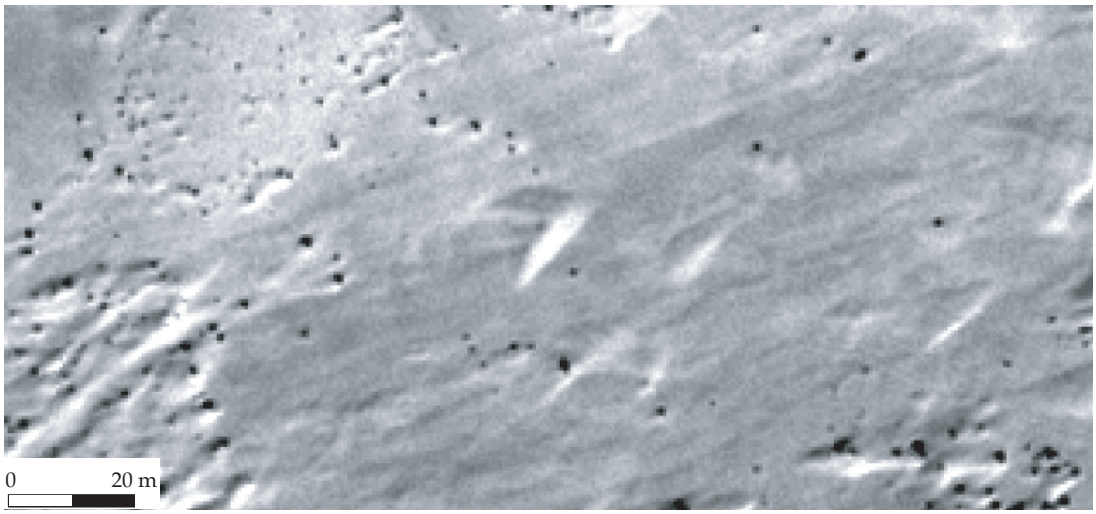


FIGURE 5.10 – *Mise en évidence par éclairement oblique d'une partie d'une forme éolienne. Site de Rass Elkamen Labiadh*

2. Cela entraîne une extraction de seulement une partie de ces formes. Cela signifie donc qu'il n'est plus envisageable de chercher à construire des analyses en terme d'orientation. En effet, quel que soit le type de la forme considérée, seule la partie éclairée est extraite. Le cas de la barkhane (cf. *supra*) montre que l'orientation de l'objet extrait ne correspond pas à une résultante de déplacements potentiels. Comme il est impossible de discriminer les objets extraits qui auraient une orientation « normale » de ceux qui ont une orientation faussée, il vaut mieux ne pas utiliser l'information.
3. En revanche, on peut raisonnablement considérer que la taille de la forme éolienne complète est proportionnelle à la taille de la partie éclairée qui aura été extraite. En effet, on peut envisager trois cas de figure. Soit la forme est à l'ombre : elle sera alors ignorée par la procédure et produira un faux négatif. Soit elle est éclairée et s'apparente à un placage - c'est-à-dire qu'elle ne présente pas de pente croulante - dans ce cas, la probabilité est forte que la procédure l'ait intégralement extraite. Soit, enfin,

elle présente une ou des pentes et une seule aura été extraite, mais ce type de forme a une géométrie qui fait que l'on peut établir des relations de proportionnalité entre ses différentes dimensions (cf. chap. 1). Certes, l'approximation est trop grossière pour envisager des calculs précis de volumes, par exemple, mais suffisante pour estimer, comme nous essaierons de le faire par la suite, une densité de couverture par les formes éoliennes.

Ainsi, l'analyse des images *QuickBird* ne permet pas de réaliser des études des formes éoliennes aussi fines que l'analyse des images *Pixy*. Elle permet, cependant, d'une part de localiser avec précision les formes, ce qui ouvre la voie à des analyses spatiales et, d'autre part, de cartographier la densité de formes éoliennes, ce qui est un indicateur intéressant en soi et que l'on peut envisager de rapprocher d'autres indicateurs, comme nous le montrerons par la suite. Le résultat final de la procédure permet d'extraire, pour le site de Rass Elkamen Labiadh, près de 550 000 formes éoliennes (fig. 5.11).

En première analyse, on constate une répartition de ces formes essentiellement concentrée à l'ouest du secteur. En cela, elle se rapproche de la répartition des buissons extraits. Dans une certaine mesure, on peut considérer que cela valide l'approche conceptuelle que nous avons adoptée, où nous avons essayé de montrer que l'essentiel des formes présentes en régions sèches non désertiques sont des formes éoliennes d'obstacle, dont l'existence est souvent liée à la végétation.

Le résultat obtenu est également assez précis, au moins concernant ces formes d'obstacle, qui n'ont généralement pas d'arête. Les formes plus élaborées, comme les barkhanes ou les aklés du petit erg, sont moins complètement extraites, pour les raisons que nous avons présentées plus haut. Cette différence correspond à la distinction que nous avions proposée au chapitre 1 entre les formes éoliennes d'obstacle et les formes éoliennes autonomes. Le fait de retrouver, dans une procédure d'analyse d'images, une différence de comportement entre deux types d'objets distincts dans une approche thématique et conceptuelle en démontre l'intérêt. Celui-ci est fondé, notamment, sur la précision des données utilisées, mais également sur la finesse des outils de la Morphologie Mathématique qui permettent de préserver la qualité thématique des données initiales.

Cependant, cet atout a également des limites du point de vue de l'interprétation du résultat. Les procédures que nous avons présentées ont permis d'accumuler une quantité de données considérable à l'échelle des objets. Mais le volume, en soi, n'est pas significatif s'il ne permet pas d'accéder à une meilleure compréhension des objets étudiés. Hormis les études conduites à Dar Dhaoui, où existe la possibilité de mettre en place des analyses croisées avec des données d'autres sources, les résultats obtenus ne sont pas directement interprétables en vue de nos objectifs : indicateurs de suivi et caractérisation synthétique de la morphodynamique éolienne. Ces problèmes liés au positionnement scalaire, ainsi que les réponses que nous proposons d'y apporter, font l'objet de la section suivante.

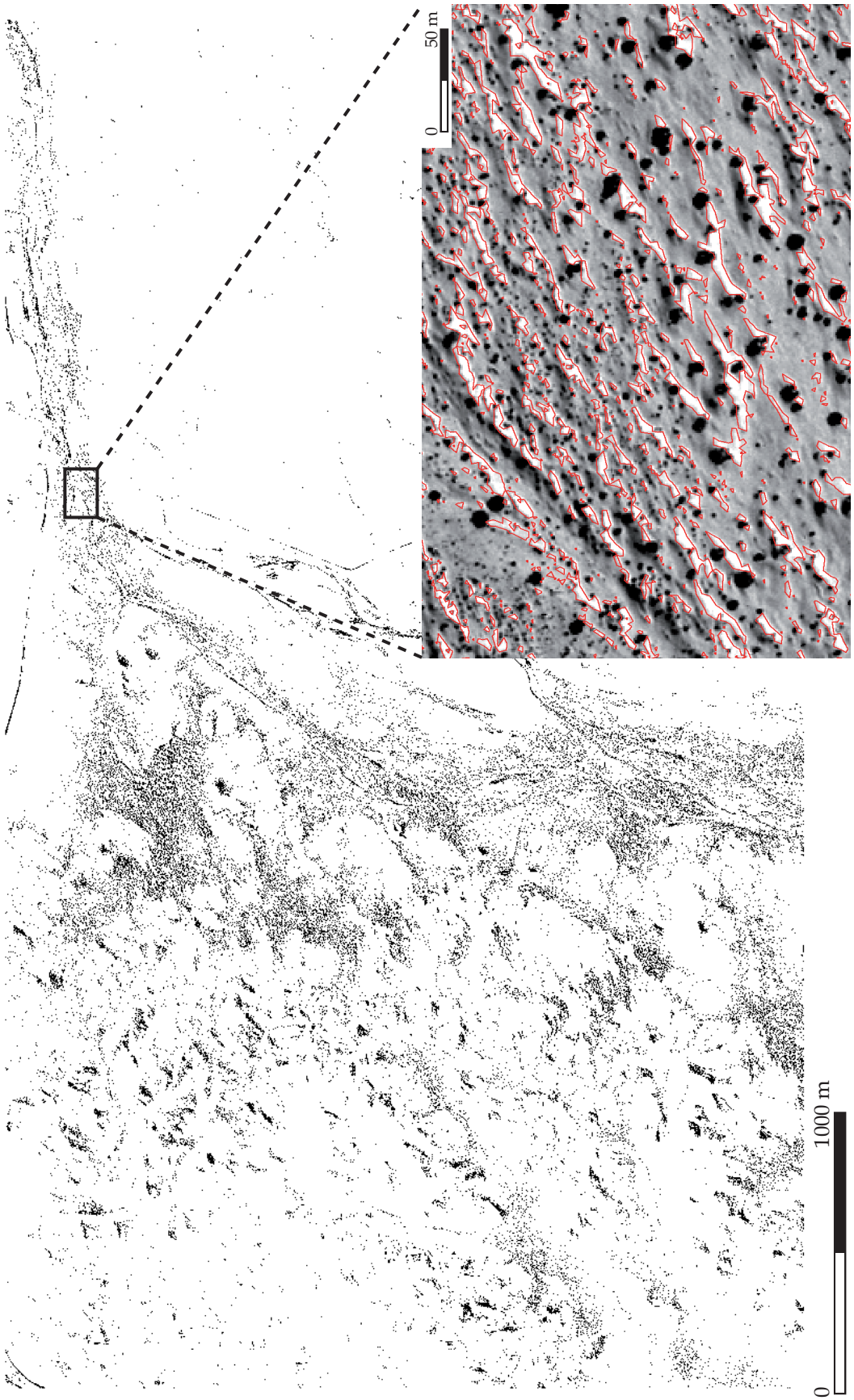


FIGURE 5.11 – *Résultat de l'extraction des formes éoliennes pour le site de Rass Elkamen Labiadh depuis l'image* QuickBird *de mars 2009*

5.3 Synthèse des questions posées par les échelles

5.3.1 La dépendance d'échelles temporelle

Il ressort des sections précédentes que les objets extraits des images correspondent à des instantanés. Or, nous avons montré des cas où ces instantanés ont pu être mis en relation avec des dynamiques climatiques ou anthropiques. En particulier les vents, ont mis en évidence le fait que ces objets étudiés enregistrent effectivement des données temporelles. Cependant, nos résultats montrent aussi qu'il existe un lien entre les dimensions des formes considérées et les profondeurs temporelles des dynamiques qu'elles enregistrent.

Ainsi, les états de surface du mois de septembre 2009 à Dar Dhaoui analysés ont-ils enregistré à la fois la pluie récente et le labour qui les a uniformisés. De même, les pentes croulantes ont-elles pris des orientations conformes à la direction résultante des déplacements potentiels sableux des 15 à 30 jours précédant la date de la prise de vue. Ces objets, analysés à une échelle spatiale fine, sont donc des indicateurs des changements temporels de court terme.

On pourrait donc légitimement penser que la même dépendance existe entre les formes éoliennes extraites depuis les images *QuickBird* et une profondeur temporelle qui serait alors plutôt de l'ordre du moyen terme. Nous avons cependant montré que l'analyse au niveau des éléments du paysage était complexe compte tenu de la quantité d'informations récoltée. C'est pourquoi il peut être intéressant de tenter l'approche au niveau du composant paysager, plus petite combinaison paysagère homogène reconnue sur le terrain et sur les images (Laques, 2009). Comme le composant correspond à une échelle plus synthétique, son étude peut être simplifiée.

Pour illustrer ces propos, nous présentons les résultat d'un protocole mis en place à *Rass Elkamen Labiad*. Il consiste à suivre les contours du petit erg situé au niveau du point d'inflexion du cours de l'oued vers une direction N–S. Une interprétation visuelle du paysage a permis de définir une limite simple à l'erg fondée sur la densité de végétation (fig. 5.12).

Figure 5.12 – *Vue paysagère de l'erg de Rass Elkamen Labiad, Tunisie*

Cette limite a été suivie, au sol, avec un GPS enregistrant les traces en continu

pendant le parcours. Cette opération a été répétée trois fois au cours de l'année 2009 : en avril, en juin et en septembre. Comme les contours obtenus sont reportés sur l'image *QuickBird* de mars (fig. 5.13), on peut considérer que l'on dispose de quatre états instantanés pour l'année 2009. En réalité, on remarque que le contour d'avril est quasiment identique à celui de l'image, ce qui donne une indication sur la résolution temporelle de la méthode : en-deçà de l'échelle du trimestre, les variations sont trop fines pour être enregistrées par l'erg dans son ensemble. L'évolution mise en évidence reste relative. La limite orientale

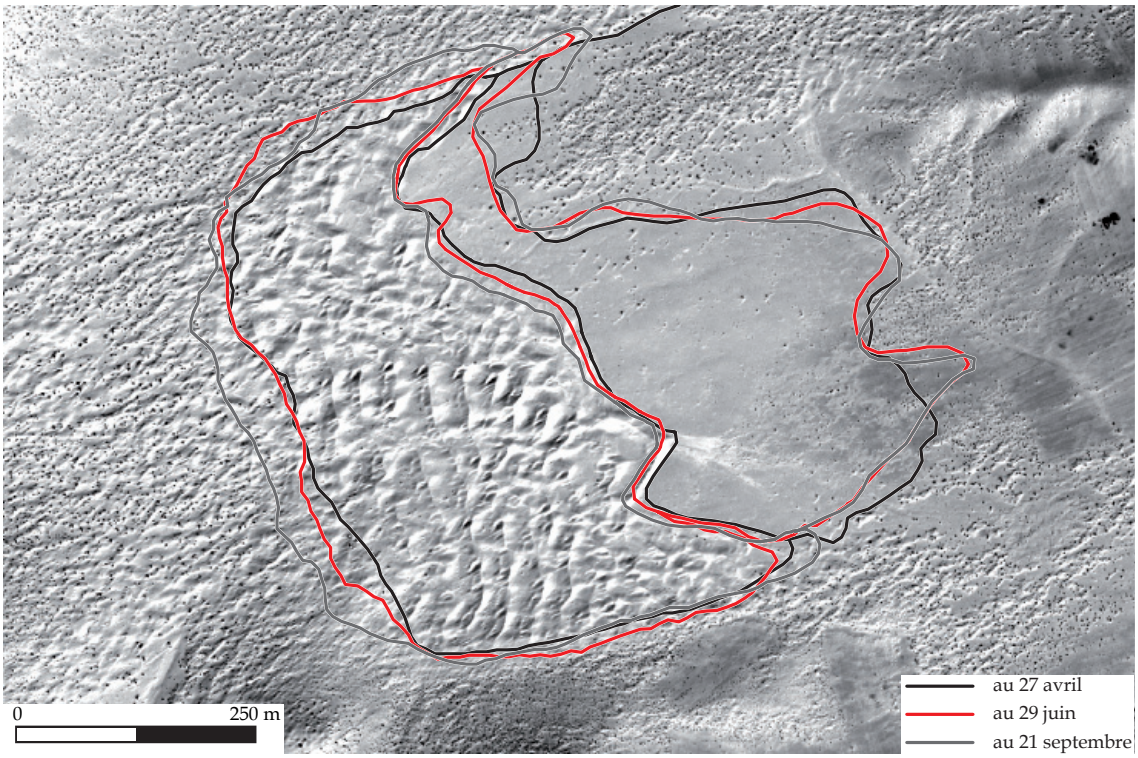


FIGURE 5.13 – *Contours de l'erg du site de Rass Elkamen Labiadh et de sa zone de déflation, à différents instants de 2009, reportés sur l'image* QuickBird *de mars*

de l'erg est ainsi plutôt stable, à l'exception d'une excroissance qui apparaît sur le contour de juin mais qui a presque disparu du contour de septembre. Une légère tendance semble cependant se dessiner, qui traduirait un déplacement de l'ensemble de l'objet complexe erg–végétation–zone de déflation vers l'ouest. Les contours semblent ordonnés en ce sens. Cette interprétation s'appuie également sur la forme générale de l'erg, comparée à la forme de sa zone de déflation. On voit que la partie nord de l'erg est en forme de demi-croissant de lune qui semble trouver un prolongement dans une zone où la végétation est beaucoup moins dense. À l'échelle d'une année, on voit toutefois que les différences ne sont pas très marquées.

L'exploitation de la base de données d'images satellitaires dont nous disposons a permis d'étendre l'analyse à une plus grande profondeur temporelle. Nous pouvons ainsi comparer l'état de l'élément erg-zone de déflation entre septembre 2006, mars 2009 et juin 2010, grâce aux mises à jour de *Google Earth*

(fig. 5.14). On remarque avec cette illustration que la tendance qui se dessine

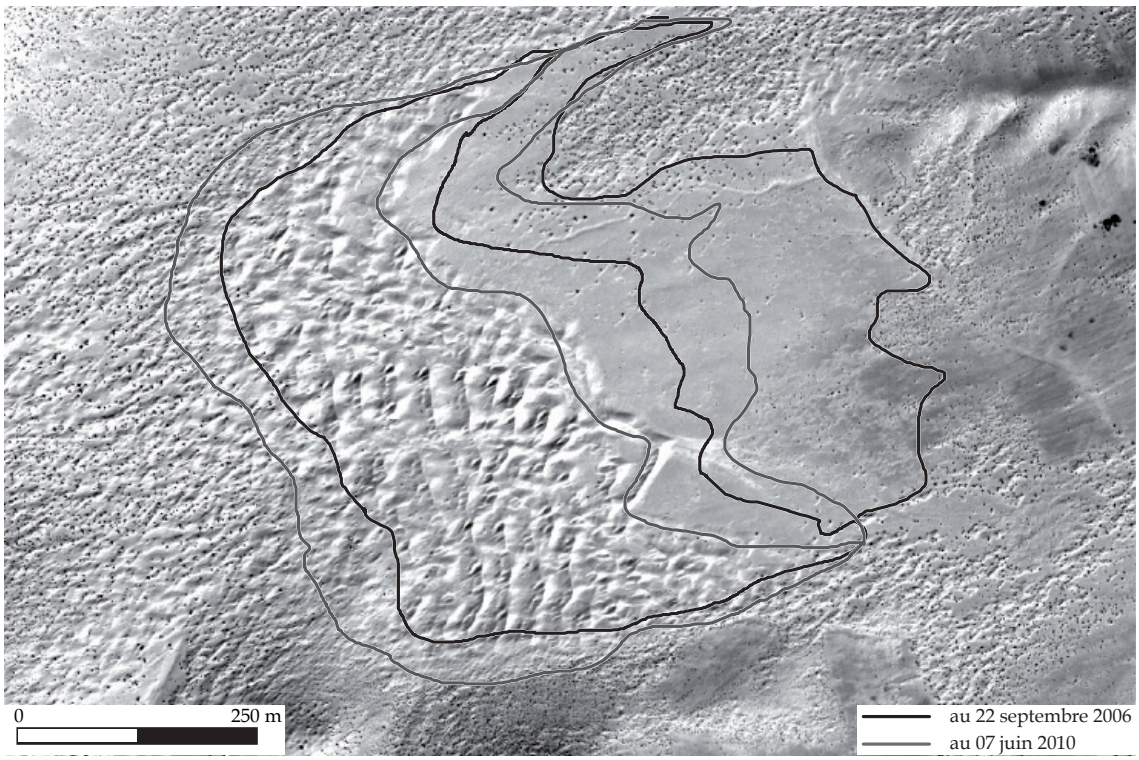


FIGURE 5.14 – *Contours de l'erg du site de Rass Elkamen Labiadh et de sa zone de déflation, entre 2006 et 2010, reportés sur l'image* QuickBird *de mars 2009*

est beaucoup plus nette à cette échelle : un déplacement de l'ensemble du composant paysager semble bien s'effectuer d'est en ouest. Mais, si cette tendance s'avère effectivement structurelle, comment expliquer que l'erg n'ait pas disparu ? On constate en effet que sur la carte topographique au 1 : 200 000^{e} de la Tunisie, établie à partir de missions de photographies aériennes de 1971, complétées par des relevés de terrain de 1972, la zone de l'erg est bien indiquée comme zone ensablée. Les échanges avec les personnes rencontrées sur place confirment la permanence de la localisation de l'erg sur le moyen terme. Comment concilier cette permanence avec l'évolution identifiée par l'analyse des images ?

Une hypothèse plausible fait intervenir des pulsations saisonnières. Dans ce cas, la dynamique éolienne locale se rapprocherait de celle que nous avons observée pour la station de Medenine, avec deux directions résultantes majoritaires à l'échelle d'une année. Cette hypothèse est confortée par l'observation, par exemple, de l'état de l'erg en juin 2010 (fig. 5.15). On constate que, par rapport aux autres images que nous avons présentées (fig 5.13 et 5.14), les aklés qui forment l'erg ont une structure beaucoup plus rectiligne. Sur les images de septembre 2006 et de mars 2009, ces aklés présentent, au contraire, une structure localement incurvée et les faces orientées à l'ouest de forme concave. Ces orientations et ces formes traduisent une direction de déplacement du matériel est-ouest, mais la forme rectiligne de l'aklé sur l'image de 2010 semble

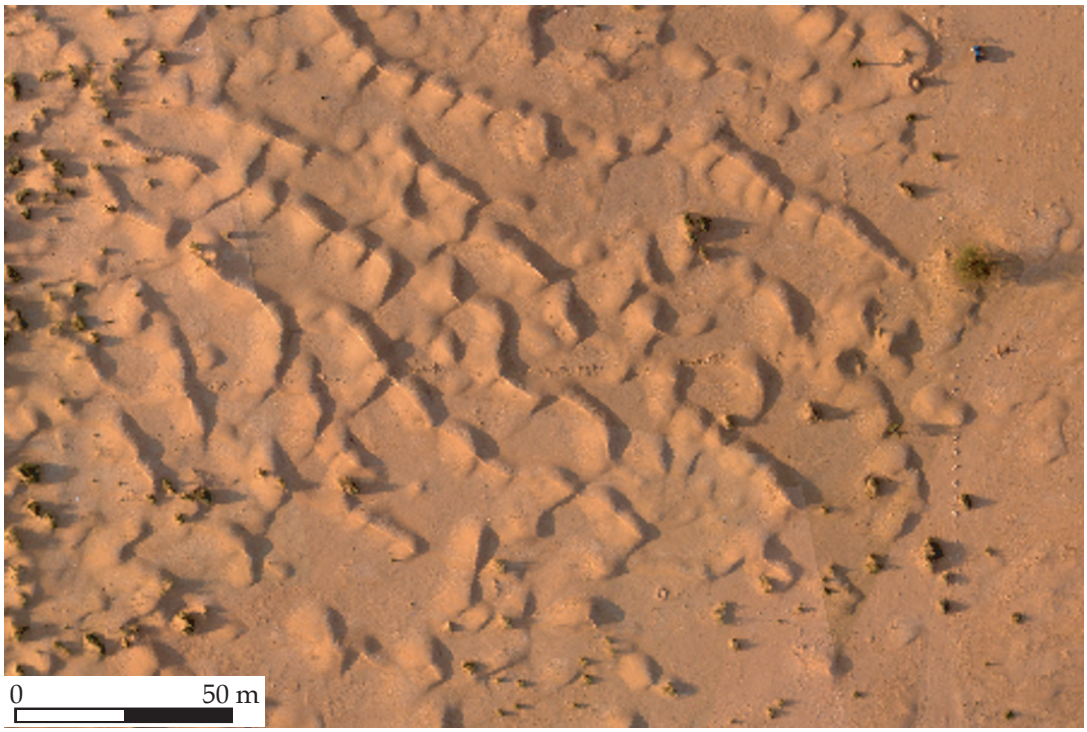
confirmer une reprise du matériel par un vent d'ouest-sud-ouest. Ainsi peut-on envisager une alternance de directions résultantes.

FIGURE 5.15 – *Aspect de l'erg de Rass Elkamen Labiadh au 7 juin 2010*

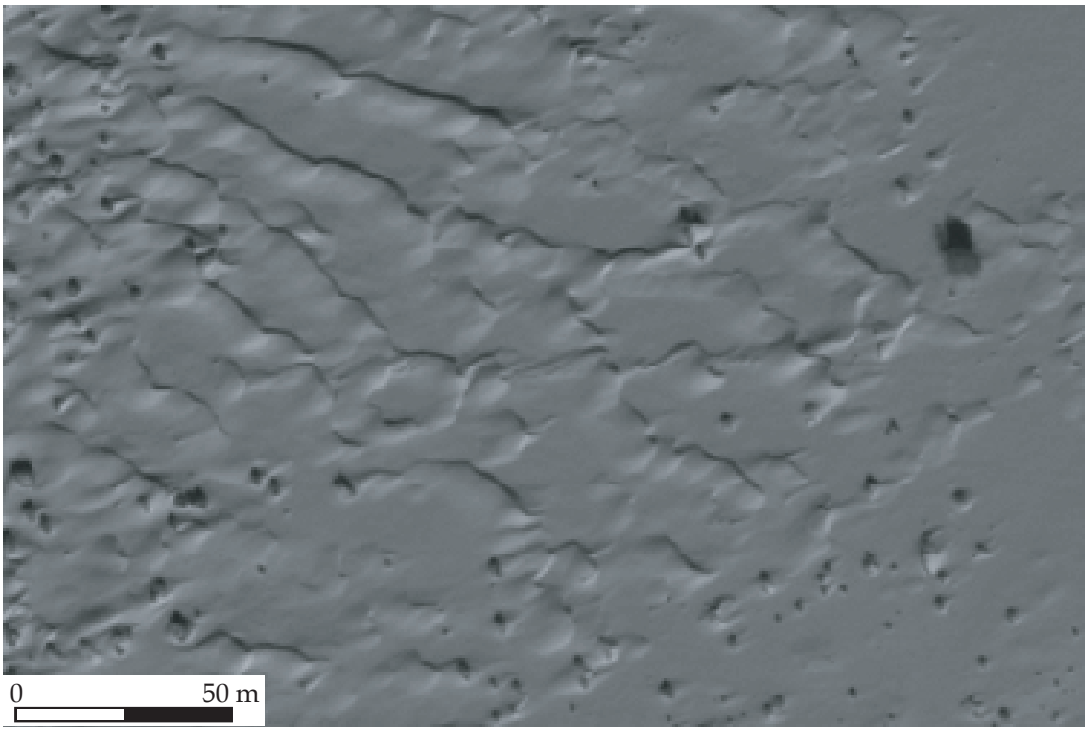
On retrouve la même dualité de directions résultantes entre des vents d'origine nord-est et des vents de secteur sud-ouest à Oglet Merteba. Les images du *Pixy* d'avril 2008 montrent ainsi des formes éoliennes dont la pente croulante est orientée sud-ouest, tandis que l'image *QuickBird* de décembre 2009 présentent des formes avec une pente croulante orientées nord-est (fig. 5.16). Ces deux exemples montrent que l'analyse d'images à très haute résolution, à l'échelle des composants paysagers, permet de dégager des tendances structurelles de morphodynamique éolienne qui marquent les composants du paysage. Ils montrent également que la comparaison entre deux types d'image ayant deux résolutions différentes reste possible dans la mesure où on cherche à comparer des indicateurs ayant la même résolution temporelle entre les deux images.

Les composants paysagers étudiés sont, dans les cas présentés, des aklés, c'est-à-dire des objets liés à la morphodynamique éolienne qui ne sont pas des formes d'obstacles. Ils sont ainsi liés à des échelles plus grossières que les éléments paysagers, ce qui explique qu'il ait fallu envisager une plus grande profondeur temporelle pour obtenir des résultats significatifs. De ce fait, il sont moins susceptibles d'enregister des variations fines, comme celles que pourraient occasionner les activités humaines par exemple.

Comme ces objets sont également des cas particuliers à l'échelle des surfaces des régions sèches non désertiques, on ne peut élaborer un protocole de suivi qui ne soit fondé que sur leur étude. C'est pourquoi nous estimons nécessaire de développer des approches qui prennent en compte les éléments paysagers.



(a) avril 2008 : les pentes croulantes font face au sud-ouest



(b) décembre 2009 : les pentes croulantes font face au nord-est

FIGURE 5.16 – *Orientations des pentes croulantes de l'aklé de Oglet Merteba entre avril 2008 et décembre 2009*

5.3.2 Analyse comparée de la distribution spatiale de deux jeux de données

Une première approche de synthèse des résultats en les exploitant à l'échelle des éléments paysagers peut être développée en s'appuyant sur la fontion K de Ripley et la fonction PCF (cf. chap. 3, section 3.3.3.2). Pour le site de Rass Elkamen Labiadh, un jeu de données a été constitué en collectant les coordonnées $[x, y]$ des buissons et des formes éoliennes extraits par analyse d'images. On obtient alors un tableau comprenant, pour chaque objet, un champ X, un champ Y et un type : végétation ou forme éolienne.

À nouveau, la quantité d'informations disponible fait qu'une analyse globale n'est pas possible en raison des limitations physiques des ordinateurs dont nous disposons. Aussi, pour illustrer l'intérêt de la méthode, nous avons choisi d'en présenter les résultats pour deux cas que l'on peut considérer comme exemplaire.

Le premier exemple est centré sur le petit erg. Dans ce contexte, les formes éoliennes sont bien réparties sur l'espace considéré, tandis que les buissons sont concentrés,en paquets, en périphérie de la zone étudiée. Cette répartition s'explique par la présence de l'erg et de la zone de déflation au centre, où la végétation ne peut se fixer durablement (fig. 5.17).

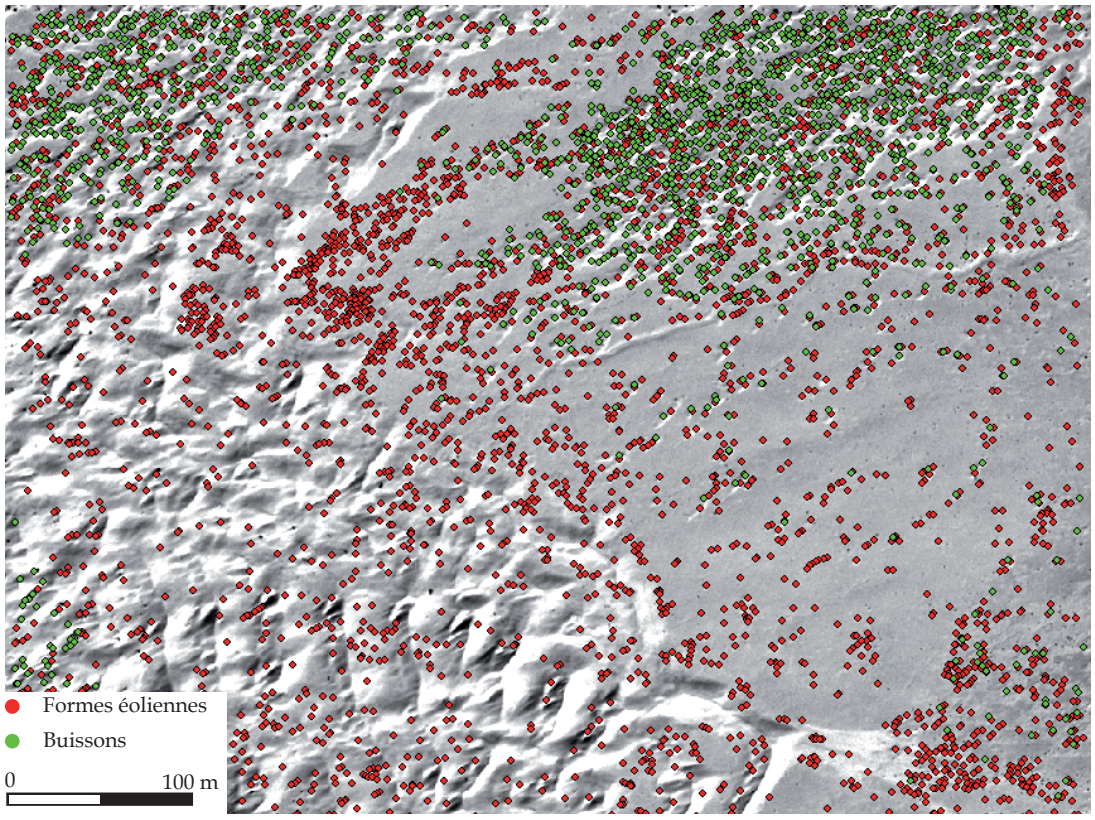


FIGURE 5.17 – *Points correspondants aux objets étudiés pour le cas de l'erg de Rass Elkamen Labiadh*

Le second cas a été pris dans le lit de l'oued Ben Khachab où, d'après les

prospections de terrain, le résultat attendu devrait montrer une agrégation entre les deux types d'objets. En effet, la répartition des deux types y semble davantage corrélée (fig. 5.18).

