



HAL
open science

Dynamique environnementale des zones steppiques à Djelfa (Algérie) : Caractérisation par télédétection des changements du couvert végétal et des processus d'ensablement

Mohamed Mezrag

► **To cite this version:**

Mohamed Mezrag. Dynamique environnementale des zones steppiques à Djelfa (Algérie) : Caractérisation par télédétection des changements du couvert végétal et des processus d'ensablement. Histoire. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSE2080 . tel-03466636

HAL Id: tel-03466636

<https://theses.hal.science/tel-03466636>

Submitted on 6 Dec 2021

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

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



N° d'ordre NNT : 2018LYSE2080

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 483 Sciences sociales

Discipline : Géographie-Aménagement-Urbanisme

Soutenue publiquement le 12 octobre 2018, par :

Mohamed MEZRAG

Dynamique environnementale des zones steppiques à Djelfa (Algérie).

*Caractérisation par télédétection des changements du
couvert végétal et des processus d'ensablement.*

Devant le jury composé de :

Bernard GEYER, Directeur de Recherches, C.N.R.S., Président

Catherine MERING, Professeure des universités, Université Paris Diderot, Rapporteur

Jean-Paul DEROIN, Professeur des universités, Université de Reims, Rapporteur

Richard ESCADAFAL, Directeur de Recherches Honoraire, Institut Recherche Développement, Invité

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

Jérôme LEJOT, Maître de conférences, université Lumière Lyon 2, Co-Directeur de thèse

Contrat de diffusion

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

Université Lumière Lyon 2
École Doctorale Sciences Sociales
UFR Temps et Territoires
Département de Géographie
UMR5133 - ArchéOrient

*Dynamique environnementale des zones steppiques
à Djelfa (Algérie)
Caractérisation par télédétection des changements du couvert végétal et
des processus d'ensablement*



Mohamed Mezrag

Thèse

Doctorat de Géographie, Aménagement et Urbanisme

Sous la direction de Yann Calot et Jérôme Lejot

Présentée et soutenue publiquement le 12 octobre 2018 devant un jury composé de :

M. Yann Callot

M. Jean-Paul Deroin

M. Richard Escadafal

M. Bernard Geyer

M. Jérôme Lejot

Mme. Catherine Mering

Mme. Khadija Rémaoun

Professeur émérite université Lumière Lyon 2

Professeur université Reims

Directeur de recherche honoraire IRD

Directeur de recherche CNRS, Lyon

Maitre de conférences université Lumière Lyon 2

Professeur université Paris Diderot

Professeur université Oran 2- Algérie

Directeur

Rapporteur

Invité

Examineur

Codirecteur

Rapporteur

Examinatrice

Photos de la page de garde, de gauche à droite et de haut en bas :

- Tempête de vent de sable traversant la ville de Djelfa (film youtub),
- Travaux de fixation de sable et réhabilitation des parcours, 2013 (34°43'29"N - 3°45'45"E)
- Barrage Vert à Hassi Bahbah, Djelfa (35°01 N – 3°01 E, Arthus-Bertrand, 2015)
- Oued ayant emporté la couche de sable à Mlilha (34°43'13"N - 3°46'24"E)
- Incision d'un oued sur les bordures de la daïa, entre Mouilah et Mliliha, 2013 (34°44'39N - 3°39'6E)
- Rafales de vent de sable, entre Mouilah à Mliliha, le 09/02017, 34°45'51"N - 3°33'12"E)

Université Lumière Lyon 2
École Doctorale Sciences Sociales
UFR Temps et Territoires
Département de Géographie
UMR5133 - ArchéOrient

*Dynamique environnementale des zones steppiques
à Djelfa (Algérie)*

*Caractérisation par télédétection des changements du couvert végétal et
des processus d'ensablement*

Mohamed Mezrag

Thèse

Doctorat de Géographie, Aménagement et Urbanisme

Sous la direction de Yann Calot et Jérôme Lejot

Présentée et soutenue publiquement le 12 octobre 2018 devant un jury composé de :

M. Yann Callot

M. Jean-Paul Deroin

M. Richard Escadafal

M. Bernard Geyer

M. Jérôme Lejot

Mme. Catherine Mering

Mme. Khadija Rémaoun

Professeur émérite université Lumière Lyon 2

Professeur université Reims

Directeur de recherche honoraire IRD

Directeur de recherche CNRS, Lyon

Maitre de conférences université Lumière Lyon 2

Professeur université Paris Diderot

Professeur université Oran 2- Algérie

Directeur

Rapporteur

Invité

Examineur

Codirecteur

Rapporteur

Examinatrice

Le contraste entre la surface et la profondeur, entre ce que l'œil voit là-haut et les vraies conditions en bas, est l'expérience fondamentale du désert.

*Lindqvist (2018) - Le Voyage saharien, page 73, chapitre : vers Laghouat
(Traduit du Suédois par Hélène Hervieu).*

Ce qui est limité, circonscrit et représenté peut-être saisi par l'esprit ⁽¹⁾.

Mais, *La dégradation des terres, bien que nettement perceptible sur le terrain, est plus aisément décrite que quantifiée* ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Johannes Kepler, *L'Harmonie du monde* (Heller-Roazen, 2014)

⁽²⁾ (BDPA-SCETAGRI, 1992 in Brabant & al. 2010)

Sauf mention contraire, les cartes, les photos, schémas et images de ce document sont de l'auteur.
Le bord supérieur des photos aériennes, d'images satellites et cartes indique la direction du nord.

Remerciements

A tous ceux qui ont rendu « cette réalisation » possible

Cette étude est l'aboutissement de cinq d'années de recherche, menée à son terme grâce à de nombreux soutiens : universitaires, sur le terrain et dans la famille.

Ma reconnaissance première va avant tout à Monsieur le professeur Yann Callot. Je le remercie d'avoir accepté de diriger mes recherches, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant ma thèse. Collaborer avec ce connaisseur du désert a été pour moi une expérience des plus enrichissantes. Qu'il trouve ici l'hommage de ma profonde gratitude. Au-delà, je lui reconnais ses hautes qualités humaines.

Je prie également Monsieur Jérôme Lejot co-encadrant de ma thèse et maître de conférences à l'université Lyon 2 d'accepter l'expression de mon hommage reconnaissant pour avoir co-dirigé mes travaux. Je le remercie des heures de travail consacrées à mon égard.

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse Madame Catherine Mering, professeur à l'université Paris Diderot et Jean-Paul Deroin professeur à l'universités de Reims, d'avoir accepté de relire cette thèse et d'en être rapporteurs. La version finale de ce document a bénéficié de leur lecture très attentive et de leurs remarques précieuses.

J'associe à ces remerciements Richard Escadafal, directeur de recherche à l'IRD, Bernard Geyer directeur de recherche CNRS et Khadija Remaoun professeur à l'université à Oran Sénia (Algérie) pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Il m'est également agréable de remercier Messieurs : Adel Boussaid enseignant à l'université de Djelfa, Youcef Oukil enseignant à l'université de Bouzeréah (Alger-2) et Naasse Saradjia, cadre au Ministère de l'Environnement (Alger) de leur soutien sur le terrain et notamment pour le bon procédé de partage de données.

À Djelfa, je tiens à remercier M. Guellil directeur du Haut-Commissariat pour le Développement de la Steppe (Algérie) (HCDS). Je suis redevable à M. Boucherf, directeur de la météo à l'ONM à Alger pour les données climatiques mises à ma disposition.

Durant ce parcours, j'ai continué à exercer mon emploi à temps plein en tant qu'ingénieur de recherche dans une administration. Cela a entraîné un fort investissement sur le temps personnel. Je remercie mes proches pour leur patience, lors de cette période marquée par « tant d'absence dans la présence ». Infiniment merci à mon épouse « Saliha » pour son appui, un gros bisou à mes enfants.

Que les membres du laboratoire ArchéOrient et l'IRG de Lyon 2, ainsi que mes collègues de travail au rectorat de Lyon trouvent ici l'expression de ma gratitude pour leur soutien

Liste des sigles et acronymes

AMS : Army Map Service - US. Army, Washington
ANRH : Agence nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie)
API : Application Programming Interface
APS : Algérie Presse Service
ASE : European Space Agency
BNEDER : Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural, Algérie
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).
CEO : Center for Earth Observation de l'université de Yale aux Etat Unis
CNTS : Centre National des Techniques Spatiales (Algérie)
CNUED : Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement
EMI : Eolien Mapping Index
ENVI : Environment for Visualizing Images
ETM : Landsat Enhanced Thematic Mappe
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GPS : Système de positionnement mondial par satellite (Global Positioning System)
HCDS : le Haut-Commissariat pour le Développement de la Steppe (Algérie)
HML5 : World Wide Web Consortium, un standard de développement harmonisé par World Wide Web Consortium (W3C).
IDOM : INGENIERÍA IDOM INTERNACIONAL (Espagne)
INRF : Institut National de Recherche Forestière (Algérie)
IRD : Institut de Recherche pour le Développement (France)
Landsat Legacy : Tri-Decadal Global Landsat Orthorectified Overvie
MRE : Ministère des Ressources en Eau (Algérie)
NASA : Agence spatiale et aérospatiale nationale des États-Unis
NCEI : National Centers for Environmental Information, entité de la NOAA (États-Unis)
NDMC : Drought Monitor
NDVI : Indice de végétation par différence normalisé
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (États-Unis)
NPP : Net Primary Productivity
OMM - WMO : Organisation Météorologique Mondiale
ONM : Office National de la Météorologie (Algérie)
ONU : Organisation des Nations unies.
OSM : Open Street Map
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RAMSAR : Convention sur les zones humides, traité intergouvernemental pour la coopération et la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides.
ROSELT : Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme
RVB : Rouge Vert Bleu
SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index
SGA - Section Géographique de l'Armée (France, en 1957).
SIG : Système d'Information Géographique
SPI : Standardized Precipitation Index

SRTM : Void Filled (Shuttle Radar Topography Mission)

TIFF : Tagged Image File Format

UNCCD : Conférence des Nations Unies sur la lutte contre la désertification

USGS : U.S Geological Survey

UTM : Projection transverse universelle de Mercator (Universal Transverse Mercator)

Wilaya : Entité territoriale, l'Algérie est découpée en 48 wilayas. Le Wali (préfet) est désigné par le gouvernement.

XML : Extensible Markup Language, ou Langage Extensible de Balisage

Sommaire

Liste des sigles et acronymes
Sommaire.....	3
Introduction générale	6
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET SCIENTIFIQUE	11
Chapitre 1 : Régions steppiques marquées par une forte dynamique.....	12
1.1. Introduction	12
1.2. Entités du paysage de l'Algérie steppique à Djelfa.....	13
1.3. Histoire environnementale	15
1.4. Un climat à forte variabilité dans l'espace et dans le temps	21
1.5. Hydrologie endoréique	29
1.6. Dynamique du système écologique	31
1.7. Transformation du mode d'élevage	40
1.8. Agriculture extensive soutenue par une mécanisation effrénée	43
1.9. Entre héritage et mutation	51
1.10. Conclusion	54
Chapitre 2 : Evolution des méthodes de diagnostic.....	55
2.1. La notion d'irréversibilité de la rupture de stabilité.....	55
2.2. La dégradation : un concept en évolution objet d'une attention internationale	56
2.3. Désertification un concept discuté.....	58
2.4. L'évaluation de la dégradation des zones steppiques.....	60
2.5. Des indicateurs biologiques pour caractériser le surpâturage	61
2.6. Le matériel éolien risque et ressource	63
2.7. Discussion des méthodes.....	65
Chapitre 3 : Site d'étude, outils et données.....	68
3.1. Le site d'étude	68
3.2. Caractériser la sécheresse	72
3.3. Restitution du paysage semi-aride	76
3.4. Les données	87
3.5. Synthèse.....	96
Chapitre 4 : Traitement des images aériennes et satellitaires.....	97
4.1. Traitement des photographies aériennes.....	97
4.2. Prétraitement des images satellitaires.....	98
4.3. Traitement de l'imagerie pour l'étude des formes semi-arides	101
4.4. Détection des changements et des dynamiques.....	108
4.5. Validation des changements détectés	109
DEUXIEME PARTIE : LES PROCESSUS DES HAUTES STEPPES	111
Chapitre 5 : Dynamique éolienne	112
5.1. Caractéristiques annuelles.....	112

5.2. Analyse mensuelle des directions des vents.....	114
5.3. Intensité des évènements des vents de sable.....	117
5.4. L'analyse directionnelle du vent de sable.....	118
Chapitre 6 : Variabilités spatio-temporelles des précipitations.....	120
6.1. Évolution des perturbations orageuses.....	120
6.2. Variabilité temporelle des précipitations.....	125
6.3. Analyse par temporalité.....	127
6.4. Analyse par croisement des temporalités.....	131
6.5. Détection des ruptures climatiques.....	136
6.6. Le constat de la sécheresse.....	140
6.7. Synthèse.....	150
Chapitre 7 : Paramètres hydromorphologiques.....	151
7.1. Les indices morphologiques - morphométriques retenus.....	151
7.2. Ruissellement et ravinement.....	157
7.3. Bordures des daïas.....	158
7.4. Analyse diachronique d'érosion hydrique.....	166
7.5. Synthèse.....	170
Chapitre 8 : La dynamique du couvert végétal.....	171
8.1. La valeur indicatrice du changement et de dynamique végétale.....	173
8.2. Évaluation de la dynamique de la couverture végétale intra-annuelle.....	176
8.3. Évaluation de la dynamique végétale : année sèche-année pluvieuse.....	177
8.4. Caractéristiques de la dynamique végétale à long terme.....	180
8.5. Synthèse.....	193
TROISIEME PARTIE : DYNAMIQUE D'ENSABLEMENT ET PERSPECTIVES D'ACTION.....	195
Introduction.....	196
Chapitre 9 : Analyse diachronique à long terme.....	198
9.1. Le choix des images et des dates.....	198
9.2. L'ensablement dans les années 50.....	199
9.3. L'ensablement dans les années 70.....	200
9.4. L'ensablement dans les années 80.....	201
9.5. L'ensablement dans les années 90.....	202
9.6. L'ensablement en 2003.....	203
9.7. L'ensablement en 2011.....	204
9.8. L'ensablement en 2016.....	205
9.9. Analyse de la dynamique temporelle d'ensablement.....	206
Chapitre 10 : Suivi - monitoring de la dynamique d'ensablement.....	209
10.1. Suivi- monitoring d'ensablement sur une temporalité annuelle.....	209
10.2. Suivi- monitoring d'ensablement sur une échelle spatio-temporelle fine.....	219
Chapitre 11 : Les facteurs de la dynamique d'ensablement.....	226

11.1. Le facteur climatique	226
11.2. Le facteur topographique - relief	231
Chapitre 12 : Interaction entre l'action éolienne et l'action hydrique.....	235
12.1. Redistribution du matériel.....	235
12.2. Remodelage des formes sableuses	236
12.3. Réinjection de matériels sédimentaires.....	239
12.4. Quelques indices d'ancienneté des formes sableuses.....	247
12.5. Synthèse	250
Chapitre 13 : Analyse spatio-temporelle régionale de l'ensablement.....	251
13.1. La dynamique d'ensablement dans le site de Dar Chioukh	252
13.2. La dynamique d'ensablement dans le site du Zahrez Gharbi	256
13.3. La dynamique d'ensablement dans le site de Had Sahary.....	264
13.4. L'analyse spatio-temporelle combinée des quatre sites.....	269
Chapitre 14 : Prospective de la désertification	273
14.1. Prévenir la dégradation par la restauration	273
14.2. Prémices d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel.....	275
14.3. Synthèse	283
Conclusion générale	284
Bibliographie.....	291
Liste des figures.....	306
Liste des tableaux	310
Table des matières.....	311
Annexe.....	315

Introduction générale

Depuis la conférence de Nairobi en 1977, la désertification est l'objet d'une attention internationale accrue. Car, elle représente l'un des plus grands défis environnementaux, avec le risque de détérioration des zones sèches de prairies et de pâturage, et menace les conditions de vie de la population. Mais, l'analyse des causes et des conséquences de la dégradation des terres des zones arides et semi-arides reste complexe. Elle implique de multiples variables entrelacées (biophysiques, anthropogéniques et climatiques) qui concourent simultanément aux changements dans les domaines écologiques et sociaux des zones vulnérables (Oswald & Harris, 2016).

Toutefois, de nouvelles connaissances ont été acquises engendrant l'évolution de la définition de la désertification. Les dernières constatations concernant la compréhension des variations climatiques, confirmées par de nombreux travaux (Tucker et al., 1991 ; Herrmann et al., 2005 ; Anyamba & Tucker, 2005), ont pu montrer un lien étroit entre la végétation et la variabilité des précipitations. Tucker et Nicholson (1999) ont ainsi noté que la limite nord de végétation verte du Sahel fluctuait jusqu'à 150 km entre une année humide et une année sèche précédente sous l'effet des précipitations. De même, la végétation dans les années 90 a atteint les mêmes limites nord qu'avant la grande sécheresse ayant sévi entre les années 70 et 80. La révélation de ces fluctuations suggère alors l'existence du modèle « d'un désert fluctuant » en perpétuel mouvement expansion/contraction plutôt que d'un « désert en expansion continue » comme supposé auparavant. Ceci amène Herrmann & Hutchinson (2005) à évoquer le changement des concepts qui encadrent le débat sur la désertification.

Ces découvertes ont été rendues possibles grâce à l'exploitation des archives d'observations par satellite. Assurément, la désertification et la dégradation sont des phénomènes à long terme. L'historique d'imagerie des capteurs d'observation de la Terre qui remonte à plus de quatre décennies offre ainsi une opportunité considérable pour les études diachroniques, de monitoring, de suivi et de surveillance de ces processus.

Le cas d'étude, la steppe est située sur la marge nord du grand désert du Sahara et peu éloignée de la surface maritime méditerranéenne. Les zones steppiques algériennes objet de notre travail, ont des caractéristiques typiques d'un climat semi-aride ; de faibles précipitations marquées par une saisonnalité à forte sécheresse estivale, des températures excessives et accentuées par des vents du sud qui charrient l'air chaud saharien. L'évapotranspiration consomme entre 70% et 90% des pluies. Les précipitations sont néanmoins suffisantes pour permettre, d'un côté, le développement d'une végétation naturelle pérenne adaptée à ces conditions et, de l'autre, autoriser certaines activités agricoles sur des sols sableux, facilement érodables, ce qui les expose à la dégradation par l'érosion éolienne.

Dans cet environnement en évolution, nous avons porté notre choix vers la région de Djelfa, située en plein centre des zones steppiques pour étudier la dynamique environnementale.

Cette région et le site de Daïet Chouiouia présentent des formes éoliennes intéressantes (Figure 1).

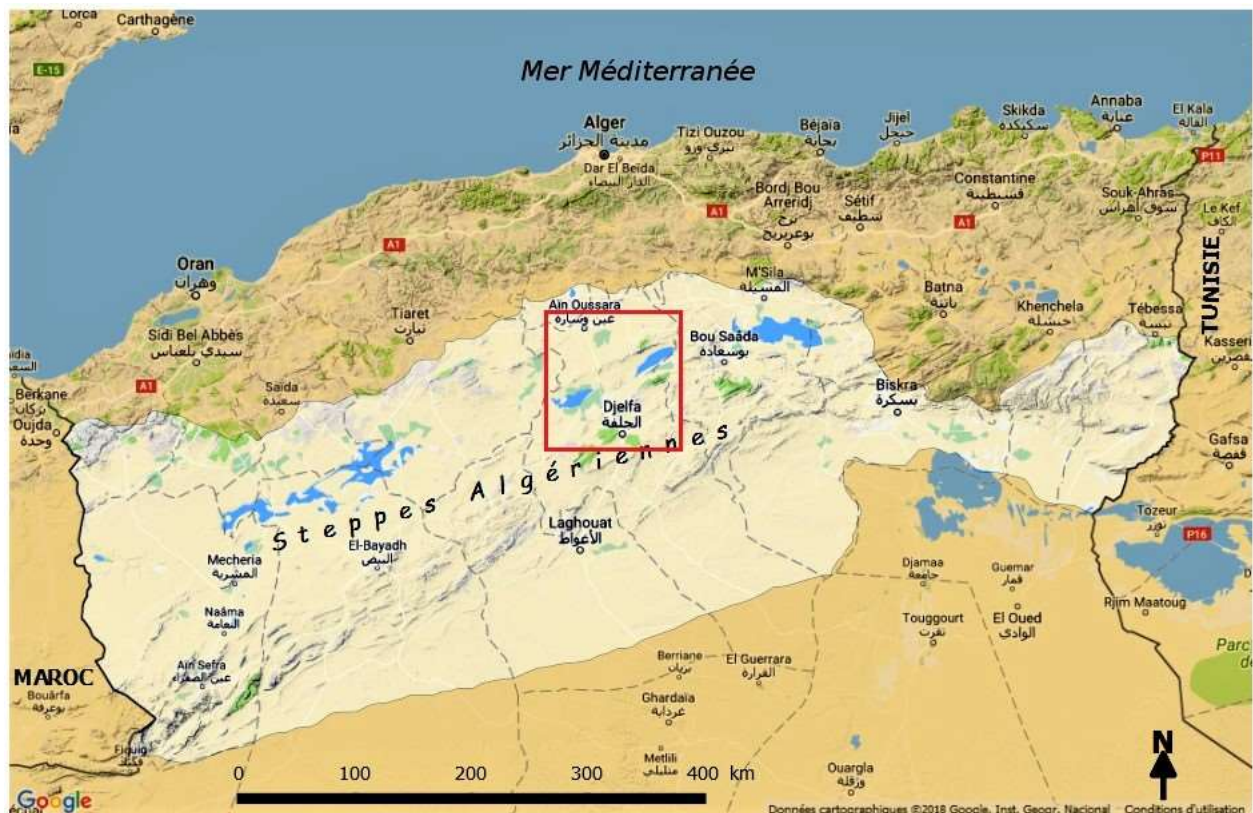


Figure 1 : Délimitation de la steppes algériennes, et localisation de la région d'étude (rectangle rouge)
Fond cartographique image Google

Longtemps, les parcours steppiques ont été voués principalement au pastoralisme associé à une forme de céréaliculture de subsistance contenue dans des zones traditionnellement réservées. Mais l'exploitation industrielle excessive de l'Alfa, la forte mécanisation de l'agriculture à la place des techniques traditionnelles et la course au défrichement ont conduit au remplacement progressif de la végétation pérenne par des espèces saisonnières, ainsi qu'à l'extension des espaces labourés en deçà du seuil de rentabilité sur des terres marginales. Durant les années sèches, la terre labourée reste dénudée et livrée sans protection à l'érosion. Cela contraste avec l'état des surfaces pendant les années humides durant lesquelles rien ne laisse entrevoir la fragilité de ces espaces.

Mais le principal constat dressé, aujourd'hui, est celui d'une métamorphose du pastoralisme traditionnel vers l'agro-pastoralisme, le recul de la superficie des steppes et la dégradation de la qualité des espèces pâturables, l'augmentation de l'érosion éolienne avec l'apparition de zones sableuses à l'intérieur même de ces régions. Le projet phare du « Barrage Vert » lancé dans les années 70 - censé protéger la région et le nord de l'Algérie - n'a été réalisé que partiellement avec un taux de réussite très mitigé, dont les bénéfices sont, d'après les spécialistes, discutables.

Un bilan moins pessimiste laisse apercevoir un environnement en mutation. Le paysage de Djelfa des années 2015 est bien différent des témoignages rapportés en 1887 par le Dr. Bernard d'une mer d'alfa et d'une faune riche composée de gazelles et de hyènes. Mais, il est également un paysage en nette amélioration, éloigné des images des années 80 lorsque l'ensablement dominait la terre et les parcours, conséquence de la grande sécheresse climatique de cette période. Désormais, des plaines cultivées en céréaliculture côtoient les parcours. Des parcelles sont cultivées en agriculture intensive, par arrosage, d'autres en culture arbustive. Dans cette amélioration, l'Etat, à travers ses institutions, fournit des efforts colossaux pour, d'un côté, lutter contre la dégradation des terres et des zones de pâturage, de l'autre, accompagner la population locale et les éleveurs pendant cette phase de transition.

L'objectif ici est de dresser les grandes lignes de l'état actuel des milieux steppiques, en insistant sur la dynamique des sujets étudiés, tout en essayant de répondre aux questions suivantes. Le climat comme facteur déterminant de couverture végétale et de l'activité culturale, laisse-t-il entrevoir des caractéristiques de variation dans le temps et dans l'espace ?

La principale interrogation concernant l'état de surface est « que s'est-il passé ? » Cette question intègre le temps, l'espace et la thématique. Nous abordons l'évolution d'occupation du sol et ses caractéristiques protectrices, la manifestation des agents géomorphologiques actifs et leur tendance spatio-temporelle. L'analyse des relations entre déterminants et conséquences retient une attention particulière pour comprendre la dépendance, notamment, entre la fluctuation d'ensablement et les variations climatiques. Dans quelle mesure les séquences sèches peuvent-elles avoir un impact sur l'ensablement et, de même, sur le retour des années humides ?

La région steppique semi-aride et Djelfa se trouvent assujetties à deux formes opposées d'érosion : hydrique et éolienne. Dans un tel paysage l'interaction entre les deux formes donne lieu à des caractéristiques intéressantes mais les plus difficiles à traiter. Il convient donc, d'adapter la méthode d'étude à cet environnement spécifique. Signalons que le sable nous intéresse en tant qu'unité globale, nous n'avons donc pas cherché à discriminer les différents types de sables par approches spécifiques.

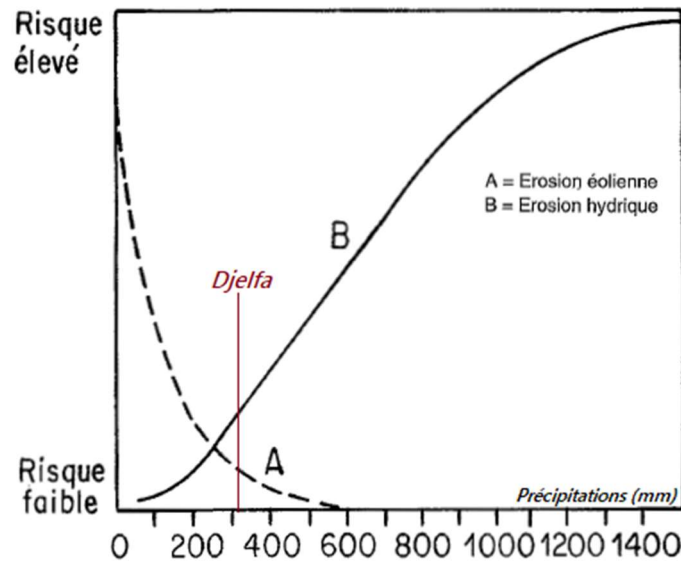


Figure 2 : Risques d'érosion hydrique et éolienne en fonction de la pluviométrie (WMO, 1983)

Au travers de la littérature, nous constatons que la plupart des ouvrages traitent l'érosion dans sa forme hydrique. Ceux qui traitent la forme éolienne sont beaucoup moins nombreux. Et, encore plus rares, ceux qui traitent à la fois de l'érosion hydrique et éolienne. Ce manque de place pour l'érosion éolienne se manifeste dans l'appel de Mainguet & Dumay (1996) dans l'article intitulé : « Pourquoi le Réseau Erosion doit-il faire une place à l'érosion éolienne ? » publié dans la revue « érosion de l'IRD » spécialisée dans l'érosion hydrique. Nous pouvons remarquer aussi que l'ouverture multidisciplinaire est beaucoup plus orientée vers d'autres disciplines (sociologie, géologie, écologie...) que l'ouverture disciplinaire entre les deux formes d'érosion. La raison la plus simple qui pourrait être avancée est que les deux formes cohabitent peu, et partagent peu le même espace géographique, l'augmentation d'activité de l'une étant synonyme de la baisse de l'autre. En plus, dans la plupart des régions, il y a une forme de domination. Mais, dans les régions semi-arides, par définition, les deux processus d'érosion coexistent. La Figure 2 est simpliste, elle ne tient pas compte des interactions complexes entre les deux, notamment, en termes de fourniture. Pour répondre à l'ensemble de ces interrogations, la thèse est développée en trois parties :

La première partie regroupe quatre chapitres pour présenter le contexte géographique régional et scientifique. Après la présentation du cadre géographique régional, il est question de présenter les multiples facettes de la dynamique socio-environnemental de l'évolution ancienne du climat, à la mutation des systèmes écologiques et transformations des formes d'exploitation des ressources en sol et végétales. Dans le chapitre suivant, à partir de l'analyse de la littérature, nous développerons quelques méthodes cartographiques permettant d'observer les changements afin d'appréhender la désertification et la dégradation des terres. Dans la même démarche, depuis la littérature, nous passons en revue des outils pour caractériser le milieu semi-aride.