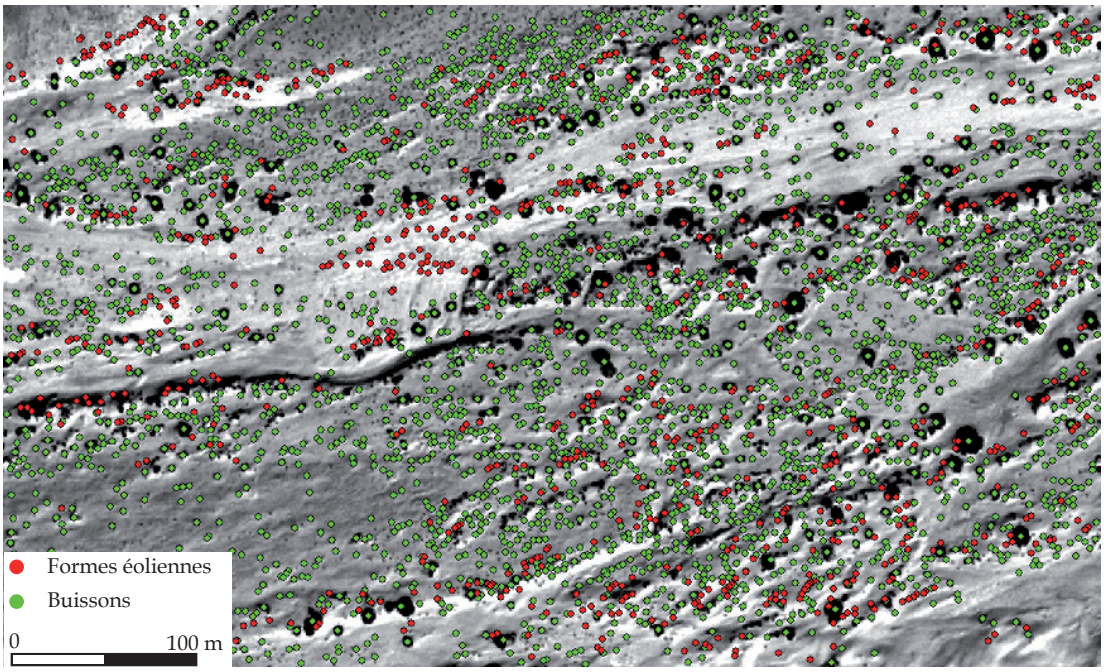
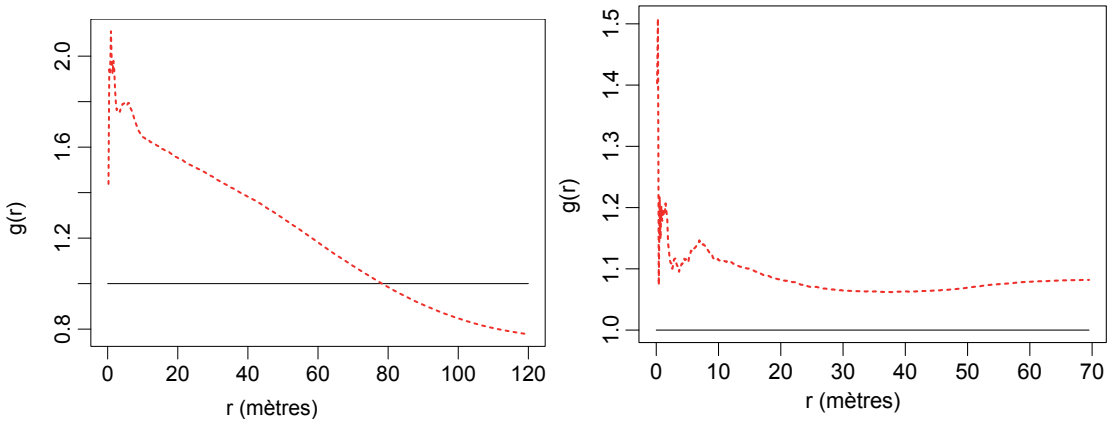


FIGURE 5.18 – *Points correspondants aux objets étudiés pour le cas de l'oued Ben Khachab*

On applique alors la méthode de calcul de la fonction *K* de Ripley pour chaque type du jeu de données, puis on calcul la fonction PCF qui présente les résultats sous forme graphique (fig.5.19).



(a) secteur de l'erg (b) secteur de l'oued

FIGURE 5.19 – *Résultats de l'approche par la fonction K de Ripley des distributions spatiales des formes éoliennes et de la végétation à Rass Elkamen Labiadh*

Lorsque la courbe des résultats (en rouge) est au dessus de 1, on peut considérer qu'il y a attraction entre les deux phénomènes étudiés. Lorsque

cette courbe passe en dessous de 1, on considère qu'il y a répulsion entre les deux phénomènes étudiés. L'interprétation du résultat est triviale dans le cas de l'oued. Toutes les valeurs sont largement au-dessus de 1, ce qui tend à confirmer les hypothèses formulées à partir des observations de terrain : les répartitions spatiales des formes éoliennes et de la végétation y sont fortement liées.

Dans le cas du secteur de l'erg, la situation est plus contrastée. En effet, la courbe montre que, plus on étend les distances prises en compte dans les calculs, moins l'attraction entre les deux types est forte. À partir d'une distance de 80 m, la courbe passe en dessous de la valeur 1, tradusant, à cette échelle, un phénomène de répulsion entre les deux types d'objets. Ce résultat est particulièrement intéressant parce qu'il est pertinent. La fenêtre spatiale considérée inclus en effet, pour les formes éoliennes, deux types : des formes éoliennes d'obstacle, comme dans le cas de l'oued, et des formes éoliennes autonomes, qui constituent l'erg. Lorsque les distances utilisées sont faibles, les formes éoliennes d'obstacle sont mieux représentées que les formes autonomes. Comme leur distribution spatiale est liée à celle de la végétation, le résultat retourné correspond à une attraction. En revanche, en élargissant la fenêtre d'analyse, on intègre de plus en plus de formes autonomes, et cela tend à inverser le résultat, puisque la distribution spatiale de ces dernières entre, la plupart du temps, en compétition avec la végétation (fig. 5.20).

FIGURE 5.20 – *Exemple de végétation endommagée par la dynamique éolienne au niveau de l'erg de Rass Elkamen Labiadh. La trace de roues donne l'échelle*

La même approche a été appliquée aux résultats obtenus avec les images du *Pixy* à Dar Dahoui. Dans ce cas, l'objectif est d'analyser le lien entre la distribution spatiale des oliviers et celles des formes éoliennes dont l'extraction a été présentée en sec. 5.2.2. Le résultat obtenu est présenté en figure 5.21. Ils sont également intéressants parce qu'ils concernent une échelle plus grande que les résultats précédents mais cependant montrent à nouveau l'apport d'une approche par les éléments du paysage.

Les oliviers, comme l'analyse d'image l'a montré, sont espacés réglièrement, de l'ordre de 25 m. à Dar Dhaoui. Cet espacement structure manifestement les

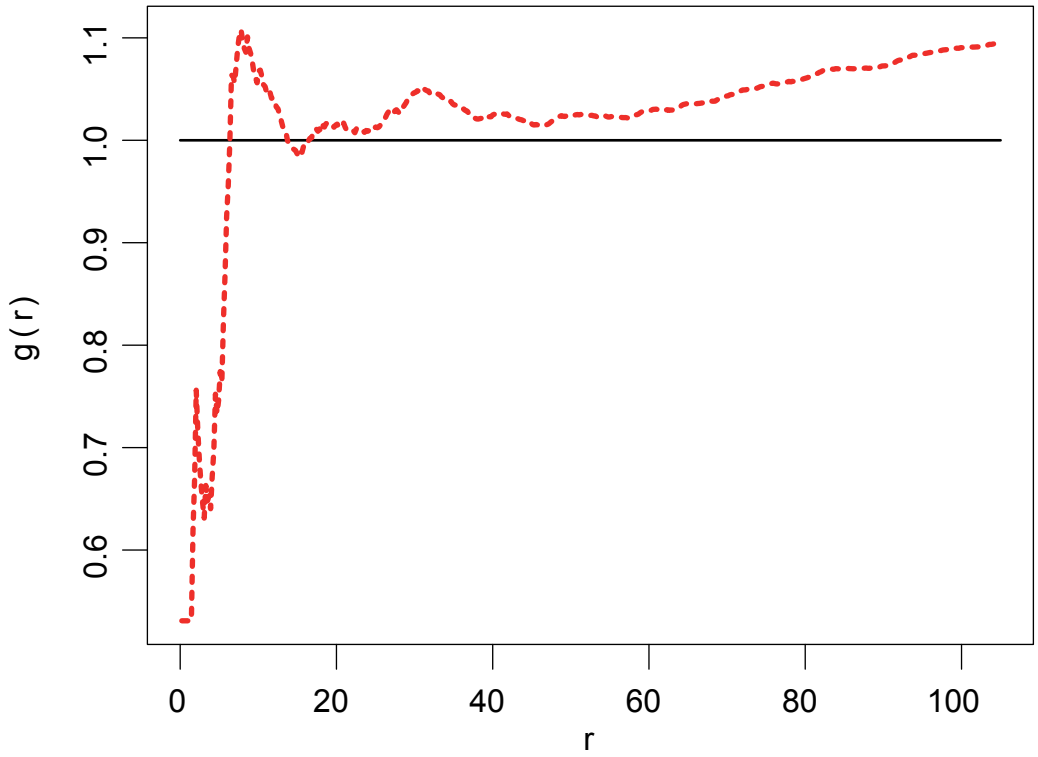


FIGURE 5.21 – *Résultat de l'approche par la fonction K de Ripley des distributions spatiales des formes éoliennes et des oliviers à Dar Dhaoui*

résultats obtenus. Lorsque l'on se positionne dans une classe de distances inférieures à la distance entre les oliviers, les résultats montrent une répulsion entre les deux types d'objets. En revanche, on constate que plus on se rapproche de la distance-type entre oliviers, plus les résultats montrent une attraction, et donc un lien spatial fort entre les oliviers et les formes éoliennes. Cette attraction semble non discutable une fois passé le seuil des 25 m, la courbe ne redescendant plus en-dessous de la valeur 1.

Ces résultats amènent deux conclusions : d'une part, l'approche par la statistique spatiale permet de fonder, de manière quantitative, le lien entre les formes éoliennes et la végétation, légitimant ainsi l'appellation formes éoliennes d'obstacle. En effet, c'est une chose de constater, sur le terrain par exemple, qu'un lien semble exister, c'en est une autre que de le démontrer de manière pertinente. Cela requiert un jeu de données suffisamment étendu pour être significatif et une méthode adaptée à l'objectif poursuivi. Les exemples que nous avons traités montrent que l'analyse d'images à très haute résolution et la statistique spatiale répondent à ces deux critères. Par manque de temps et de moyens techniques pour développer davantage l'approche, nous en restons à ce stade exploratoire, mais il semble que ces premiers résultats sont prometteurs et méritent des développements postérieurs.

D'autre part, l'intérêt de la fonction de Ripley est de préserver les différents niveaux d'échelle d'analyse, comme l'exemple du secteur de l'erg l'a montré. De ce point de vue, elle répond bien aux critères de l'analyse paysagère. Elle entre

également dans la définition d'indicateurs et de méthodes de caractérisation et de suivi adaptés à la problématique particulière de la morphodynamique éolienne des régions sèches non désertiques.

5.3.3 Vers une intégration d'échelles : l'analyse par mailles

L'approche statistique a été testée pour répondre à une limite de nos résultats, qui est aussi un atout : la quantité d'informations extraite. Compte tenu de la résolution des images et de la précision des procédures d'extraction, les résultats obtenus sont, pour une analyse intégrée et généralisée, en dessous du seuil d'hétérogénéité, tel que défini par Puech (1994). Mais l'approche statistique pâtit elle-même de cette limite, puisque la quantité de mémoire nécessaire au traitement en un seul jet de la totalité du jeu de données dépasse très largement les capacités standards d'une machine commerciale. C'est pourquoi, pour présenter des résultats synthétiques, nous avons dû explorer une autre voie, celle consistant à intégrer les échelles d'analyses, pour passer de l'échelle des éléments du paysage à un niveau supérieur, où les données élémentaires sont agrégées et la perception spatiale des phénomènes est simplifiée.

Pour cela, on travaille avec le SIG, dans lequel on génère une grille régulière sur l'ensemble de l'espace étudié (fig. 5.22). En parallèle, pour chaque objet, par exemple chaque forme éolienne, on a calculé le paramètre que l'on souhaite étudier, par exemple la superficie.

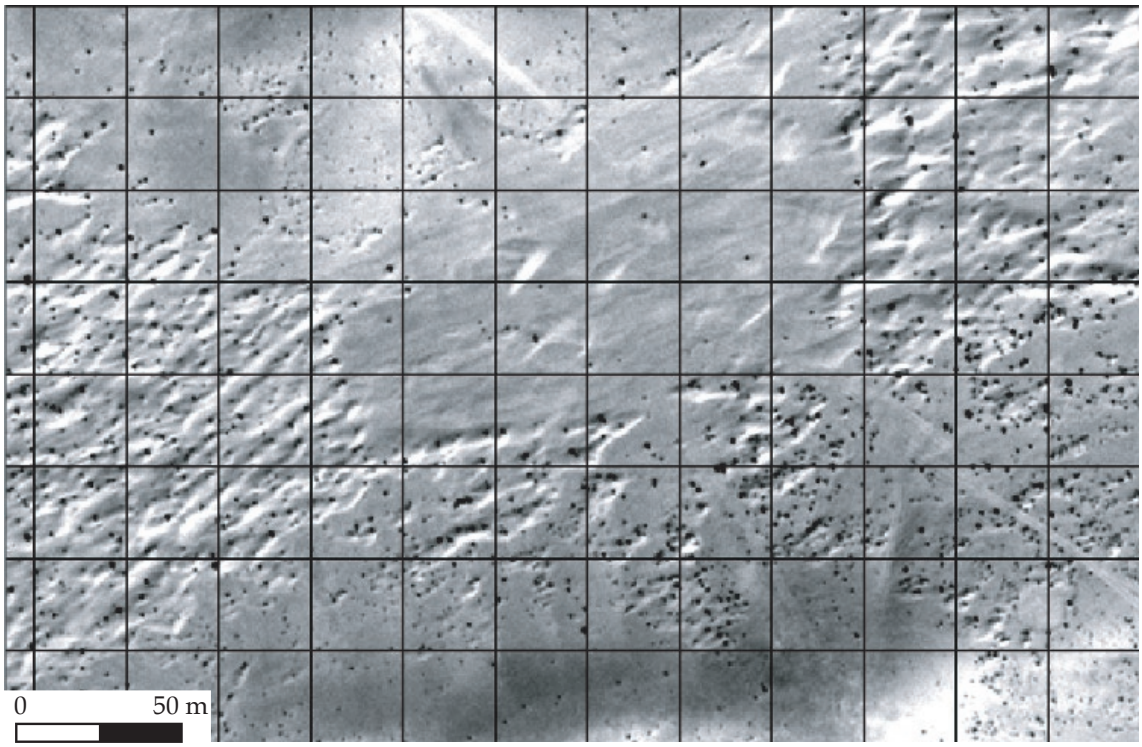


FIGURE 5.22 – *Utilisation d'une grille régulière pour agréger les données obtenues par analyse de l'image* QuickBird *de mars 2009. Exemple du col de REL018*

On effectue ensuite une jointure topologique qui permet d'obtenir la somme des valeurs-paramètres des objets intersectés par chacune des mailles. Dans le cas d'objets qui ne seraient pas entièrement inclus dans une seule maille, cela risque de conduire à une sur-représentation. C'est pourquoi l'agrégation se fait de façon pondérée : la somme des valeurs est pondérée par la surface de chaque objet intersecté par la maille (fig. 5.23) [2].

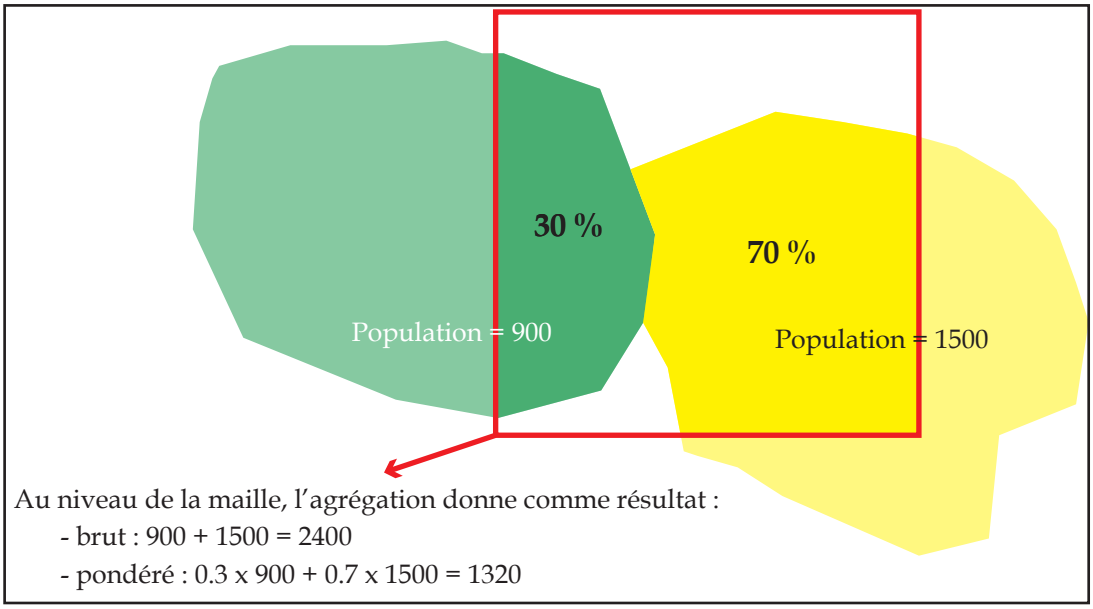


FIGURE 5.23 – *Agrégation au niveau d'une maille des valeurs d'un paramètre, pondérée par la surface intersectée*

Lorsque l'agrégation est effectuée, on obtient un résultat qui s'appuie sur une unité de référence : la maille, pour laquelle on peut aisément calculer une surface. Il est ensuite très simple d'envisager une représentation de l'indicateur par un ratio. Dans le cas des formes éoliennes, par exemple, on peut ainsi élaborer une carte de densité qui permet de modéliser l'ensemble de l'espace étudié (fig. 5.24). L'intérêt d'une telle approche est double. Du point de vue de la représentation, dans un premier temps, elle permet de facilement distinguer des grands ensembles à différentes échelles.

En effet, en s'appuyant sur une trame régulière, on lisse les effets de taille dans la symbologie : les secteurs qui sont mis en évidence sont bien ceux où la valeur de l'indicateur est la plus forte, non pas ceux où les objets ou les mailles de la trame sont les plus grands. Cependant, on préserve la finesse de l'information à toutes les échelles. Ainsi, une carte à l'échelle de l'ensemble du site met en évidence deux grands ensembles : celui où la densité de formes éoliennes est faible voire nulle (les mailles représentées en jaune), et celui où elle est forte (les mailles représentées en rouge).

2. D'après le site internet du support ESRI : `http://support.esrifrance.fr/outilsscripts/arcgis/arcmap/analyse/analyseparmailles/analyseparmailles.html`

À l'échelle d'un site, une interprétation de la répartition des formes éoliennes peut alors s'appuyer sur des données externes, d'échelle équivalente. En effet, en ayant intégré les échelles pour obtenir une information fiable à un niveau supérieur, on conserve la précision de la donnée initiale, tout en la rendant compatible avec des données plus grossières, comme un Modèle Numérique d'Élévation présentant l'information du relief, dont la résolution (28 m$\times$30 m) est proche de la taille des mailles utilisées pour l'agrégation (fig. 5.25).

Dans la section précédente, nous avons montré que la distribution spatiale, à une échelle fine, des formes éoliennes relevait d'un phénomène d'attraction réciproque avec la végétation. Les nouveaux résultats présentés ici mettent en évidence un second facteur : le relief. En effet, à l'échelle du site, si on note bien un lien avec la répartition de la végétation basse (cf. annexe J), en particulier dans l'oued, on remarque également que, à l'ouest notamment, alors que la végétation est présente, les formes éoliennes sont beaucoup plus rares. En revanche, la disposition du relief, avec un alignement nord–sud de colines sur lesquelles l'ensablement vient buter, semble être un facteur explicatif pertinent. En d'autres termes, l'approche que nous avons déroulée jusqu'à présent a permis, en intégrant les échelles, de mettre en évidence plusieurs niveaux d'explication, du local au général, pour un phénomène donné.

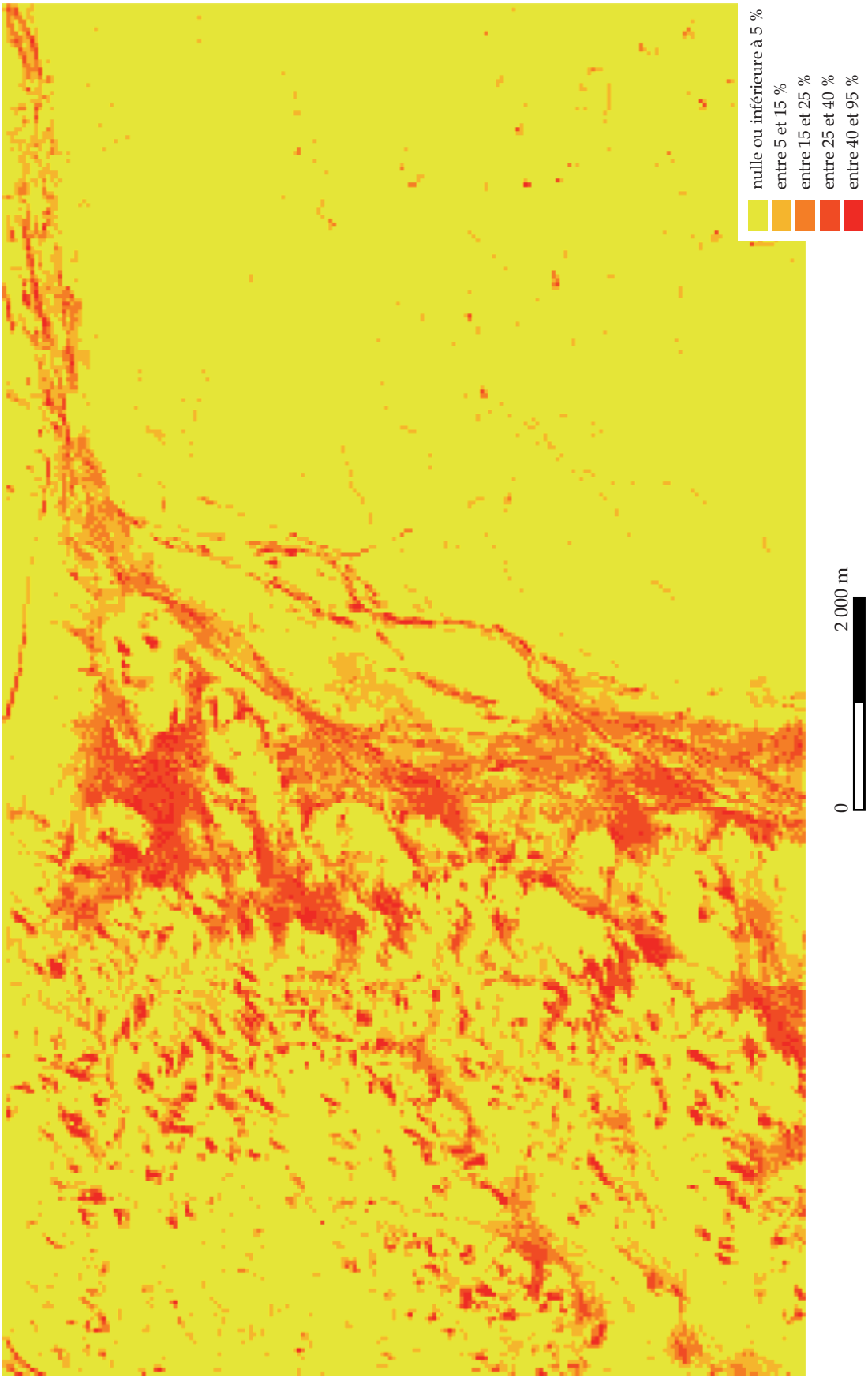


FIGURE 5.24 – *La densité de formes éoliennes du site de Rass Elkamen Labiadh*

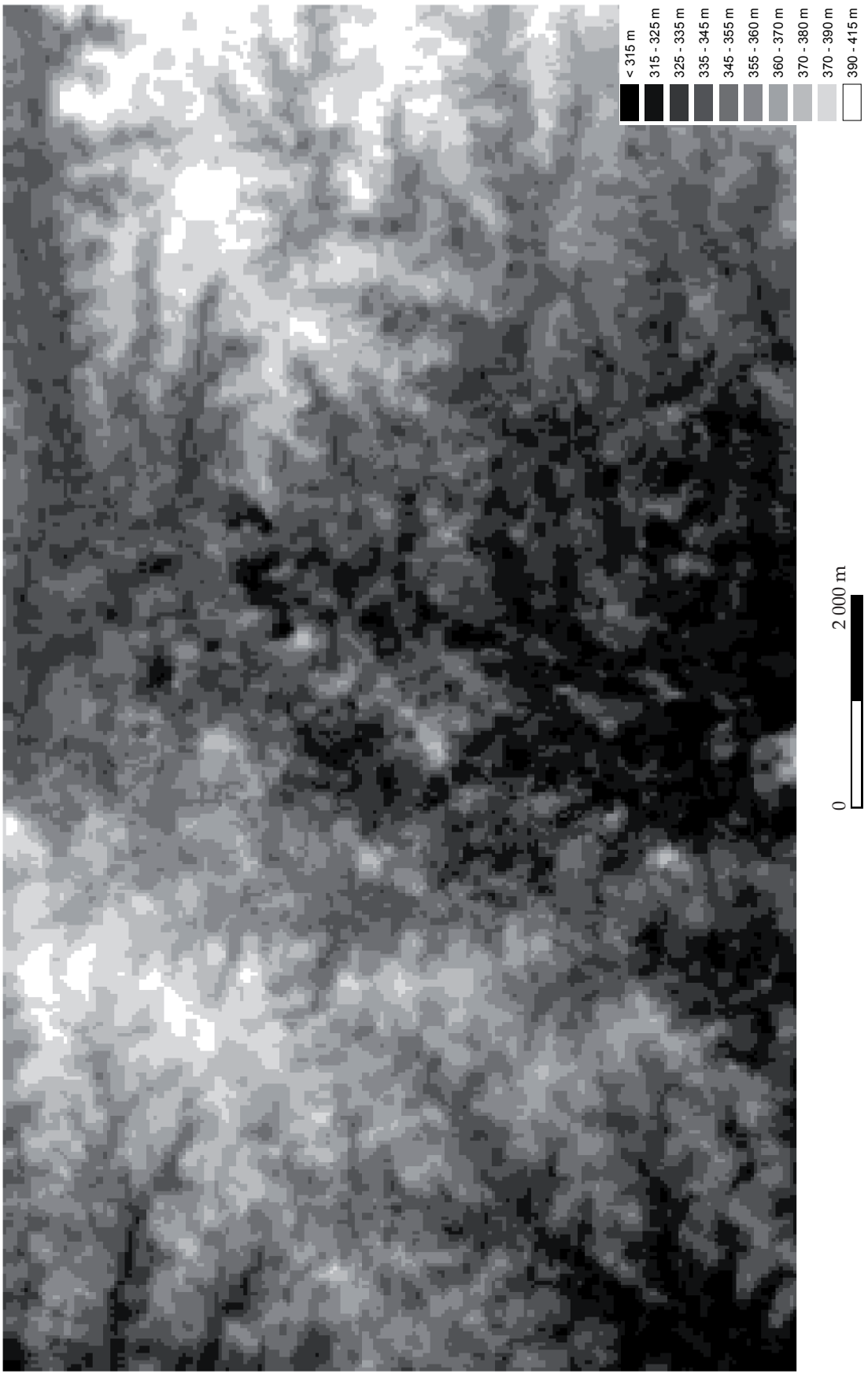


FIGURE 5.25 – *Le relief du site de Rass Elkamen Labiadh*

Conclusion du chapitre

La richesse et la précision des informations obtenues nous ont amené à développer une méthode d'agrégation qui permet ainsi d'étudier non plus une collection d'objets mais un indicateur normalisé. L'ensemble de la procédure qui a permis la réalisation de la carte de densité de formes éoliennes est reproductible sous réserve d'avoir des images comparables. Dans la mise en place d'un suivi, cela offre des perspectives intéressantes, en particulier parce qu'on peut ainsi mettre en parallèle les résultats avec des données issues d'autres images de résolution plus grossière, comme des images Landsat.

Si des corrélations significatives pouvaient être établies entre les cartes de densité de forme éolienne et des indices comme l'indice de brillance, on lèverait une des limites de l'approche qui est la contrainte spatiale : les étendues modélisées sont relativement contraintes par le coût d'acquisition des images THR. En revanche, on peut utiliser la méthode pour calibrer un modèle précis par des zooms sur différents secteurs représentatifs, puis utiliser le modèle pour généraliser le résultat. Nous reviendrons sur cette question au cours du chapitre 6.

Enfin, on pourrait appliquer la même méthode à la cartographie de la végétation pour affiner l'approche comparative. Cependant, il nous semble opportun d'élaborer une approche visant le même objectif mais en intégrant davantage d'information que la seule surface couverte par la végétation. En effet, la carte de la densité des formes éoliennes permet d'étudier un indicateur évaluant en instantané la morphodynamique éolienne d'un secteur donné. Il serait alors intéressant de disposer en parallèle d'un indicateur d'ordre plus prédictif, permettant de modéliser comment un milieu donné peut réagir à des modifications de la morphodynamique éolienne, qu'il s'agisse d'intensité du vent ou bien de fourniture supplémentaire de matériel.

Pour cela, si nous disposons déjà de l'information topographique, dont nous avons brièvement montré l'importance, il est essentiel, dans les régions sèches non désertiques, d'intégrer la végétation. Pour un maximum de précision, cette intégration doit tenir compte de la dimension verticale des éléments de végétation, comme nous l'avons montré au cours du chapitre 3 concernant l'effet d'abri sur la morphodynamique éolienne. Une telle intégration est moins immédiate que celle de la surface, c'est pourquoi nous en avons fait l'objet d'un chapitre séparé.

Chapitre 6

Un indicateur prédictif

Modélisation par la densité d'obstacles

Sommaire

6.1 Cartographie de la densité d'obstacles végétaux 225
6.1.1 Relation empirique entre l'emprise au sol de la végétation et sa hauteur 225
6.1.2 la densité d'obstacles 229
6.2 Confrontation géographique et thématique 236
6.2.1 Comparaison site à site 236
6.2.2 Comparaison avec la densité de formes éoliennes 241
6.3 Perspectives et conclusions 245
6.3.1 Le point sur les données 245
6.3.2 Apports conceptuels et développements potentiels . . . 247

Introduction

Ce dernier chapitre découle naturellement du positionnement à l'échelle des éléments paysagers : en raison de la précision des méthodes utilisées, la quantité d'informations produites par les analyses est considérable et de nature ponctuelle. Il a donc fallu mettre au point des méthodes de représentation synthétique des résultats qui préservent cependant leur profondeur thématique. L'ensemble de la démarche est ainsi confrontée aux problématiques de dépendance d'échelles, de seuil d'hétérogénéité et d'homogénéité que nos propositions permettent d'intégrer de façon robuste.

6.1 Cartographie de la densité d'obstacles végétaux

6.1.1 Relation empirique entre l'emprise au sol de la végétation et sa hauteur

Nous avons déjà montré (chap. 3) qu'il était possible, depuis les ombres portées visibles sur les images *Pixy*, de calculer la hauteur des objets associés. L'objet de cette section est de montrer comment cette méthode permet de caractériser un paysage dans son rapport à la dynamique éolienne en représentant l'indice de la densité d'obstacle présenté au chapitre 1.

À partir des images du *Pixy*, dont l'échelle est quasiment celle du terrain, une relation entre la surface des buissons identifiés par photo-interprétation et leur hauteur calculée depuis la longueur de leurs ombres portées a été établie.

Pour calculer la hauteur des buissons, il faut connaître la valeur de l'angle des rayons du soleil avec l'horizontale théorique du sol. Pour cela, nous avons utilisé l'équation 3.1, présentée au chap. 3, en l'appliquant aux données des sites étudiés : Rass Elkamen Labiadh (REL) et Oglet Merteba (OM) (tab. 6.1).

Tableau 6.1 – *Données entrant dans le calcul de la hauteur solaire*

Site	**Date**	**J** [a]	d [b]	**L** [c]	**T** [d]	$\mathbf{A}_h$ [e]	**H** [f]
REL	04 nov. 2009	308	$-16,33°$	$33,1267°$ N	9,88 h	$31,86°$	$31,94°$
OM	02 avr. 2008	93	$4,95°$	$33,743243°$ N	17,43 h	$-81,39°$	$9,90°$

a. N° du jour dans l'année
b. Déclinaison
c. Latitude
d. Heure solaire vraie de la prise de vue
e. Angle horaire
f. Hauteur solaire

La démarche adoptée pour mettre en relation emprise au sol et hauteur des buissons est la suivante :

- vectorisation, sous forme de polygones, de l'emprise au sol des buissons pour lesquels on peut déterminer la longueur de l'ombre ;
- calcul de la surface de ces polygones et extraction des coordonnées de leur centre géométrique ;
- repérage par des points de l'extrémité de l'ombre portée de chaque buisson étudié et extraction des coordonnées x et y (fig. 6.1) ;
- calcul de la longueur de l'ombre portée par différence entre les coordonnées ;
- correction de cette longueur suivant le coefficient $0,695$;
- à partir de cette donnée, calcul de la hauteur des objets en utilisant la hauteur solaire.

L'échantillonnage des buissons sur les images est fait de manière à ne pas sur-représenter les buissons de plus grande taille. Par ailleurs, le problème qui pourrait se poser est celui du poids des plus petits buissons dans l'établissement de la relation. Si trop de buissons vectorisés ont une superficie inférieure à 0,36

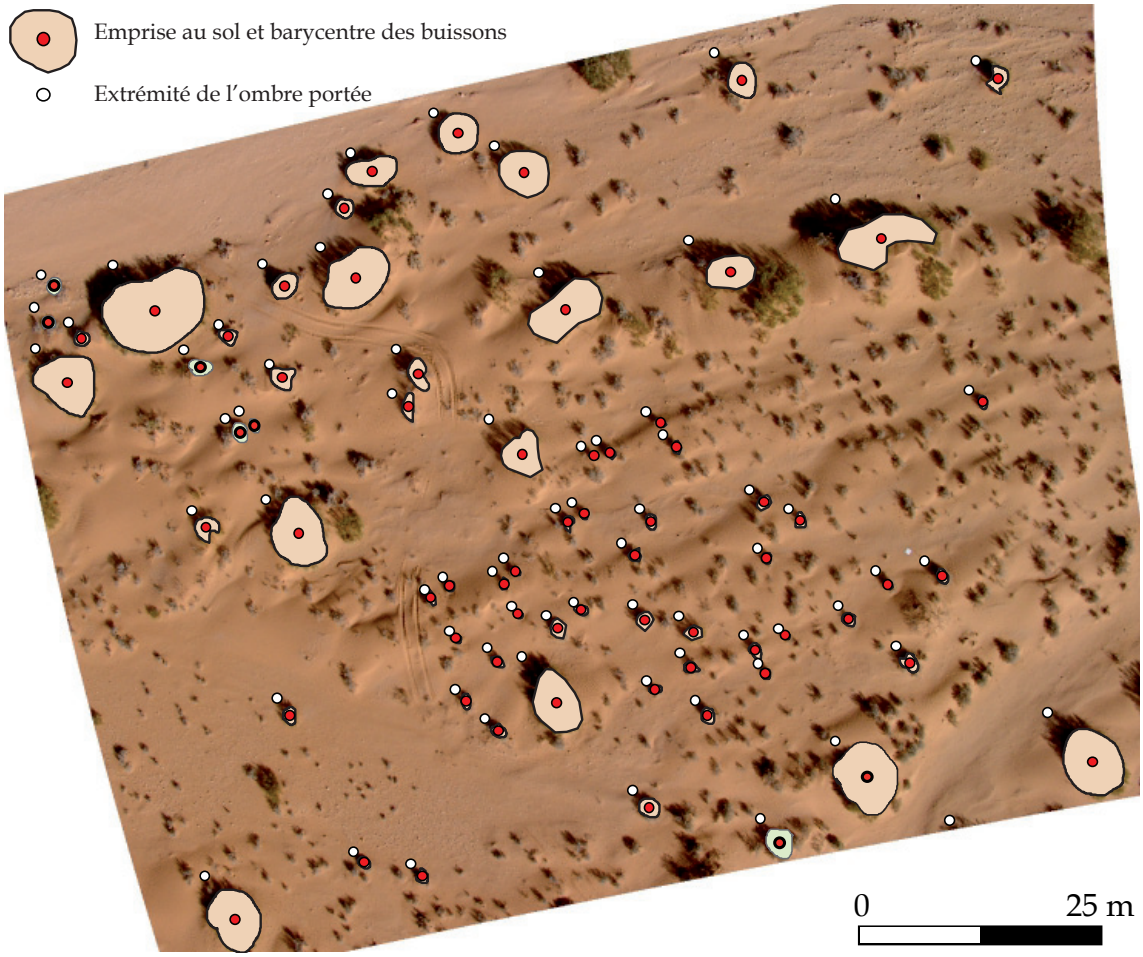


FIGURE 6.1 – *Extrait graphique de la base de données SIG utilisée pour établir la relation entre l'emprise au sol et la hauteur des buissons*

m², soit la plus petite emprise au sol détectable sur une image *QuickBird* dont la résolution est de 0,6 m par pixel, la relation peut difficilement être appliquée. L'échantillon analysé sur le site de Rass ELkamen Labiadh ne contient qu'un seul individu avec une emprise au sol inférieure à ce seuil. On peut donc le considérer comme représentatif. La perte d'informations, ou de qualité, liée au transfert d'échelles est ainsi limitée.