Afin de mettre en exergue la dynamique d'état de surface, un site d'étude a été retenu, il sera présenté au même niveau que les données collectionnées pour mener cette étude. Le dernier chapitre de cette partie est consacré aux méthodes de traitement des données.

La deuxième partie, est réservée à l'étude de quelques processus de hautes steppes. Les deux paramètres du climat les plus déterminants dans les études de dégradation et d'ensablement, à savoir les vents et les précipitations. La sécheresse climatique est examinée à travers la fluctuation des précipitations. Le recours aux indicateurs spécialisés permet une meilleure appréciation des caractéristiques climatiques dans l'espace et dans le temps. Il est question, ici, d'analyser la sécheresse et différencier ses formes. Une méthodologie à multi-échelle de temporalité est suivie, couplée à la recherche statistique des ruptures.

La région est le siège de dépressions fermées qui donnent naissance à d'endoréisme, les paramètres hydromorphiques d'un bassin endoréique seront évoqués à travers des indicateurs. Les points les plus marquants, les bordures de la daïa et l'équilibre sédimentaire seront développés. La dynamique peut être examinée et comprise à l'écart de la transmutation du mode social qui affecte les mécanismes d'exploitation des terres. Le deuxième chapitre traite cette dimension. En effet, la végétation pérenne recule partout pour laisser place à l'agriculture céréalière. A travers quelques sites de références, nous remontons la chronologie à 60 ans pour dresser un état comparatif. Sur une échelle temporelle, basée sur des images satellitaires récentes, nous examinons la dynamique interannuelle (année humide – année sèche) et la dynamique saisonnière (printemps – été).

La troisième partie, réservée à la dynamique d'ensablement, car il est considéré comme l'ultime indicateur de l'état de dégradation. La dynamique d'ensablement est abordée par une méthode quantitative. Cette démarche se base sur la mesure surfacique depuis des supports variés, photos aériennes et images satellitaires. Le rythme des fluctuations d'ensablement ainsi que l'amplitude des séquences de progression et de régression seront analysés à différentes échelles spatio-temporelles. Enfin, pour contrer et maîtriser la dégradation, nous passons en revue les travaux de réhabilitation et restauration entrepris sur le site. Dans une démarche prospective de la désertification, deux méthodes de veille seront développées. Nous terminons par une conclusion générale sous forme de discussion.

PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET SCIENTIFIQUE

Chapitre 1 : Régions steppiques marquées par une forte dynamique.....	12
Chapitre 2 : Evolution des méthodes de diagnostic.....	55
Chapitre 3 : Site d'étude, outils et données.....	68
Chapitre 4 : Traitement des images aériennes et satellitaires.....	97

Chapitre 1 : Régions steppiques marquées par une forte dynamique

1.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons d'abord présenter le cadre structural et les entités du paysage de la région de Djelfa. Afin d'analyser la dynamique actuelle au regard des événements passés, nous prenons un recul suffisamment long. L'évolution du climat sera revue, depuis le Soltanien et la présence humaine depuis le Néolithique. La présentation de cette dernière, suit l'ordre chronologique des grands événements de la présence néolithique à notre ère en évoquant les différents passages (Romains, arabes, Ottomans et français). À chaque étape, nous évoquerons l'impact laissé sur l'environnement. Nous évoquerons les changements climatiques passés, ce trait de caractère étant souvent considéré comme long et graduel. Un focus sera fait sur les séquences de variations climatiques courtes et abruptes, résultats des dernières recherches dans ce domaine.

Le caractère principal du climat est sa forte variabilité spatio-temporelle. L'hydrologie caractérisée par des bassins endoréiques. Une forte dynamique socio-environnementale se met en place et se manifeste par l'évolution du mode d'exploitation des ressources naturelles (sols et végétation). Enfin, il sera l'occasion de questionner le projet « Barrage-Vert » développé comme barrière végétalisée pour lutter contre la désertification.

1.2. Entités du paysage de l'Algérie steppique à Djelfa

Assurant la transition entre le nord et le sud de l'Algérie, la Wilaya (département) de Djelfa présente quatre entités distinctes du Nord au Sud. Au Nord, les plaines de Ain Oussera sont une zone relativement plane entre 650 et 850 m d'altitude. Au sud de ces plaines, on trouve la dépression des Chotts, Zahrez Gharbi et Zahrez Chergui. La topographie change à la rencontre de la chaîne montagneuse des Ouled Nail, l'ossature de l'Atlas Saharien. Enfin au Sud le plateau désertique qui succède au piémont de l'Atlas saharien. Nous développons les trois unités du paysage situées au nord, autour de la ville de Djelfa (Figure 3).



Figure 3 : Carte des principales unités du paysage de la région de Djelfa (fond cartographie Google)

- A. **Les plaines de Ain Oussera** : piémont sud de l'Atlas Tellien, elles forment une unité qui se prolonge du côté occidental par les plaines de Sersou. Ces plaines de formation d'argile sableuse rouge, ont entre 650 mètres et 850 mètres d'altitude. Elles sont compartimentées en trois secteurs séparés par de petites collines érodées : la vallée de l'Oued Touil à l'ouest, la plaine de Birine à l'est et les plaines de Ain Ousséra au centre. Leur limite sud est le premier pli de l'Atlas Saharien les séparant des dépressions des Chotts.
- B. **La zone des dépressions des Chotts** : Les dépressions des Chotts marquent l'emplacement d'un synclinal (Pouget, 1980) coincé entre les premiers plis de l'Atlas

Saharien au Nord et le cœur de l'Atlas Saharien par le Sud. Les eaux convergent vers les sebkhas des Zahrez Gherbi et Zahrez Chergui. La topographie entre les deux cuvettes est un seuil peu élevé. L'altitude du Zahrez Gherbi se situe autour de 830 m, celle du Zahrez Chergui autour de 750 m. Pouget (1980) remarque que « ce synclinal est le prolongement vers l'Ouest de la grande faille de Bou Saada ». Cette région contient des formes typiques des régions semi-arides à arides :

- Les deux étendues d'eau des Zahrez (Zahrez Gherbi et Zahrez Chergui), par leur intérêt écologique, (floristique, espèces rares et protégées en Algérie, et faune spécifique), sont inscrites depuis 2003 sur la liste RAMSAR de Convention sur les zones humides (TECSULT International, 2008; Ledant, 1986; DERRADJI, s. d.; Ramsar, 2016).
- Le cordon dunaire qui forme une ligne presque continue s'étalant sur 150 km sur les bordures sud des deux Zahrez, bloqué au Sud par le relief de l'Atlas Saharien. Sa largeur varie entre 2 et 3 km.

C. **Zone de l'Atlas saharien** : lié au relief plissé de l'Atlas, le rocher de sel (Figure 4) se dresse à 20 km au sud de la bordure méridionale du Zahrez, presque à mi-distance entre le Zahrez et Djelfa. C'est un diapir de roche triasique, qui présente une forme circulaire de 1 km de diamètre, c'est une formation résultant de la dissolution de la partie supérieure. La roche verte au-dessus fait partie du "cap-rock", éléments insolubles qui se concentrent en surface au fur et à mesure de la dissolution du sel. La dissolution du sel forme une trainée blanche visible en surface dans les cours d'eau. On le retrouve dans les sols, mais également dans les nappes phréatiques en aval.



Figure 4 : Rocher de sel près de Djelfa (octobre 2013, 34°50'5"N - 3° 5'30"E)

- L'Atlas se caractérise par l'alignement du relief des monts des Ouled Naïl, sous forme d'une chaîne plissée d'orientation SW-NE. Ces structures anticlinales encadrent des dépressions crétacées dont la plus importante est le synclinal de Djelfa » (MRE & IDOM, 2005). Cette partie est formée de petites plaines parfois fermées dont l'altitude varie entre 900 et 1.600 mètres. Les plaines les plus importantes sont celles de Maâlba et de Mouilah à l'Est de la ville de Djelfa.

1.3. Histoire environnementale

« La dégradation environnementale actuelle, souvent évidente, aurait des antécédents historiques » (Côte, 2014). L'examen de la dimension historique, revient à questionner les transformations opérées dans le passé, sur les modes d'exploitation des ressources, et leur effet sur la régénération ou la dégradation des ressources. Mais, l'histoire environnementale, écrit Davis (2012), « est davantage qu'une spécialité s'ajoutant à l'histoire politique, sociale ou économique », histoires qui permettent de relier le passé au présent.

1.3.1. Néolithique

L'homme du néolithique n'a pas laissé d'écrits car l'écriture n'était pas encore née, mais dans l'Atlas saharien et à Djelfa, l'homme qui a conduit la transition néolithique nous a transmis une description de son environnement par des gravures sur pierre. Il vivait dans une région de savane, environnement attesté par les vestiges d'une cinquantaine de sites de gravures qui ornent les falaises et les parois rocheuses de l'Atlas. Bien que ces gravures subissent les outrages du temps, elles nous livrent encore le témoignage d'une autre époque. Elles racontent des scènes de la vie, on note notamment la présence d'animaux d'une faune très différente de celle de notre époque. Elles nous renseignent sur la présence des conditions plus humides, ce qui permet de nous rendre compte des grands changements environnementaux opérés il y a cinq à huit mille ans.

Dans les environs de Djelfa, Roubet & Amara (2016) ont pu répertorier et cataloguer 55 stations et sites, principalement centrés sur Messaâd, Ain el Ibel, Moudjbara, Ain Naga, Sidi Makhoulf et Nt'sila. Dans ce musée à ciel ouvert, il est relativement aisé d'identifier les espèces de la grande faune des savanes : rhinocéros, éléphants, buffles, lions, antilopes, antilopes chevalines, gazelles, autruches, bovins. Camps (1978) distingue plusieurs styles, dont celui de Djebel Zakar près de Djelfa. Au Djebel Amour, on reconnaît des animaux domestiques gravés : béliers paissants, coiffés de bonnets décorés ou ceints de colliers tressés.



Figure 5: Site de gravures Djebel Zakar (2013), rhinocéros

Les datations des gravures de Djelfa, les classent ainsi : les gravures d'Ain Naga à (5550 ± 220 av), et celles de Safiat Bou Rhenan à (5020 ± 170) av selon Roubet & Amara (2016). Les premiers bergers gardaient des troupeaux de moutons sauvages, probablement il y a plus de 10 000 ans, pour passer progressivement à la domestication des moutons et faire de l'élevage. Par la suite, la diffusion de la domestication a été relativement rapide après 8 500 av (Vigne *et al.*, 2011; Ameisen, 2013; Roubet & Amara, 2016). Il est peu probable que ces populations de chasseurs et de pasteurs aient eu une grande influence sur l'environnement (Pouget, 1980).

1.3.2. Epoque romaine

L'occupation romaine de l'Afrique du Nord a duré six siècles. Avec l'installation de colonies de vétérans sous les empereurs romains Claudius (41-54 apr JC), Nerva (96-98 apr JC) et Trajan, l'urbanisation romaine a progressé en Algérie. Ces afflux ont abouti à l'établissement de villes comme Tipasa, Cuicul (Djemila), Thamugadi (Timgad) et Sitifis (Sétif). Au sud de Djelfa, la ville de Massâad « *CastellumDimmidi* » était occupée de 198 à 238 environ par une garnison romaine (MacKendrick, 2000). Elle fut une place avancée dans l'Afrique romaine. La ville de Messâad est située sur le chemin de SW-NE, reliant Laghouat à Stifis (Sétif), en passant par Aïn-Erriche. La prospérité des villes à cette époque dépendait essentiellement de l'agriculture.

Les limites méridionales étaient parfois matérialisées par des Fossatum¹(Baradez, 1949), qui est un « fossé-frontière ». Cette fortification était l'une des formes de construction de l'espace à cette période. Car l'opposition berbère à la présence romaine était presque permanente.

En termes d'impact, pour Monjauze (1982), l'Atlas saharien s'est garni de colonies paysannes, notamment à « Castellun Dimmidi », près de la ville de Messad et autour de Laghouat, il évoque : « La trace des défrichements est particulièrement apparente car, même sur des sols qui ont pu lui convenir en tant que paraclimax pastoral substitut de la forêt de Pin d'Alep, l'alfa ne s'y régénère plus ». L'Afrique du Nord devint le « grenier de l'empire ». Les céréales, les plantations de vignes et d'oliviers, écrit (Le Houérou, 1975) occupèrent plusieurs millions d'hectares dont une grande partie dans la zone aride entre les isohyètes actuels de 200 à 400 mm. Le Houérou a qualifié, « d'agriculture minière » dont l'érosion a sans doute été la principale raison du déclin. Par ailleurs, l'augmentation de l'urbanisation et l'extension des zones cultivées pendant la domination romaine, remarque (Metz, 1993), « ont provoqué des dislocations massives de la société berbère. Les tribus nomades ont été contraintes de s'installer ou de quitter les parcours traditionnels. Les tribus sédentaires ont perdu leur autonomie et leur connexion avec la terre ».

Les deux autres occupations de l'Afrique du Nord, des Vandales au V^{ème} siècle et des Byzantins au milieu du VI^{ème} siècle, furent limitées dans l'espace. Ils se heurtèrent aux mêmes

¹ Pour aller plus loin, consulter le livre référence « Fossatum Africae: Vue aérienne de l'organisation romaine dans le Sud Algérien » de J.Baradez 1949.

cavaliers, aux mêmes tribus que les romains. Les Byzantins restent un siècle en fortifiant les villes contre les attaques des paysans des plaines et des massifs montagneux (Inal, 1992).

1.3.3. L'avènement de l'islam

Considéré comme le fait le plus marquant de l'histoire du Maghreb. Avec l'arrivée des Arabes en 647, ils trouvèrent un territoire affaibli par son isolement. Contrairement aux occupations précédentes, l'islam pénètre tous les segments de la société, emportant l'adhésion de la population, en unifiant villes et tribus. « Les conquêtes de l'Islam », écrit l'historien belge J. PIRENNE, « furent suivies d'un véritable renouveau de l'économie universelle », la conquête arabe pour Lacoste (1953)² est destructrice de la féodalité, crée un capital carrefour commercial, amène l'établissement d'une aire unifiée d'échanges de marchandises, d'hommes et d'idées. Mais le processus d'arabisation et d'islamisation de cette région s'est fait sur une durée longue et compliquée. Les Rustoumides (761-909) ont gouverné la majeure partie du Maghreb central depuis Tahirt (Tiaret) ville des plaines intérieures, située à 190 km au NW de Djelfa. Sous cette dynastie, il y a eu une prospérité économique et culturelle. La campagne était exploitée par la ville en pleine croissance. Le territoire s'est ouvert également par le sud, en libérant le chemin des caravanes qui traversaient la steppe pour l'établissement du commerce transsaharien. Comme écrit Thiry (1995) : « Le commerce saharien, du moins dans le volume que nous lui connaissons, semble bien avoir été une initiative et une réussite islamique ».

Des troubles régionaux dans la Méditerranée (Le pillard de Gênes, de Pise et la perte de la Sicile en 1061) perturbent le commerce côtier traditionnel (Le kairouan). La conséquence fut le déplacement des lignes de commerce transsaharien vers l'ouest, renforçant les chemins menant aux marchés d'Espagne. À cette époque, la richesse des dynasties était assurée par les échanges commerciaux, et notamment par la liaison entre le commerce transsaharien et le commerce maritime. La route des caravanes était créatrice de richesse et « urbanisatrice³ ». De nouveaux centres se développent et prospèrent comme la « Kalâa des Béni Hammad » [1007-1152]⁴ située à 185 km au nord-est de la ville de Djelfa. Vers le milieu du XI^e siècle, l'arrivée massive de tribus nomades arabes (Les Béni Hilal) modifia le mode d'exploitation des ressources. Au XIV^e siècle, Ibn-Khaldoun (1374), note dans « Prolégomènes » que les nomades arabes laissent en friche la plupart des terres cultivables situées en plaine pour le pâturage. Les historiens russes GREKOV et IAKOUBOWSKI : « La Horde d'Or », cités par Lacoste (1953) ont montré également qu'au Maghreb toute poussée (avancée) de la steppe et des nomades a

² Yves Lacoste est primé par le prix international de géographie Vautrin-Lud de l'année 2000

³ Voir le livre de Mar Côte, Le Sahara, barrière ou pont, 2014

⁴ <https://whc.unesco.org/fr/list/102>

comme préface un changement de structure des sociétés, qui passent à des formes féodales. Lacoste (1953), conclut que « les invasions nomades (Hilaliens) ne semblent pas être une cause de la décadence, mais une conséquence de la féodalisation (...). Les guerres, l'insécurité, les perceptions d'impôts, entraînent l'abandon des terres par les fellahs qui, soit se réfugient dans les montagnes, soit abandonnent la culture pour ne se consacrer qu'à leur troupeau ».



Figure 6 : Caravane en marche (Paul Lazerges, 1892)

Les Almoravides, prenant Marrakech comme capitale, ont élargi leur pouvoir sur le Maghreb jusqu'à l'est d'Alger et en l'Espagne (Beaumier, 1860; Ruthven & Nanji, 2004). Époque qui dura jusqu'en 1147, « Bien que ce ne soit pas une période totalement pacifique, l'Afrique du Nord en bénéficia économiquement et culturellement » (Metz, 1993). Les villes qui se trouvent sur le chemin du commerce prospèrent. La région steppique se trouve sur la route Nord-Sud, et Est-Ouest, la ville de Messâad, ancien centre, localisée sur le chemin des caravanes, vers l'est, à destination de Constantine et, au sud, vers le bas Sahara. Durant cette époque, les nomades exerçaient leur fonction de convoyeurs de caravanes, et les villes retrouvent le foisonnement de leur commerce.

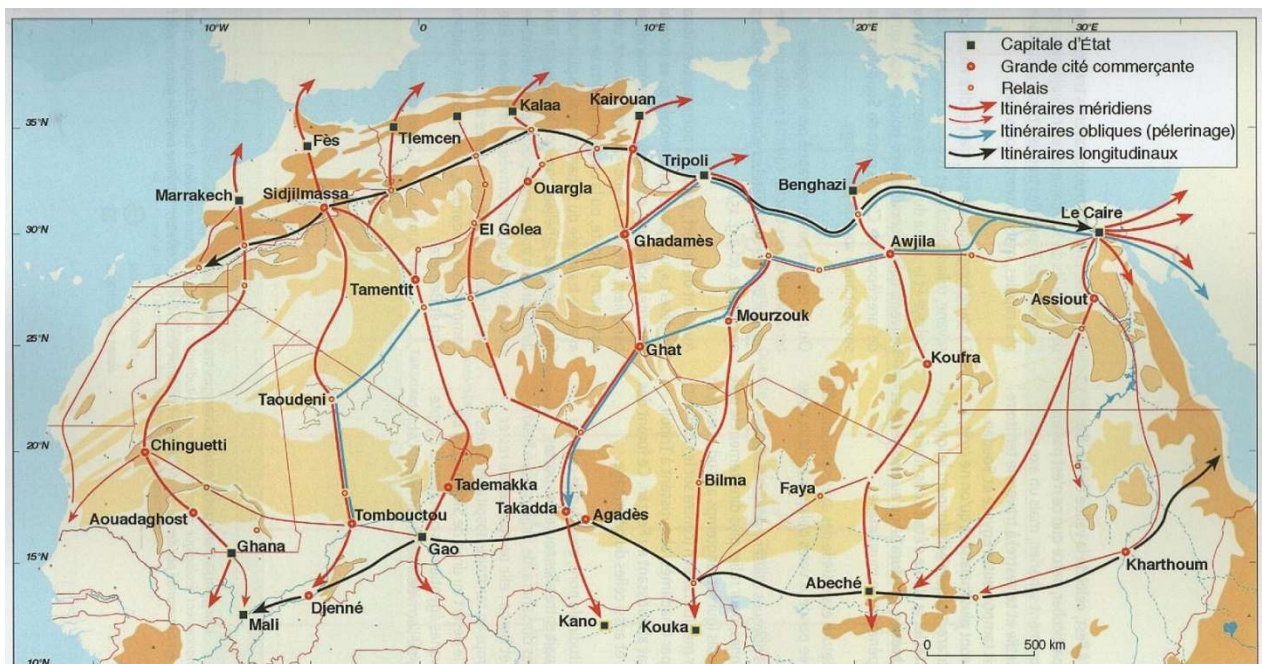


Figure 7 : Le Sahara des caravanes, une dizaine d'itinéraires se sont développés au cours des siècles. Cependant ils n'ont pas fonctionné simultanément (Côte, 2014)

1.3.4. Epoque Ottomane

Débute au 16^{ème} siècle : l'administration de l'époque avait, comme but principal, de faire rentrer les impôts dans les caisses du Beylik. Les Ottomans (Turcs) incitaient dans l'Ouest, les tribus de la steppe à rester au sud, donc à limiter leur rayon de migration (Couderc, 1979, cité par Hadeid, 2008). Ce qui conduit à déduire que le mode de vie prédominant dans les steppes était toujours l'élevage.

Clamé comme étant venus aider les arabes (algériens) à se libérer de l'oppression turque, les français restent un siècle et 32 ans, ils occupent tout le territoire, s'approprient les meilleures terres où les sols sont le plus fertiles.

1.3.5. Période française

Encouragé pendant la seconde république, et dès le début de la colonisation (1830), l'afflux des Européens est accentué par l'acquisition gratuite des terres. Dans les plaines du Mitidja algérois, le flux des colons européens a engendré le reflux des locaux vers les montagnes environnantes.

Parmi les fondamentaux d'adaptation de la population locale face au climat imprévisible, figure le mode de gestion des récoltes. L'excédent d'une bonne année était stocké pour contrer (pallier) les déficits d'une année sèche. Il se trouve que des stocks de céréales ont été vendus aux spéculateurs européens après l'augmentation du cours du blé en Europe. Mais l'arrivée de la sécheresse, entre 1865-1868, additionnée à d'autres évènements, a abouti à un véritable désastre : récoltes médiocres (presque nulles durant cette période), céréales détruites, pâturages impossibles. S'ajoutent à cette sécheresse l'invasion de criquet pèlerin en 1866 et la défaillance de gestion de l'administration qui n'a pu empêcher la transformation de ces incidents en catastrophe. Il en résulta une terrible famine qui dura de novembre 1867 à juin 1868 et fit périr hommes et bétail. Des spécialistes de cette période, Taithe (2010), ont évalué qu'entre 10 % et un tiers de la population sont morts, d'autres comme Sari (2010), précisent qu'il y a eu 820 000 morts sur une population totale estimée à l'époque à 4,2 millions d'habitants. En effet, la mémoire collective est riche d'enseignements : dans la campagne, on raconte qu'à cette période on mangeait les racines des plantes pour pallier l'absence de récolte.

Le récit d'un environnement en voie de dégradation triomphe, la responsabilité de cette dégradation est souvent attribuée aux paysans, stigmatisant le mode d'exploitation des ressources et les pratiques traditionnelles. Davis (2012)⁵ a analysé l'évolution du discours environnemental colonial, elle écrit à propos de la dégradation « Le récit n'est plus seulement une simple rhétorique maniée par des colons en colère, il est un outil destiné à modifier les lois

⁵ Livre « Les mythes environnementaux de la colonisation française au Maghreb », de Diana K. DAVIS, paru en 2007. En 2008, il a reçu le prix de l'American Society for Environmental History (Traduit en français en 2012).

et les politiques dans le but de priver un peu plus les Algériens de leurs droits ». Entre 1870 et 1880, la loi est modifiée pour faciliter le transfert privé de terres aux colons et poursuivre l'appropriation de la terre par le gouvernement et sa distribution aux colons. Dans la partie occidentale de l'Algérie, au massif montagneux de l'Ouarsenis, Sari (1977), a associé chronologiquement l'accélération de l'érosion au défrichement perpétré par la population, suite à leur exode dans le massif. L'exode résulte de la déposssession des terres des fellahs (paysans) en plaine par des colons. la déposssession a engendré « des dizaines de milliers de musulmans non qualifiés, arrachés à leurs terres, se promenaient dans les villes ou dans les zones côtières à la recherche de travail » (Metz, 1993).

Par ailleurs, en plus de payer des taxes traditionnelles (aumône), les musulmans payaient des taxes du régime colonial plus élevées que les Européens (Metz, 1993). Cependant, l'investissement de ces recettes fiscales profitait essentiellement aux centres urbains des colons (écoles, routes, bâtiments...) tandis que les zones rurales algériennes en bénéficiaient très peu. Sans qu'il soit matérialisé par le Fossatum comme à l'époque romaine, le fossé existait, la fracture était de nature socio-économique. L'un des aspects de cette forte disparité entre les colons et la population locale, est le mode de mobilisation et d'exploitation des ressources. En effet, l'agriculture des colons occupe les meilleures terres dans les plaines les plus fertiles. En plus des ressources, elle exploite aussi et à grande échelle la main d'œuvre locale, sa production est destinée essentiellement à l'export. De l'autre côté, l'agriculture des Algériens est dépossédée des terres riches, repliée en petites parcelles de terres marginales. Elle manquait d'investissement, tentait de répondre aux besoins de l'auto-suffisance, et demeurait vivrière.