Une fois la hauteur de chaque buisson calculée, on peut la mettre en relation avec son emprise au sol, estimée par le SIG. On peut ainsi construire un nuage de points, présenté en fig. 6.2. La taille de l'échantillon étudié est ici $n = 393$. Il semble décrire une progression logarithmique de la relation entre emprise au sol d'un buisson et sa hauteur. Ce détail est important pour plusieurs raisons :

- il signifie que notre jeu de données est cohérent. En effet, il est logique de voir la relation tendre vers une limite, puisque si un végétal d'une espèce donnée peut s'étendre horizontalement, il atteindra forcément une limite en hauteur. On peut cependant regretter un certain manque de données vers la droite du nuage pour confirmer la progression logarithmique ;
- aucune hauteur calculée sur la base des longueurs des ombres portées ne

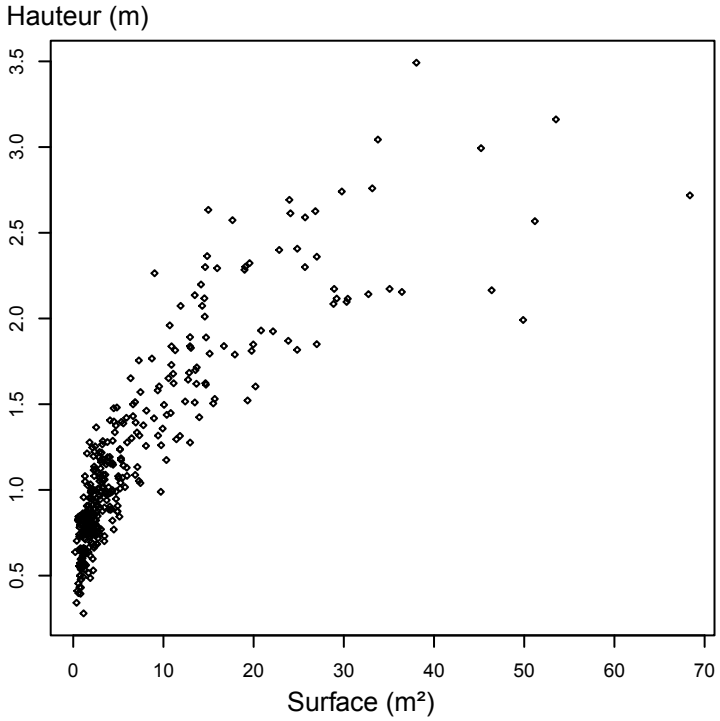


FIGURE 6.2 – *La hauteur d'un buisson en fonction de son emprise au sol sur le site de Rass Elkamen Labiadh*

dépasse la valeur de $3,5\ m$, ce qui est cohérent avec la réalité, *a fortiori* si on considère que, dans un secteur ensablé et dans le cas d'espèces psammophiles, le buisson peut s'élever avec l'accumulation qu'il contribue à créer ;

– pour établir une relation, via une régression, une fonction logarithmique n'est cependant pas idéale. En effet, dans l'intervalle $]0;1]$, la fonction $f : x \rightarrow \log(x)$ retourne un résultat négatif ou nul. Or, considérant la résolution des images *QuickBird* que nous allons utiliser, il est probable qu'un nombre important d'objets aura une emprise au sol comprise dans cet intervalle. C'est pourquoi nous avons fait le choix d'une régression utilisant une fonction de puissance, de la forme $y = bx^a$.

La procédure suivie pour réaliser une telle régression est détaillée en annexe L. On y trouvera en particulier les différents graphiques qui permettent de mieux rendre compte de la démarche et de son application aux données du site de Rass Elkamen Labiadh.

La fonction obtenue est de la forme :

$$y = 0.6584x^{0.3635} \tag{6.1}$$

Elle permet d'obtenir un bon coefficient de détermination R^2 (fig. 6.3), en plus d'une courbe qui répond bien aux critères que nous avons définis.

Dès lors, si nous sommes en mesure de calculer l'emprise au sol d'un buisson du secteur, nous pouvons proposer une estimation de sa hauteur basée sur le modèle. Pour cela, nous nous appuyons sur les résultats des traitements par les outils de la MM présentés précédemment.

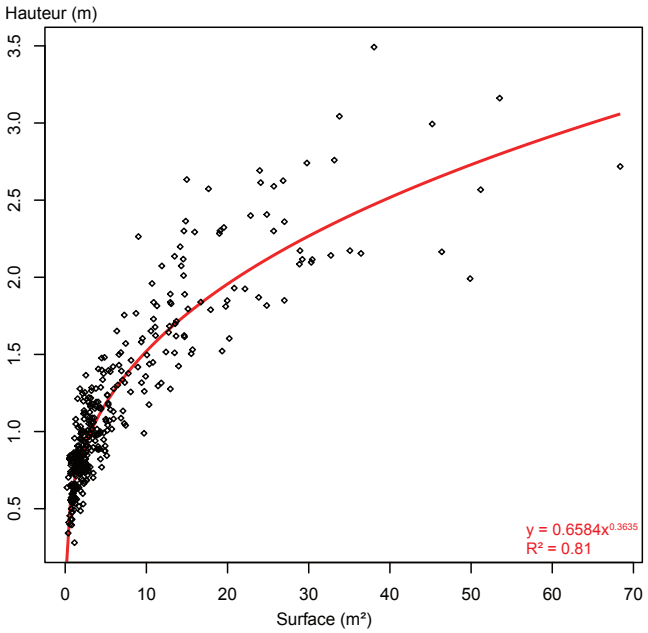


FIGURE 6.3 – *Résultats du modèle de régression appliqué aux données de Rass Elkamen Labiadh*

Comme nous l'avons évoqué en section 5.1.2, certains buissons sont contigüs. Les surfaces extraites sont alors très importantes et la hauteur estimée sur cette base est surévaluée. Une parade consisterait à fixer arbitrairement une limite de hauteur, correspondant par exemple à la taille maximale de l'espèce estimée par les biologistes. Tous les buissons dont la hauteur calculée dépasse cette limite aurait ainsi comme hauteur la valeur fixée. Nous n'avons pas retenu cette option parce que, comme cela a été évoqué, il n'est pas nécessairement aberrant de trouver des hauteurs importantes, en raison des interactions positives qui se mettent en place entre un buisson et l'accumulation sableuse qu'il génère. Ces interactions peuvent se traduire par une élévation du buisson et créer un élément buisson-accumulation dont la hauteur peut dépasser celle d'un buisson ordinaire.

Dès lors que l'on considère le problème sous cet angle, la question se pose du niveau où fixer le seuil et, compte-tenu de la faible étendue de la population concernée, nous choisissons de ne pas supprimer des valeurs qui paraissent aberrantes sans avoir la possibilité de vérifier la pertinence de cette suppression.

Cette approche, utilisant la profondeur d'informations que fournissent les images THR de différentes échelles, permet donc de créer une base de données explicite : la donnée est portée par chaque buisson. Le niveau d'information de cette base de données permet, quant à lui, d'envisager de calculer un indicateur qui permet d'analyser, pour une zone définie, l'état de la végétation et de caractériser la morphodynamique éolienne potentiellement associée : la densité d'obstacles.

6.1.2 la densité d'obstacles

Rappelons la formule, présentée au chap. 1, qui permet de calculer cet indicateur :

$$\lambda = \frac{nbh}{S'} \tag{6.2}$$

avec

n : nombre d'obstacles
b : largeur moyenne des obstacles
h : hauteur moyenne des obstacles
S' : surface de la zone étudiée

Nous avons adapté cette formule en remplaçant le paramètre b par la surface des obstacles. Le paramètre n n'a alors plus lieu d'être et la formule devient :

$$\lambda = \frac{Sh}{S'} \tag{6.3}$$

avec

S : somme des surfaces des buissons de la zone étudiée
h : hauteur moyenne des buissons de la zone étudiée
S' : surface de la zone étudiée

Comme l'information est portée par chaque buisson, il faut appliquer une grille de synthèse des résultats qui fournit aussi la surface de référence étudiée dans l'équation 6.3. Nous avons choisi de travailler avec une maille carrée de 28,5 m de côté, pour obtenir des résultats à une échelle comparable à celle d'une image LANDSAT. D'une part, cette résolution est adaptée à la visusalisation d'un indice sur une superficie importante et, d'autre part, cela ouvre la porte à une étude d'une éventuelle relation entre les résultats obtenus par notre méthode d'intégration d'échelles et ceux que l'on pourrait obtenir par traitement d'une image LANDSAT. Les données de densité d'obstacle sont agrégées en suivant la méthode décrite en section 5.3.3.

Après avoir agrégé les données des buissons au niveau des mailles, on peut facilement calculer λ. On obtient alors une valeur de l'indice de la densité d'obstacles pour chacune des mailles, sous une forme qui se prête bien à la représentation cartographique. Il faut encore définir le mode de représentation de cette variable. Pour cela, nous nous appuyons sur un graphique de Marticorena (1995) qui met en relation la densité d'obstacles et la fraction efficace du vent, c'est-à-dire l'énergie effectivement disponible pour l'érosion du sol par le vent après qu'une partie a été dissipée dans les obstacles placés sur la trajectoire du vent (fig. 6.4).

On identifie ainsi quatre seuils :

- pour λ compris entre 0 et 0,003, la fraction efficace du vent est comprise entre 80 et 100 % ;
- pour λ compris entre 0,003 et 0,01, la fraction efficace du vent est comprise entre 50 et 80 % ;

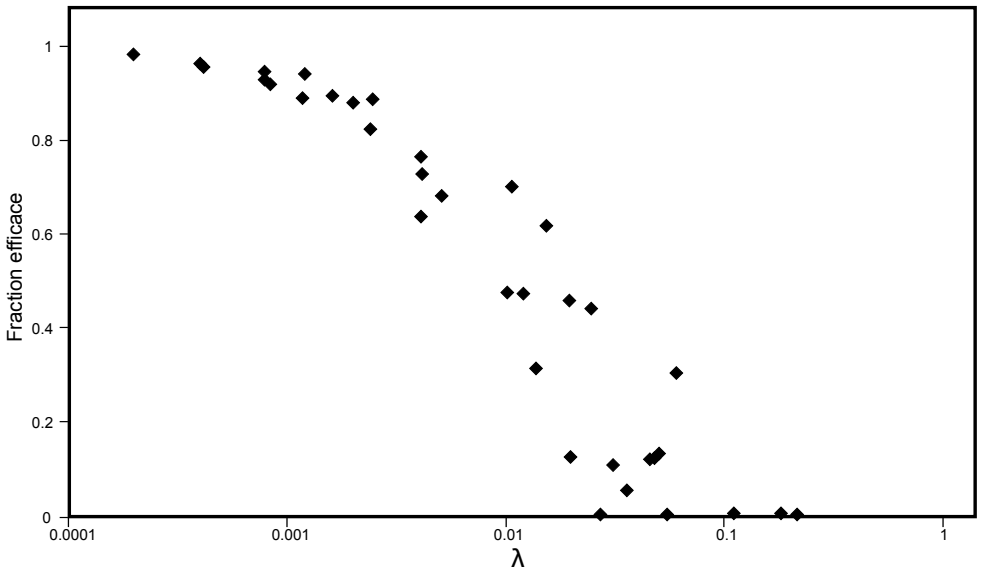


FIGURE 6.4 – *Relation entre la densité d'obstacles et la fraction efficace du vent. D'après Marticorena (1995)*

- pour λ compris entre 0,01 et 0,035, la fraction efficace du vent est comprise entre 20 et 50 % ;
- pour λ compris entre 0,035 et 0,3, la fraction efficace du vent est inférieure à 20 %.

Au delà de 0,3, l'énergie disponible pour l'érosion des sols est nulle. Ainsi la densité d'obstacle permet-elle de cartographier, en un seul indice, le potentiel d'érosion éolienne et l'effet de protection des obstacles étudiés.

Pour le site de Rass Elkamen Labiadh, la carte ainsi obtenue est présentée en figure 6.5, avec un extrait agrandi en figure 6.6. Avant de proposer une interprétation des résultats obtenus, il est important de préciser le choix de la symbologie : le dégradé de nuances, du jaune au rouge, correspond à une progression des faibles valeurs de densité d'obstacles aux fortes valeurs. En revanche, les libellés de la légende correspondent à une progression des fortes valeurs de fraction efficace du vent vers les faibles valeurs, qui constituent un ensemble plus intelligible que des seuils de valeurs de densité d'obstacles. Ce choix se justifie d'une part par la nécessité de bien représenter la thématique étudiée, ici la densité d'obstacles, mais en mettant aussi en avant l'interprétation qui peut en être faite du point de vue de la dynamique éolienne. Il peut bien entendu se discuter : on pourrait, en particulier, avoir choisi de représenter plutôt une échelle de potentiel de dépôt, qui correspondrait davantage, en terme de progression, au dégradé de nuances retenu. Cela serait néanmoins déjà une interprétation du résultat, ce que n'est pas la représentation de l'échelle de fraction efficace du vent.

La lecture de cette carte conforte la cohérence de la méthode générale utilisée : nous n'obtenons pas, en première analyse, de résultats aberrants. Une double dichotomie apparaît : entre les versants et les oueds, d'une part, entre la partie est et la partie ouest du secteur d'autre part.

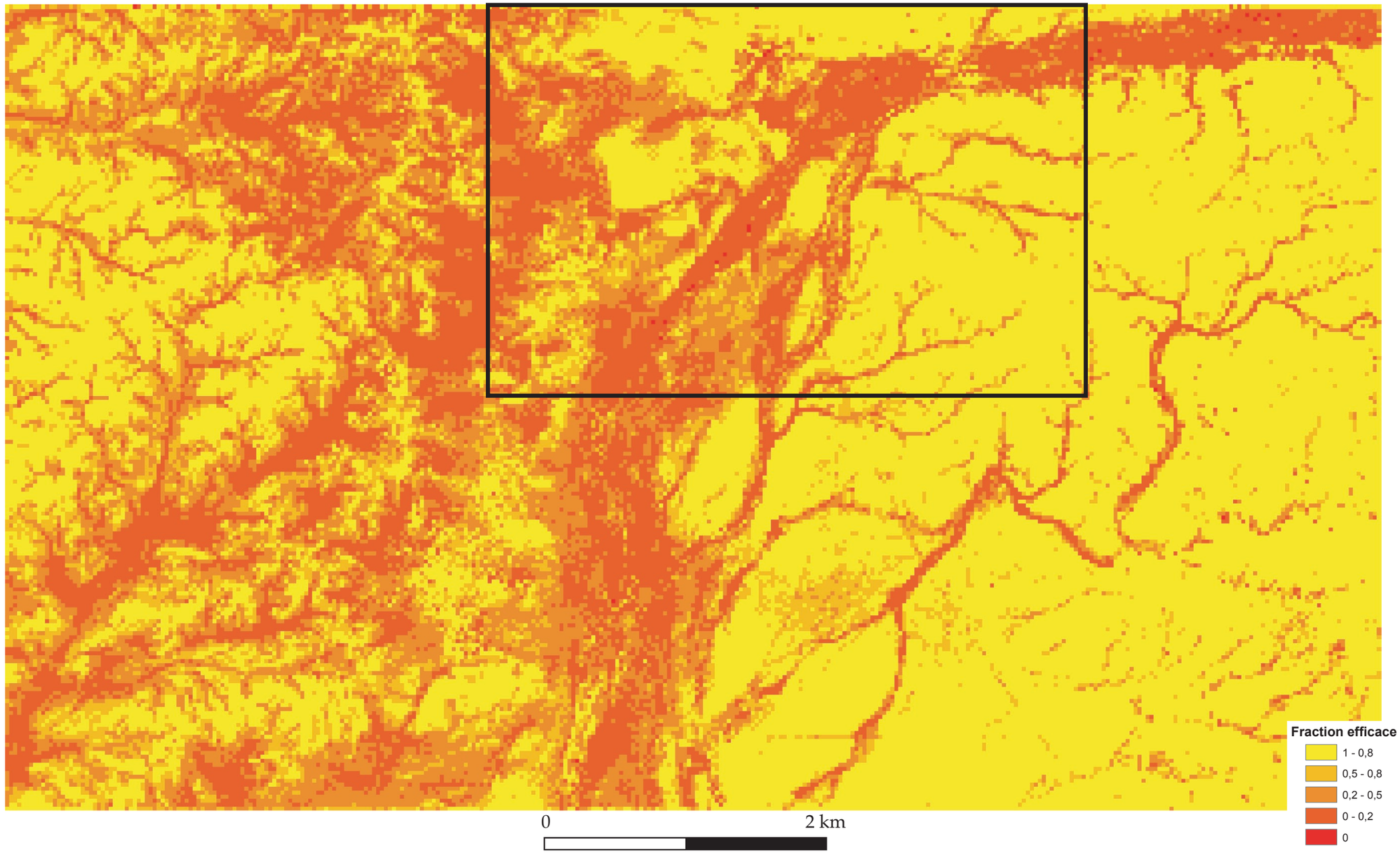


FIGURE 6.5 – *Cartographie de la densité d'obstacle et de la fraction efficace du vent correspondant pour le site de Rass Elkamen Labiadh*

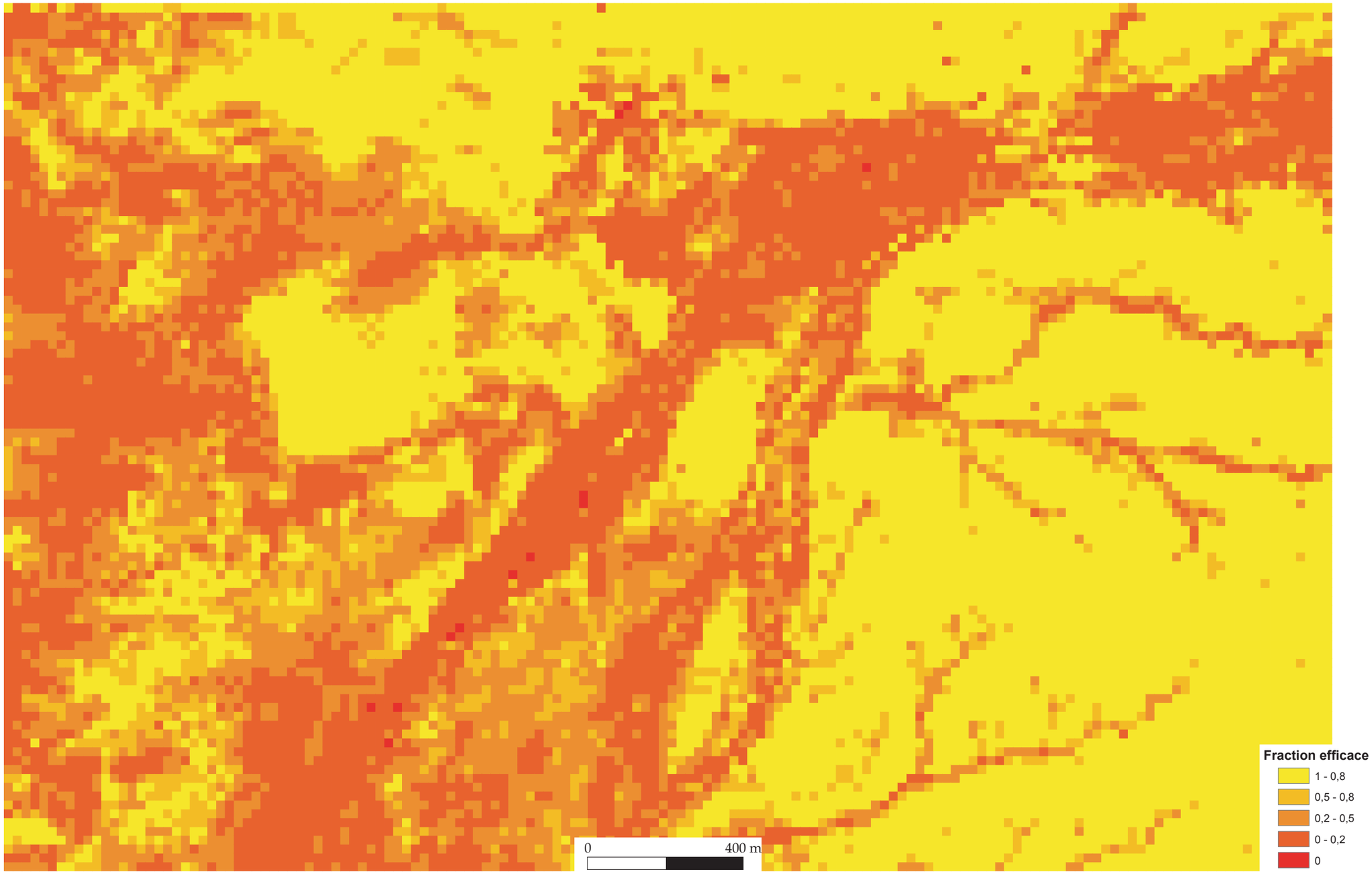


FIGURE 6.6 – *Extrait de la carte de la densité d'obstacles de Rass Elkamen Labiadh correspondant au cadre de la figure 6.5*

Les valeurs les plus fortes de densité d'obstacles, correspondant aux plus faibles fractions efficaces, sont concentrées dans les thalwegs tandis que les versants sont presque exclusivement modélisés avec des valeurs faibles ou nulles. Globalement, on identifie aussi un schéma périphérie–cœur qui se répète régulièrement là où les valeurs de densité d'obstacles sont les plus fortes. Cet aspect est mieux mis en évidence sur la figure 6.6, qui illustre également l'intérêt de l'échelle colorimétrique retenue : une représentation de l'ensemble de la zone, bien que relativement grossière, permet de facilement rendre compte des oppositions entre secteurs. Un zoom sur une zone définie de la même carte met en évidence des répartitions plus fines, illustrée par des transitions de couleurs plus aisément perceptibles.

La dichotomie est–ouest est, elle aussi, nettement marquée mais est liée à la répartition versants–oueds. L'oued Bel Khachab dessine une sorte de frontière entre la partie est de la zone, montagneuse et traversée par de nombreux oueds, et la partie ouest, au relief moins marqué et où les oueds sont nettement moins incisés. La végétation y est beaucoup plus présente et la densité d'obstacles, en conséquence, plus élevée que dans la partie est.

En mettant en évidence certains secteurs, on peut encore illustrer la précision de l'approche. Ainsi la station de REL018, ce petit col où des barkhanes peuvent se former, est-elle correctement modélisée dans la carte. On identifie nettement une zone bien dessinée où la fraction efficace du vent est maximale, correspondant à la zone du train de barkhanes, encadrée par des zones où elle est plus faible, voire quasiment nulle (fig. 6.7).

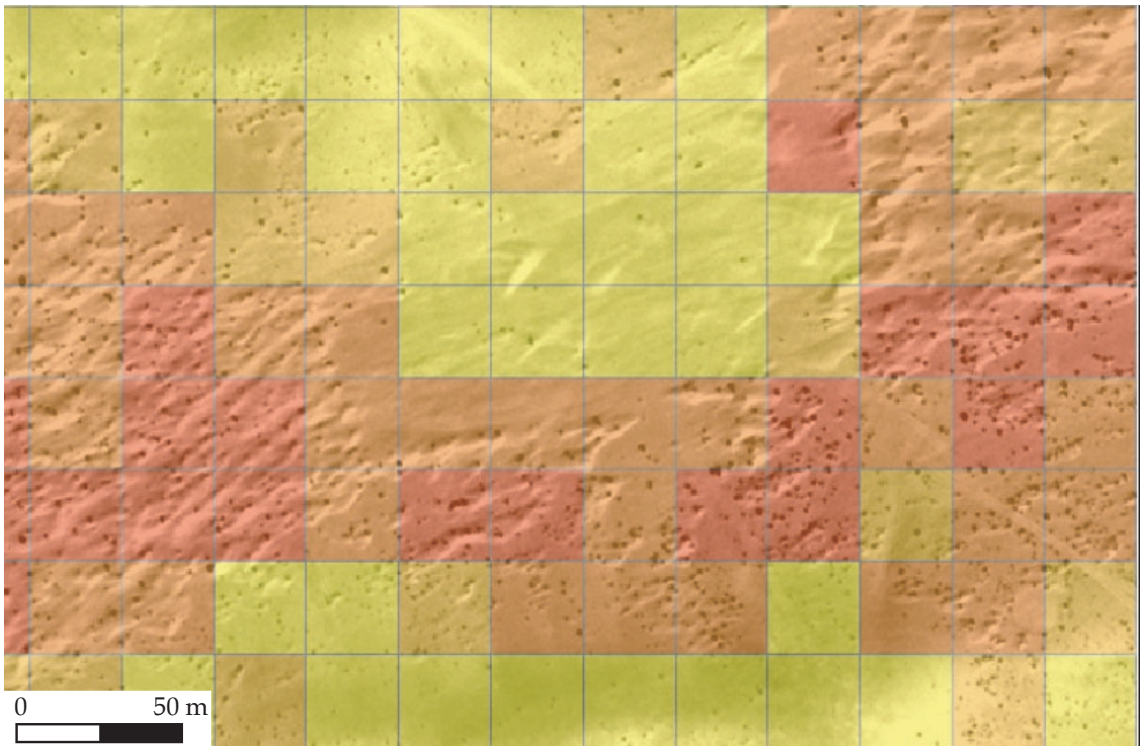


FIGURE 6.7 – *La densité d'obstacles de la station REL018 en surimpression de l'image* QuickBird *de mars 2009*

On remarque également que le petit erg et sa zone de déflation sont bien représentés par des valeurs très fortes de fraction efficace, correspondant à des valeurs très faibles de densité d'obstacles (fig. 6.6). Cela valide, d'une part, la méthodologie retenue, et, d'autre part, montre une première limite du résultat dans la mesure où on ne peut interpréter ces seules valeurs fortes de fraction efficace comme un indicateur d'ablation puisque, dans ce cas, on est en présence à la fois d'une zone de déflation et d'une zone d'accumulation.

Ce point est particulièrement intéressant puisqu'il renvoie aux problèmes que nous avions évoqués au chap. 1 concernant les transferts d'échelles dans la zonation du Sahara. La méthode que nous avons développée s'appuie sur l'étude des objets individuels : buissons, formes éoliennes, etc. Les résultats obtenus sont donc pertinents pour proposer des explications ou des relations à l'échelle de ces objets. Quand on envisage une autre échelle, comme c'est le cas pour cet erg, on bascule dans un autre système de relations et d'explication. C'est donc une limite de l'approche de modélisation qui, de fait, encadre les possibilités d'interprétation.

Une seconde limite est liée à la nature des objets étudiés. Dans les niveaux médians à hauts des thalwegs de la zone est, les *jessours* sont plantés en oliviers et ceux-ci ont la même signature morphologique et spectrale que les buissons des zones basses. Les oliviers sont donc extraits comme et inclus dans le calcul de la densité d'obstacles. Or, la morphologie des arbustes ou des arbres n'a pas le même effet sur la fraction efficace du vent que celle des buissons. La relation que nous modélisons n'est donc peut-être pas valide dans ce cas. Si la part des données concernées reste infime par rapport au total, les oueds de la partie orientale sont sur-représentés dans la carte de la densité d'obstacles.

On remarque enfin que très peu de cellules ont une valeur de densité d'obstacle correspondant à une fraction efficace du vent nulle : 31 sur un total de près de 69 700. Cela est cohérent avec la réalité du terrain, où on observe, à différentes échelles, des associations de formes de dépôt et de formes d'érosion (cf. chap. 2). Ainsi pouvons-nous considérer que la méthode est robuste et que les résultats qu'elle permet de produire sont suffisamment probants pour envisager, d'une part, de l'appliquer à d'autres sites, en tirant partie de sa reproductibilité et, d'autre part, de confronter ces résultats avec les autres résultats de ce travail.

6.2 Confrontation géographique et thématique

6.2.1 Comparaison site à site

La démarche n'est pas pertinente pour le site de Dar Dhaoui, dans la mesure où les oliviers constituent des obstacles d'un genre particulier, qui n'ont pas le même effet sur la fraction efficace du vent que des buissons. En revanche, on peut appliquer la même approche au site d'Oglet Merteba. La mise au point de la relation entre emprise au sol et hauteur des buissons a été faite à partir d'un échantillon de 127 buissons seulement. En effet, la répartition généralement plus dense de la végétation à Oglet Merteba rend plus délicate l'identification

fine de buissons individuels et de leur ombre propre. Le modèle de régression donne un résultat proche de celui obtenu pour le site de Rass Elkamen Labiadh (fig. 6.8). La hauteur maximale calculée à l'aide de la longueur des ombres

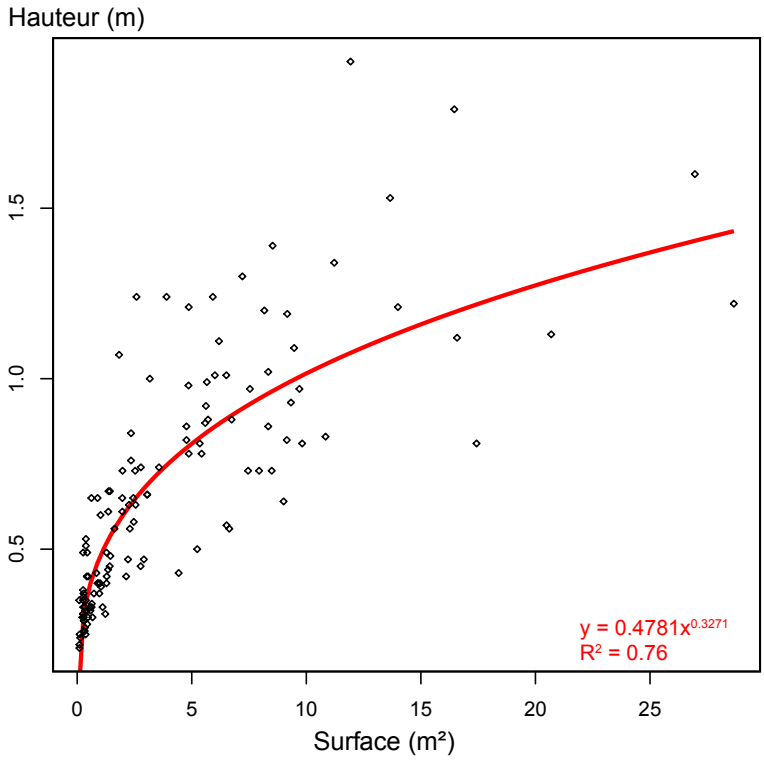


FIGURE 6.8 – *Résultats du modèle de régression appliqué aux données de Oglet Merteba*

portées est de 1,92 m, la moyenne est de 0,67 m, ce qui est cohérent avec la réalité observée sur le terrain. Ces chiffres placent les buissons du site d'Oglet Merteba dans une catégorie de dimensions inférieure à celle des buissons de Rass Elkamen Labiadh. La nature du peuplement explique ces différences : essentiellement des gros buissons de *Rætama retam* à Rass Elkamen Labiadh et essentiellement des ligneux bas dont la hauteur, d'après Mabbutt et Floret (1983), ne dépasse que rarement un mètre à Oglet Merteba. Dans l'échantillon étudié, 60 % des buissons ont une hauteur calculée inférieure à 0,7 m.

Le modèle de régression a un coefficient R^2 inférieur à celui obtenu avec les données de Rass Elkamen Labiadh, mais sa valeur reste suffisamment significative pour que la relation puisse être utilisée. Les buissons ont été extraits par analyse de l'image *QuickBird* d'Oglet Merteba en suivant la même méthode que pour le site de Rass Elkamen Labiadh, à l'exception de la division du site en 4 images. La supeficie à traiter étant plus réduite, ce contournement n'était pas nécessaire. 292 000 buissons ont ainsi été extraits. Leur emprise au sol a été convertie en hauteur en utilisant les équations permettant de calculer la hauteur solaire et le résultat a été intégré dans une trame régulière pour produire la carte présentée en fig. 6.9.