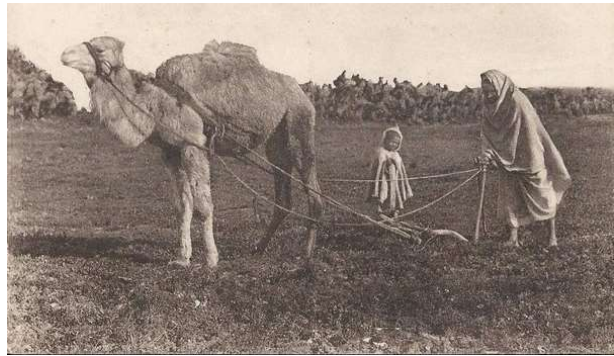


Figure 8 : Labourage d'époque, un dromadaire traîne une charrue en bois (Ancienne carte postale)

Fin du 19^{ème} siècle, la colonisation française bat son plein au Sahara ainsi que dans les hauts plateaux. La société bédouine subit une rupture brutale détruisant les formes anciennes d'organisation et bouleversant le mode de vie traditionnel basé sur l'exploitation raisonnée des ressources. Des récits poignants témoignent des atrocités, actes commis contre la population. Isabelle Eberhardt vit le nomadisme en Algérie entre 1897 – 1905, elle rapporte comment le colonialisme s'empare des terres de petits fellahs arabes, en les rendant ouvriers auprès des nouveaux propriétaires. Ceux qui s'opposent sont amenés mains ligotées, pieds nus marchant sur les cailloux à Tâadmit (50 km SW de Djelfa). Ce site était appelé « l'enfer du Djebel-Amour » (Vallier, 1901), « dont le nom seul fait frémir les Arabes d'Algérie » (Eberhardt & Barrucand, 1920). A travers la recommandation de Chailley-Bert (1910) transparaît l'état d'esprit d'expansion de l'époque, il écrit « Il est infiniment probable que les millions d'hectares des hauts plateaux peuvent être colonisés aussi bien que les 14 millions d'hectares du Tell ».

Cette politique d'oppression et de dépossession a anéanti la paysannerie vivrière traditionnelle basée sur le savoir-faire ancestral, en faveur d'une culture de colons. Il en résulte, une situation inédite de pauvreté, d'érosion des liens de la communauté bédouine et de désagrégation de la société. Ce concert de tragédies a laissé des plaies dans la mémoire.

En termes de biodiversité, jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la steppe préservait encore une richesse floristique et une diversité faunistique. En effet, lors de sa traversée à cheval en 1887, du Nord vers le Sud, le Dr Bernard consigne entre Ain-Ouessara et Djelfa, la présence d'une mer d'alfa dans une grande étendue d'espace vert, parsemée par quelques arbres de térébinthes (*Pistacia terebinthus*). Ces espaces sont animés par une faune variée, des insectes comme les coléoptères, des reptiles comme des lézards et des serpents vipères, des gerboises des steppes en grand nombre, des gazelles, des vautours, des chacals et des hyènes.

1.4. Un climat à forte variabilité dans l'espace et dans le temps

1.4.1. Dynamique climatique du Soltanien à notre ère

Les modèles de reconstitution du climat intervenus depuis 30 KP BP montrent que ce dernier, à une échelle millénaire, a subi des variations climatiques évoluant entre phase humide et hyperaride (Ballais *et al.*, 1979; BALLAIS, 1991; Ballais & Benazzouz, 1994; Coque & Jauzein, 1965; Damnati, 2000; Dorize & Rognon, 1979; Le Houérou & Henry, 1997; Rognon, 1979, 1983, 1984, 1986, 1991). Dans la figure suivante (Figure 9), Rognon (1986) résume l'évolution du climat du nord du Sahara.

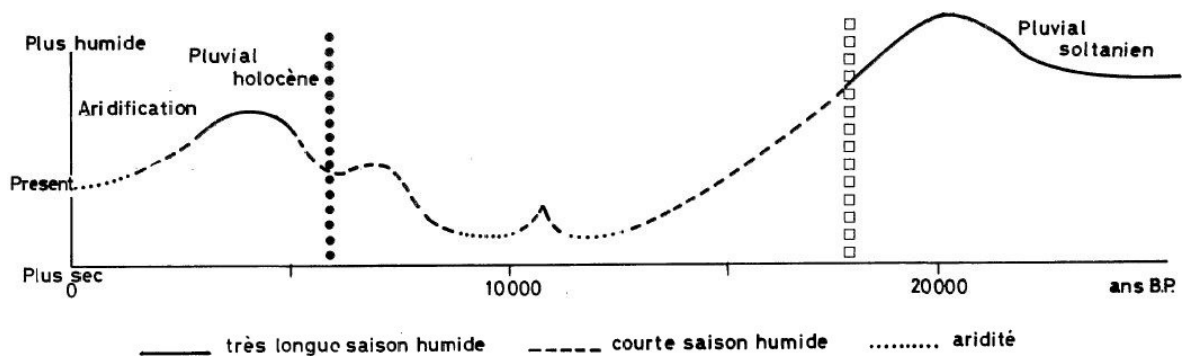


Figure 9 : Changement climatique depuis 30 000 ans sur le nord du Sahara (Rognon, 1986)

Nous pouvons identifier les phases suivantes :

- Le Soltanien, marqué par des sols riches rougeâtres et des étendues de retenues d'eau. Vers 19 000 ans BP l'érosion hydrique a été très active. Le déclin des précipitations intervient vers 18 KP BP, par l'installation d'une phase sèche très longue jusqu'à 13 KP BP. Cette phase est marquée par un remplissage des surfaces de retenue d'eau, une

activité éolienne intense et le début d'accumulation de grandes étendues de sable, ainsi qu'une régression de la végétation. La courte séquence d'amélioration du climat au début d'Holocène en Afrique du Nord a été liée à une intensification de la mousson africaine en raison des changements orbitaux terrestres (deMenocal *et al.*, 2000).

- L'Holocène peut être décomposé en trois périodes : Holocène inférieur aride, Néolithique humide, Holocène supérieur incluant la période historique. L'Holocène inférieur jusqu'aux 8000 BP, aride, réactive le processus éolien, mais est plus frais que le climat actuel. Le début de la phase néolithique, avec une humidité améliorée, aboutit à une période humide qui dure de 6500 à 4300 BP. Elle est caractérisée par une stabilisation des versants et une pédogénèse très active (sol limoneux, noirâtre). À cette époque, l'Atlas Saharien était caractérisé par de grands espaces verts végétalisés qui soutenaient une faune de savane abondante : antilopes, éléphants, rhinocéros, buffles. Cette phase coïncide avec l'extension de l'activité néolithique dans l'ensemble de l'Atlas Saharien.
- L'assèchement du climat qui suit durant l'Holocène supérieur commence vers 3000 BP. Il marque l'installation de conditions de plus en plus arides semblables au climat actuel. Cette dernière phase est marquée par la réapparition de dépôts éoliens et l'éclaircissement de la végétation. Le Sahara devient désert, il coupe la communication entre l'Afrique du Nord et l'Afrique noire. En effet, « Il s'est interposé entre Méditerranée et Afrique noire. Il fait définitivement basculer le Maghreb dans le monde méditerranéen » (Côte, 2014). D'autres comme, deMenocal *et al.* (2000) affectent à cette période la fin de sédentarisation et le début du nomadisme.

Des études récentes apportent un éclairage supplémentaire sur la présence des crises climatiques caractérisées par des séquences courtes et abruptes dans ce qui était considéré auparavant comme une évolution longue et graduelle. L'Afrique du Nord comme la Méditerranée ont été marquées par des séquences de variation très brusques, se produisant sur de courtes périodes, allant de décennies à des siècles (deMenocal *et al.*, 2000). Confirment ces conclusions, Jalut *et al.* (2009) résument les résultats d'analyse de plus d'une vingtaine d'études de ces séquences sur la période d'Holocène jusqu'au début de notre ère. Les résultats obtenus par Callot & Fontugne (2008) invitent à la prudence quant à la généralisation. Ils constatent dans nord-ouest du Sahara algérien, un maximum d'humidité situé entre 8800 et 7350 ans cal. BP et un assèchement final des lacs vers 5 000 ans cal. BP.

1.4.2. Climat actuel marqué par une forte variabilité

1.4.2.1. L'origine des précipitations

L'Afrique du Nord est soumise, d'une part, à l'influence des perturbations d'origine océanique et d'autre part, à celles d'origine Soudano-Saharienne (Félice & Schremmer, 1964). En hiver, l'anticyclone des Açores se dilate et se retire brusquement vers le sud. Il conditionne la pénétration des masses d'air froid (régime cyclonique) qui affectent toute l'Afrique du Nord (Dubief, 1959).

Les dépressions de front polaire viennent buter contre les chaînes atlasiques. Lorsqu'elles frappent, par vent de Nord-Ouest, les versants nord de l'Atlas tellien, elles empruntent une voie méridionale et débordent sur le flanc de l'Anti-Atlas (Riser, 2010). Ces dépressions sont porteuses d'une instabilité météorologique accompagnée de pluies abondantes sur les reliefs de l'Atlas tellien, dont une partie arrive à atteindre l'Atlas saharien et les hautes plaines steppiques. L'influence du vent pluvieux venant du Nord ou Nord-Ouest diminue proportionnellement à l'éloignement du littoral (la Figure 10 laisse voir une situation météorologique généralement constatée). Les montagnes de l'Atlas tellien obligent les vents pluvieux à s'élever et à abandonner sur les reliefs la majeure partie de leur humidité, ne laissant à l'Algérie steppique que « la part du pauvre » - l'Atlas saharien joue le même rôle vis-à-vis du piedmont saharien (Le Houerou, *et al.*, 1977).

Des études sur le réchauffement climatique du globe (GIEC *et al.*, 2008) ont mis en exergue que l'oscillation nord-atlantique a une forte influence sur les températures de surface en hiver dans une grande partie de l'hémisphère Nord, sur l'activité orageuse et les précipitations enregistrées sur l'Europe et l'Afrique du Nord.

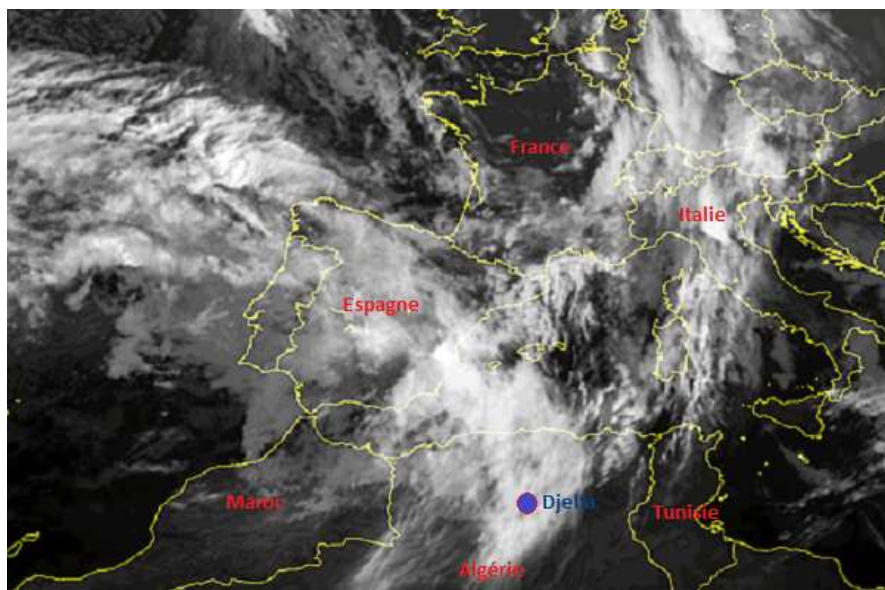


Figure 10. Pénétration des masses nuageuses venant du Nord-Ouest (Sat24, image du 2 janvier 2014)

Les précipitations orageuses qui arrosent les régions steppiques ont une autre origine. Elles sont dues aux perturbations atmosphériques engendrées par les dépressions en provenance des régions sahariennes (Dubief, 1959). Ces dépressions abordent les zones steppiques par le Sud et se produisent généralement durant la saison chaude jusqu'au début d'automne (Figure 11).

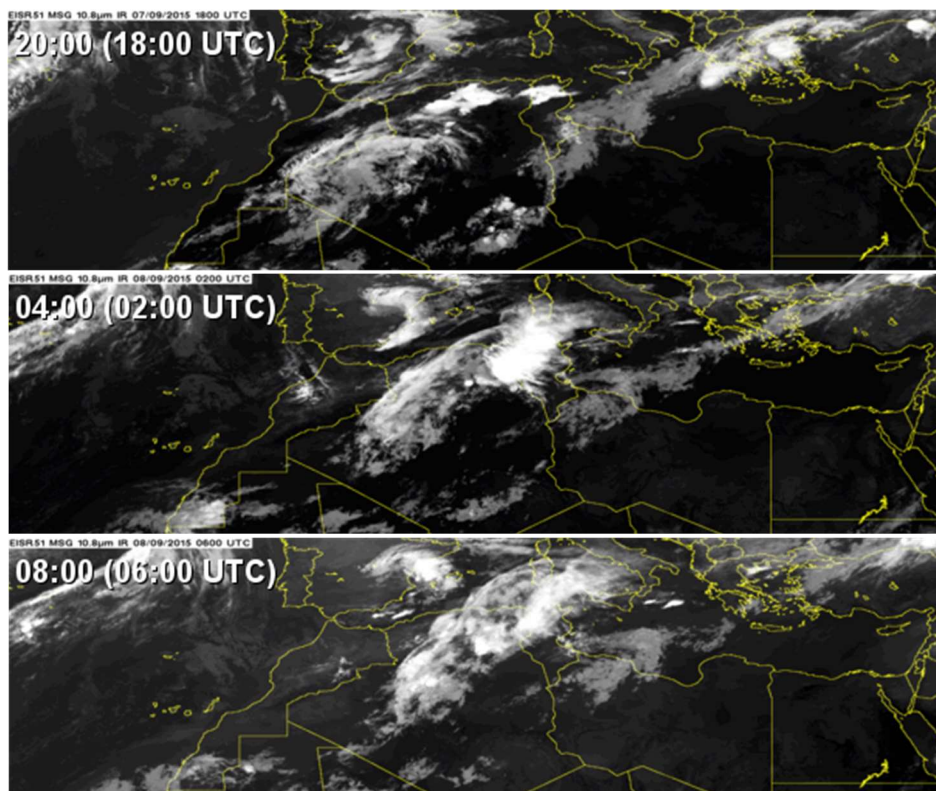


Figure 11 : Chronologie du déplacement d'une masse nuageuse du Sud-Ouest vers le Nord-Est. (Images infrarouges sat24, 1 ère image 7/9/2015, image 2 et 3 le 08/9/2015)

Les trois images ci-dessus illustrent le déplacement d'une masse nuageuse du Sahara vers le Nord en empruntant une direction SW-NE. Lors du passage de ce nuage orageux, la station de Djelfa a enregistré 50 mm de pluies dans la nuit du 07 au 08 septembre 2015.

Queney (1943) cité par Isnard (1950) a montré que la zone maritime de l'Afrique du Nord est surtout intéressée par le passage du NW au SE de cyclones de front polaire dont le maximum de fréquence est en hiver. Tandis que la zone intérieure, Hauts Plateaux et Sahara, reçoit une partie de ses précipitations, des perturbations du SW au NE, avec un maximum de fréquence au printemps. D'autres travaux (Dubief, 1959; Pouget & Le Houerou, 1971; Seltzer *et al.*, 1946) ont classé Djelfa et les régions steppiques dans le domaine climatique méditerranéen. Le Houérou (1995b) assure que « cela paraît indiscutable, et que comme l'ont noté de très nombreux phytogéographes, la zone aride steppique et le Sahara septentrional appartiennent à la région méditerranéenne ».

Les caractéristiques et la singularité fondamentale du climat méditerranéen ont été définies, éclairées par la proposition de divers indices bioclimatiques (Bagnouls & Gaussen, 1953; de Martonne, 1926; Thornthwaite, 1948). Au même titre, Seltzer *et al.* (1946) ont effectué un zoom sur les événements climatiques extrêmes en Algérie, alors que les travaux de Le Houérou (1995b) portaient sur le bilan de l'évapotranspiration. En conclusion, Pons et Quézel (1998) résumant ses caractéristiques « elles ne résident pas dans la quantité des précipitations, ni dans la moyenne des températures annuelles, ni même dans la moyenne des minima du mois le plus froid, mais principalement dans l'existence d'une période de sécheresse axée sur la saison chaude ». Pour pouvoir situer et positionner la région dans ce classement bioclimatique, la Figure 12 compare Djelfa à quelques villes méditerranéennes.

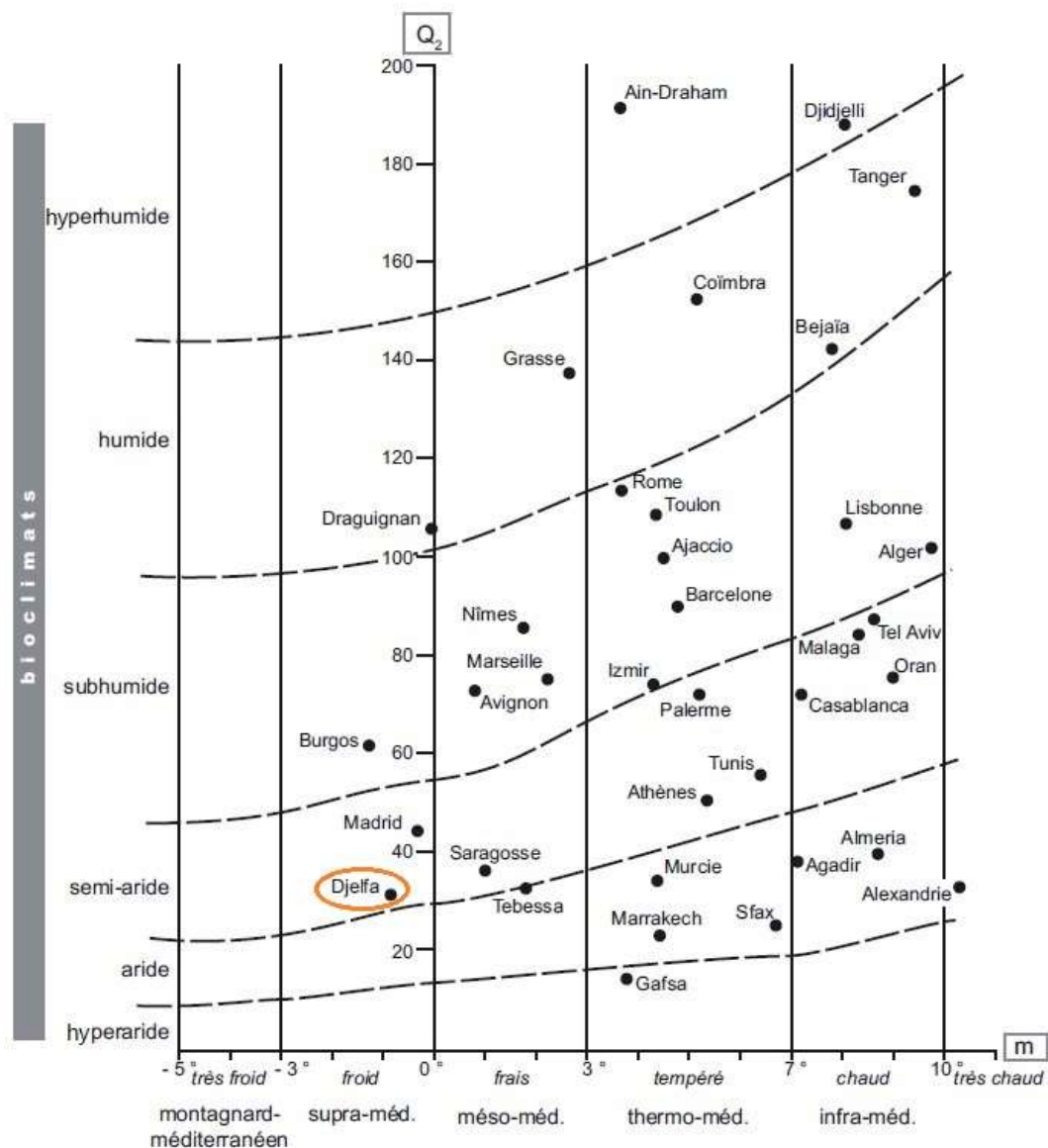


Figure 12 : Situation bioclimatique de quelques villes méditerranéennes en fonction des bioclimats et des étages de végétation définis par le climagramme pluvio-thermique d'Emberger (Tassin, 2012).

Nous présentons ensuite les caractéristiques climatiques au niveau régional de la variabilité des précipitations et des températures. Les autres composantes plus fines, jugées déterminantes pour analyser la dynamique environnementale seront développées et analysées de façon plus détaillée dans une partie réservée ultérieure. Il s'agit de l'évaluation de la sécheresse climatique et de l'examen des vents.

1.4.2.2. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au niveau régional

Les précipitations de la région sont caractérisées par une forte variabilité spatiale et interannuelle. La morphologie des sites et le caractère orageux des pluies peuvent expliquer et conditionner une majeure partie de cette variabilité. Au Nord, les plaines d'Ain-Ouessara, à la limite de la zone steppique, sont relativement basses, autour de 700 m d'altitude, donc à l'abri des vents du Nord porteur des précipitations d'hiver, car situées sous l'ombre pluviale de l'Atlas Tellien culminant à 1600 m vers Média. Nous n'avons pas eu accès à la carte des précipitations moyennes, en l'occurrence, la carte ci-dessous (Figure 13) confirme que la zone la plus sèche se localise au Nord des Hautes plaines, à l'abri de l'Atlas tellien. Cette région s'étend de Msila à l'Est jusqu'aux alentours de Ksar-Chellala à l'Ouest en passant par les plaines d'Ain-Ouessara.

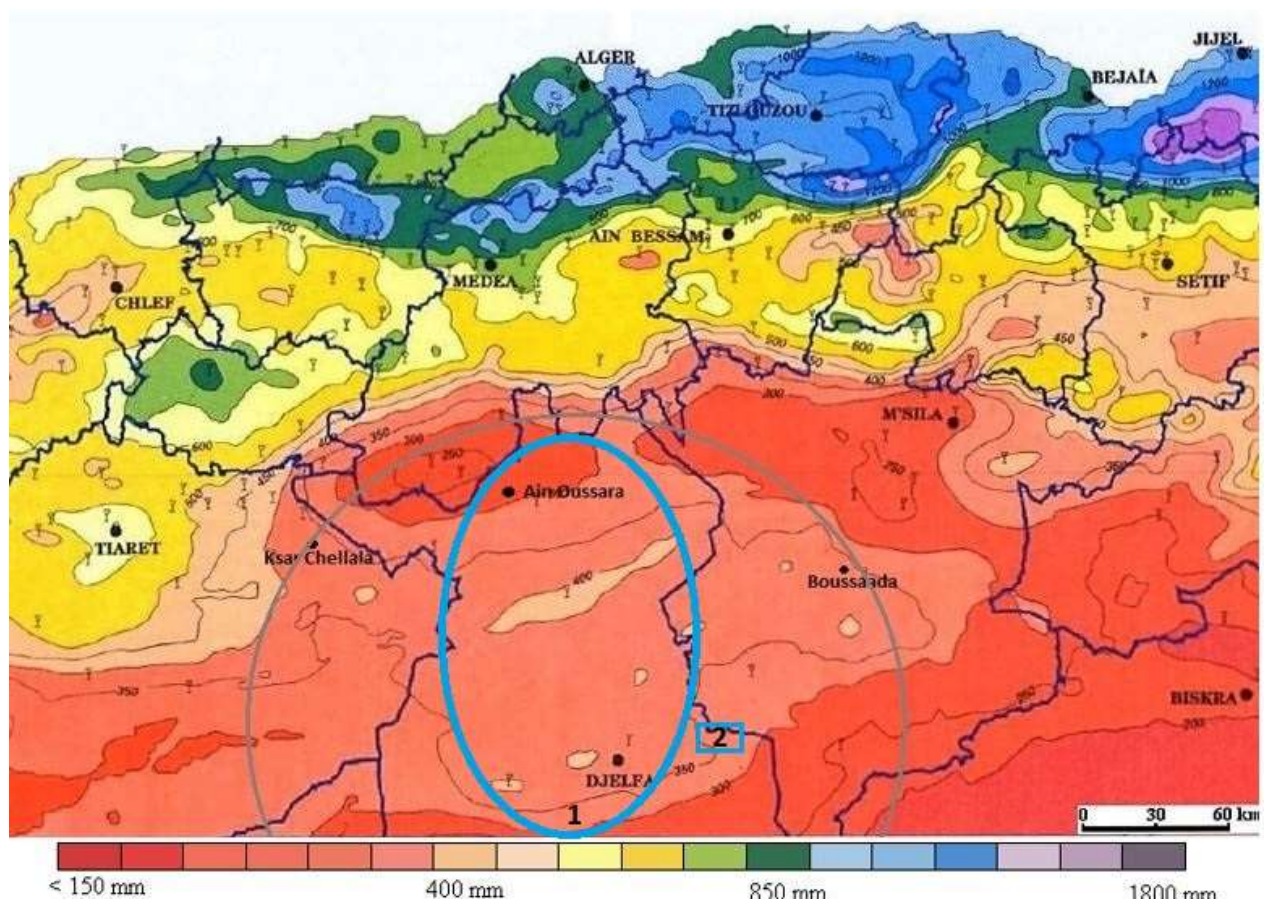


Figure 13 : Carte des répartitions des précipitations d'Algérie centrale en période humide Hauteurs pluviométriques annuelles dépassées en moyenne une année sur cinq (pluies annuelles "quinquennales humides") de l'Algérie du nord (Source ANRH)

La variabilité temporelle est marquée par le déplacement des isohyètes entre les périodes humides et sèches. Les périodes sèches se traduisent par la contraction et la remontée des isohyètes vers le nord. Medjerab et Henia (2013) constatent que la décennie sèche des années 1940, touchée par une généralisation de la diminution des précipitations, s'est traduite dans l'ensemble de la région par un retrait important vers le Nord de la courbe de l'isohyète 400 mm, pouvant atteindre 134 km. La carte (Figure 14) montre que lors des périodes sèches (aridification) la région de Djelfa et les zones steppiques se trouvent désormais dans la zone des 150 à 200 mm.