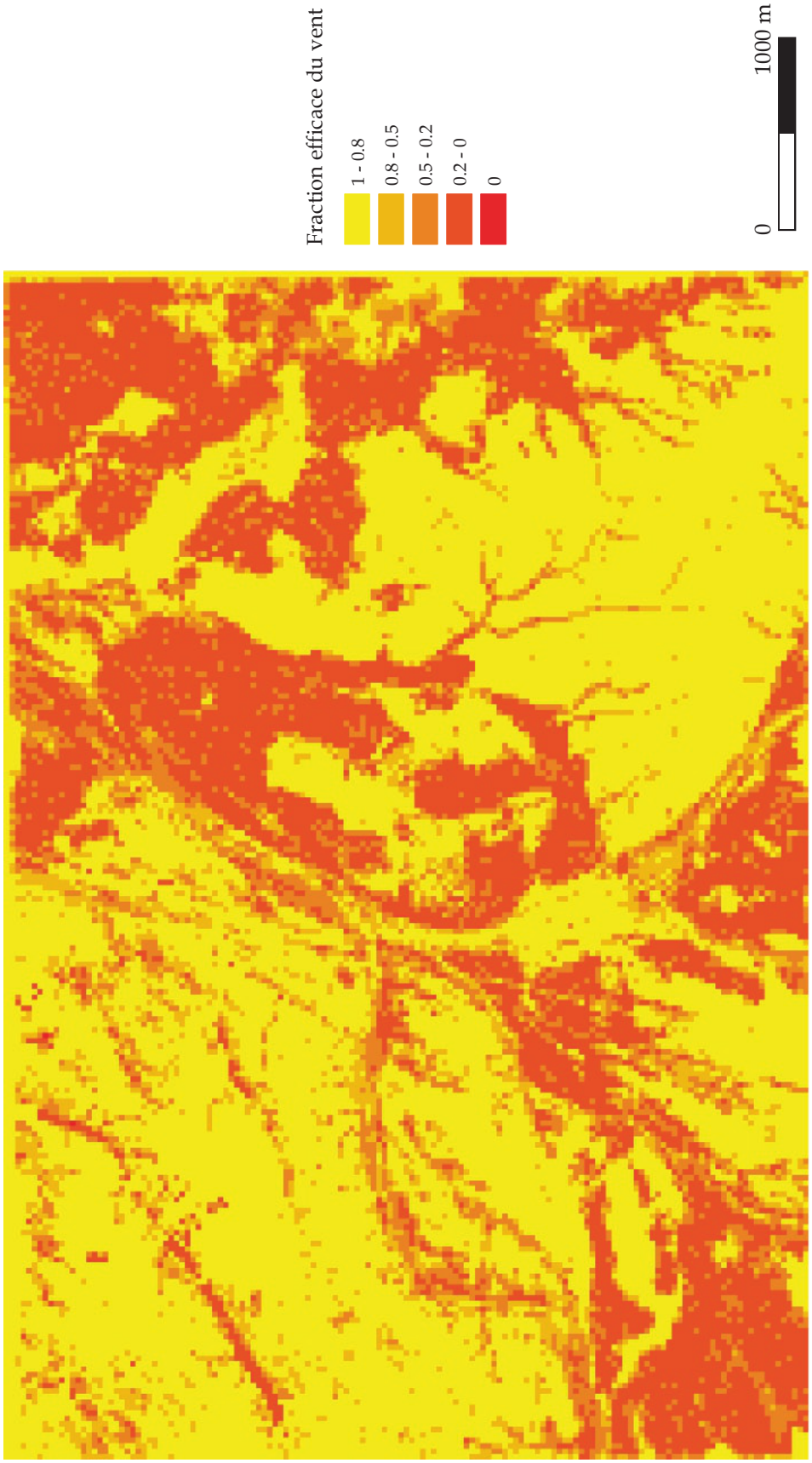


FIGURE 6.9 – *Carte de la densité d'obstacles du site d'Oglet Merteba et de la fraction efficace du vent correspondant*

Cette carte met en évidence une répartition de la densité d'obstacles différentes de celle de Rass Elkamen Labiadh. En particulier, on remarque que les valeurs les plus fortes ne se trouvent pas dans l'oued El Merteba (au centre de la carte). Au contraire, ce dernier présente des valeurs très faibles. Cette différence avec le site de Rass Elkamen Labiadh peut traduire une différence de comportement hydrologique : on sait que l'oued Bel Khachab n'a plus connu de crue depuis longtemps. Il n'est pas impossible que l'oued El Merteba connaisse une activité plus régulière. Cependant, une seconde hypothèse est aussi plausible, sans être exclusive de la première. Des puits à abreuvoirs sont en effet présents dans l'oued El Merteba (fig. 6.10).

FIGURE 6.10 – *Un puits et son abreuvoir dans l'oued El Merteba*

Le site est depuis longtemps un lieu carrefour de troupeaux nomadisant dans le secteur (Mabbutt et Floret, 1983). À l'instar de ce que nous avons pu montrer pour la station REL002, on peut envisager le fait que le passage et le stationnement de troupeaux contribuent à empêcher le développement de la végétation dans le lit de l'oued. À nouveau, le fait que la carte finale mette en avant ce caractère particulier du site indique que la méthode semble robuste. Ainsi, la comparaison avec les images du *Pixy* montre-t-elle que la structure de la disposition de la végétation est effectivement conservée, y compris à une échelle fine (fig. 6.11).

Si la carte montre aussi certaines erreurs, comme des valeurs élevées de densité d'obstacle au centre de l'aklé, ces dernières peuvent être relativisées. Elles sont essentiellement liées aux ombres portées des cordons transversaux, qui ont été extraits comme des buissons. Ce cas reste cependant marginal à l'échelle du site, propre au secteur de l'aklé et ne remet pas en cause la procédure dans son

ensemble dont l'objectif est de modéliser le milieu dans sa relation à la morphodynamique éolienne. En ce sens, générer des faux positifs dans un secteur d'accumulation n'est pas totalement invalidant.

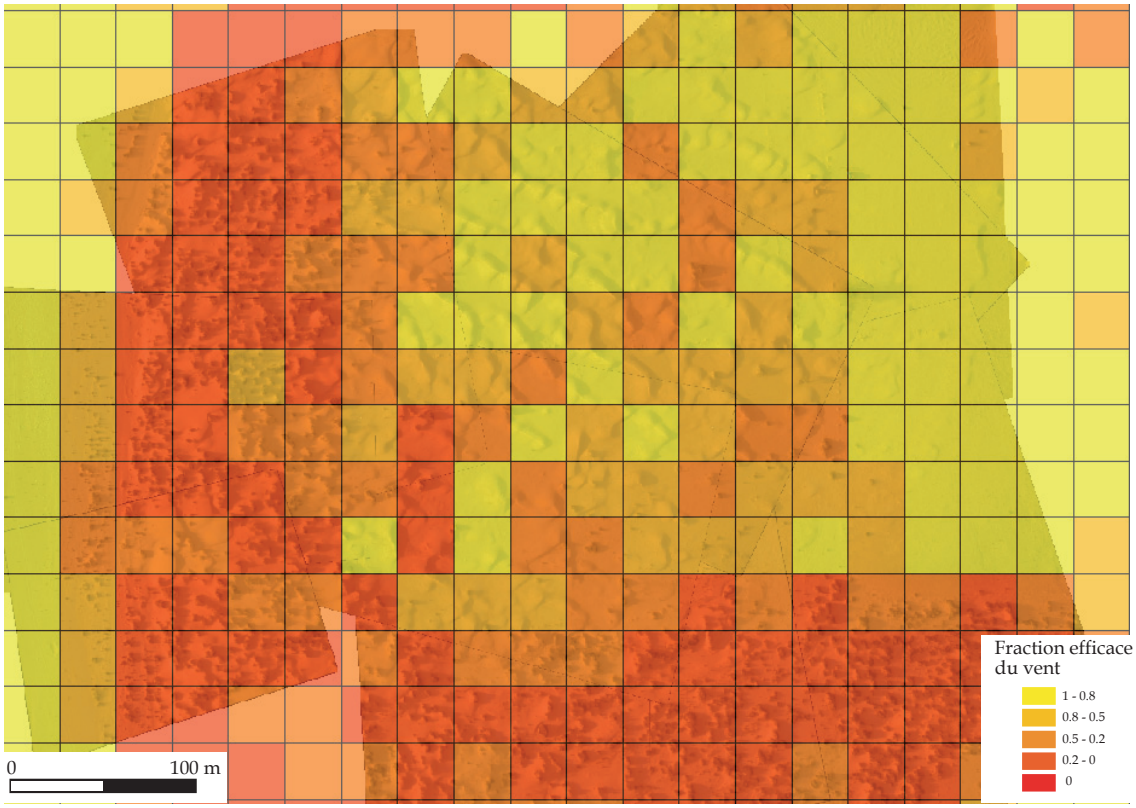


FIGURE 6.11 – *Extrait de la carte de la densité d'obstacles du site d'Oglet Merteba en surimpression des images* Pixy

Ces résultats montrent que la méthode suivie permet de modéliser de façon satisfaisante la répartition spatiale de la végétation et du rôle d'abri qu'elle joue. La représentation sous la forme d'une maille régulière facilite, de surcroît, l'interprétation visuelle à différentes échelles. La densité d'obstacles apparaît comme un indicateur pertinent pour comparer des sites entre eux, en fonction de leur sensibilité aux différents effets de la morphodynamique éolienne.

Le principal apport de la procédure que nous présentons ici est l'intégration du lien avec l'action potentielle du vent, selon le modèle présenté par (Marticorena, 1995) (cf. fig. 6.4). Cette intégration permet de modéliser la réaction potentielle du milieu à la morphodynamique éolienne, en intégrant le rôle d'abri de la végétation. C'est la prise en compte de cette dimension verticale des obstacles qui est le principal apport de cette méthode, qui présente de surcroît l'avantage de contrôler les effets du transfert d'échelles, puisque, en partant de l'élément du paysage, de l'objet individuel : le buisson et ses caractères morphologiques , nous avons réussi à mettre au point une procédure conduisant à une cartographie synthétique d'un indicateur utilisé dans des modèles physiques de simulation de la morphodynmaique éolienne.

Ce faisant, nous avons répondu à une partie des problèmes posés notam-

ment par Callot *et al.* (2000) mais plus généralement par les travaux qui s'appuient, d'une part sur des prospections de terrain particulièrement fines et fouillées et, d'autre part, sur les résultats de l'analyse d'images de télédétection de résolution moyenne. Le transfert de l'informations d'un niveau d'échelle à un niveau supérieur, en sautant des niveaux, se fait, d'une certaine façon « à l'aveugle ». La méthode que nous proposons permet de réduire cet effet tunnel.

Enfin, le résultat obtenu nous semble un bon complément d'autre résultat, comme par exemple ceux obtenus par Ouerchefani (2012) à partir de l'analyse d'images LANDSAT. Cet auteur a produit des cartes des *unités éoliennes potentielles*, à partir de l'analyse d'indices radiométriques, en les confrontant également avec des cartes des unités pédologiques. Un extrait de ses résultats pour le site d'Oglet Merteba est disponible en annexe M. La combinaison de telles cartes, qui intègrent le critère pédologique, avec des cartes de densité d'obstacles et des données de vent traitées par la méthode des DPS permet d'envisager d'analyser de façon tout à la fois précise et synthétique le risque éolien d'un secteur donné.

La précision de l'ensemble de la démarche, qui adopte une stratégie ascendante, est par exemple illustrée par le fait qu'elle nous a permis de mettre en évidence la dépendance d'échelle dans le lien entre la répartition de la végétation et des formes éoliennes. Il nous a paru intéressant d'approfondir ce point, en conclusion de cette partie. Comme nous avons également pu produire, suivant la même stratégie ascendante, une carte de la densité de formes éoliennes pour le site de Rass Elkamen Labiadh, nous proposons d'analyser les liens que l'on peut établir entre densité d'obstacles végétaux et densité de formes éoliennes.

6.2.2 Comparaison avec la densité de formes éoliennes

Une telle comparaison est rendue possible par le fait que, spatialement, les mêmes unités de référence ont été utilisées. Cela signifie que, pour une même maille, nous avons compilé une valeur de densité d'obstacles et une valeur de densité de formes éoliennes. Plusieurs possibilités s'offrent alors pour étudier le lien potentiel entre ces deux données.

Une première approche consiste à représenter les valeurs de densité de formes éoliennes en fonction des valeurs de densité d'obstacles. Cette approche repose, implicitement, sur l'hypothèse d'un lien déterministe et, qui plus est, linéaire entre les deux valeurs et nous avons déjà discuté ce point. Une telle approche, modélisée par un nuage de points, produit le résultat présenté en figure 6.12. Pour aider à l'interprétation de la figure, rappelons que les valeurs faibles de densité d'obstacles correspondent à des valeurs fortes de fraction efficace du vent, c'est-à-dire plutôt à un potentiel d'érosion, tandis que des valeurs fortes de densité d'obstacles correspondent plutôt à un potentiel de dépôt.

La figure montre, dans un premier temps, que la relation entre les deux valeurs n'est pas linéaire, ce qui vient confirmer les observations que nous avons pu faire par ailleurs. La seule densité d'obstacles, ici végétaux, ne suffit pas à expliquer la répartition des formes éoliennes. D'autres facteurs doivent ainsi

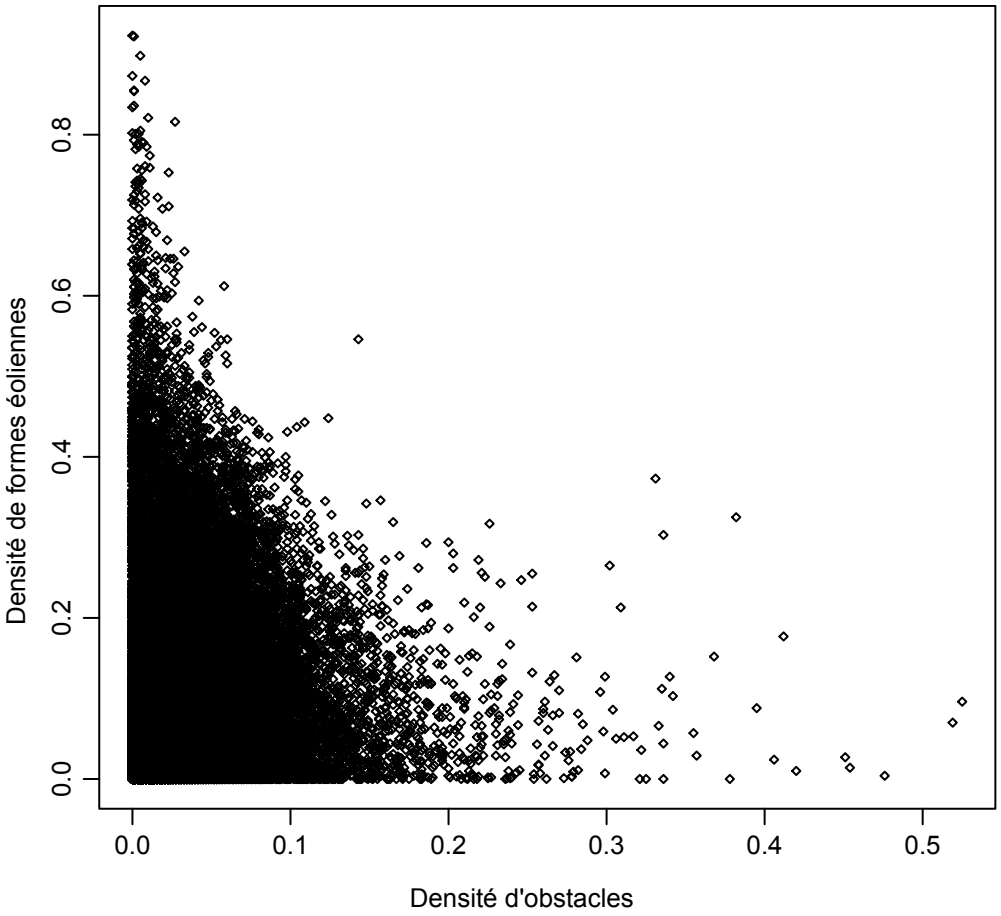


FIGURE 6.12 – *La densité de formes éoliennes représentée en fonction de la densité d'obstacles. Données du site de Rass Elkamen Labiadh*

entrer en ligne de compte. Cette observation est renforcée par le fait que la figure semble mettre en évidence un seuil dans la relation, seuil à partir duquel quand l'une des valeurs augmente, la seconde diminue.

Pour schématiser, on peut dire que, au-delà de ce seuil, plus la densité d'obstacles est élevée, plus la densité de formes éoliennes est faible et, inversement, plus la densité de formes éoliennes est élevée, plus la densité d'obstacles est faible. Cela confirme par exemple nos observations sur l'erg de Rass Elkamen Labiadh, ainsi que les observations similaires concernant l'aklé de Oglet Merteba.

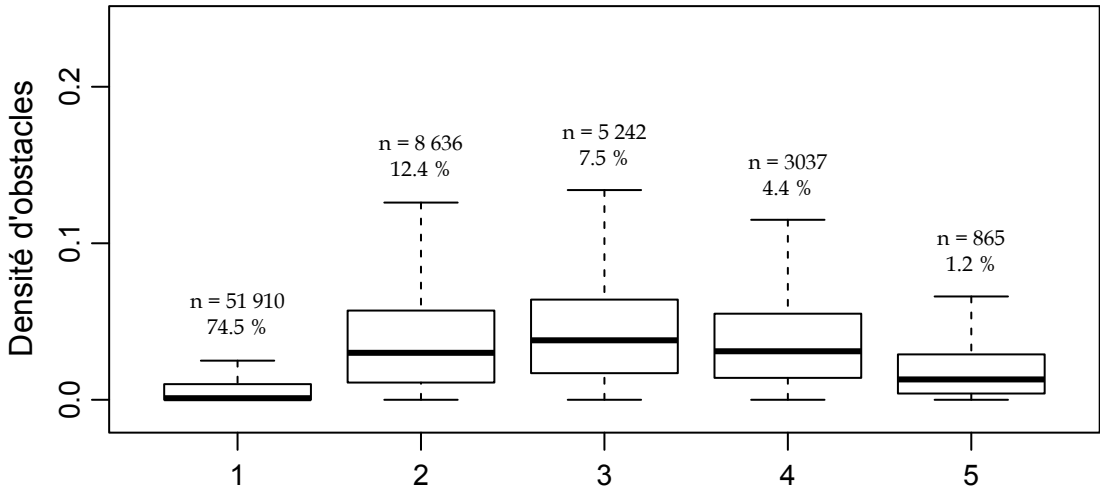
Compte tenu de l'étendue et de l'hétérogénéité des données, on peut se poser la question de leur représentation sous forme de variables continues. Pour simplifier la représentation et fournir d'autres pistes d'interprétation, il est possible, en effet, de discrétiser chaque jeu de valeurs en classes thématiques, puis de représenter un résumé statistique des valeurs prises par l'autre paramètre au sein de chacune des classes définies. Le résumé statistique choisi ici est la boîte à moustaches, qui représente dans une seule figure :

– les premiers et troisièmes quartiles : les extrémités inférieures et supérieures de la boîte rectangulaire ;

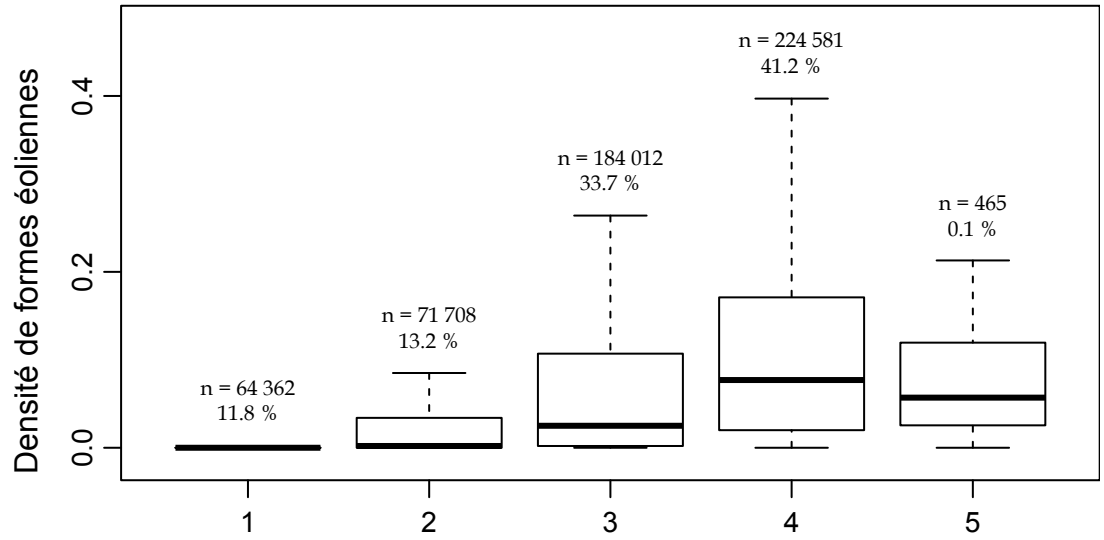
– la médiane : le trait horizontal épais au sein de la boîte ;
– le minimum et le maximum (hors valeurs considérées comme atypiques) : les deux traits horizontaux fins en dessous et au dessus de la boîte.

La représentation sous cette forme a été réalisée en discrétisant séparément chacune des deux données, ce qui permet de produire la figure 6.13. Nous avons également ajouté, pour chaque classe :

– de densité de formes éoliennes (fig. 6.13(a)) : le nombre et la proportion de mailles incluses ;
– de densité d'obstacles (fig. 6.13(b)) : le nombre et la proportion de formes éoliennes incluses.



(a) La densité d'obstacles dans chaque classe de densité de formes éoliennes



(b) La densité de formes éoliennes dans chaque classe de densité d'obstacles

FIGURE 6.13 – *Les relations entre les densités d'obstacles et de formes éoliennes après discrétisation de chacune des valeurs*

Les classes de la figure 6.13(a) ont pour bornes celles utilisées dans la légende de la carte présentée en fig. 5.24, à savoir :

- classe 1 : densité de formes éoliennes nulle ou inférieure à 5 % ;
- classe 2 : comprise entre 5 et 15 % ;
- classe 3 : comprise entre 15 et 25 % ;
- classe 4 : comprise entre 25 et 40 % ;
- classe 5 : densité de formes éoliennes supérieure à 40 %.

Les classes de la figure 6.13(b) ont pour bornes celles utilisées dans la légende de la carte présentée en fig. 6.5, à savoir :

- classe 1 : densité d'obstacle nulle ou inférieure à 0,003, correspondant à une fraction efficace du vent supérieure à 80 % ;
- classe 2 : comprise entre 0,003 et 0,01, correspondant à une fraction efficace du vent comprise entre 50 et 80 % ;
- classe 3 : comprise entre 0,01 et 0,035, correspondant à une fraction efficace du vent comprise entre 20 et 50 % ;
- classe 4 : comprise entre 0,035 et 0,3, correspondant à une fraction efficace du vent inférieure à 20 % ;
- classe 5 : supérieure à 0,3, correspondant à une fraction efficace du vent nulle.

La première figure apporte les éléments d'interprétation suivants : tout d'abord, l'essentiel de l'espace considéré est peu recouvert de formes éoliennes (classe 1) et la boîte à moustaches montre que cela correspond à des densités d'obstacles globalement faibles. À l'inverse, très peu de mailles de l'espace étudié ont une densité de formes éoliennes très forte, supérieure à 40 % (classe 5). Ces dernières ont également des valeurs de densité d'obstacles plutôt faibles. Elle correspondent au secteur de l'erg, ainsi qu'à d'autres zones d'ensablement important. Il est cependant intéressant de noter que ces secteurs de fort ensablement ne sont pas nécessairement ceux où la densité d'obstacles est la plus forte. À nouveau, cela signifie probablement que d'autres facteurs, comme le relief, peuvent expliquer la présence des formes éoliennes. Les boîtes à moustaches des trois classes centrales ont une apparence similaire, ce qui signifie que les mailles concernées présentent des valeurs de densité d'obstacles semblables.

La seconde figure permet de compléter ces interprétations. En effet, elle montre bien que lorsque la densité d'obstacles est faible ou nulle, on a relativement peu de formes éoliennes qui sont, dans l'ensemble, de très petites dimensions et quand la densité d'obstacle est très forte, on n'a presque pas de formes éoliennes mais elles peuvent avoir, en revanche, des dimensions importantes. La dispersion de la densité de formes éoliennes dans cette dernière classe est cependant forte. On remarque, enfin, que 75 % des formes éoliennes se trouvent dans les classes 3 et 4 de densité d'obstacles. Ainsi, on identifie également deux seuils sur cette figure : un seuil supérieur et un seuil inférieur.

En résumé de ces remarques, on peut proposer une hypothèse d'explication synthétique faisant intervenir trois types de secteurs, caractérisés par une morphodynamique éolienne spécifique :

1. les secteurs où la faible couverture en formes éoliennes s'explique par la faiblesse de la densité d'obstacles.
2. les secteurs où, à l'inverse, on peut considérer que la présence de formes

éoliennes, dont la chaîne de causalité n'est pas liée à la végétation, explique la faiblesse de la densité d'obstacles.

3. les secteurs, enfin, où la densité d'obstacles est relativement homogène et où la densité de formes éoliennes évolue dans des limites précises. Dans ces secteurs, l'interaction entre la végétation et la morphodynamique éolienne est forte.

Ces résultats montrent ainsi en quoi la démarche que nous avons suivie permet de préserver la finesse de l'information à différentes échelles. En considérant toutes les formes éoliennes comme des objets, nous avons pu mettre en évidence différents niveaux d'explication de leur répartition spatiale, certains en lien avec la végétation, que nous avons pu modéliser dans sa dimension verticale, d'autres en lien avec des paramètres plus structuraux, comme le relief. L'approfondissement de l'analyse est encore possible, par exemple en convertissant les différentes couches de données au format Raster et en en faisant une analyse multivariée. Cet aspect, qui a pas abordé lors du travail de master 2, fait partie des perspectives que nous discutons dans la dernière section de ce chapitre.

6.3 Perspectives et conclusions

6.3.1 Le point sur les données

Un premier élément de discussion finale concerne l'exploitation de la base de données. Très vaste, cette dernière n'a pu être intégralement exploitée. Nos objectifs initiaux, tant du point de vue géographique - appliquer les mêmes méthodes à chacun des sites - que du point de vue thématique - étudier les mêmes objets et problématiques dans chacun des sites - n'ont pas été tenus. Cependant, les données sont effectivement disponibles, préparées pour la plupart, en particulier les images qui avaient besoin d'être géoréférencées. Ce travail très important de préparation n'est pas forcément visible dans les résultats que nous avons finalement choisis de présenter, mais il explique en grande partie leur aspect finalement quelque peu morcelé. Toujours au plan général, il manque à ce travail une plus grande intégration de la dimension temporelle. Nous avons montré que les méthodes que nous utilisons sont robustes pour intégrer les transferts d'échelles et décrire des situations spatiales différentes, ce qui est la première étape vers l'élaboration d'un protocole de suivi. Si leur intérêt pour suivre les évolutions temporelles des phénomènes qu'elles permettent d'étudier ne fait, selon nous, pas beaucoup de doute, ce travail n'a pas pu exploiter complètement cette dimension.

Concernant les images, l'analyse est contrastée entre, d'une part, les images satellites *QuickBird* acquises grâce au financement d'ArchéOrient, et qui auront été bien exploitées, et les images du *Pixy* dont nous n'avons finalement vraiment analysé qu'un seul jeu : celui de Dar Dhaoui. Les jeux d'images de Rass Elkamen Labiadh et Oglet Merteba ont essentiellement servi à calibrer le modèle de relation entre l'emprise au sol de la végétation et sa hauteur qui a

permis d'élaborer les cartes de densité d'obstacles. Le lecteur intéressé trouvera toutefois des résultats d'analyse des images d'Oglet Merteba dans le mémoire de master 2 (Venard, 2008). Deux raisons expliquent cela. La première est liée à la nécessité de ne pas reproduire le travail de Ouerchefani (2012), en transposant les approches de cet auteur à des analyses de photographies aériennes. Le souci d'élaborer des démarches qui soient complémentaires, et non redondantes, nous a conduit à écarter certaines pistes qui semblaient intéressantes. Ces pistes pourront peut-être être explorées lors de travaux menés en collaboration.

La seconde raison est davantage conceptuelle. Les images *Pixy* introduisent une résolution thématique telle que l'interprétation de résultats obtenus doit s'appuyer sur des données explicatives au moins aussi précises. S'agissant, dans ce travail, de la morphodynamique éolienne, c'était le cas à Dar Dhaoui, grâce à la collaboration précieuse des membres de l'IRA chargé de la station météorologique. Par manque de données locales sur les vents, il aurait été beaucoup plus délicat d'interpréter les résultats pour les sites de Rass Elkamen Labiadh et d'Oglet Merteba. Mais les résultats prometteurs obtenus pour le site de Dar Dhaoui montrent que des protocoles de suivi intégrant, éventuellement sur des périodes relativement courtes, des images très haute résolution et des données de vent locales permettent de caractériser avec une grande finesse la morphodynamique éolienne. Cela peut servir, notamment, à mieux définir les modalités d'actions de lutte contre l'ensablement ou l'érosion éolienne, tout en ciblant plus précisément les secteurs d'intervention, aussi bien spatialement que temporellement. Un vaste champ de recherche utilisant la photographie aérienne à basse altitude est ainsi ouvert dans le domaine des régions sèches.

Le travail de préparation des images *Pixy*, s'il n'a pas toujours conduit à produire des résultats définitifs, a cependant permis de poser les fondations du questionnement qui est au cœur de ce travail : comment envisager la morphodynamique éolienne à différentes échelles sans perdre (trop) d'information lors des transferts d'échelles ? C'est cette question qui a structuré notre travail et elle explique aussi en partie la sous-exploitation de la base de données *Pixy*. En effet, pour avoir une dimension opérationnelle, nos résultats ne pouvaient être cantonnés à l'échelle micro correspondant à la résolution des images du *Pixy*. Aussi avons-nous organisé la restitution finale autour et vers l'exploitation des images *QuickBird*.

De la même façon que les images *Pixy*, et pour les mêmes raisons, la base de données de photographies d'échantillons d'états de surface est encore sous-exploitée. Nous n'avons développé dans ce travail que quelques exemples d'utilisation, là encore en ayant le souci de rester complémentaire et non redondant des travaux déjà réalisés. En revanche, les données de vents ont été bien exploitées. L'approche par les DPS a montré tout son intérêt, en particulier à des échelles temporelles fines où les moyennes ne suffisent plus pour analyser les processus à l'œuvre dans les paysages. Cette base de données structurée est disponible et, même si elle n'a pas été formellement présentée ainsi, elle constitue un résultat important de ce travail de thèse.

6.3.2 Apports conceptuels et développements potentiels

La figure 6.14 est un essai de représentation de la démarche communément utilisée dans les études des régions sèches non désertiques. Ces dernières s'appuient sur des prospections de terrain généralement très précises et exhaustives. Elles ont pour but de décrire au plus près la diversité des paysages rencontrés. La limite de ce type de travail est l'hétérogénéité des données récoltées, leur caractère ponctuel et la quantité importante de cas particuliers qu'elle conduit à rencontrer. Aussi, pour généraliser les conclusions tirées de cette première approche, il est commun d'utiliser des images de télédétection, les plus fréquentes étant les image LANDSAT, qui présentent l'avantage de couvrir de grandes surfaces avec des résolutions considérées comme moyennes, d'être disponibles partout et, pour certaines, gratuitement. De fait, comme nous l'avons montré, ces images constituent le socle principal des études des régions sèches.

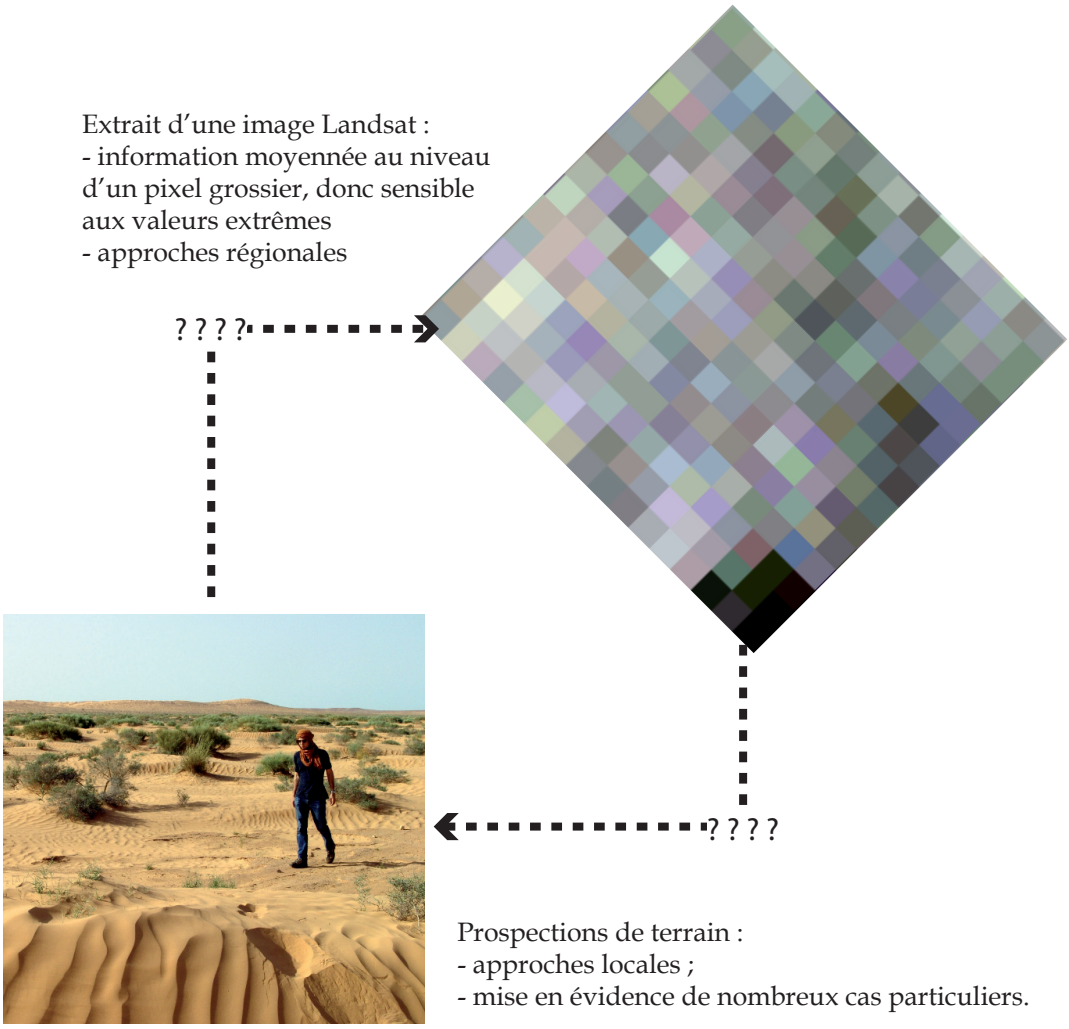


FIGURE 6.14 – *Le schéma classique d'étude des régions sèches non désertiques*

Notre propos n'est pas de discuter ici des limites de l'approche dans d'autres cas que l'étude de la morphodynamique éolienne. Tout au long de ce travail,

nous avons montré que les formes éoliennes les plus fréquentes dans les régions sèches non désertiques, donc celles qui présentent le plus d'intérêt pour un diagnostic ou un suivi, sont à la fois de petite dimension et sensibles aux variations fines des conditions du milieu, qu'il s'agisse du climat, par exemple les précipitations ou l'intensité du vent, comme des activités humaines : pâturage ou labours. De ce point de vue, appliquer à leur étude le schéma classique revient à se heurter aux deux seuils définis par Puech (1994). Dans une approche au sol, on est en-deçà du seuil d'hétérogénéité et chaque cas semble particulier. Les schémas d'organisation spatiale n'apparaissent pas clairement et la complexité des éléments à observer brouille l'analyse. À l'échelle de Landsat, en revanche, on est au-delà du seuil d'homogénéité : les formes éoliennes sont, en général, trop petites pour peser suffisamment dans les comptes numériques des pixels résultants. De plus, en raison de la dépendance d'échelle qui est propre à chaque niveau, ces seuils sont renforcés : au sol, on observe des changements quasiment instantanés, tandis qu'ils sont soit invisibles, soit exacerbés à l'échelle de Landsat.

Aussi avons-nous cherché à dépasser les limites de l'approche classique en intégrant deux nouvelles approches (fig. 6.15) : la première consiste à prendre de la hauteur tout en conservant la résolution du terrain en termes de richesse d'information. Cette approche exploite le potentiel des photographies aériennes à basse altitude. Elle permet de mettre en évidence des schémas d'organisation des éléments du paysage que l'approche-terrain a identifié. On discrimine ainsi plus facilement des indicateurs qu'il est possible voire souhaitable d'étudier à un niveau supérieur, et ceux qui ne décrivent qu'une réalité locale et fugitive. Cela étant posé, il faut, d'une part, disposer d'une donnée qui permette de généraliser ces indicateurs, en l'occurence les images *QuickBird* qui introduisent un niveau d'échelle intermédiaire et, d'autre part, s'appuyer sur des méthodes qui préservent la précision de l'information initiale. Ces méthodes doivent être orientées–objets. Il ne peut s'agir de méthodes de classification orientées–pixels dont le principe même est de simplifier l'information en la discrétisant en classes. Au contraire, les méthodes pertinentes dans ce contexte sont celles qui structurent l'information sans l'altérer, au moins dans la phase d'extraction. De ce point de vue, l'analyse d'images utilisant les outils de la Morphologie Mathématique est particulièrement indiquée. Elle présente l'avantage, en outre, d'offrir des outils pertinents et efficaces à différentes échelles, comme nous l'avons montré par exemple concernant l'extraction des formes éoliennes.

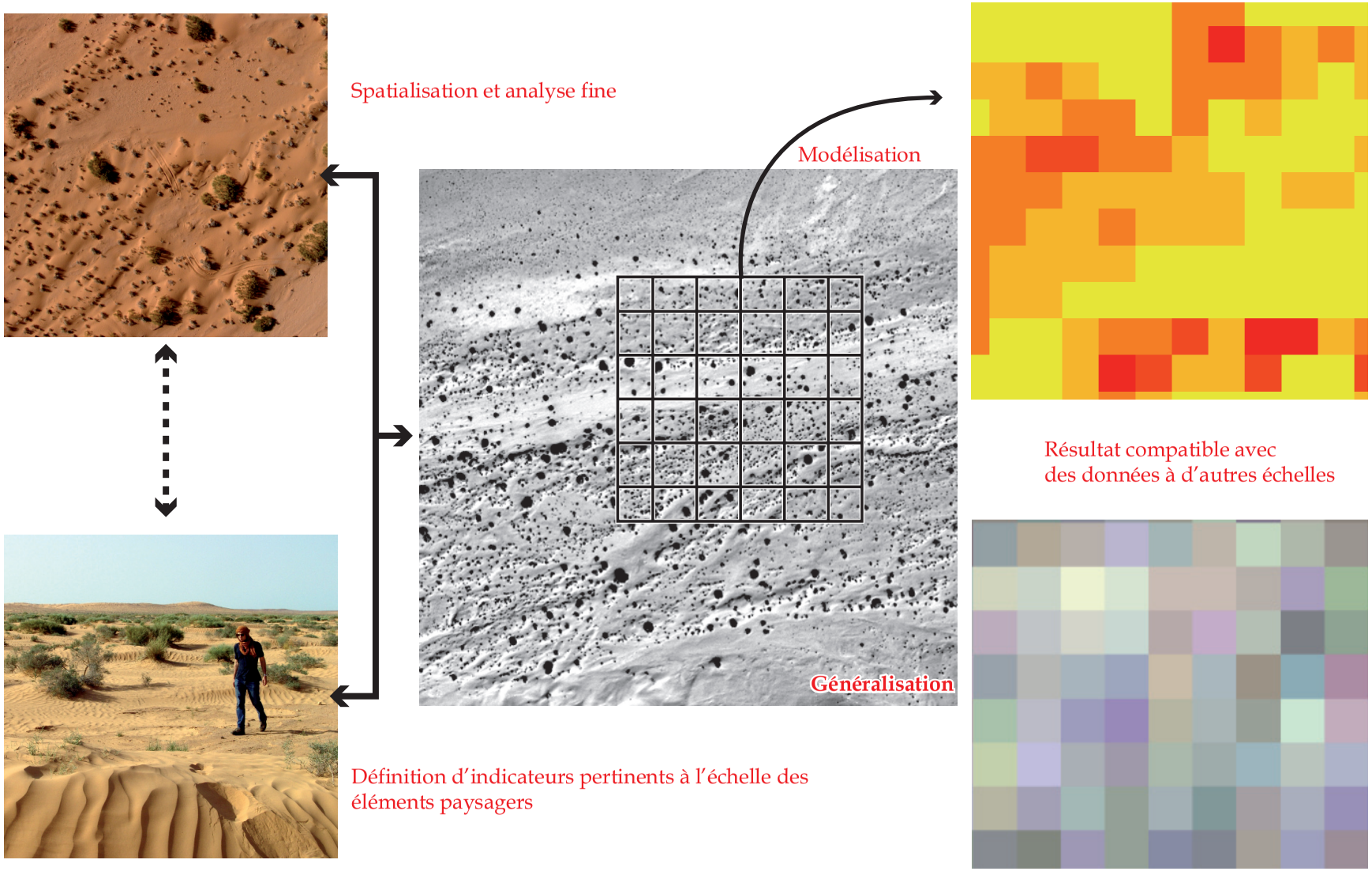


FIGURE 6.15 – *Une approche intégrée contrôlant les transferts d'échelle*

Tout l'objet des procédures qui viennent à la suite de ce que l'on peut appeler le transfert d'échelle contrôlé est de normaliser l'information extraite pour que les résultats obtenus soient comparables dans l'espace et dans le temps. Ce faisant, nous avons réalisé une démarche intégrée de *bottom–up* (Escadafal, 1989), depuis l'échelle du terrain jusqu'à l'échelle de l'image satellite à moyenne résolution. Nous avons ainsi réussi à dépasser le seuil d'hétérogénéité pour produire un résultat non bruité, sans pour autant perdre en précision. Il ne s'agit pas d'une remise en question des démarches classiques, puisque, au contraire, nous nous sommes appuyé sur leurs acquis pour élaborer les problématiques et les démarches méthodologiques de ce travail. C'est l'intégration dans le champ de la recherche sur les régions arides d'un nouvel objet, les formes éoliennes d'obstacles, qui a conduit à élaborer cette réflexion conceptuelle autour des seuils d'hétérogénéité et d'homogénéité dans les images de télédétection.

En effet, comme la bibliographie le montre, ces derniers ne sont pas liés à une échelle, mais à l'objet de l'étude qui, lui, définit l'échelle d'analyse adéquate (Mering, 1998). Le nouvel objet imposant son échelle d'analyse, cette dernière ne peut être traitée qu'en s'appuyant sur des données conformes à cette échelle. La mise à disposition de plus en plus large d'images satellites à très haute résolution répond à ce besoin. Enfin, la normalisation est aussi une réponse au défi posé par la très haute résolution : comment interpréter et exploiter des résultats qui se comptent en centaines de milliers d'objets ? Comment spatialiser ces résultats pour en analyser les motifs de répartition ? Les propositions que nous avons faites dans ce travail sont des pistes de réponses qui devront être approfondies. En particulier, la combinaison des différents résultats sous la forme de Raster multi–canaux à partir desquels on peut développer des analyses multivariées (fg. 6.16) est l'étape suivante de la démarche générale. Cette dernière figure illustre aussi l'intérêt qu'il y a à se positionner au niveau des éléments du paysage, puisque cela démultiplie les niveaux d'informations que l'on peut intégrer à l'analyse, et dont seuls quelques-uns ont été présentés ici.

Les potentielles application de cette approche sont nombreuses. Il peut s'agir de support aux actions locales de lutte contre la désertification et contre l'ensablement, menée en Tunisie, par exemple, conjointement par les instituts de recherche et par les centres régionaux de développement agricole (CRDA). Les résultats que nous sommes en mesure de fournir permette d'analyser finement l'impact d'une pratique culturale ou d'un aménagement sur la morphodynamique éolienne en les intégrant dans une approche systémique. Une autre application concerne la modélisation d'autre aspects de la morphodynamique éolienne, à une échelle beaucoup plus petite, comme par exemple les travaux menés par le LISA concernant les soulèvements de poussières (Callot *et al.*, 2000, Marticorena *et al.*, 2004), dont certains récents et qui concernent la Tunisie, comme par exemple les thèses de Kardous (2005) ou de Labiadh (2011). La démarche ascendante que nous avons présentée est en effet un complément pertinent d'une stratégie d'échantillonnage à une échelle régionale, permettant de caler des modèles locaux et d'augmenter la précision des modèles globaux.

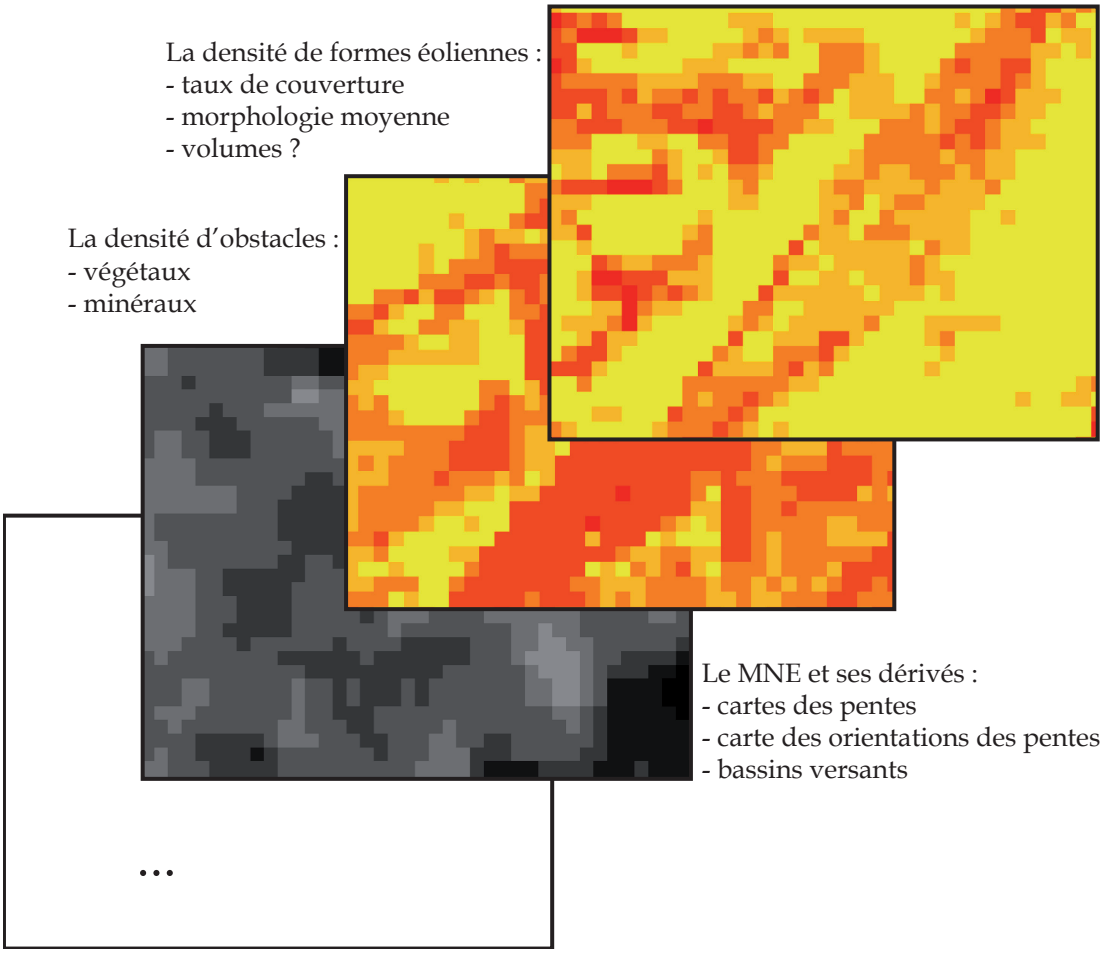


FIGURE 6.16 – *Combinaisons spatiales des informations extraites au niveau des éléments du paysage*

Conclusion générale

En introduction de ce mémoire, nous nous étions fixé deux objectifs. Le premier était répondre à un questionnement conceptuel : comment définir les formes éoliennes de façon à en faire des indicateurs pertinents de suivi de la morphodynamique éolienne et de la désertification ? Le second, découlant du premier, devait répondre au questionnement méthodologique associé : comment mettre en place une démarche de suivi globale fondée sur une échelle d'observation initiale très fine en contrôlant de façon satisfaisante les transferts d'échelle ?

Considérant qu'il est essentiel de bien définir les éléments d'un problème, de structurer l'aproche que l'on veut en faire, en posant un à un les éléments sur lesquels l'analyse sera construite, nous avons mis d'abord l'accent sur les questions de définition et de pertinence méthodologique. Ce socle conceptuel et méthodologique a ensuite été confronté, dans différents contextes, aux réalités observées sur le terrain ou aux résultats de l'analyse d'images de télédétection. La réflexion conceptuelle a ainsi orienté la démarche méthodologique qui, en retour, a enrichi la réflexion conceptuelle.

La construction de ce mémoire répond à ce choix de démarche en proposant une progression, pour chaque thème abordé, depuis le particulier vers le plus général. Ainsi avons-nous exposé, au cours du premier chapitre (partie 1), les fondements de l'étude de la morphodynamique éolienne, en décrivant les mécanismes à l'œuvre à l'échelle du grain de sable, de la parcelle expérimentale ou encore d'un système comme le Grand Erg occidental.

Appuyées sur ces fondamentaux, les applications présentées au cours de ce chapitre ont mis en évidence la manière dont les formes éoliennes, dans le contexte désertique, peuvent être considérées comme des enregistreurs en continu des évolutions du milieu. L'analyse des barkhanes du fleuve de sable du cap Juby a été l'occasion de rappeler l'actualité d'hypothèses anciennes, comme celle du rapport entre la hauteur des formes et la vitesse de leur déplacement (Coursin, 1964), ou bien de l'intérêt du calcul de Déplacements Potentiels Sableux (DPS) pour décrire les évolutions de ces paysages (Fryberger, 1979).

Dans un contexte relativement simple, nous avons pu démontrer la robustesse d'une approche couplant ces déplacements potentiels sableux et l'analyse d'images très haute résolution. L'étude comparée des formes éoliennes a permis d'ouvrir des pistes de réflexion sur le rapport entre les formes observées, l'environnement dans lequel elles se développent et les échelles auxquelles elles peuvent se rattacher. Dans des régions où l'analyse directe peut être particu-

lièrement difficile à mettre en œuvre, nous avons montré tout le potentiel de l'analyse d'images pour un premier diagnostic, notamment en recherche fondamentale, car la présence humaine est moins forte dans ces zones. Si les enjeux n'y sont pas nuls, ils sont ainsi de moins grande envergure que ceux que l'on peut trouver dans des contextes moins arides où la morphodynamique éolienne joue également un rôle essentiel, comme nous l'avons montré au cours des chapitres suivants.

La morphodynamique éolienne prend ainsi une dimension beaucoup plus concrète, du point de vue des processus comme des impacts qu'elle peut avoir. Au fil des développements suivants, nous enrichissons cette vision en l'illustrant par des exemples variés. Il apparaît dès lors que l'affirmation de Tricart et Cailleux (1969) selon laquelle, contrairement à ce qui serait une idée reçue, le vent ne joue qu'un rôle secondaire dans la géomorphologie des régions sèches peut se discuter. Elle se vérifie à l'échelle du relief et du modelé de l'ensemble d'une région, où la morphodynamique éolienne est, en proportion des autres actions, effectivement confinée à la marge. À l'issue de ce travail, on peut cependant nuancer ce propos en indiquant qu'à certaines échelles spatiale et temporelle, celles des variations rapides du milieu, l'action éolienne a une place prépondérante, dans le façonnement des paysages comme dans les problématiques d'aménagement ou d'usage des ressources qui en découlent.

Fort de ce constat, nous avons entrepris d'interroger, dans le second chapitre, la façon dont les dynamiques du milieu sont étudiées dans les régions sèches non désertiques, en particulier dans un contexte de désertification. Une revue critique des définitions possibles du concept a été proposée qui nous a conduit à considérer qu'un trait commun aux différentes définitions est la perte de la capacité d'adaptation des sociétés et des pratiques aux évolutions climatiques qui sont, dans les contextes concernés, inéluctables. Aussi, étudier la morphodynamique éolienne dans les régions sèches non-désertiques nécessite, de notre point de vue, de pouvoir décrire de façon précise les évolutions du milieu comme celles des pratiques qui peuvent l'affecter. Pour cela, de nouvelles approches doivent être explorées, et celles que nous avons proposées sont centrées autour d'un objet spécifique : la forme éolienne d'obstacle, qui reste mal connu malgré l'importance qu'il revêt dans la constitution des paysages arides.

Nous avons montré que les méthodes classiques atteignaient leurs limites lorsque l'on place l'analyse à son niveau. Cet objet, commun à tous les sens du terme, peut pourtant être étudié de façon systémique. Une grille de caractérisation fine de cet objet a ainsi été proposée, à partir de laquelle on peut élaborer un protocole de quantification, d'évaluation qualitative nécessaire à la production d'indicateurs. Cette démarche fait l'objet d'un article en cours de préparation qui s'appuie en partie sur les raisonnements développés dans ce mémoire. Nous avons montré enfin que la distinction entre cette forme d'obstacle et la forme autonome, définie dans le premier chapitre, est fondamentale pour comprendre les différences de processus entre les contextes désertiques et ceux des régions sèches.

En plaçant l'analyse élémentaire à l'échelle d'un objet de petite dimension comme la forme éolienne d'obstacle, nous avons également été amené à envisa-

ger les effets de seuil induits par la démarche. En effet, pour en assurer la portée analytique et ne pas la cantonner à un aspect descriptif, il était nécessaire qu'elle puisse se décliner à différentes échelles sans perdre de sa robustesse. L'utilisation multi-scalaire d'indicateurs se heurte alors fréquemment à ces effets de seuil, notion fondamentale en géographie puisque constitutive de l'approche scalaire (Brunet, 1967).

Pourtant, il est souvent difficile de l'intégrer dans des approches standardisées, surtout jusqu'à présent où, en matière de télédétection, il existait peu sinon pas d'outils permettant d'appréhender une échelle intermédiaire entre celle du terrain et celle des satellites de résolution moyenne comme Landsat. En la plaçant au centre de nos préoccupations méthodologiques, nous avons cherché à apporter des éléments de réflexion supplémentaires. En détaillant quelques exemples, nous soulignons notamment l'importance de la prise en considération du seuil d'hétérogénéité - en-deçà duquel l'information recherchée est noyée dans le bruit d'un trop grand détail - et du seuil d'homogénéité - au-delà duquel la maille d'analyse fait que l'information est trop lissée pour être pertinente. Ce double concept nous paraît fondamental et nécessairement structurant dans une approche de télédétection (Puech, 1994).

C'est donc en cherchant à prendre au mieux en considération ces différentes contraintes que nous avons ensuite proposé des méthodes permettant :

1. De décrire de façon précise la morphodynamique éolienne en intégrant un nouvel indicateur, la forme éolienne d'obstacle, qui doit permettre de relier la morphodynamique éolienne aux évolutions générales de l'environnement.
2. De généraliser des approches emboîtant les niveaux d'analyse en limitant l'impact négatif des transferts d'échelle.

Il nous semble que le second point prend d'autant plus d'importance que les progrès actuels de la technologie fournissent des informations de plus en plus précises qu'il faut pouvoir analyser de façon pertinente. Aussi, après avoir été assez conceptuelle, la démarche se fait-elle beaucoup plus méthodologique dans le troisième chapitre et dans les chapitres suivant. Ces conclusions sur les aspects méthodologiques de notre travail étant communes aux différents points abordés dans le troisième chapitre et dans l'ensemble de la deuxième partie, nous n'en détaillerons pas la synthèse chapitre par chapitre.

Pour différentes raisons, certaines scientifiques et d'autres plus pragmatiques, nous avions choisi de travailler en Tunisie pré-saharienne. Elle présentait l'intérêt d'avoir été le terrain de nombreuses autres études, tant du point de vue des sciences humaines (Fethoui, 2011) que des sciences naturelles (Labiadh, 2011). Aussi avons-nous pu nous appuyer sur les acquis existants. En particulier, nous avons conçu des protocoles complémentaires de ceux appliqués par Ouerchefani (2012) pour étudier la même problématique d'un autre point de vue. Ses travaux ont notamment enrichi les principes de l'approche stationnelle selon la méthode des points quadrats, adaptée à l'étude de la morphodynamique éolienne. Pour les compléter, nous avons mis l'accent, d'une part, sur la description des conditions de vent, en nous appuyant sur une base de données

riche et, d'autre part, sur les apports de l'analyse d'images prises au sol dans un premier temps.

La description des conditions de vent de la Tunisie pré-saharienne, utilisant les DPS, a souligné la nécessité de prendre en considération les variations inter et intra-annuelles. Les DPS, qui mettent en évidence les vents les plus forts par rapport aux vents les plus fréquents, offrent de ce point de vue plus d'information que l'approche par les moyennes, plus fréquemment utilisée. Ils ont permis de mieux comprendre comment des quantités de sable aussi importantes peuvent être mobilisées dans des contextes où le vent, en général, n'est pas particulièrement violent. Dans le contexté étudié, nous avons pu mettre en relation des pics d'activité éolienne, nettement identifiables d'une période à une autre ou d'une année à une autre, avec des pics d'exploitation des ressources du sol qui le fragilisent et l'exposent à l'érosion éolienne, en particulier à travers la pratique du labour. Par extension, on peut envisager que la recherche de telles corrélations puisse expliquer d'autres dimensions du risque éolien, éventuellement dans d'autres contextes que ceux de la Tunisie pré-saharienne.

La traduction concrète de ce risque a été la mise en place de formes, dont la disposition, l'état et l'aspect ont alors pu être mis en relation avec leur environnement. À différentes échelles spatiales et temporelles, nous avons pu mettre en parallèle des types de formes, comme des rides, ou des orientations, comme celles des formes piégées dans les oliviers, et les caractères de la dynamique éolienne décrits par les DPS. Dès lors, la possibilité d'utiliser les formes éoliennes comme des indicateurs fins des évolutions du milieu est devenue plus concrète et a introduit l'aspect appliqué de nos résultats. En terme de diagnostic, de prévention et de correction, de nombreuses extensions concrètes des démarches présentées dans ce mémoire peuvent être envisagées.

Dans cet esprit, nous avons cherché à développer des méthodes qui soient reproductibles, minimisant la complexité et les coûts de mise en œuvre. La télédétection s'est alors imposée mais il était nécessaire qu'elle respecte les contraintes posées. Celles-ci portent d'une part sur la donnée analysée, qui doit permettre d'appréhender les objets d'intérêt que sont les formes éoliennes d'obstacle et, d'autre part, sur la méthode utilisée pour l'analyse. En évaluant différents vecteurs de capture nous avons fait la démonstration de la pertinence des images à très haute résolution spatiale pour caractériser, de façon précise, les paysages arides.

Le *Pixy*, paramoteur léger à voile souple, par sa facilité d'utilisation et la précision des images qu'il permet de produire, a mis en avant le potentiel d'application des vecteurs de type drone. Il permet d'appréhender un secteur avec une précision comparable à celle de l'approche-terrain tout en offrant le recul de la vision verticale. En contrepartie, nous avons montré également que sa grande sensibilité aux conditions climatiques limite la souplesse d'usage qui devrait en faire l'atout principal. Le développement actuel de vecteurs à la fois plus compacts, plus stables et plus efficaces - ils peuvent intégrer une centrale à inertie, un GPS, suivre un plan de vol pré-défini - devrait étendre le champ d'application de ce type d'outil. Les pistes méthodologiques que nous avons suivies pour

contourner les contraintes que cela peut poser seront utiles aux chercheurs qui voudront utiliser des outils similaires dans d'autres contextes.

En second lieu, nous avons pu illustrer l'intérêt des - relativement - nouveaux satellites à très haute résolution spatiales pour, notamment, la généralisation d'études ciblées spatialement ou thématiquement, autour d'un objet. Les images qu'ils permettent de produire correspondent à l'échelle intermédiaire qui faisait jusqu'alors défaut. Nous avons montré comment on pouvait extraire des formes éoliennes de ces images, ainsi que des éléments de contexte, comme la végétation, en cherchant à les combiner avec les relevés de terrain, les images du *Pixy* et les images de niveau d'échelle supérieur, de type LANDSAT. À partir d'exemples variés, nous avons montré comment elles pouvaient être à la base de démarches de « bottom-up » visant à intégrer les échelles.

Parmi les fournisseurs de ce type d'image, nous avons montré que *Google Earth* était une alternative possible des fournisseurs payants. La disponibilité de plus en plus grande d'images de résolution très élevée, comme celles du satellite GeoEye©, au lancement duquel la compagnie californienne a participé, offre des perspectives d'applications dans des domaines extrêmement variés, de l'archéologie à la gestion des cours d'eau. Dans ce contexte, les apports méthodologiques de ce travail trouveront également une continuité naturelle.

Certes, les images extraites de *Google Earth* ne se prêtent pas à tous les traitements possibles en télédétection, mais elles peuvent nourrir une première approche de terrains difficiles d'accès, une sélection de zones d'intérêt. Sous certaines conditions, comme nous l'avons montré, elles peuvent même fournir la donnée fondamentale d'une étude ciblée. Ces conclusions s'inscrivent dans les ambitions initiales de ce travail : produire des méthodes et des indicateurs souples et à moindre coût, qui permettent de les reproduire dans des contextes spatiaux et temporels différents et difficiles. Le potentiel de ces images est d'autant mieux exploité que l'on utilise des outils adaptés à leurs faiblesses.

En raison de la diversité des images nécessaires à l'élaboration d'une approche intégrant les échelles, l'utilisation de la Morphologie Mathématique (MM) s'est imposée naturellement. Outre l'intérêt d'être une discipline de l'analyse d'image orientée-objet, ses méthodes permettent de définir des procédures simples à expliquer et à reproduire, dont les résultats sont plus facilement interprétables que ceux des procédures de classification multi-spectrale. Comme elles s'appuient sur une segmentation initiale, elles ne sont certes pas adaptées à tous les types d'objet mais, dans le contexte des régions sèches, elles donnent de bons résultats en simplifiant les démarches.

L'utilisation de la Morphologie Mathématique (MM) participe aussi à réduire le coût des études, puisqu'elle rend optionnelle la plupart des corrections des images - coûteuses car nécessitant une forte expertise - en ne s'appuyant pas sur les relations radiométriques entre ses composants mais sur leurs relations spatiales. Elle permet donc d'analyser de façon robuste des images non standardisées, du type *Pixy* ou *Google Earth* (Venard *et al.*, 2009). La MM offre ainsi un champ d'application très vaste, proposant davantage de souplesse et de simplicité, ou des coûts faibles voire nuls. Or, comme nous l'avons souligné, la question économique des diagnostics ne peut être évacuée, en particulier dans

les pays concernés par la lutte contre la désertification. Il nous paraît important de revenir sur ce point car ce travail ne répondrait pas à son ambition initiale si son application concrète se heurtait de façon trop abrupte à une question de coûts ou de transfert de compétences.

Il ne s'agissait en effet pas d'analyser l'action éolienne uniquement pour elle-même mais bien de comprendre comment, en entrant en interaction avec d'autres processus environnementaux, celle-ci permet d'expliquer les évolutions des paysages, compris comme la traduction visible de ces interactions, à différentes échelles. Au-delà de la problématique de la morphodynamique éolienne, les approches que nous avons mises au point combinent donc des méthodes de caractérisation semi-automatique des éléments du paysage avec des procédures d'intégration multi-scalaire des indicateurs ainsi obtenus. En résumé, il s'agit de pouvoir décrire aussi précisément que possible l'objet élémentaire de l'analyse pour pouvoir la généraliser avec pertinence. Aussi nos résultats sont-ils potentiellement utiles à toute démarche qui cherche à appréhender les effets d'un phénomène à différentes échelles. Ce constat se vérifie pour des problématiques géomorphologiques, mais on peut envisager de l'étendre à des problématique de santé publique liées au vent (Sultan *et al.*, 2005) ou d'analyse des changements environnementaux à une échelle gloable (Pierre, 2010).

Les résultats de ce travail pourront donc trouver des applications dans le champ de la recherche fondamentale, où la combinaison d'indicateurs paramétrés permet de calibrer et de valider des modèles. Ils pourront également servir dans le champ de la recherche appliquée, où les méthodes développées permettront de mettre en œuvre simplement des diagnostics préliminaires dans des « zones difficiles », pour lesquelles elles ont été spécialement développées. En ce sens, et malgré le chemin encore à parcourir pour disposer d'une démarche parfaitement structurée autour de l'utilisation des formes éoliennes comme indicateur et de l'intégration d'échelle, nous espérons avoir répondu aux objectifs fixés initialement.

Bibliographie

Abaad A., Bedrani S., Bourbouze A. et Chiche J., 1995. Les politiques agricoles et la dynamique des systèmes agropastoraux au Maghreb. *Options méditerranéennes, Sér. B*, (14) : 139–165. (Cité page 110.)

Abrahams A.D., Anthony J.P. et Wainwright J., 1995. Effects of vegetation change on interill runoff and erosion, Walnut Gulch, southern Arizona. *Geomorphology*, 13(1-4) : 37–48. (Cité page 87.)

Andrieu J. et Mering C., 2008. Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des Rivières-du-sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Geba (Guinée-Bissau). *Télédétection*, 8(2) : 93–118. (Cité page 82.)

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C. et Pontanier R., 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands. I. A view from the South. *Restoration Ecology*, 1 : 8–17. (Cité page 111.)

Asseline J., M'timet M., Pontanier R. et Cléry J., 1987. Une méthode de caractérisation en zone aride et semi-aride des états de surface élémentaires (1 m²) soumises à des averses contrôlées. *Gouttes et splash*, 4(1) : 13–18. (Cité page 87.)

Aubréville A., 1949. *Climat, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Société d'Éditions Géographiques Maritimes et Coloniales. Paris, 255 p. (Cité page 55.)

Auclair L., Chaize-Auclair M., Delaître E. et Sandron F., 1996. Dynamique sociale et désertification, le cas de Menzel Habib dans le sud tunisien. *in Actes du séminaire international « acquis scientifiques et perspectives pour un développement durable des zones arides »*. IRA, pp. 481–487. (Cité pages 66, 111 et 161.)

Avocat C., 1982. Approche du paysage. *Géocarrefour*, 57(4) : 333–342. (Cité page 79.)

Bachimond P., Dérioz P. et Laques A-E., juin 2004. Forme et paysage. *in Actes du Colloque Géopoint : La forme en Géographie*. Groupe Dupont, UMR ESPACE 6012 du CNRS. 3 p. (Cité page 79.)

Bagnold R.A., 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen. Londres, 265 p. (Cité pages 4, 12, 13 et 25.)

Ballais J-L., 1991a. évolution holocène de la Tunisie saharienne et présaharienne. *Méditerranée*, 74(4) : 31–38. (Cité pages 60 et 65.)

Ballais J-L., 1991b. Les terrasses historiques de Tunisie. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.*, 83 : 221–226. (Cité page 60.)

Balland P., Huet P. et Schlich R., 2001. Rapport sur les observatoires de l'environnement. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris. Disponible en ligne sur le site de *la documentation française*. (Cité page 74.)

Ballarò B., Florena A.M., Franco V., Tegolo D., Tripodo C. et Valenti C., 2008. An automated image analysis methodology for classifying megakaryocytes in chronic myeloproliferative disorders. *Medical Image Analysis*, 12 : 703–712. (Cité page 143.)

Belnap J. et 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*, 39(2) : 133–142. (Cité page 20.)

Benblidia N., Abdellaoui A., Guessoum A. et Bensaid A., 2006. Utilisation de la Morphologie Mathématique pour l'analyse de l'occupation de l'espace en zones urbaines et périurbaines présahariennes : cas de Laghouat (Algérie). *Télédétection*, 6(2) : 177–190. (Cité page 143.)

Bendali F., Floret C., Le Floc'h E. et Pontanier R., 1990. The dynamics of vegetation and sand mobility in arid regions of Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 18 : 21–32. (Cité page 100.)

Bensaïd A., Smahi Z., Iftene T. et Benzineh S., 2003. Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'aide à la surveillance du risque de dégradation des parcours steppiques. *Télédétection*, 3(5) : 387–402. (Cité page 83.)

Bernus E., 1984. Les causes de la désertification, les thèses en présence. *Bulletin de la société languedocienne de géographie*, (18) : 8 p. (Cité page 64.)

Bertrand G., 1978. Le paysage entre la Nature et la Société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 49(2) : 239–258. (Cité page 79.)

Bertrand G., 1984. Les géographes français et leurs paysages. *Annales de Géographie*, 93(516) : 218–229. (Cité page 55.)

Beuf S., Biju-Duval B., de Charpal O., Rognon P., Gariel O. et Bennacef A., 1971. *Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara. Sédimentation et discontinuités. Évolution structurale d'un craton*. Publ. Inst. fr. du Pétrole, Technip. Paris, 480 p. (Cité page 54.)

Bisson J., 2005. *Mythes et réalités d'un désert convoité. Le Sahara*. L'Harmattan. 480 p. (Cité page 2.)