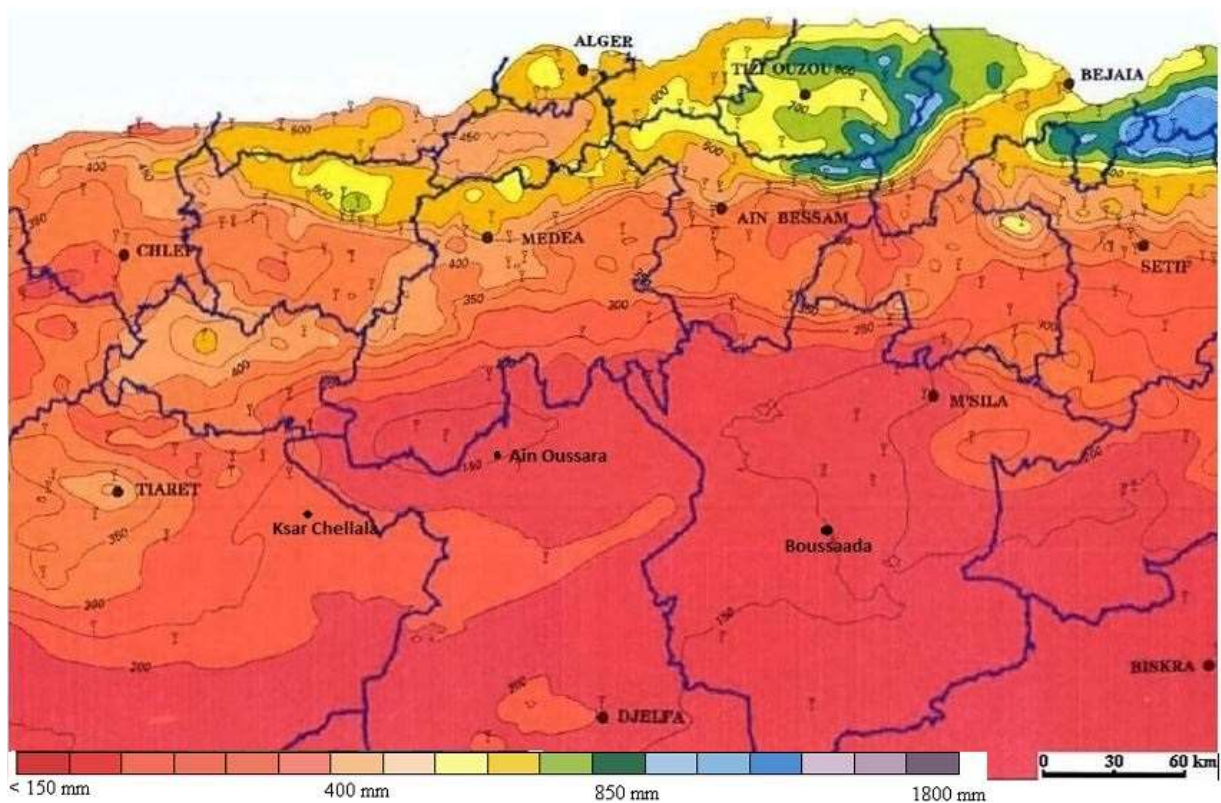


Figure 14 : Carte des répartitions des précipitations d'Algérie centrale en période sèche. Hauteurs pluviométriques annuelles dépassées en moyenne quatre années sur cinq ("quinquennales sèches") de l'Algérie du nord (Source ANRH)

La variabilité spatiale des précipitations observées au niveau régional demeure aussi à l'intérieur de la même zone climatique du semi-aride. Pour éclairer cet aspect, nous avons établi une corrélation entre les séries de précipitations de deux stations météorologiques voisines situées dans les villes de Djelfa et de Boussaâda à 100 km au Nord-Est de Djelfa. Les résultats sont affichés dans le diagramme ci-dessous (Figure 15), qui exprime, la corrélation linéaire simple entre les précipitations annuelles de Djelfa et celles de Boussaâda sur la période 1950 – 2015.

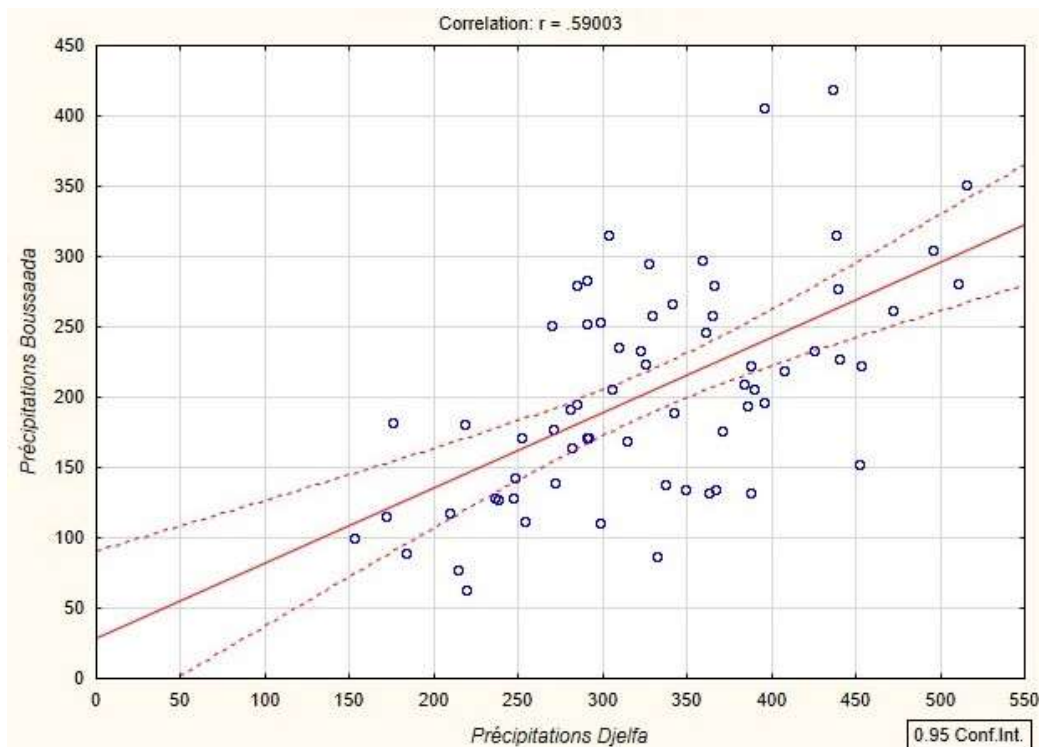


Figure 15 : Diagramme de corrélation des précipitations de Djelfa et de Boussaâda (1950 – 2015)

L'indice de corrélation affiche seulement la valeur de 0.59, les points sont dispersés de part et d'autre d'une droite d'ajustement. Ils expriment donc une forte variabilité spatiale des précipitations. La différence des précipitations entre la station de Djelfa et de Boussaâda peut varier de 300 mm à -13 mm. Sur cette série de 65 ans allant de 1950 à 2015, on dénombre 10 années où la station de Djelfa reçoit 200 mm de plus que celle de Boussaâda et 3 années pendant lesquelles les précipitations à Boussaâda dépassent celles de Djelfa. Cette forte variabilité des précipitations est un caractère typique du climat des régions semi-arides

1.4.2.3. Les températures

La région de Djelfa se caractérise par des températures variables entre un hiver froid et un été chaud. Sur la période 1980 -2000, la moyenne des minima est enregistrée en janvier avec 0.1°C. Alors que, la moyenne des maxima est constatée pendant le mois de juillet, le plus chaud, pour y atteindre 34.1°C. Les températures décroissent jusqu'au mois de décembre. Le mois le plus froid enregistre une moyenne de 5 °C, en revanche, elle est de 26.3 °C pour le mois de juillet, comme exposé dans la figure suivante (Figure 16).

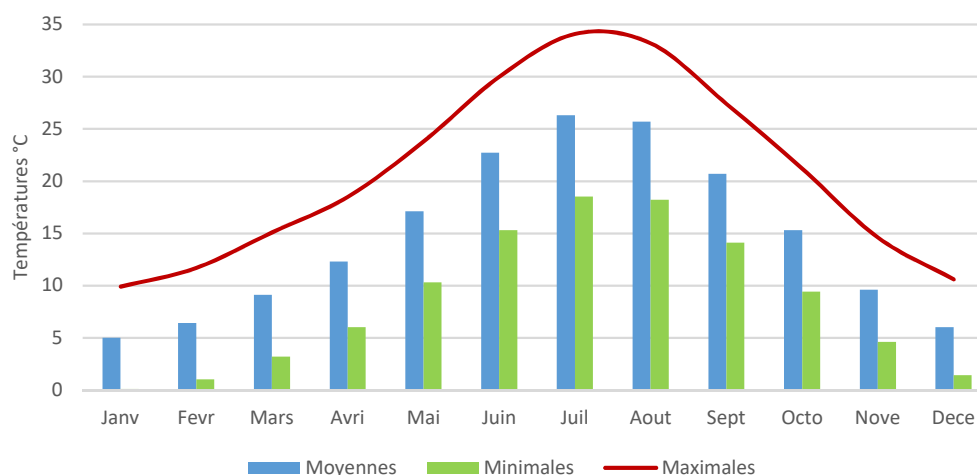


Figure 16 : Répartition mensuelle des températures de la période 1980-2010.
(Station de Djelfa, données : ONM)

L'amplitude moyenne annuelle s'élève à 20 °C entre le mois de janvier et juillet, elle indique ainsi, un climat à caractère continental. Le suivi mensuel des moyennes montre des amplitudes thermiques variant entre 10 °C pendant la saison froide en janvier et 15 °C durant la saison chaude pour atteindre un maximum de 15.6 au mois de juillet. Si on prend en compte la topographie de la région, Demangeot (2001) suggère que « les sites concaves ont une amplitude thermique de type continental, alors que les sites convexes ont une amplitude atténuée ». On suppose donc, que la cuvette du synclinal du bassin de Zahrez intra-montagneuse est plus chaude. Cette hypothèse est confirmée par les remarques de Pouget (1980), Trayssac (1981), Makhoulf (1993) qui montrent l'écart des températures et la précocité du printemps dans cette cuvette par rapport au plateau de Djelfa.

Les conséquences de cette variation saisonnière sont doubles :

- Sur la croissance végétale : l'intensité et la durée du froid hivernal engendrent une dormance hivernale alors que la période de dormance estivale coïncide avec les fortes chaleurs d'été (Pouget, 1980).
- Sur les sols : chaque année, la longue période d'été assèche les couches supérieures et désagrège le sol, les rendant plus sensibles d'un côté à l'érosion éolienne (Makhoulf, 1993) et de l'autre à l'action hydrique (Bourouba, 1998).

1.5. Hydrologie endoréique

La région est une juxtaposition de bassins hydrauliques fermés, dont les bassins des Zahrez (9125 km²), il fait partie du système de grands Chotts des Hautes Plaines. Il est le prolongement d'ensembles (système) analogues mais plus grands, le Chott Chergui à l'Ouest et le Chott El

Hodna à l'Est. Ce bassin d'orientation SW-NE, se développe en périphérie Nord de l'Atlas Saharien.

Le bassin de Zahrez est décomposé en six sous-bassins (voir carte Figure 17). Au nord, on trouve les deux sous-bassins, Zahrez Gherbi et Zahrez Chergui se développant sur la vaste dépression endoréique. Au nord, leurs délimitations commencent avec le premier pli de l'Atlas Saharien. Au sud, les deux sous-bassins de Djelfa et d'El Idrissia alimentent le Zahrez Gherbi par plusieurs oueds. On trouve respectivement oued el Melah et oued Korirech pour le sous-bassin de Djelfa, puis oued Hadjia pour le bassin d'El Idrissia. Côté oriental, oued Medjdel qui draine le sous bassin de Dar Chioukh, ses eaux se trouvent bloquées par le cordon dunaire, à 350 mètres du Sebka. Ils alimentent le Zahrez Chergui par sous-écoulement. Le réseau hydrographique n'est pas très développé, il existe dans le même bassin de petits endroits fermés, des oueds qui ne communiquent pas entre eux et des oueds qui s'éteignent. La carte présente un niveau d'abstraction, sans tenir compte de ces caractéristiques de détail.

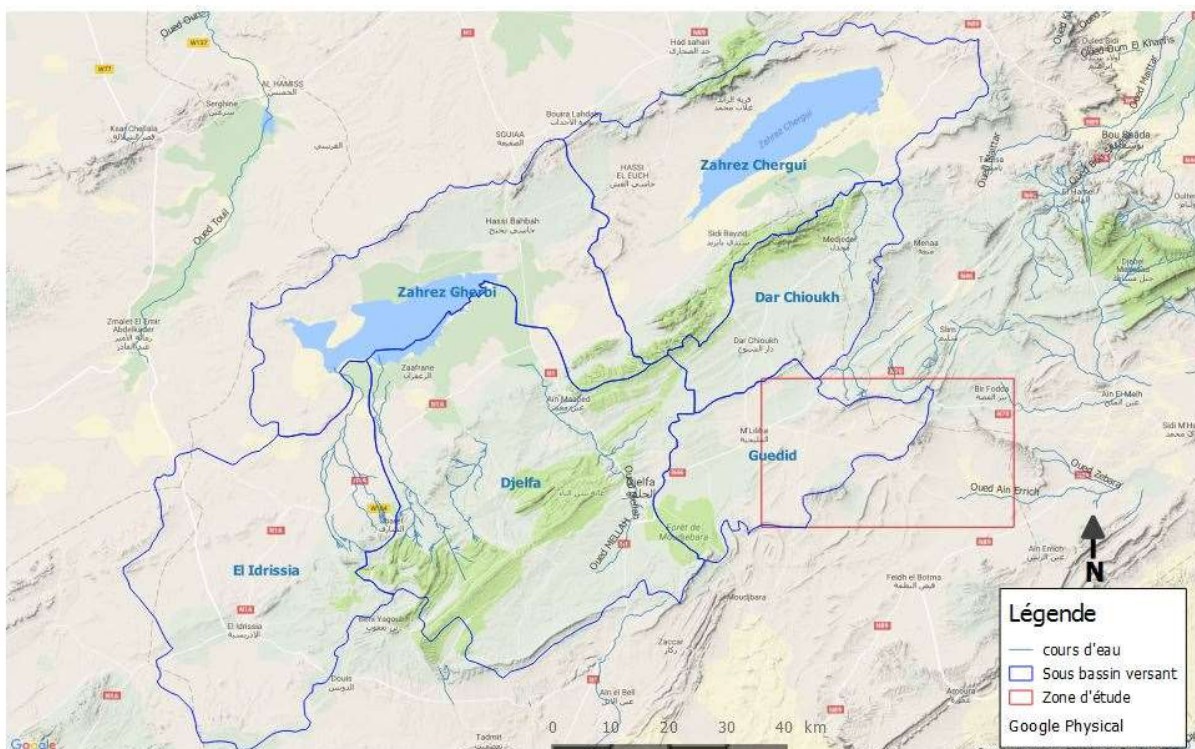


Figure 17 : Les sous-bassins hydrologiques de la région de Djelfa.
(Carte réalisée sur la base d'un document papier de l'ANRH)

Les accumulations d'eau salée créées dans les Zahrez sont appelées Sebka, dont la surface d'eau recule pendant la saison sèche. Par ailleurs, le dernier sous-bassin appelé Guedid, sur lequel portera la partie centrale de notre étude, son réseau hydrographique est moins développé et ses eaux de surface ne communiquent pas avec le Zahrez. Il se décompose en plusieurs petites dépressions qui donnent naissance à un système endoréique jusqu'à des échelles fines.