Bisson J. et Callot Y., 1986. Des monts des Ksours au Grand Erg occidental. Adaptation ou disparition de la vie nomade ? *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, 41(1) : 357–377. (Cité page 58.)

Bisson J. et Callot Y., 1990. Les hommes et la sécheresse autour du Grand Erg occidental (nord-ouest du Sahara algérien). *Sécheresse*, 1(2) : 124–133. (Cité page 64.)

Bonvallot J., 1986. Tabias et jessour du sud tunisien. Agriculture dans les zones marginales et parade à l'érosion. *Cahiers de l'Orstom, série Pédologique*, 22(2) : 163–171. (Cité page 107.)

Bourke M.C et Goudie A.S., 2009. Varieties of barchan form in the Namib desert and on Mars. *Aeolian research*, 1 : 45–54. (Cité page 45.)

Bozou-Moussa I. et Dan Lamso N., 2004. Le « Tassa » : une technique de conservation des eaux et des sols bien adaptée aux conditions physiques et socio-économiques des glacis des régions semi-arides (Niger). *Revue de géographie alpine*, 92(1) : 61–70. (Cité page 89.)

Brossard T. et Wieber J-C., 1984. Le paysage : trois définitions, un mode d'analyse et de cartographie. *l'Espace Géographique*, 13(1) : 5–12. (Cité page 80.)

Brun A., 1987. étude palynologique des limons organiques du site de l'oued Akarit (sud tunisien). *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 24(1) :19–25. (Cité page 65.)

Brunet R., 1967. *Les phénomènes de discontinuité en géographie*. Centre de recherche et de Documentation cartographique. volume 7 de *Mémoires et documents du* Cnrs. Paris, 117 p. (Cité pages 73 et 255.)

Brunet R., Ferras R. et Théry H., éditeurs, 1993. *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique*. Reclus - La documentation française. 520 p. (Cité page 1.)

Bubenzer O. et Bolten A., 2008. The use of new elevation data (SRTM, ASTER) for the detection and morphometric quantification of pleistocene megadunes (draa) in the eastern Sahara and the southern Namib. *Geomorphology*, 102(2) : 221–231. (Cité page 133.)

Burel F. et Baudry J., 1999. *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Éditions Tec & Doc. Paris, 359 p. (Cité page 82.)

Buscombe D., Rubin D.M. et Warrick J.A., 2010. A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment. *Journal of Geophysical Research*, 115. Fo2015. (Cité page 112.)

Cailleux A. et Tricart J., 1956. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. *Annales de géographie*, 65(349) : 162–186. (Cité page 25.)

Callot Y., 1987. *Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas saharien au Grand Erg occidental : dynamique éolienne et paléolacs holocènes*. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (Sciences Naturelles), 412 p. (Cité pages 14, 22, 24 et 60.)

Callot Y., 1991. Histoire d'un massif de dunes : le Grand Erg occidental. *Sciences et changements planétaires - Sécheresse*, 2(1) : 26–39. (Cité pages 22 et 28.)

Callot Y., 2008. Formations éoliennes, *in* Dewolf Y. et Bourrié G., éditeurs, *Les formations superficielles*, pp. 293–317. Ellipses, Paris. 830 p. (Cité pages 11, 25, 26, 33, 50 et 92.)

Callot Y., Marticorena B. et Bergametti G., 2000. Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions : application to the Sahara desert. *Geodynamica Acta*, 13(5) : 245–270. (Cité pages 87, 241 et 250.)

Callot Y., Mering C. et Simonin A., 1994. Analysis of sand hills massif on high resolution images : an application to the Great Western Erg (Algeria). *International Journal of Remote Sensing*, 15(18) : 3799–3822. (Cité pages 137 et 143.)

Callot Y. et Oulehri T., 1996. Dynamique des sables éoliens dans le nord-ouest du saharien : relation entre aérologie et géomorphologie. *Geodinamica Acta*, 9 (1) : 1–12. (Cité pages 12, 14, 15, 161 et 293.)

Casenave A. et Valentin C., 1990. Les états de surface, une des clés de l'hydrologie sahélienne. *in The state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa*, Urbana. Ouagadougou, pp. 135–147. (Cité page 87.)

Casenave A. et Valentin C., 1992a. Infiltrations into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6) : 1667–1673. (Cité page 87.)

Casenave A. et Valentin C., 1992b. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130(1-4) : 231–249. (Cité page 87.)

Casson B., Delacourt C. et Allemand P., 2005. Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface - Application to the La Clapière landslide (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(1) : 425–437. (Cité page 120.)

Chesnay M., 1998. Évaluation de la croissance urbaine du Caire par télédétection. *Revue de Géographie de Lyon*, 73(3) : 259–266. (Cité page 83.)

Chudeau R., 1920. étude sur les dunes sahariennes. *Annales de Géographie*, 29 (161) : 334–351. (Cité pages 25, 54 et 88.)

Clos-Arceduc A., 1969. *Essai d'explication des formes dunaires sahariennes*. IGN. 66 p. (Cité page 23.)

Combeau A., 1977. Erosion et conservation des sols (plus particulièrement en zone tropicale). Orstom. (Cité page 18.)

Conroy G. C., Anemone R. L., Van Regenmorter J. et Addison A., 2008. Google Earth©, GIS and the Great Divide : a new and simple method for sharing paleontological data. *Journal of Human Evolution*, 55 : 751–755. (Cité page 126.)

Cook R.U., Warren A. et Goodie A.S., 1993. *Desert Geomorphology*. UCL Press, Londres. 526 p. (Cité page 25.)

Coque R., 1962. *La Tunisie pré-saharienne, étude géomorphologique*. Armand Colin. Paris, Thèse de doctorat d'État, 488 p. (Cité pages 27, 60, 65, 88, 90, 93 et 107.)

Coursin A., 1964. Observations et expériences faites en avril et mai 1956 sur les barkhanes du Souhel el Abiodh (région de Port-Étienne. *Bulletin de l'Institut Français d'Afrique Noire*, 26 A(3) : 989–1022. (Cité pages 32, 35 et 253.)

Debaine F., Mering C. et Poncet Y., 1988. Traitements d'image spatiale appliqués à la recherche archéologique : mise en évidence de réseaux en Inde du Nord. *Cahiers des Sciences Humaines*, 24(3) : 417–426. (Cité page 143.)

Debierre F., 1931. Dunes de la tunisie. *Le chêne, S^té forestière*, (34) : 40–46. (Cité page 65.)

Delacourt C., Allemand P., Jaud M., Grandjean P., Deschamp A., Ammann J. et Cuq V., 2009. Drelio : An unmanned helicopter for imaging coastal areas. *Journal of Coastal Research*, 56 : 1489–1493. (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, Lisbon, Portugal). (Cité page 120.)

Delaître É., Ben Hafsia I. et D'Herbès J-M., 2007. Des structures végétales tigrées en zone aride méditerranéenne. *Bois et forêts des tropiques*, 293(3) : 43–47. (Cité page 124.)

Dibi N'Da H., Kouakou N'Guessan E., Egnankou Wadja M. et Affian K., 2008. Apport de la télédétection au suivi de la déforestation dans le parc national de la Marahoué (Côte-d'Ivoire). *Télédétection*, 8(1) : 17–34. (Cité page 83.)

Dougill A-J. et Thomas A-D., 2002. Nebkhas dunes in the Molopo basin, South Africa and Botswana : formation controls and their validity as indicators of soil degradation. *Journal of Arid Environments*, 50 : 413–428. (Cité page 100.)

Dérioz P. et Laques A-E., Janvier 2004. Évaluation paysagère et diagnostic de territoire : de l'évaluation du paysage à l'évaluation par le paysage. *in Acte du colloque : l'évaluation du paysage, une utopie nécessaire ?* UMR 5045-CNRS, Publications de l'Université Paul Valéry, Montpellier, pp. 447–464. (Cité page 80.)

Drouot J-L., 1994. Application de la Morphologie Mathématique à la cartographie dunaire Grand Erg occidentale à partir d'une image Spot panchromatique. Mémoire de Master, Université François Rabelais de Tours, Sous la direction de Y. Callot. 133 p. (Cité page 138.)

Dubief J., 1952. Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Trav. Inst. Rech. Sahara*, 8 : 123–162. (Cité page 68.)

Ducrot D., 2005. *Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images multi-sources. Extraction de caractéristiques du paysage.* Inp Toulouse (HDR), 240 p. (Cité page 82.)

Elbelrhiti H., 2005. *Morphodynamique des barkhanes. Étude des dunes du sud-ouest marocain*. Thèse de Doctorat, Université Paris 7 Denis Diderot (Géophysique), 160 p. (Cité pages 29, 32 et 36.)

Elbelrhiti H., Andreotti B. et Claudin P., 2008. Barchan dune corridors : field characterization and investigation of control parameters. *Journal of Geophysical Research*, 113(F2) :21 p. (Cité page 33.)

Escadafal R., 1989. *Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Exemple de la région de Tataouine, (Tunisie)*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (Sciences de la Terre), 317 p. (Cité pages 87, 112, 146, 148 et 250.)

Escadafal R., 2007. La surface des sols des régions arides : lien entre l'écologie de terrain et la télédétection. *in* Cornet A. et Hamrouni H., éditeurs, *Territoires et aridité au nord et au sud du Sahara : la lutte contre la dégradation des terres, bilan des acquis et nouvelles perspectives de recherche*. Tunis, pp. 56–70. (Cité page 87.)

Escadafal R. et Mtimet A., 1981. Apports de la télédétection spatiale à la cartographie des ressources en sol de la région de medenine. Ministère de l'agriculture, Division des ressources en eau et en sols, Tunis. 40 p. (Cité pages 107 et 150.)

Faran Maiga O., 2004. L'érosion éolienne dans le Zarmaganda. *Revue de géographie alpine*, 92(1) : 71–82. (Cité page 60.)

Fécan F., Marticorena B et Bergametti G, 1999. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Ann. Geophysiciae*, 17 : 149–157. (Cité page 11.)

Fehri N., 2003. *Les rapports entre les processus morphogéniques et les pratiques agro-pastorales dans la plaine oléicole de Sfax : exemple du bassin versant de l'oued Chaâl Tarfaoui (Tunisie centro orientale*. Thèse de Doctorat, université de Provence Aix–Marseille 1 (Géographie Physique), 338 p. (Cité page 182.)

Fethoui M., 2011. *Évaluer et suivre la désertification en zones arides tunisiennes pour accompagner l'aide à la décision : dynamiques interactives « Climat-Homme-Espace-Ressources naturelles » via les paysages*. Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry Montpellier 3 (Géographie), 441 p. (Cité pages 71, 81 et 255.)

Floret C., Le Floc'h E. et Pontanier R., 1986. La désertisation en Tunisie présaharienne. *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, 41(1) : 291–326. (Cité pages 65 et 66.)

Floret Ch. et Pontanier R., 1982. *L'aridité en Tunisie pré-saharienne, climat, sols, végétation et aménagements*. Orstom. Paris, 552 p. (Cité pages 58, 64 et 66.)

Fryberger S.G., 1979. Dune forms and wind regime. *United States Geological Survey Professional Paper*, 1052 : 137–169. (Cité pages 11, 13, 34, 118, 253 et 293.)

Gautier E-F., 1916. Le Chott Tigri. *Annales de Géographie*, 25(135) : 181–189. (Cité page 88.)

Genin D., Guillaume H., Ouessar M., Ouled Belgacem A., Romagny B., Sghaier M. et Taâmallah H., éditeurs, 2006. *Entre désertification et développement, la Jeffara tunisienne*. IRD-CERES-IRA. 351 p. (Cité pages 2, 59 et 66.)

Ghram-Messedi A. et Delaître É., 2007. Les états de surface en zone aride à partir d'indices radiométriques et de classifications multitemporelles d'images Landsat TM prises sur la région de Menzel Habib, (Tunisie méridionale). *Sécheresse*, 18(4) : 305–313. (Cité page 111.)

Girard M-C. et Girard C-M., 1999. *Traitement des données de télédétection*. Dunod. Paris, 529 p. (Cité page 84.)

Glantz M. H. et Orlovski N., 1983. Desertification : a review of the concept. *Desertification Control Bulletin*, (9) : 15–22. (Cité page 57.)

Godard A. et André M-F., 1999. *Les milieux polaires*. Armand Colin, collection U. Paris, 453 p. (Cité page 68.)

Gonzalez J., Galindo C., Arevaldo V. et Ambrosio G., 2007. Applying image analysis and probalistic techniques for counting olive trees in high-resolution satellite images. *in ACIVS 2007*, pp. 920–931. (Cité page 193.)

Goossens D., Offer Z. et London G., 2000. Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps. *Geomorphology*, 35(3-4) : 233–252. (Cité page 34.)

Graham D.J., A-J. Rollet, Piégay H. et Rice S.P., 2010. Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. *Water Resources Research*, 46. W02508. (Cité page 113.)

Graham D.J., Reid I. et Rice S.P., 2005. Automated sizing of coarse-grained sediments : image-processing procedures. *Mathematical Geology*, 37(1) : 1–28. (Cité page 113.)

Gunnell Y., 2009. *Écologie et société*. Armand Colin, collection U. Paris, 480 p. (Cité page 55.)

Haase P., 1995. Spatial Pattern Analysis in Ecology Based on Ripley's K-Function : Introduction and Methods of Edge Correction. *Journal of Vegetation Science*, 6(4) : 575–582. (Cité page 149.)

Hesp P.A. et Hastings K., 1998. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans. *Geomorphology*, 22 : 193–204. (Cité pages 42 et 45.)

Hoang K-H., Bernier M. et Villeneuve J-P., 2008. Les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Câu (Viêt-nam). essai sur une approche diachronique. *Télédétection*, 8(4) : 227–236. (Cité page 83.)

Hupy J.P., 2004. Influence of vegetation cover and crust typt on wind-blown sediment in a semi-arid climate. *Journal of Arid Environments*, 58 : 167–179. (Cité page 70.)

Jacome A., Puech C., Raclot D., Bailly J-S. et Roux B., 2007. Modèle Numérique de Terrain issu de photographies par drone sur badlands. Actes du Séminaire : Rencontres internationales Géomatique et Territoires, 18 p. (Cité page 145.)

Janeau J-L. et Esparza Villareal R., 1992. Cartographie des états de surface d'une toposéquence représentative du bassin versant de san ignacio. *in Actes du séminaire Mapimi*. Institut d'écologie de Xalapa, pp. 161–176. (Cité page 87.)

Jauffret S., 2001. *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides : application au suivi de la désertification dans le sud tunisien*. Thèse de Doctorat, Université de Droit, d'Économie et des Sciences Aix-Marseille 3 (Écologie), 329 p. (Cité pages 55, 86, 112 et 131.)

Kanaa T.F., Tonyé E., Mercier G. et Onana V., 2004. Détection des nappes d'hydrocarbures dans les images RSO par Morphologie Mathématique. *Télédétection*, 4(3) : 215–229. (Cité page 143.)

Kardous M., 2005. *Quantification de l'érosion éolienne dans les zones arides tunisiennes : approche expérimentale et modélisation*. Thèse de Doctorat, Université Paris 12 – Val-de-Marne (Sciences), 298 p. (Cité pages 20, 92, 107, 112, 118, 163, 167, 180 et 250.)

Kassas M., 1995. Desertification : a general review. *Journal of Arid Environments*, 30(2) : 115–128. (Cité page 56.)

Khatelli H., 1996. *Érosion éolienne en Tunisie aride et désertique. Analyse des processus et recherche des moyens de lutte*. Thèse de Doctorat, Université de Gand, Faculté de Sciences biologiques appliquées : Aménagement des Terres et des Forêts, 179 p. (Cité pages 27, 60, 68, 88, 107, 122, 161 et 176.)

Kombé T. et Assako Assako R-J., 2007. Morphologie Mathématique appliquée aux images RSO pour la différentiation des tissus urbains : cas de la ville de Douala (Cameroun). *Télédétection*, 7(1-2-3-4) : 251–270. (Cité page 143.)

Koné M., Aman A., Adou Yao C., Coulibaly L. et K. N'Guessan, 2007. Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Télédétection*, 7(1-4) : 433–446. (Cité page 83.)

Laben C. A. et Brower B. V., 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. US Patent. N° 6011875. (Cité page 131.)

Labiadh M., 2011. *Quantification de l'érosion éolienne sur des surfaces anthropisées : simulation des flux de masse à l'échelle des zones arides tunisiennes*. Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot Paris 7 (Sciences), 202 p. (Cité pages 107, 117, 250 et 255.)

Lancaster N., 1982. Dunes on Skeleton Coast, Namibia (South West Africa : Geomorphology and grain size relationships. *Earth surface processes and landforms*, (7) : 575–587. (Cité page 34.)

Landon N. et Piégay H., 1999. Mise en évidence de l'ajustement d'un lit fluvial à partir de documents d'archives : le cas de la haute Drôme. *Revue de géographie alpine*, 87(3) : 67–86. (Cité page 55.)

Langford R.P., 2000. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 46(1) : 25–41. (Cité pages 89 et 91.)

Laques A-E., 2009. *Paysage, image et observatoires. Lire et diagnostiquer les territoires amazoniens*. Université d'Avignon et des pays du Vaucluse (HDR), Volume 3, 274 p. (Cité pages 5, 86, 101, 185 et 207.)

Le Floc'h E., Neffati M., Chaïeb M. et Pontanier R., 1995. Un essai de réhabilitation en zones arides. La cas de Menzel Habib (Tunisie), *in* Pontanier R., M'Hiri A., Akrimi N., Aronson J. et Le Floc'h E., éditeurs, *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ?*, pp. 139–160. Orstom & John Libbey Eurotext, Paris. 480 p. (Cité page 111.)

Lejot J., juin 2008. *Suivi des formes fluviales par télédétection à très haute résolution. Application aux programmes de restauration de la basse vallée de l'Ain et du Haut-Rhône (Chautagne)*. Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2 (Géographie), 257 p. (Cité pages 144 et 145.)

Lejot J., Delacourt C., Piégay H., Fournier T., Trémélo M-L. et Allemand P., 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled plateform. *Earth Surface Processes and Landforms*, (32) : 1705–1725. (Cité page 122.)

Lelong F., Roose E., Darthout R., Trevisan D., Boudjemline D., Boureghda S. et Raheliarisoa M.A., 1993. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. expérimentation au champ sous pluies simulées. *Sciences du sol*, 31 (4) : 251–279. (Cité page 88.)

Lettau K. et Lettau H., 1969. Bulk transport of sand by barchans of Pampa de la Joya in southern Peru. *Z. Geomorphology N.F.*, 13 : 182–195. (Cité page 13.)

Levy E.B. et Madden E.A., 1933. The point method of positive analysis. *New Zealand J. Agric.*, 46 : 267–279. (Cité page 112.)

Lisle R. J., 2006. Google Earth© : a new geological ressource. *Geology today*, 22 : 29–32. (Cité page 126.)

Loireau M., Laques A-E., Dérioz P., Callot Y., Delaître E., Dessay N., Fargette M., Fethoui M., Mitja D., Neyra M., Sghaier M., Venard C. et Wilson-Junior G., avril 2009. Observatoires environnementaux pour le développement et rôle du paysage. *in Actes du Colloque International : Sociétés en transition et développement local en zones difficiles « DELZOD »*. Institut des Régions Arides. 21 p. (Cité pages 59, 74, 77 et 83.)

Mabbutt J.A. et Floret C., éditeurs, 1983. *Étude de cas sur la désertification*. UNESCO. Paris. (Cité pages 110, 237 et 239.)

Mainguet M., 1983. Dunes vives, dunes fixées, dunes vêtues : une classification selon le bilan d'alimentation, le régime éolien et la dynamique des édifices sableux. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd*, 45 : 265–286. (Cité page 24.)

Mainguet M., 1995. *L'homme et la sécheresse*. Masson. Paris, 335 p. (Cité pages 2, 57, 65 et 182.)

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*. Mémoires et documents du CNRS. volume 18. Paris, 184 p. (Cité page 25.)

Mainguet M., Dumay F., Lemine Ould El Hacen M. et Maefoudh A., 2001. Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne. *Télédétection*, 2(2) : 129–136. (Cité page 31.)

Mainguet M. et Jacqueminet C., 1984. Le grand erg occidental et le grand erg oriental. classification des dunes, balance sédimentaire et dynamique d'ensemble. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 56(90) : 29–48. (Cité page 24.)

Mama V-J. et Oloukoi J., 2003. Évaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection*, 3(5) : 429–441. (Cité page 83.)

Marticorena B., 1995. *Modélisation de la production d'aérosols désertiques en régions arides et semi-arides : développement et validation d'un code de calcul adapté au transport à grande échelle*. Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot Paris 7 (Sciences), 268 p. (Cité pages 16, 229 et 240.)

Marticorena B. et Bergametti G., 1995. Modeling the atmospheric dust cycle : 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research*, 100(D8) : 16415–16430. (Cité page 19.)

Marticorena B., Chazette P., Bergametti G., Dulac F. et Legrand M., 2004. Mapping the aerodynamic roughness length of desert surfaces from the POLDER/ADEOS bi-directional reflectance product. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3) : 603–626. (Cité pages 19 et 250.)

Marticorena B., Kardous M., G. Bergametti, Callot Y., Chazette P., Khatelli H., Le Hégarat-Mascle S., Maille M., Rajot J-L., Vidal-Madjar D. et Zribi M., 2006. Surface and aerodynamic roughness in arid and semiarid areas and their relation to radar backscatter coefficient. *Journal of Geophysical Research*, 111 : 23 p. (Cité pages 19 et 146.)

Mering C., 1991. Quelques remarques à propos du transfert d'échelle lors de l'interprétation des images de télédétection. *in Séminfor4, le changement d'échelle*. Orstom, Coll. Colloques et Séminaires. 35 p. (Cité page 137.)

Mering C., 1998. *Images satellitaires et analyse spatiale*. Université Denis Diderot Paris 7 (HDR), Volume 1, 689 p. (Cité pages 138 et 250.)

Meur-Férec C. et Ruz M-H., 2002. Transport éolien réel et théorique en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, (2) : 321–334. (Cité page 49.)

Mihai B., Savulescu I., Sandric I. et Oprea R., 2006. Application de la détection des changements à l'étude de la dynamique de la végétation des Monts de Bucegi (Carpates méridionales, Roumanie). *Télédétection*, 6(3) : 215–231. (Cité page 83.)

Monod T., 1928. Une traversé de la Mauritanie occidentale. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, p. 45 p. (Cité pages 88 et 90.)

Nguer M. et Rognon P., 1989. Homogénéité des caractères sédimentologiques des sables ogoliens entre Nouakchott (Mauritanie) et Mbour (Sénégal). *Géodynamique*, 4(2) : 119–133. (Cité page 60.)

Nield J.M. et Baas A.C.W., 2008. Investigating parabolic and nebkhas dunes formation using a cellulat automaton modelling approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(5) : 724–740. (Cité pages 31 et 91.)

Okin G.S., Gilette D.A. et Herrick J.E., 2006. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 65(2) : 253–275. (Cité page 17.)

Oloukoi J., Mama V-J. et Agbo F-B., 2006. Modélisation de la dynamique d'occupation des terres dans le département des Collines au Bénin. *Télédétection*, 6(4) : 305–323. (Cité page 83.)

Oswald J., Kouacouatta J-M., Kergomard C. et Robin M., 2007. Représenter l'espace pour représenter le temps : approche des dynamiques de changement forestiers dans le sud-est de la Côte-d'Ivoire par télédétection. *Télédétection*, 7 (1-4) : 271–282. (Cité page 83.)

Ouerchefani D., 2012. *Caractérisation et suivi des états de surface éolisés en Tunisie pré-saharienne : approches stationnelle et spatiale*. Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2 (Géographie) et Université de Tunis El Manar (Sciences géologiques), 314 p + annexes. (Cité pages 85, 100, 110, 112, 176, 183, 241, 246 et 255.)

Ouled Belgacem A., Taamalah H., Ouessar M., Boukchina R., Daou H. et Ouerchefani D., 2006. Rapport scientifique du thème : surveillance biophysique dans l'observatoire de Menzel Habib, Tunisie. ROSELT et IRA. 80 p. (Cité page 111.)

Oulehri T., 1992. *Étude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la province de Laayoune*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (Sédimentologie), 223 p. (Cité pages 12, 25, 27, 29, 31, 32, 33, 39, 43 et 47.)

Ozer P., 1996. évolution des directions et des vitesses des vents de 1951 à 1994 sur la façade atlantique de l'afrique de l'ouest du sud du Sénégal au nord de la Mauritanie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 9 : 479–486. (Cité page 47.)

Pelletier J. D., 2009. Controls on the height and spacing of eolian ripples and transverse dunes : a numerical modeling investigation. *Geomorphology*, 105 (3-4) : 322–333. (Cité page 29.)

Pham T., Bonn F. et Dubois J-M., 2007. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution spatiale : application à une région littorale au Viêt-nam. *Télédétection*, 7(1-4) : 303–323. (Cité page 83.)

Picard N. et Bar-Hen A., 2002. La corrélation spatiale entre la surface terrière des arbres et leur accroissement est-elle un bon indicateur de la compétition ? *Annals of forest science*, 59(1) : 41–51. (Cité page 149.)

Pierre C., 2010. *Variabilité interannuelle des émissions d'aérosols minéraux en zone semi-aride sahélienne*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (Sciences), 215 p. (Cité pages 19 et 258.)

Puech C., 1994. Thresholds of homogeneity in targets in the landscape. relationship with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 15(12) : 2421–2435. (Cité pages 82, 216, 248 et 255.)

R Development Core Team, 2011. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL `http://www.R-project.org/`. (Cité page 149.)

Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asseline J. et Bailly J-S., 2005. Photographies aériennes prises par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 1 : 7–20. (Cité page 122.)

Redelsperger J-L., Diedhiou A., Flamant C., Janicot S., Lafore J-P., Lebel T., Polcher J., Bourles B., Caniaux G., De Rosnay P., Desbois M., Eymard L., Fontaine B., Geneau I., Ginoux K., Hoepffner M., Kane C., Law K., Mari C., Marticorena B., Mougin E., Pelon J., Peugeot C., Protat A., Roux F., Sultan B. et Van Den Akker E., 2006. Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie*, (54) : 22–32. (Cité page 74.)

Rhodes S., 1991. Rethinking desertification : What do we know and what have we learned ? *World Development*, 19(9) : 1137–1143. (Cité page 57.)

Richard J-F., 1989. *Le paysage : un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux*. Thèse de Doctorat d'État, 279 p. (Cité page 79.)

Rieke-Zapp D., Wegmann H., Nearing M. et Santel F., 2001. Digital photogrammetry for measuring soil surface roughness. Aspрs Annual Convention, S^{t} Louis, 8 p. (Cité page 145.)

Rognon P., 1994. *Biographie d'un désert*. L'Harmattan. Paris, 347 p. (Cité pages 1 et 60.)

Roose E., 1996. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants de montagne. *Bulletin du réseau érosion, Orstom*, (16) : 87–97. (Cité page 87.)

Roquet D., 2008. Partir pour mieux durer : la migration comme réponse à la sécheresse au Sénégal ? *Espace populations sociétés*, 2008(1). 19 p. (Cité page 100.)

Roselt/Oss , 2004. Document scientifique n°2. Roselt/Oss, Montpellier. 54 p. (Cité page 75.)

Sauermann G., Andrade Jr. J.S., Maia L.P., Costa U.M.S., Araújo A.D. et Herrmann H.J., 2003. Wind velocity and sand transport on a barchan dune. *Geomorphology*, 54 : 245–255. (Cité page 49.)

Sauermann G., Rognon P., Poliakov A. et Herrmann H.J., 2000. The shape of the barchan dunes of southern Morocco. *Geomorphology*, 36 : 47–62. (Cité pages 42 et 45.)

Serra J., 1982. *Image analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press. Londres, 600 p. (Cité page 138.)

Sghaier M., Fétoui M. et Tbib A., 2007. Contribution à l'analyse des systèmes « populations–exploitations des ressources naturelles » dans l'observatoire de Menzel Habib (sud-est tunisien. *Sécheresse*, 18(4) : 321–327. (Cité page 111.)

Shengli W., Li J., Sujiang C., Qi L. et Feng L., Z. andXia, 2009. The shape character and development stages of nebkhas. *High technology letter*, 15(4) : 440–445. (Cité page 88.)

Stoyan D. et Stoyan H., 1994. *Fractals, Random Shapes and Point Fields. Methods of Geometrical Statistics*. John Wiley & Sons. volume XIV. 389 p. (Cité page 149.)

Sultan B., Labadi K., Guégan J-F. et Janicot S., 2005. Climate Drives the Meningitis Epidemics Onset in West Africa. *Plos Medicine*, 2(1) : 43–49. (Cité page 258.)

Taïbi A-N. et El Hannani M., 2004. Identification et suivi des processus de la dégradation du milieu dans le bassin de l'oued Dadès (Maroc) par télédétection satellitaire et aérienne. *Télédétection*, 4(2) : 63–73. (Cité page 83.)

Tengberg A., 1995. Nebkhas dunes as indicator of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, 30 (3) : 265–282. (Cité pages 91 et 100.)

Thesiger W., 1978. *Le désert des déserts*. Terre Humaine, Plon. 464 p. (Cité page 79.)

Thomas D.S.G., éditeur, 1997. *Arid Zone Geomorphology*. Wiley. 2nd édition, 732 p. (Cité page 3.)

Tokinaga H. et Xie S-P., 2011. Weakening of the equatorial Atlantic cold tongue over the past six decades. *Nature Geoscience*. (Cité page 47.)

Tricart J., 1968. Milieu physique et charge de population. *Annales de Géographie*, 77(424) : 663–686. (Cité page 58.)

Tricart J. et Cailleux A., 1969. *Le modelé des régions sèches. Traité de Géomorphologie*. SEDES. Paris, 472 p. (Cité pages 1, 68, 89, 90 et 254.)

Tsoar H., 1974. Desert dunes morphology and dynamics, Alarish. *Z. Geomorph (Suppl.)*, 20 : 41–61. (Cité page 34.)

Vecchi G.A., Soden B.J., Wittenberg A.T., Held I.M., Leetmaa H. et Harrison M.J., 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441 : 73–76. (Cité page 47.)

Venard C., 2007. Essai de caractérisation et de typologie des petites formes éoliennes et des états de surface dans la région de Bamba, nord-Mali. Mémoire de Master, Université Lumière Lyon 2, Faculté GHHAT, sous la direction de Y. Callot et É. Delaître, 104 p. (Cité pages 58, 182 et 193.)

Venard C., 2008. L'ensablement des olievraies en Tunisie présaharienne. Approches multi-scalaires comparées. Mémoire de Master, Université Lumière Lyon 2, sous la direction de Y. Callot et É. Delaître. 112 p. (Cité pages 150 et 246.)

Venard C., Delaître É., Callot Y., Ouessar M. et Ouerchefani D., 2010. Exploitation d'images satellitales à très haute résolution spatiale fournies par Google Earth©. Exemple d'application à l'étude de l'ensablement des oliveraies en Tunisie. *Télédétection*, 9(1) : 59–71. (Cité pages 37, 126 et 193.)

Venard C., Delaître É., Mering C. et Callot Y., 2009. Using *Mathematical Morphology* methods in order to define landscape indicators from VHR images. *in Proceedings of the 10th European Congress of ISS on Stereology and Image Analysis*. Société internationale de stéréologie (ISS), Milan. (Cité pages 183, 193 et 257.)

Vogt P., Riiters K.H., Iwanowski M., Estreguil C., Kozak J. et Soille P., 2007. Mapping landscape corridors. *Ecological indicators*, 7 : 481–488. (Cité page 143.)

Zhen-Ting W., Shi-Chen T., Yao-Wen X. et Guang-Hui D., 2007. Barchans of Minqin : morphometry. *Geomorphology*, 89 : 405–411. (Cité pages 28 et 45.)

Liste des figures

1.1 Les forces agissant sur les particules du sol. D'après Marticorena (1995) . . . 11
1.2 Rose des déplacements potentiels sableux (1994-2005) à Kebili, Tunisie. Données du CEPMT . . . 15
1.3 Les effets de la végétation sur la dynamique éolienne, d'après Okin *et al.* (2006) . . . 17
1.4 Deux états de *Cyperus* et la dynamique éolienne associée. Bamba, nord-Mali . . . 18
1.5 Gradient de densité de végétation. Bamba, nord-Mali . . . 19
1.6 Les vitesses-seuil en fonction de la nature des sols et de leur couverture et en l'absence de perturbations, d'après Belnap et Gilette (1998) . . . 20
1.7 Mécanisme du vannage éolien, d'après Callot (2008) . . . 21
1.8 Effets du vannage éolien avec, à gauche, une croûte striée par la corrasion. Secteur de Bamba, nord-Mali . . . 21
1.9 Structure du Grand Erg occidental, d'après Callot (2008) . . . 22
1.10 Coupe montrant la disposition des formes éoliennes dunaires et non-dunaires au centre du Grand Erg occidental entre l'oued Namous et l'oued Rharbi . . . 23
1.11 Fonctionnement d'une oscillation stationnaire et conséquences érosives. D'après Clos-Arceduc (1969) . . . 23
1.12 Système crêtes-couloirs sur le plateau du Djado, Niger. Extrait *Google Earth* d'une image SPOT5 de 2010 . . . 26
1.13 Tentative de schématisation du lien entre transport et action morphologique du vent . . . 27
1.14 Vue en plan d'une barkhane et délimitation des secteurs selon le comportement du sable, d'après Oulehri (1992) . . . 28
1.15 Nebkas à flèche, secteur de Bamba, nord-Mali. Hauteur des buissons : 30 cm . . . 29
1.16 Nebkas à flèche géantes, secteur de Douch, Égypte. Capture d'écran *Google Earth* d'une image *QuickBird* de mars 2003 . . . 30
1.17 Face sous le vent d'un cordon dunaire (orienté O-E) strié de rides correspondant à 3 jours de vent d'est ; hauteur du cordon : 1,8 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali . . . 30
1.18 L'axe de déplacement de la barkhane . . . 31

1.19 Formes éoliennes en fonction des volumes de sable déplacés. D'après Callot et Oulehri (1996) 31
1.20 Coupe sagittale et paramètres morphométriques d'une barkhane, d'après Oulehri (1992) 32
1.21 Coupe latérale d'une barkhane se déplaçant 33
1.22 Localisation de la zone de travail et tentative de schématisation de la morphodynamique éolienne locale 35
1.23 Valeurs de déplacements en fonction de la hauteur des barkhanes de Boulanouar entre 1996 (2000) et 2009 (2003). En rouge, la courbe déterminée par Coursin (1964) 39
1.24 Part (relative aux données initiales) des valeurs conservées pour l'analyse. $Y_0 = 30$ 40
1.25 Résumé statistique des données de vent de la station de Nouadhibou 41
1.26 Schématisation du rapport R à partir de l'exemple de la dune Coursin. Cliché : Y. Callot (1996) 42
1.27 Variations des déplacements potentiels sableux à Nouadhibou (1985-2005) 44
1.28 Le mur construit par l'équipe de Coursin en 1956. Capture d'écran *Google Earth* d'une image *QuickBird* de déc. 2003 45
1.29 Précision de l'approche couplant *Google Earth* et LANDSAT. Capture d'écran *Google Earth* d'une image *QuickBird* de décembre 2003 46
1.30 Évolution de MR et CM à Laâyoune entre 1980 et 1989. D'après Oulehri (1992) 47
1.31 Évolution de MR et CM à Nouadhibou entre 1985 et 2005 48
1.32 Approche conceptuelle des déplacements sableux en régions désertiques à vent uni-directionnel 50

2.1 Carte postale photographique illustrant la dégradation des versants à Romeyer (Drôme) au début du XX^{e} s. Droits réservés, aimablement fournie par J-P. Bravard 56
2.2 Deux effets opposés de la dynamique éolienne pour deux arbres du même secteur. Bamba, nord-Mali 59
2.3 L'extension spatiale maximale et minimale du Sahara depuis 20 000 ans, d'après Rognon (1994) 61
2.4 Les alignements de cordons dunaires hérités de l'erg ogolien dans la région de Bamba, nord-Mali 62
2.5 La classification des terres en Afrique suivant un gradient climatique 63
2.6 Limite de terres collectives tracée au soc. Menzel Habib, Tunisie 66
2.7 Olivier planté dans un trou creusé dans la steppe. Dar Dhaoui, Tunisie 67
2.8 Fréquences des vitesses de vents enregistrées par deux stations de la Tunisie pré-saharienne 69
2.9 Racines d'olivier déchaussées par l'érosion éolienne. Ghrabet, Tunisie 70

2.10 Oliviers dégagés à la pelle mécanique, secteur de Zarzis, Tunisie. Cliché : Éric Delaître (2008) 71
2.11 La situation politique des pays de la ceinture septentrionale du Sahara en février 2011 72
2.12 Le jeu des échelles convoquées dans les phénomènes de désertification 73
2.13 La répartition des observatoires-pilotes de ROSELT, d'après Roselt/Oss (2004) 76
2.14 Schéma conceptuel de l'étude des changements environnementaux dans la méthodologie ROSELT, *in* Roselt/Oss (2004) 76
2.15 Le système paysager, propositions de l'école de Besançon. Schéma conceptuel de P. Dérioz, d'après Brossard et Wieber (1984) 79
2.16 Évolution (en pointillés) d'une dynamique d'un milieu en cours de désertification suivie par télédétection à moyenne résolution . 84
2.17 Exemple d'une surface de région sèche. Photographie aérienne prise par le paramoteur *Pixy*. Oglet Merteba, Tunisie. Cliché : É. Delaître (2008) 85
2.18 Photographie aérienne prise par le paramoteur *Pixy* d'une surface de région sèche non désertique. Oglet Merteba, Tunisie présaharienne. Cliché : Delaître, 2008 89
2.19 Une forme éolienne d'obstacle typique, la nebka isolée simple (ici sous *Stipagrostis pungens*). L'ellipse rouge correspond à celui de la figure 2.18. Cliché : É. Delaître (2008) 89
2.20 Processus de formation et d'évolution d'une nebka dans un contexte d'obstacle isolé 91
2.21 Coupe d'un obstacle topographique perpendiculaire à la direction des vents et deux types de disposition des placages. D'après Callot (2008), modifié 93
2.22 Une nebka isolée simple. Secteur de Ras Elkamen Labiadh, Tunisie 93
2.23 Banc de nebkas de hauteur 30 cm env. Secteur de Bamba, nord-Mali 94
2.24 Un système de nebkas. Largeur : 1 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali 94
2.25 Komo, ou *coppice dune*, du secteur de Bamba, nord-Mali 95
2.26 Diversité des FEO dans les oliveraies du sud tunisien 96
2.27 Nebka (sous *Hammada scoparia*) indurée et reprise par l'érosion éolienne, Menzel Habib, Tunisie 97
2.28 Terriers creusés dans un komo en partie induré. Hauteur : 1 m env. Secteur de Bamba, nord-Mali 97
2.29 Un komo dévégétalisé et induré. Secteur de Bamba, nord-Mali . 98

3.1 La Tunisie pré-saharienne, d'après la carte de Le Houérou, *in* Floret et Pontanier (1982) 105
3.2 Les sites de travail. Extrait correspondant au cadre de la fig. 3.1 . 106
3.3 Usages des ressources dans le secteur de Rass Elkamen Labiadh 108
3.4 La mophodynamique éolienne dans le secteur de Dar Dhaoui . . 109

3.5 Bâtiments et parcelles (délimitées en pointillés) de l'ancien périmètre irrigué de Oglet Merteba, aujourd'hui très ensablé. Extrait *Google Earth* d'une image *QuickBird* de juin 2003 110
3.6 Dispositif mis au point par Escadafal pour obtenir des images nadirales d'EDS. D'après Escadafal (1989) 113
3.7 Acquisition des photographies d'échantillon d'EDS 114
3.8 Exemple d'échantillon photographique d'EDS 115
3.9 Comparaison des données de l'IRA et des données du LISA pour le site de Dar Dhaoui 118
3.10 Comparaison des roses de déplacements potentiels calculées à partir des données de vent relevées entre le 16 mars et le 30 mai 2008 à Dar Dhaoui. En rouge, la résultante des déplacements potentiels 119
3.11 Le paramoteur *Pixy* 121
3.12 Répartition des vitesses moyennes de vent pour le secteur de Dar Dhaoui au cours de la journée (2008-2009) 123
3.13 Le site d'Oglet Merteba, mosaïque d'images capturées par le *Pixy*. Clichés : Delaître (2008) 125
3.14 Col, à Rass Elkamen Labiadh, où des barkhanes peuvent se former. Extrait *Google Earth* d'une image *QuickBird* de septembre 2006 126
3.15 Résultat de l'extraction d'images *Google Earth*, d'après la méthode de Venard *et al.* (2010). Exemple du site de Rass Elkamen Labiadh 128
3.16 Utilisation des images extraites de *Google Earth* pour le géoréférencement des images du *Pixy*. Exemple pour le site d'Oglet Merteba 129
3.17 L'emboîtement des échelles lié à la résolution des images dans le site de Dar Dhaoui 132
3.18 Comparaison entre les courbes de niveaux extraites depuis le MNE et les objets géomorphologiques visibles sur l'image *QuickBird* de Rass Elkamen Labiadh 135
3.19 Image multi–spectrale et image binaire de l'objet d'intérêt utilisé pour illustrer les outils de la MM. Extrait d'une photographie aérienne du *Pixy* à Dar Dhaoui 139
3.20 Exemple de transformations en Morphologie Mathématique, avec un ES circulaire, appliquées à la figure 3.19(b) 140
3.21 La reconstruction en Morphologie Mathématique appliquée au nettoyage d'une image 141
3.22 Représentation schématique de l'érosion et de la dilatation d'une image en niveaux de gris. D'après Callot *et al.* (1994) 142
3.23 Ouverture, fermeture et chapeau haut de forme blanc d'une image en niveaux de gris. D'après Callot *et al.* (1994) 142
3.24 Inscription d'un buisson de *Retama rætam* dans une portion d'ellipse 146
3.25 Schéma illustratif du raisonnement suivi pour calculer la hauteur des objets en fonction de la longueur de leur ombre avec les images du *Pixy* 146

3.26 Parcelles agricoles regroupées en familles d'après les résultats d'une classification ascendante hiérarchique. Secteur de Sidi Makhlouf, près de l'IRA de Medenine 150

4.1 Les roses des déplacements potentiels sableux des stations de la Tunisie pré-saharienne pour la période 1979-2008 159
4.2 Évolution inter-annuelle des capacités de transport des stations de la Tunisie pré-saharienne 160
4.3 Évolution mensuelle des capacités de transport des stations de la Tunisie pré-saharienne 162
4.4 Évolution mensuelle des capacités de transport de la station de Dar Dhaoui 164
4.5 Roses mensuelles des déplacements potentiels sableux à Dar Dhaoui (2008–2009) 166
4.6 Élément grossiers d'un échantillon d'état de surface. Exemple pris sur une station du site de Dar Dhaoui 168
4.7 Fréquences cumulées de surface supprimée par chaque itération d'ouverture de l'image 4.6(b) 170
4.8 Courbes granulométriques de quelques stations du site de Rass Elkamen Labiadh. Fond : mosaïque d'extraits *Google Earth* d'une image *QuickBird* du 22 sept. 2006 173
4.9 Abri de pasteurs de la station REL002 175
4.10 Évolution spatiale et temporelle de la densité granulométrique du transect étudié 178
4.11 Évolution du pourcentage de surface supprimé par la première ouverture 179
4.12 Évolution du nombre d'ouvertures nécessaire à la suppression complète de la surface des éléments grossiers 179
4.13 Exemple d'un échantillon d'état de surface du transect de septembre 2009 à Dar Dhaoui 180
4.14 Les roses des déplacements potentiels à Dar Dhaoui pour les 5 jours précédant le transect de mai (1) et le transect de septembre (2) 181
4.15 La répartition spatiale des états de surface le long du transect du mois de mai 182

5.1 Profil radiométrique (de gauche à droite) d'un buisson. Extrait d'une image *Pixy* prise le 2 avril 2008 à Oglet Merteba. La balise blanche fait 50 cm de côté 187
5.2 Extraction des buissons par les outils de la Morphologie Mathématique. Exemple pris sur l'image *QuickBird* de mars 2009 pour le site de Rass Elkamen Labiadh 191
5.3 Exemple de parcelles dessinées par photo-interprétation pour le site de Dar Dhaoui, à partir de la mosaïques d'extraits *Google Earth* de juin 2003 192
5.4 Résultat de la procédure d'extraction des oliviers appliquée à la mosaïque d'extraits *Google Earth* du site de Dar Dhaoui 194

5.5 Le comportement spectral d'une pente croulante. Exemple d'un cordon à arête transversale du site de Dar Dhaoui 196
5.6 Image *Pixy* du 4 nov. 2009 à Dar Dhaoui. Parcelle d'oliviers présentant des dunes transversales à arête vive 198
5.7 Résultat obtenu après application de la séquence d'analyse à la fig. 5.6 199
5.8 L'orientation du MBR d'une pentre croulante extraite par MM et son rapport à la résultante des déplacements sableux 200
5.9 Aperçu des différentes hauteurs des dunes transversales de la parcelle d'oliviers survolée par le *Pixy* à Dar Dahoui 203
5.10 Mise en évidence par éclairement oblique d'une partie d'une forme éolienne. Site de Rass Elkamen Labiadh 204
5.11 Résultat de l'extraction des formes éoliennes pour le site de Rass Elkamen Labiadh depuis l'image *QuickBird* de mars 2009 206
5.12 Vue paysagère de l'erg de Rass Elkamen Labiad, Tunisie 207
5.13 Contours de l'erg du site de Rass Elkamen Labiadh et de sa zone de déflation, à différents instants de 2009, reportés sur l'image *QuickBird* de mars 208
5.14 Contours de l'erg du site de Rass Elkamen Labiadh et de sa zone de déflation, entre 2006 et 2010, reportés sur l'image *QuickBird* de mars 2009 209
5.15 Aspect de l'erg de Rass Elkamen Labiadh au 7 juin 2010 210
5.16 Orientations des pentes croulantes de l'aklé de Oglet Merteba entre avril 2008 et décembre 2009 211
5.17 Points correspondants aux objets étudiés pour le cas de l'erg de Rass Elkamen Labiadh 212
5.18 Points correspondants aux objets étudiés pour le cas de l'oued Ben Khachab 213
5.19 Résultats de l'approche par la fonction *K* de Ripley des distributions spatiales des formes éoliennes et de la végétation à Rass Elkamen Labiadh 213
5.20 Exemple de végétation endommagée par la dynamique éolienne au niveau de l'erg de Rass Elkamen Labiadh. La trace de roues donne l'échelle 214
5.21 Résultat de l'approche par la fonction *K* de Ripley des distributions spatiales des formes éoliennes et des oliviers à Dar Dhaoui 215
5.22 Utilisation d'une grille régulière pour agréger les données obtenues par analyse de l'image *QuickBird* de mars 2009. Exemple du col de REL018 216
5.23 Agrégation au niveau d'une maille des valeurs d'un paramètre, pondérée par la surface intersectée 217
5.24 La densité de formes éoliennes du site de Rass Elkamen Labiadh 219
5.25 Le relief du site de Rass Elkamen Labiadh 221

6.1 Extrait graphique de la base de données SIG utilisée pour établir la relation entre l'emprise au sol et la hauteur des buissons . . . 226

6.2 La hauteur d'un buisson en fonction de son emprise au sol sur le site de Rass Elkamen Labiadh 227
6.3 Résultats du modèle de régression appliqué aux données de Rass Elkamen Labiadh 228
6.4 Relation entre la densité d'obstacles et la fraction efficace du vent. D'après Marticorena (1995) 230
6.5 Cartographie de la densité d'obstacle et de la fraction efficace du vent correspondant pour le site de Rass Elkamen Labiadh 231
6.6 Extrait de la carte de la densité d'obstacles de Rass Elkamen Labiadh correspondant au cadre de la figure 6.5 233
6.7 La densité d'obstacles de la station REL018 en surimpression de l'image *QuickBird* de mars 2009 235
6.8 Résultats du modèle de régression appliqué aux données de Oglet Merteba 237
6.9 Carte de la densité d'obstacles du site d'Oglet Merteba et de la fraction efficace du vent correspondant 238
6.10 Un puits et son abreuvoir dans l'oued El Merteba 239
6.11 Extrait de la carte de la densité d'obstacles du site d'Oglet Merteba en surimpression des images *Pixy* 240
6.12 La densité de formes éoliennes représentée en fonction de la densité d'obstacles. Données du site de Rass Elkamen Labiadh . . . 242
6.13 Les relations entre les densités d'obstacles et de formes éoliennes après discrétisation de chacune des valeurs 243
6.14 Le schéma classique d'étude des régions sèches non désertiques 247
6.15 Une approche intégrée contrôlant les transferts d'échelle 249
6.16 Combinaisons spatiales des informations extraites au niveau des éléments du paysage 251

Liste des tableaux

1.1 Le déplacement éolien, d'après Callot (2008) 12
1.2 Quelques indices d'érodabilité des sols proposés par Gilettte, extrait d'un tableau de Marticorena (1995) 16
1.3 Extrait de la base de données de mesures des barkhanes 38

2.1 Évolution du climat et des occupations humaines de la Tunisie pré-saharienne pendant les derniers 45 000 ans, d'après Coque (1962) 65
2.2 Analyse bibliographique des suivis de changements par télédétection 83
2.3 Clés de détermination des formes éoliennes d'obstacle 99

3.1 Principaux caractères des données de vents disponibles en Tunisie pré-saharienne 116
3.2 Caractéristiques de l'imagerie *QuickBird* pré-traitée au niveau standard, d'après le guide des produits Digital Globe 130
3.3 Caractéristiques comparées du MNT SRTM et du MNE ASTER–GDEM, d'après Bubenzer et Bolten (2008) 134
3.4 Résumé de la base de données d'imagerie utilisée pour les applications en Tunisie pré-saharienne 136

4.1 Les déplacements potentiels sableux en Tunisie pré-saharienne . 157
4.2 Les coefficients de migration mensuels en Tunisie pré-saharienne 163
4.3 Densités granulométriques de quelques stations de Rass Elkamen Labiadh 171

5.1 Caractéristiques des pentes croulantes extraites des images *Pixy* de Dar Dhaoui 200
5.2 Caractéristiques des DPS de la période précédant le 3 nov. 2009 à Dar Dhaoui (cumul des n jours précédents) 201

6.1 Données entrant dans le calcul de la hauteur solaire 225

Table des matières

Liste des acronymes **ix**

Introduction générale **1**

I De la forme au paysage 7

1 La morphodynamique éolienne des milieux désertiques **9**
1.1 Quelques bases physiques 11
1.1.1 Mise en mouvement du matériel éolien 11
1.1.1.1 La vitesse-seuil de mobilisation 11
1.1.1.2 Les modalités de transport éolien 12
1.1.1.3 Quantités de matériel transporté 13
1.1.2 Les paramètres influant sur la dynamique 16
1.1.2.1 La nature des sols 16
1.1.2.2 La couverture des sols 17
1.1.2.3 Les processus bio-physiques affectant les sols . . 20
1.1.3 Transferts d'échelles 21
1.1.3.1 La complexité du Grand Erg occidental 21
1.1.3.2 Des formes complexes 23
1.1.3.3 Conclusions sur les échelles spatiales et temporelles 24
1.2 Aspects géomorphologiques 24
1.2.1 La classification des formes éoliennes 24
1.2.1.1 Les formes d'ablation 25
1.2.1.2 Les formes d'accumulation 26
1.2.1.3 Une forme éolienne autonome remarquable : la barkhane 27
1.2.2 Orientation des déplacements 28
1.2.2.1 Les formes longitudinales 28
1.2.2.2 Les formes transversales 29
1.2.3 Hauteurs des formes et volumes mobilisés 31
1.2.3.1 Approche thématique 31
1.2.3.2 Approche morphométrique 32
1.2.3.3 Les possibilités de conversion en volumes 32
1.3 Proposition d'un modèle d'approche des déplacements sableux . 34

1.3.1 Fondements conceptuels 34
1.3.1.1 Le risque éolien 34
1.3.1.2 Limites des méthodes d'évaluation des quantités transportées 34
1.3.1.3 Utilisation des formes éoliennes 34
1.3.2 Méthodes anciennes, nouvelles sources, propositions innovantes 37
1.3.2.1 Validation de la formule de Coursin 37
1.3.2.2 Les données météorologiques 38
1.3.2.3 Convertir le déplacement d'une barkhane en volumes pertinents de sables déplacés 41
1.3.3 Résultats et perspectives 42
1.3.3.1 Des volumes aux capacités de transport 42
1.3.3.2 Les déplacements potentiels sableux de Nouadhibou 43
1.3.3.3 Discussion et perspectives 45
Conclusion 50

2 Les contextes des régions sèches non désertiques 53
2.1 La désertification et ses impacts paysagers 55
2.1.1 Un concept flottant ? 55
2.1.1.1 La dégradation : condition nécessaire, mais non suffisante 55
2.1.1.2 Une pléthore de définitions 56
2.1.1.3 Le mythe de l'avancée du désert ? 60
2.1.2 Les facteurs de la désertification 62
2.1.2.1 Les multiples facettes des contraintes climatiques 62
2.1.2.2 La gestion sociale du milieu 65
2.1.2.3 L'importance et les modalités de l'action du vent 68
2.1.3 Une approche complexe 71
2.2 Observer et suivre la désertification : quoi, comment et pourquoi ? 74
2.2.1 Les observatoires de l'environnement 74
2.2.1.1 Des démarches « lourdes » 74
2.2.1.2 Le programme ROSELT 75
2.2.1.3 Limites et contraintes de ces observatoires 77
2.2.2 Propositions pour de nouvelles approches 77
2.2.2.1 La dynamique PASSAGE 77
2.2.2.2 Les propriétés du paysage dans la démarche PASSAGE 79
2.2.2.3 Les outils proposés 80
2.2.3 Télédétection et spécificités des régions sèches non désertiques 81
2.2.3.1 La dépendance d'échelles 82
2.2.3.2 Conséquences pour le pas temporel du suivi des changements 82
2.2.3.3 Applications à la morphodynamique éolienne . 83

2.3 Un nouvel indicateur : les formes éoliennes d'obstacle 86
2.3.1 Décomposer les paysages des régions sèches non désertiques 87
2.3.1.1 Les états de surface 87
2.3.1.2 Les fonctions des EDS 87
2.3.2 Les formes éoliennes d'obstacles 88
2.3.2.1 Un élément important des EDS 88
2.3.2.2 Des objets mal connus : l'exemple de la *nebka* . . 88
2.3.2.3 Les faiblesses interprétatives 90
2.3.3 Comment en faire des indicateurs ? 92
2.3.3.1 Classification des FEO 92
2.3.3.2 Le cycle des FEO 95
2.3.3.3 FEO et dynamiques du milieu 100
Conclusion 101

3 Une échelle, un outil 103
3.1 Approche stationnelle 105
3.1.1 Les sites de travail 105
3.1.1.1 Rass Elkamen Labiadh 106
3.1.1.2 Dar Dhaoui 107
3.1.1.3 Ghrabet 108
3.1.1.4 Oglet Merteba 109
3.1.1.5 Menzel Habib 111
3.1.2 Transects de photographies d'échantillons d'états de surface 111
3.1.2.1 Pourquoi explorer cette voie ? 111
3.1.2.2 État de l'art 112
3.1.2.3 Méthode d'acquisition et développements potentiels 113
3.1.3 Les vents et le climat 115
3.1.3.1 Les données générales 115
3.1.3.2 Les données locales 117
3.1.3.3 Estimation de la qualité des données de vent de la station de Dar Dhaoui 117
3.2 Données de télédétection 120
3.2.1 Le *Pixy* 120
3.2.1.1 Un outil de télédétection rapprochée 120
3.2.1.2 Contraintes d'exploitation et conséquences méthodologiques 122
3.2.1.3 Données récoltées 124
3.2.2 L'imagerie spatiale 124
3.2.2.1 *Google Earth* 126
3.2.2.2 *QuickBird* : images satellitales à très haute résolution spatiale 130
3.2.2.3 Conclusion sur l'utilisation d'images THR 131
3.2.3 L'information sur le relief 133
3.2.3.1 Quel usage potentiel ? 133

3.2.3.2 Critique comparée des données gratuites disponibles . . . 134
3.2.3.3 Choix et validation des données . . . 135
3.3 Traitements de données multiscalaires . . . 137
3.3.1 La Morphologie Mathématique . . . 137
3.3.1.1 Les problèmes liés aux images . . . 137
3.3.1.2 Présentation générale de la Morphologie Mathématique . . . 138
3.3.1.3 Applications de la Morphologie Mathématique et évaluation qualitative . . . 143
3.3.2 Rugosité et topographie à partir d'images en plan . . . 144
3.3.2.1 Les contraintes de la réalisation de MNT submétriques . . . 144
3.3.2.2 Principes de l'estimation de la hauteur d'un objet grâce à la longueur de son ombre portée . . . 145
3.3.2.3 Le calcul de l'angle des rayons solaires . . . 147
3.3.3 Approches synthétiques des résultats . . . 148
3.3.3.1 De l'intérêt d'un SIG . . . 148
3.3.3.2 La fonction *K* de Ripley . . . 149
3.3.3.3 Analyse par mailles . . . 149
Conclusion . . . 151

II Applications en Tunisie pré-saharienne 153

4 L'échelle stationnelle 155
4.1 Les vents en Tunisie pré-saharienne . . . 157
4.1.1 Du littoral à l'intérieur des terres . . . 157
4.1.2 La variabilité temporelle des DPS . . . 160
4.1.3 La station de Dar Dhaoui . . . 164
4.2 La densité granulométrique des EDS . . . 167
4.2.1 Protocole suivi pour les échantillons photographiques . . . 167
4.2.2 Application à la compréhension des mécanismes locaux . . . 171
4.3 L'approche par les transects d'EDS . . . 177
4.3.1 Évolution des EDS le long d'un transect et dans le temps . . . 178
4.3.2 Les DPS des périodes étudiées . . . 180
4.3.3 Synthèse . . . 182
Conclusion . . . 184

5 Paysages et morphodynamique éolienne 185
5.1 La végétation, élément de contexte . . . 186
5.1.1 Les difficultés posées par les images du *Pixy* . . . 187
5.1.2 Les buissons des secteurs de steppes . . . 188
5.1.3 Les oliviers des secteurs agricoles . . . 192
5.2 Les modelés éoliens . . . 195
5.2.1 Problématiques rencontrées . . . 195

5.2.2 les pentes croulantes des formes éoliennes d'obstacle . . . 197
5.2.3 Application aux images *QuickBird* 204
5.3 Synthèse des questions posées par les échelles 207
5.3.1 La dépendance d'échelles temporelle 207
5.3.2 Analyse comparée de la distribution spatiale de deux jeux de données 212
5.3.3 Vers une intégration d'échelles : l'analyse par mailles . . . 216
Conclusion 222

6 Un indicateur prédictif 223
6.1 Cartographie de la densité d'obstacles végétaux 225
6.1.1 Relation empirique entre l'emprise au sol de la végétation et sa hauteur 225
6.1.2 la densité d'obstacles 229
6.2 Confrontation géographique et thématique 236
6.2.1 Comparaison site à site 236
6.2.2 Comparaison avec la densité de formes éoliennes 241
6.3 Perspectives et conclusions 245
6.3.1 Le point sur les données 245
6.3.2 Apports conceptuels et développements potentiels 247

Conclusion générale 253

Bibliographie 259

Liste des figures 275

Liste des tableaux 283

Table des matières 285

Annexes 291
A Réalisation des roses des déplacements potentiels sableux sous Excel© 292
B Base de données de mesures des barkhanes 294
C Les coûts de la lutte contre la désertification 298
D Le système tabia–jesser 299
E Fiche de description de station 300
F Dispersion des valeurs de résolution obtenues pour les échantillons photographiques d'EDS de deux jeux de données 301
G Macro d'extraction des éléments grossiers des états de surface . . 302
H Macro de calcul de la granulométrie des éléments grossiers des états de surface 303
I Fiche de renseignements des transects de photographies d'échantillons d'états de surface 304
J Extraction des buissons pour le site de Rass Elkamen Labiadh . . 305

K Illustration de la séquence d'extraction des oliviers par les outils de la MM 306
L Procédure de régression d'un nuage de points vers une fonction puissance. Application aux données de Rass Elkamen Labiadh . 307
M Carte des unités éoliennes potentielles d'Oglet Merteba établie par Ouerchefani (2012) 309

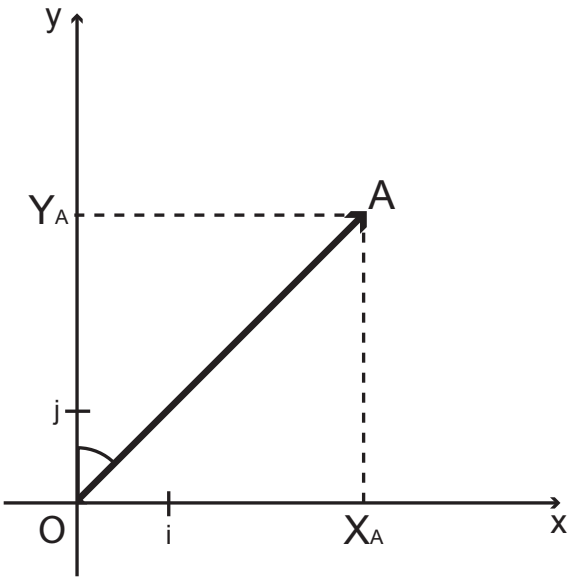
Résumé **311**

Annexes

A Réalisation des roses des déplacements potentiels sableux sous Excel©

Les données sont préparées de la façon suivante : les directions sont triées par intervalles de 22,5° centrés sur les 16 directions de la rose des vents (0 pour le nord, 90 pour l'est, etc.) ; de même, les vitesses sont triées par intervalles. En-dessous de 0,5 $m.s^{-1}$ on considère les vitesses comme nulles, entre 0,5 et 1,5 on leur attribue la valeur 1, etc.

Les roses des déplacements sont réalisées directement depuis les données du tableau via l'outil de réalisation de graphique d'Excel©. Si on se place en effet dans un repère orthonormé, avec un coefficient de transport potentiel pour chaque direction (exprimée en degrés), on peut considérer que l'on a un vecteur dont le module (la longueur) est la valeur du coefficient et la direction est donnée par l'angle avec le nord.



Représentation dans un repère orthonormé du déplacement potentiel de direction 45° (NE) sous forme de vecteur

Les projections de A sur l'axe des abscisses et celui des ordonnées permettent de définir un triangle rectangle dans lequel, à partir de l'angle $\widehat{AOj}$ on peut calculer les coordonnées de A en appliquant des formules de trigonométrie. En effet, $Y_A = \cos(\widehat{AOj}) \times OA$ et $X_A = \sin(\widehat{AOj}) \times OA$. Les coordonnées de l'origine O du vecteur seront toujours $(0, 0)$. On obtient alors un tableau comprenant une série de deux points pour chaque direction de vent.

L'outil graphique du tableur permet alors de dessiner ces séries sous la forme d'un nuage de points reliés deux à deux par un segment, ce qui permet de représenter les déplacements potentiels des sables pour les 16 directions de la rose des vents. La somme vectorielle des déplacements dans les 16 directions permet de représenter de la même manière la migration résultante. L'intérêt

Q	Dir. (°)	X_O	X_A	Y_O	Y_A
OA	$\widehat{AOj}$	0,0	$OA \times \sin(\widehat{AOj})$	0,0	$OA \times \cos(\widehat{AOj})$
13,9	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9
10,1	22,5	0,0	3,9	0,0	9,3
7,2	45,0	0,0	5,1	0,0	5,1
35,2	67,5	0,0	32,5	0,0	13,5
30,4	90,0	0,0	30,5	0,0	0,0
etc.	...	...	...	...	...

Exemple de données servant à la réalisation des roses de déplacements potentiels des sables

de l'implémentation dans une feuille de calcul est d'autoriser la répétition de l'opération pour toute donnée correctement formatée.

Callot et Oulehri (1996), reprenant Fryberger (1979), distinguent cinq types de roses des déplacements potentiels suivant qu'elles ont une, plusieurs ou aucune orientation préférentielle :

A ***unimodales étroites*** *où plus de 90 % du potentiel de transport est situé dans deux directions adjacentes ou tout au moins dans un arc de cercle de 45°.*

B ***unimodales larges*** *où il n'existe qu'un seul pic de direction de transport mais avec une distribution plus large.*

C ***bimodales aiguës****, avec une distribution où les pics des deux modes forment un angle aigu (y compris 90°).*

D ***bimodales obtuses****, identiques à la distribution précédente, avec un angle obtus entre les pics.*

E ***complexes****, où la distribution comporte plus de deux modes ou ne comporte pas de modes bien définis.*

B Base de données de mesures des barkhanes

Barkh n°	L	ϕ	H	D_{tot}	T	D_{moy}	$C = D_{moy}.H$
Pr1	23,5	31	14,1	264,7	12	22,1	311,9
Pr2	27,5	31	16,5	293,4	12	24,5	403,6
Pr3	20,2	31	12,2	434,6	12	36,2	440,3
Pr4	15,4	31	9,3	517,8	12	43,2	400,1
Pr5	14,9	31	8,9	328,4	12	27,4	244,2
Pr6	14,7	31	8,8	574,4	12	47,9	421,8
Pr7	18,8	31	11,3	309,2	12	25,8	290,6
Pr8	31,2	31	18,7	245,6	12	20,5	383,7
Pr9	23,5	31	14,1	318,7	12	26,6	375,5
Pr10	9,6	31	5,7	287,5	12	24	137,5
Pr11	20	31	12	283,3	12	23,6	283,7
Pr12	13,8	31	8,3	500,3	12	41,7	345,7
Pr13	26,4	31	15,9	216,9	12	18,1	286,7
Pr14	13,4	31	8	292,7	6	48,8	391,3
Pr15	9,5	31	5,7	221	6	36,8	210,2
Pr16	7,1	31	4,3	396,1	6	66	281,7
Pr17	30,3	31	18,2	148	6	24,7	449,1
Pr18	10,1	31	6	348,6	6	58,1	350,9
Lt1	40	31	24	44,6	3	14,9	357,3
Lt2	26	31	15,6	55	3	18,3	286,4
Lt3	24	31	14,4	56,2	3	18,7	270,1
Lt4	27	31	16,2	52,7	3	17,6	285
Lt5	22	31	13,2	57	2	28,5	376,7
Lt6	21	31	12,6	67,4	3	22,5	283,5
Lt7	23	31	13,8	70,4	3	23,5	324,3
Lt8	30	31	18	59,6	3	19,9	358,1
Lt9	18	31	10,8	100,2	3	33,4	361,2
Lt10	20	31	12	101,1	3	33,7	405

Lt11	26	31	15,6	49,7	3	16,6	258,8
Lt12	26	31	15,6	62	2	31	484,3
Lt13	20	31	12	62	2	31	372,5
Lt14	18	31	10,8	76	3	25,3	274
Lt15	28	31	16,8	47	2	23,5	395,4
Lt16	29	31	17,4	81	3	27	470,5
Lt17	29	31	17,4	70	3	23,3	406,6
Lt18	37	31	22,2	33	3	11	244,6
Lt19	27	31	16,2	51	2,6	19,6	318,2
Lt20	30	31	18	60	3	20	360,5
Lt21	29	31	17,4	76	3	25,3	441,4
Lt22	27	31	16,2	55	2,6	21,2	343,2
Lt23	33	31	19,8	31	3	10,3	204,9
Lt24	29	31	17,4	35	2,6	13,5	234,6
Lt25	36	31	21,6	36	2,6	13,8	299,5
Lt26	29	31	17,4	42	2,6	16,2	281,5
Lt27	22	31	13,2	70	2,6	26,9	355,9
Lt28	28	31	16,8	58	2,6	22,3	375,3
Lt29	19	31	11,4	89	2,6	34,2	390,8
Lt30	20	31	12	57	2,6	21,9	263,5
Lt31	20	31	12	84	2,6	32,3	388,2
Lt32	24	31	14,4	57	2,6	21,9	316,1
Lt33	22	31	13,2	65	2,6	25	330,5
Lt34	25	31	15	56	2,6	21,5	323,5
Lt35	33	31	19,8	40	2,6	15,4	305,1
Lt36	25	31	15	47	2,6	18,1	271,5
Lt37	23	31	13,8	39	2,6	15	207,3
Lt38	24	31	14,4	47	2,6	18,1	260,7
Lt39	34	31	20,4	41	2,6	15,8	322,2
Lt40	28	31	16,8	43	2,6	16,5	278,2

Lt41	31	31	18,6	46	2,6	17,7	329,5
Lt42	36	31	21,6	44	2,6	16,9	366,1
Lt43	32	31	19,2	43	2,6	16,5	318
Lt44	34	31	20,4	44	2,6	16,9	345,7
Lt45	29	31	17,4	28	2	14	243,9
Lt46	32	31	19,2	14	2	7	134,6
Lt47	31	31	18,6	36	3	12	223,5
Lt48	23	31	13,8	103	3	34,3	474,5
Lt49	27	31	16,2	89	3	29,7	481,3
Lt50	24	31	14,4	58	3	19,3	278,8
Lt51	34	31	20,4	28	3	9,3	190,7
Lt52	21	31	12,6	70	2,6	26,9	339,7
Lt53	26	31	15,6	40	2	20	312,4
Lt54	30	31	18	61	3	20,3	366,5
Lt55	33	31	19,8	80	3	26,7	528,8
Lt56	30	31	18	50	3	16,7	300,4
Lt57	36	31	21,6	39	3	13	281,2
Lt58	32	31	19,2	64	3	21,3	410,2
Lt59	36	31	21,6	46	3	15,3	331,7
Lt60	36	31	21,6	36	3	12	259,6
Lt61	31	31	18,6	49	3	16,3	304,2
Lt62	33	31	19,8	56	3	18,7	370,1
Lt63	24	31	14,4	83	3	27,7	399
Lt64	38	31	22,8	33	3	11	251,2
Lt65	37	31	22,2	41	3	13,7	303,8
Lt66	35	31	21	35	3	11,7	245,4
Lt67	24	31	14,4	57	3	19	274
Lt68	33	31	19,8	53	3	17,7	350,3
Lt69	34	31	20,4	51	3	17	347,3
Lt70	28	31	16,8	69	3	23	387

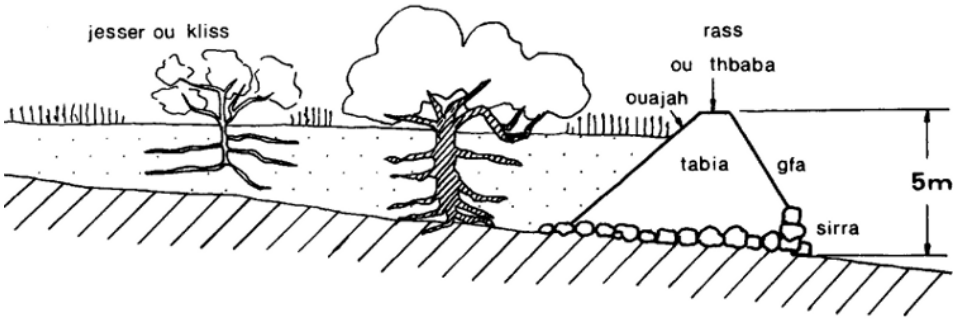
Lt71	36	31	21,6	48	3	16	346,1
Lt72	31	31	18,6	60	3	20	372,5
Lt73	41	31	24,6	31	3	10,3	254,6
Lt74	25	31	15	52	2,3	22,6	339,6
Lt75	23	31	13,8	33	2,3	14,3	198,3
Lt76	33	31	19,8	14	2,3	6,1	120,7
Lt77	28	31	16,8	32	2,3	13,9	234,1
Lt78	34	31	20,4	38	2	19	388,2
Lt79	23	31	13,8	63	2	31,5	435,3
Lt80	21	31	12,6	72	2	36	454,3
Lt81	29	31	17,4	43	2	21,5	374,6
Lt82	36	31	21,6	44	3	14,7	317,3
Lt83	37	31	22,2	35	3	11,7	259,4
Lt84	31	31	18,6	60	3	20	372,5
Lt85	33	31	19,8	50	3	16,7	330,5
Lt86	38	31	22,8	43	3	14,3	327,3
Lt87	29	31	17,4	66	3	22	383,3
Lt88	29	31	17,4	69	3	23	400,8
Lt89	32	31	19,2	58	3	19,3	371,7
Lt90	31	31	18,6	63	3	21	391,2

C Les coûts de la lutte contre la désertification

Exemples d'opérations de lutte contre l'ensablement en Tunisie et coût estimé par deux sources différentes

Type d'opération	**Coût estimé**	**Source**
Fixation du sable libre par reboisement et entretien de la plantation	1 900 DT pour un ha pendant trois ans	
Fixation par palissades de fibrociment	4 060 DT par km (+ 1 200 DT par km pour un éventuel rehaussement)	ISESCO
Fixation par palissades de palmes	2 900 DT par km (+ 1 200 DT par km pour un éventuel rehaussement)	
Construction de levées de terre (*tabias*)	3 800 DT par km	
Plantation	800 DT par ha	FAO
Entretien des plantations	240 DT par ha	

D Le système tabia–jesser



Coupe longitudinale d'un jesser et de sa tabia. D'après Bonvallot (1986)

La tabia barre toute la largeur du talweg. En aval, les sédiments et les eaux de ruissellement sont ainsi bloqués (pas intégralement : un déversoir assure, en principe, la connexion amont–aval) et forme le jesser, réserve de sol fertile sur laquelle sont cultivés oliviers, figuiers, légumes, céréales, etc.

Ce système est très ancien, son utilisation par les romains est attestée, et répandu dans l'ensemble du bassin méditerrranéen.

Les travaux d'entretien réguliers qu'il nécessite en font un indicateur pertinent d'exode rural dans des régions aux contraintes bio–physiques fortes.

E Fiche de description de station

Relevés de terrain / Dynamique éolienne – oliveraies ensablées – Médenine - Tunisie

RELEVE n° : ..... STATION : .....
DATE : ..... EQUIPE : .....

LOCALISATION
PROJECTION : ..... DATUM : ..... UNITE : .....
LATITUDE : ..... LONGITUDE : .....
ALTITUDE : ..... UNITE : ..... LIEU DIT/LOCALITE : .....
PARCELLE n° : .....
POSITION TOPOGRAPHIQUE : ..... (SM : sommet ; HV : haut de pente ; MV : mi-pente ; BV : bas de pente ; OD : oued)
UNITE GEOMORPHOLOGIQUE : ..... (interfluve, terrasse, lit...)

EROSION HYDRIQUE
TYPE : ..... (DF : diffuse, RG : rigole, RV : ravine, DP : dépôt)
LONGUEUR : .....(m) LARGEUR : .....(m) DENSITE : .....

EROSION EOLIENNE
TYPE : ..... (VL : voile ; NP : nappe ; NB : nebka ; DN : dune ; BK : barkhane)
MODE : ..... (JN : jointif ; NJ : non jointif) COHESION : ..... (VF : vif ; FG : figé)
VEGETALISE : pérennes / annuelles

TYPE	MODE	COHESION	ABONDANCE	DOMINANCE

DEFLATION : ..... (EF : érosion des formes ; DC : déchaussement ; AD : aire de déflation)

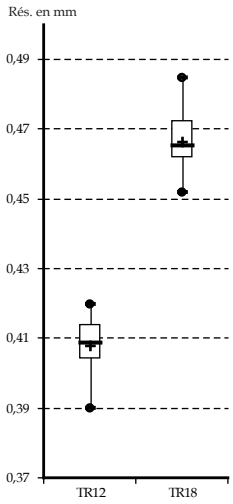
VEGETATION (parcours)
ESPECE DOMINANTE : ..... PERENNES (%) : ..... ANNUELLES (%) : ....
LISTE PERENNES : .....

SURFACE SOL

TYPE	%	TYPE	%	TYPE	%
BLOC		CROUTE CALC		PELL. STRUCT1	
GALET		CROUTE GYPS		PELL. STRUCT2	
CAILLOUX		PELL. EROSION		PELL. STRUCT3	
GRAVIER		PELL. DESSICC			
SABLE		PELL. DECANTA			

PARCELLE
PLANTATION : ..... (OL : oliviers ; CR : céréales ; AU : autres à préciser)
DISTANCE TRONCS : ..... (m) HAUTEUR ARBRE : .....(m) COURONNE : ..... (m)
LIMITE : ..... (VG : végétalisée ; LV : levée de terre ; TB : tabia)
SURFACE : ..... (LR : labour récent ; LA : labour ancien ; PL : plane)
AMENAGEMENT : .....

F Dispersion des valeurs de résolution obtenues pour les échantillons photographiques d'EDS de deux jeux de données



G Macro d'extraction des éléments grossiers des états de surface

```
Sub main
Dim a$(100)
Chdir ("Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter")

v$ = Dir$("*.jpg")
s$ = "Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter\" & v$

i = 0
a(i) = s$
while (v$ <> "")

t$ = "origin" & i
w$ = "automedian" & i
u$ = "segmentation" & i
z$ = "holefill" & i

original = AphImgNew(t$)

AphImgRead original, s$

AphImgAutoMedian AphImg(t$), AphImgNew(w$), AphNamedSElement("Disk",1)

AphImgThreshold AphImg(w$), AphImgNew(u$), AphThreshold(230,255)

AphImgHoleFill AphImg(u$), AphImgNew(z$), AphNamedNgbGraph("2D 8-connected")

AphImgWrite AphImg(z$), "Le_répertoire_de_sortie\" & z$ & ".jpg", "AphJpegFile"

v$ = Dir$
s$ = "Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter\" & v$
a(i) = s$
i = i + 1

Wend

AphImgFreeAll

End Sub
```

Cette macro permet de boucler sur toutes les images d'un dossier en appliquant une séquence de traitement qui aboutit à une image binaire des éléments grossiers de la surface. Les valeurs de seuillage sont déterminées par rapport à nos images et doivent être adaptées en cas d'utilisation pour une autre application.

H Macro de calcul de la granulométrie des éléments grossiers des états de surface

```
Sub main
Dim a$(100)
Dim Result() As Double
Chdir ("Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter")

v$ = Dir$("*.jpg")
s$ = "Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter\" & v$

i = 0
a(i) = s$
while (v$ <> "")

t$ = "origin" & i

w$ = "ouverture" & i

original = AphImgNew(t$)

AphImgRead original, s$

  AphImgArea AphImg(t$), Result
  AphImgCountObjects AphImg(t$), Result

For j = 1 To 50

  AphImgOpen AphImg(t$), AphImgNew(w$), AphNamedSElement("Disk",j)
  AphImgArea AphImg(w$), Result
  AphImgCountObjects AphImg(w$), Result

If (result(0) = 0) Then Exit For

Next j

v$ = Dir$
s$ = "Le_répertoire_où_se_trouvent_les_images_à_traiter\" & v$
a(i) = s$
i = i + 1

Wend

AphImgFreeAll

End Sub
```

Cette macro boucle sur toutes les images binaires d'un dossier et, pour chaque image :

1. calcule la surface (en pixels) et le nombre d'objets représentés de l'image initiale ;
2. effectue des ouvertures de taille croissante avec un élément structurant circulaire ;
3. calcule la surface et le nombre d'objets du résultat de chaque ouverture et écrit ce résultat dans la fenêtre d'historique d'Aphelion© ;
4. interrompt la série des ouvertures lorsque la surface devient nulle et passe à l'image suivante.

I Fiche de renseignements des transects de photographies d'échantillons d'états de surface

Fiche transect de photographies d'EDS

TRANSECT N° :_____

Caractérisation du site de travail

Système :_____ Datum :_____ Zone :_____ Unité :_____

Longitude :_____ Latitude :_____

Position topographique :_____

Description de l'unité :_____

_____

_____

_____

Caractérisation du transect

Longitude début :_____ Latitude début :_____

Orientation (degrés) :_____ Direction (transversale/longitudinale) :_____

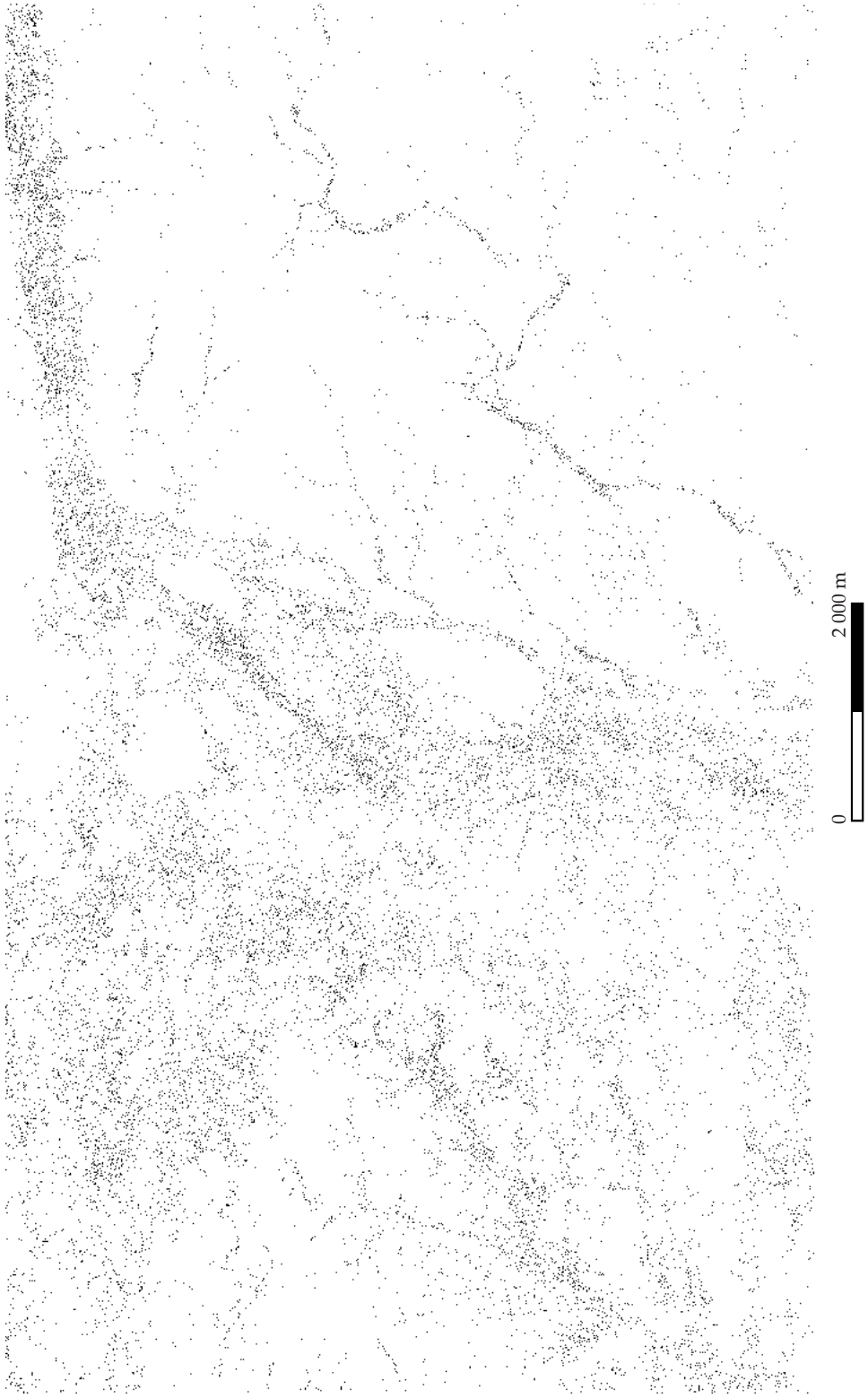
Longitude fin :_____ Latitude fin :_____

Longueur (mètres) :_____ Intervalle de prise de vues (m) :_____ Nbre de prises de vues par arrêt :_____

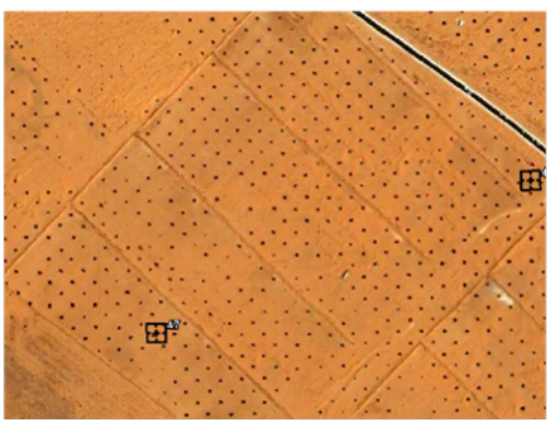
Données du transect

STATION	PHOTOGRAPHIES	DYNAMIQUE	REMARQUES
1			
2			
3			
4			
5			
6			

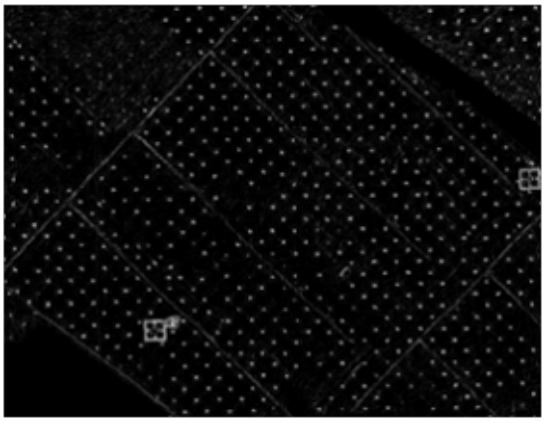
J Extraction des buissons pour le site de Rass El-kamen Labiadh



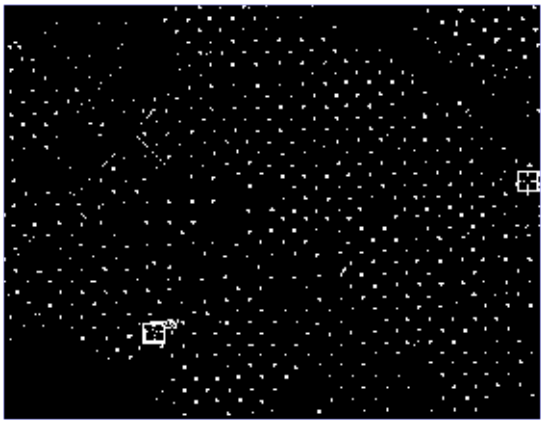
K Illustration de la séquence d'extraction des oliviers par les outils de la MM



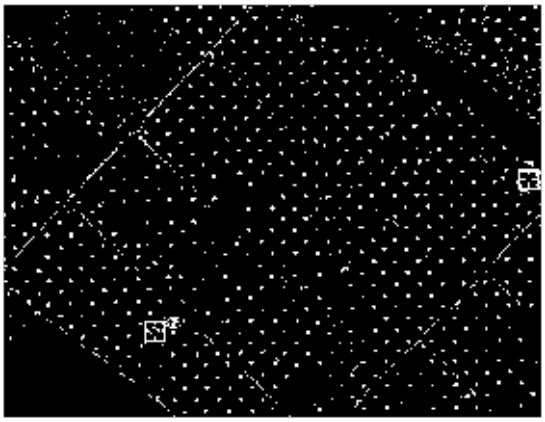
(a) Image traitée



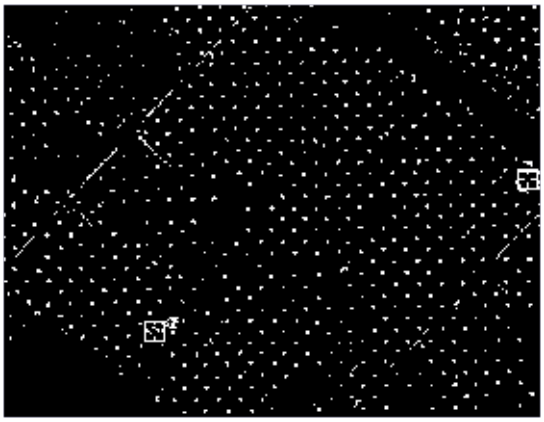
(b) Chapeau haut-de-forme noir utilisant un élément structurant disque de rang 4



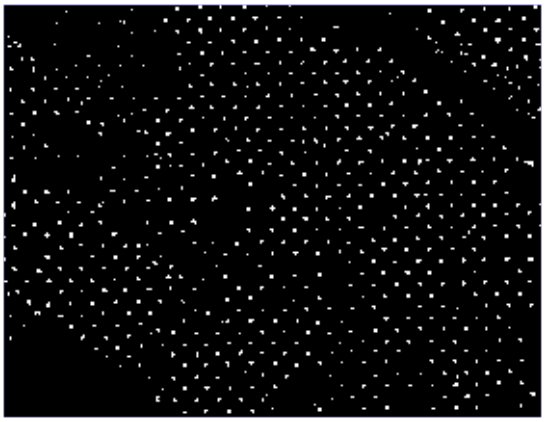
(c) Seuil haut (marqueur)



(d) Seuil bas (masque)



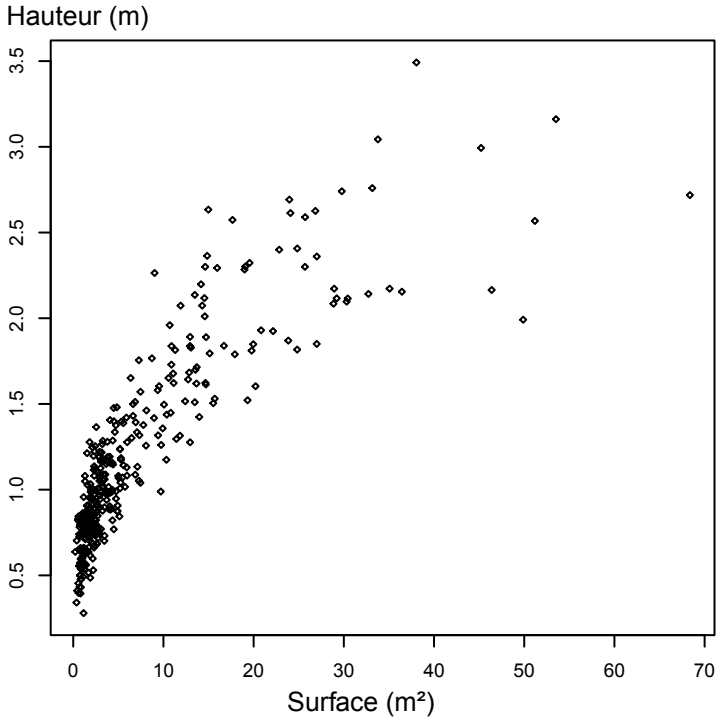
(e) Reconstruction de (c) dans (d)



(f) Résultat final après le filtre sur l'élongation et la superficie

L Procédure de régression d'un nuage de points vers une fonction puissance. Application aux données de Rass Elkamen Labiadh

Le principe de la démarche est le suivant. On est en présence d'un nuage de points (x, y) qui suit une distribution logarithmique. On pose $A = a$ et



Nuage de points initial

$\exp(B) = b$ et on peut écrire :

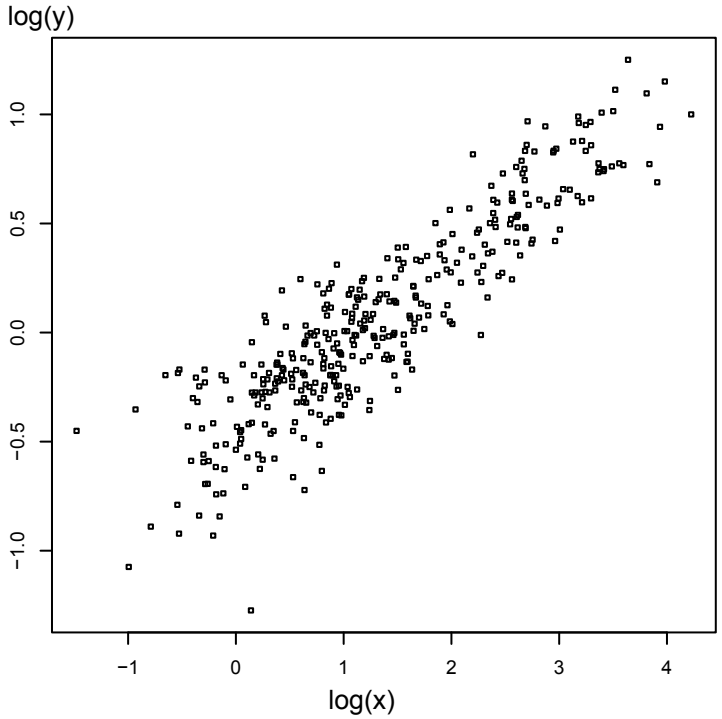
$$y = ax + b \Longleftrightarrow \log(y) = A\log(x) + B$$

On redéfinit le nuage de points en calculant $\log(x)$ et $\log(y)$. Le nouveau nuage a un aspect rectiligne. L'étape suivante est la construction d'une régression linéaire simple. Elle permet d'obtenir les coefficients A et B. On récupère ainsi les coefficients :

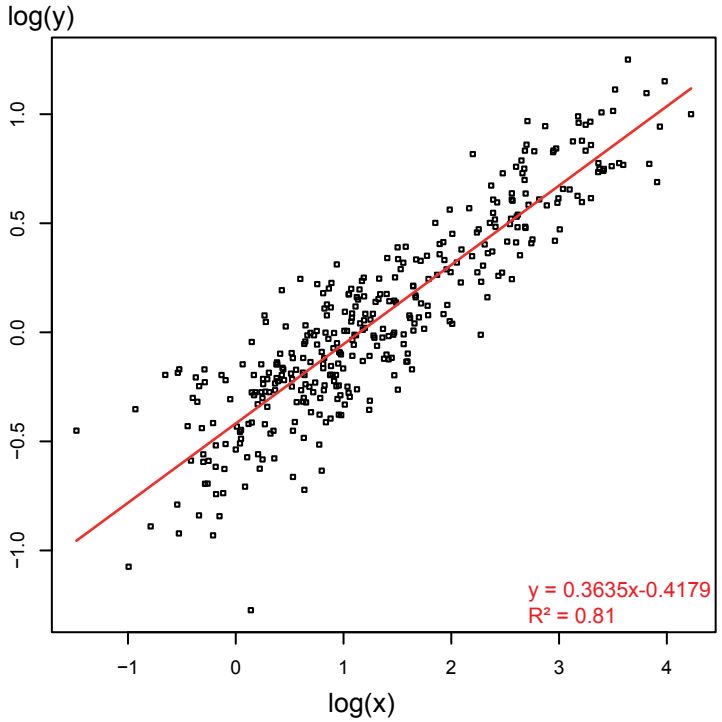
$a = 0.3635$

et

$b = \exp(-0,4179) \Longleftrightarrow b = 0,6584$ qui permettent d'établir la fonction de puissance utilisée pour la régression finale.

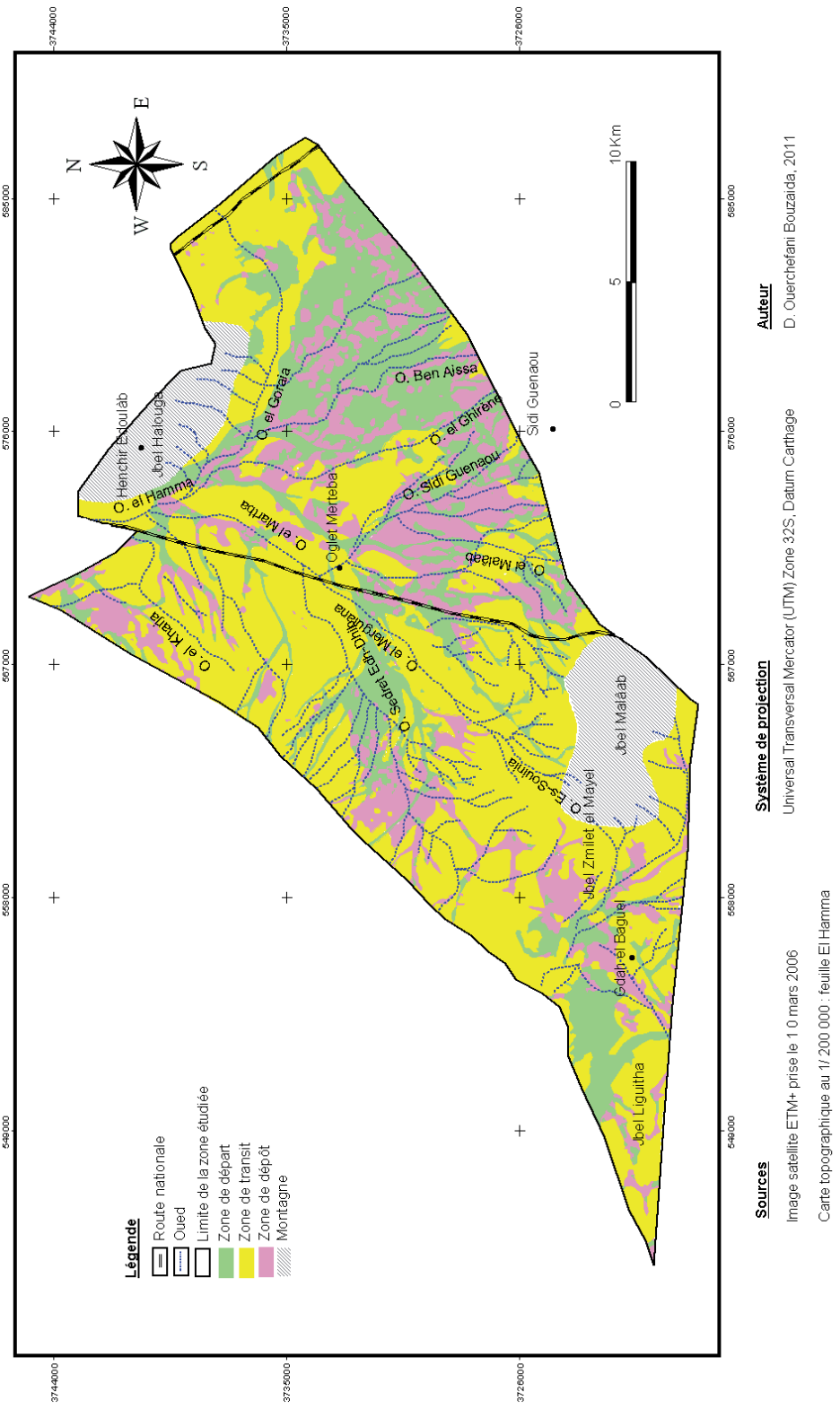


Nuage de points obtenu après passage des axes en logarithme



Résultat de la régression linéaire appliquée au nouveau nuage de points

M Carte des unités éoliennes potentielles d'Oglet Merteba établie par Ouerchefani (2012)



La morphodynamique éolienne en régions sèches : des échelles spatiales et temporelles aux outils

Résumé : Les régions sèches situées à la périphérie des déserts sont généralement peuplées et mises en valeur sur un mode sédentaire. Elles partagent cependant avec les milieux désertiques des conditions environnementales qui les rendent sensibles et fragiles. Cela implique de bien connaître les mécanismes de leurs milieux, *a fortiori* dans un contexte de désertification qui augmente le risque environnemental. Celui-ci est souvent évalué par le suivi de la végétation, mais l'expérience de terrain montre que les formes éoliennes pourraient apporter des compléments utiles. La morphodynamique éolienne joue en effet un rôle non négligeable dans le risque environnemental en régions sèches. Si, dans les systèmes désertiques, l'influence des activités humaines sur l'évolution des formes éoliennes de grande taille est réduite, dans les régions sèches non-désertiques, elles sont de plus petite dimension et leur vitesse de réaction aux changements des conditions du milieu est élevée. Elles sont de surcroît liées aux autres composants du paysage, avec lesquels elles interagissent fortement, et leur fonctionnement peut être corrélé aux modalités d'exploitation du milieu. Cela en fait des indicateurs pertinents et leur suivi doit donc être conçu dans une approche systémique appuyée sur une bonne maîtrise des fondements physiques de l'étude de la morphodynamique éolienne qui sont présentés en ouverture de ce mémoire. Différents outils et concepts élaborés dans les contextes désertiques, parmi lesquels les déplacements potentiels sableux et la densité d'obstacle, sont détaillés. Les effets paysagers de la morphodynamique éolienne sont illustrés par divers exemples. Son intégration dans les études de suivi est alors questionnée pour démontrer que de nouvelles approches peuvent être explorées. Les propositions faites s'intéressent en particulier à un objet, la forme éolienne d'obstacle, qui reste mal connu malgré la place qu'il tient dans les paysages des régions sèches. Une grille de caractérisation fine de cet objet est définie, à partir de laquelle un protocole de quantification et d'évaluation qualitative nécessaire à la production d'indicateurs peut être élaboré.

Pour cela, les méthodes développées doivent être reproductibles et minimiser la complexité et les coûts de mise en œuvre. Dans le domaine de la télédétection, la facilité d'utilisation et la précision des images du *Pixy*, paramoteur léger à voile souple, démontrent le potentiel des vecteurs de type drone. L'intérêt des satellites à très haute résolution spatiale pour, notamment, la généralisation d'études ciblées est également démontré. Les images produites correspondent notamment à une échelle intermédiaire qui faisait jusqu'alors défaut. Parmi les fournisseurs d'images très haute résolution spatiale, *Google Earth* est une alternative possible des fournisseurs commerciaux. La disponibilité de plus en plus grande d'images de résolution très élevée offre des perspectives d'applications dans des domaines variés. Leur exploitation présente cependant des contraintes que la Morphologie Mathématique (MM), discipline de l'analyse d'image orientée-objet, permet de contourner. Les outils de la MM facilitent l'analyse façon robuste des images non corrigées, du type *Pixy* ou *Google Earth*. Elle s'appuie sur des procédures simples à reproduire, dont les résultats s'expliquent facilement. Elle participe ainsi à réduire le coût des études. Or, la question économique du diagnostic environnemental ne peut être évacuée, en particulier dans les pays concernés par la lutte contre la désertification.

Chaque chapitre de ce mémoire démontre l'importance de la prise en considération de deux seuils : d'une part, le seuil d'hétérogénéité, en-deçà duquel l'information recherchée est noyée dans le bruit d'un trop grand détail, d'autre part, le seuil d'homo-

généité, au-delà duquel la maille d'analyse fait que l'information est trop lissée pour être pertinente. Au fil des exemples analysés, les effets induits par ces seuils sur les résultats obtenus sont décris. Leur prise en considération est ainsi un élément structurant des méthodes développées. Au-delà de la problématique de la morphodynamique éolienne, les approches mises au point combinent ainsi des méthodes de caractérisation semi-automatique des éléments du paysage avec des procédures d'intégration multiscalaire des indicateurs obtenus. Les résultats de cette étude sont donc potentiellement utiles à toute démarche qui cherche à appréhender les effets d'un phénomène à différentes échelles.

Mots clés : Dynamique éolienne, désertification, formes éoliennes d'obstacle, observatoires, télédétection, imagerie très haute résolution, drone, morphologie mathématique

Ce document a été préparé en LaTeX à l'aide de l'éditeur *TeXmaker* et de la distribution TeX *MikTeX*, à partir des feuilles de style de J. Chiquet (modifiées).