La subdivision du sous-bassin de Guedid en deux dépressions à système endoréique, peut encore être reconduite à une échelle plus fine jusqu'à de simples cuvettes : des mares d'eau parsèment le paysage lors de la saison humide, ou après le passage d'une forte averse. L'étendue, la forme, la profondeur d'eau varient d'une retenue à l'autre en fonction de sa taille, et les quantités des précipitations. Ces formes sont appelées les « *daïas* », qui sont une dépression avec un terrain plat, des sols sédimentaires limoneux, appréciés pour la culture.

Ces dépressions, attirent les eaux d'écoulement et de ruissellement chargées de sédiments lors des crues. Une fois l'eau asséchée par évaporation et infiltration, ces terres deviennent des lieux très prisés pour l'agriculture sous toutes ses formes (céréaliculture, irrigation, jardins...).

1.6. Dynamique du système écologique

En Afrique du Nord, la flore était essentiellement tropicale à la fin du Tertiaire. Les espèces tropicales ont progressivement laissé place à des éléments holarctiques et méditerranéens à la fin du Pléistocène. Le Pléistocène supérieur (0.5 - 0.01 millions d'années) au Sud Constantinois semble offrir une flore méditerranéenne dont 78% d'espèces forestières sont encore actuellement présentes dans le nord de l'Afrique (Le Houérou, 1995b). L'analyse pollinique indique des alternances floristiques entre espèces forestières et steppiques au cours de l'Holocène entre 15 000 et 10 000 B.P. Les premières sont caractérisées par la dominance d'espèces forestières actuelles de la zone semi-aride à humide (*Cedrus*, *Pinus*, *Cupressus*, *Quercus*, *Pistacia*...) et les secondes par celles d'espèces steppiques : graminées, armoises, chénopodiacées, zygophyllacées (Divers auteurs cités par Le Houérou 1995).

La steppe algérienne actuelle est un système écologique dont les limites géographiques sont définies par les seuls critères bioclimatiques. Elle est délimitée au Nord par l'isohyète 400 mm, ligne qui marque le début des cultures céréalières et au Sud, par l'isohyète 100 mm qui signifie le début du domaine saharien. Sa végétation est décrite par Le Houérou (1995a) comme «basse et clairsemée» et par Pouget (1980) comme «basse, très ouverte à base de graminées».

Les steppes algériennes, délimitées au Nord par les bordures sud de l'Atlas Tellien, s'étendent jusqu'au piémont sud de l'Atlas Saharien pour rencontrer le désert. Elles couvrent une superficie de 20 millions d'hectares, qui englobe l'ensemble des Hautes Plaines. Ce vaste territoire dont l'altitude diminue d'Ouest en Est, passe de 1100 m au niveau le plus haut à 400 m dans la dépression du Hodna. A l'Ouest, son domaine commence au nord d'Ain-Sefra dès la frontière marocaine pour recouvrir la région de Naâma et Mecheria, et atteindre les monts des Ksour. Au centre, il commence aux abords de Ksar Chellala au Nord jusqu'au sud de Laghouat en incluant les monts des Ouled Naïls dans la région de Djelfa et l'Atlas Saharien. A l'Est, il inclut le Hodna pour s'étendre au sud des massifs montagneux de l'Aurès et des Nementchas (Figure 24).

1.6.1. Une exploitation intensive des ressources végétales : l'exemple de l'alfa

Les principaux facteurs de la dégradation actuelle d'alfa sont surtout d'ordre anthropique. Ils trouvent leurs racines dans la surexploitation des ressources végétales. Comme le souligne Tassin (2012), la dégradation a d'abord été enclenchée par l'exploitation irrationnelle de l'alfa, autrefois exporté à l'état brut, pour fournir la fibre pour la fabrication de papier de haute qualité et d'ouvrages tressés (ceintures, corbeilles, chaussures ou encore chapeaux). L'exploitation des plantes des steppes et notamment l'alfa a été intensifiée et bouleversée depuis 1862. La cueillette à des fins industrielles était déjà en 1887 considérée comme inadaptée (Aidoud *et al.*, 2006).

Les quantités prélevées ont doublé au lendemain de la première guerre mondiale pour faire face à la diminution des réserves forestières (Europe, Maghreb) limitant ainsi l'emploi du bois pour la fabrication de la pâte à papier. On notait déjà, à cette époque que l'industrie européenne accroissait très rapidement ses importations d'alfa, l'utilisation de cette plante se généralisant. La production remontée à 105 000 tonnes dès 1922, a atteint 213 000 tonnes en 1928. L'alfa de l'Aurès écoulé par Annaba (Bône) ; celui de Djelfa, très renommé, par Alger; la grosse production des vastes steppes oranaises s'écoule par Oran ou Arzew (Célérier & Cholley, 1931). Après la deuxième guerre mondiale, en 1947, l'Angleterre utilise 350 000 tonnes pour fabriquer le papier d'Alfa, contre 30 000 pour la France (Brunet & Berjaud, 1951)

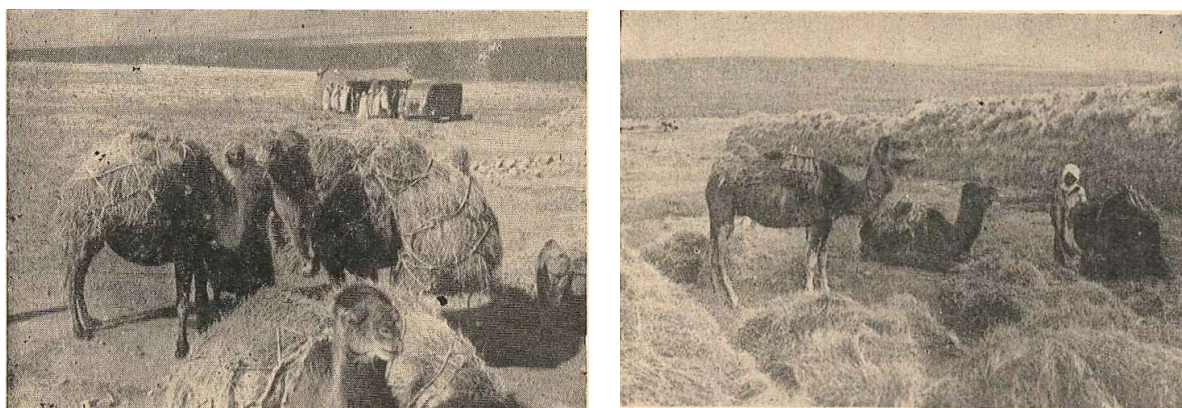


Figure 18 : La cueillette d'Alfa, transport se fait généralement à dos de chameaux pour la livraison au chantier. Des montagnes d'Alfa prélevé des zones steppiques (Brunet & Berjaud, 1951)

La cueillette toute entière, écrit Sivignon (1963) était l'affaire de nomades, ou plutôt de pasteurs transformés en ramasseurs d'alfa. A l'époque, on comptabilisait, dans le sud de l'arrondissement de Tiaret, 2000 familles environ qui exerçaient cette activité. En fait, le système profite essentiellement aux locataires, les véritables bénéficiaires de la récolte de l'alfa, ce dernier est revendu au port dix à douze fois plus cher qu'il n'est acheté au cueilleur (Brunet & Berjaud, 1951). Cette exploitation a perduré jusqu'aux années 70. Mais en termes de préjudice écologique, Aidoud *et al.* (2006) remarquent que les conditions présidant à la genèse des sols alfatiers steppiques n'existaient plus. Cela justifie le qualificatif de « fossile » parfois attribué à ces steppes, qui ont cessé de se régénérer. Par le passé, avant ces

événements, les steppes d'alfa ont réussi à traverser des siècles, voire des millénaires, d'aléas climatiques et d'exploitation de l'homme par ses troupeaux.

1.6.2. Déclin des forêts et espoir suscité par le Barrage Vert

L'histoire récente du rétrécissement de la forêt de Djelfa, s'inscrit dans la tendance régressive de la forêt algérienne qui se résume ainsi : la forêt couvrait 5 Mha en 1830 ; une phase de déboisement intense intervient jusqu'en 1874, date de mise en œuvre du Code Forestier ; en 1887 la forêt ne couvre plus que 3,2 Mha ; puis elle se stabilise à ce niveau jusqu'en 1954. En 1967, les estimations parlent de 0.6 Millions ha de forêt et 1.8 Mha de maquis et broussailles (Plit, 1983).

La véritable catastrophe, pour laquelle nous pouvons parler d'une rupture depuis des milliers d'années, se trouve dans l'exploitation des Daïas avec la coupe des arbres de Bétoum (Pistachier de l'Atlas - *Pistacia atlantica*). Ce constat concerne l'ensemble de la région et pas seulement Djelfa. Les daïas ont subi de fortes pressions pour l'exploitation de leurs forêts. Déjà en 1934 la situation est décrite comme catastrophique. Monjauze (1982) évoque que « les Européens ont exploité presque toutes les dayas (...) Elles étaient au nombre de 140 (en 1934) sur les quelques milliers boisées 80 ans plus tôt. Le tableau qu'on a pu se faire des dayas cette année-là est le dernier souvenir vivant du grand plateau merveilleux (...) En 1945 les dayas étaient pratiquement liquidées à quelques bouquets d'arbres près, çà et là ».

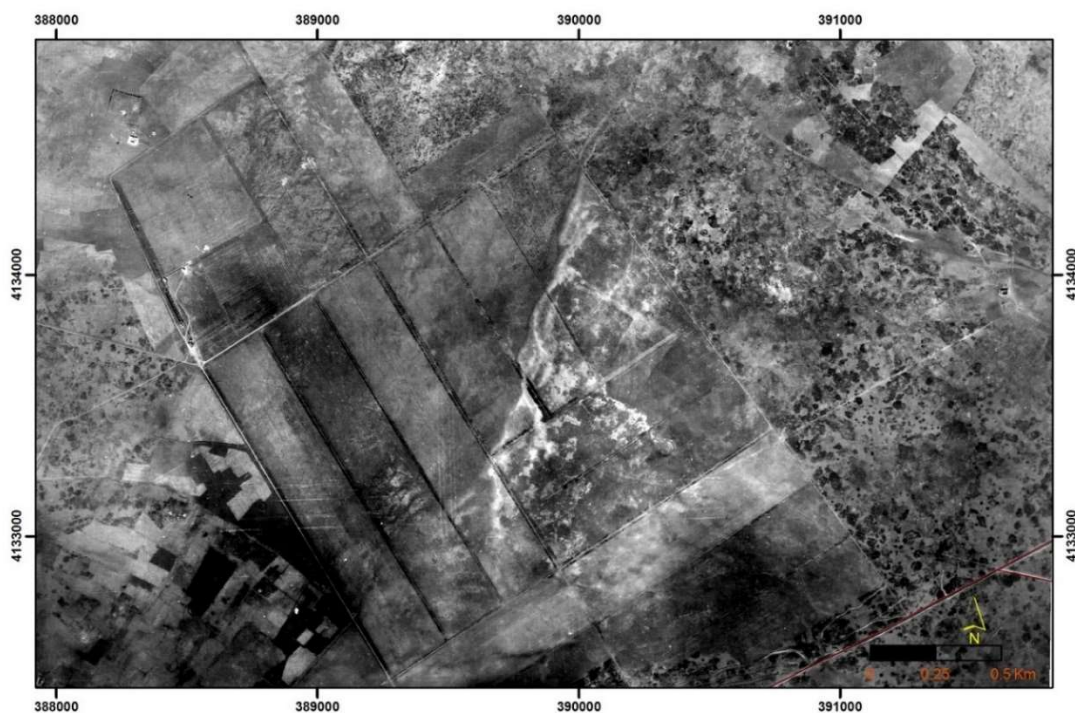


Figure 19 : Mise en culture par défrichement sur les bordures méridionales de Daiet Tisselouine. Près de la ville de Mouilah située à 25 km à l'est de Djelfa. (Photo AV53 du 2 février 1957, cliché N° 275 source SHD, 34°46'40"N - 3°30'30"E)

La forêt de la région, dont les pinèdes de Djelfa, est l'une des dernières reliques forestières de l'étage bioclimatique « semi-aride inférieur frais » (Nahal, 1962). D'un point de vue floristique, les montagnes sahariennes ont été, pour les « taxons » hérités du passé, de véritables montagnes refuges. On y retrouve des taxons autochtones et méditerranéens (Demangeot, 2001). Cette forêt connut une forte régression. Dans un dossier présenté par le Conseil Supérieur de l'Algérie, Reynard et le lieutenant de Dianous indiquent en 1880 : « l'Atlas des Ouled Naïl, entre Djelfa et Bou Saada recelait encore à cette époque plus de 300 000 hectares de forêts dont la moitié au moins en état fort honorable » (Monjauze, 1982). Aujourd'hui, cette surface ne dépasse guère 152 753 hectares soit la moitié de ce qui était estimé 130 ans auparavant. Cette nouvelle surface comptabilise pourtant les 30 636 hectares de repeuplement et de reboisement depuis 1962, dans le cadre de projet de Barrage Vert.

Dans les années 70, la région de Djelfa, retenue site pilote, a connu le lancement d'un projet d'envergure nationale. Il s'agit du programme du Barrage Vert dont l'objectif essentiel était de lutter contre la désertification par le reboisement de 3 millions d'hectares, et de constituer ainsi une barrière végétale pour contrer le désert. Il devait s'étaler sur une ceinture de 1000 km et 20 km de large de la frontière marocaine à l'ouest jusqu'aux frontières tunisiennes à l'Est.

Fondé sur l'état de connaissance de l'époque et en s'inscrivant pionnier et précurseur dans la lutte contre la désertification, l'argumentaire qui a accompagné la mise en place du projet Barrage Vert était la lutte contre l'avancée du désert du Sahara vers le Nord. Des études ultérieures traitant de la dynamique du sable (Ballais *et al.*, 1979 ; Pouget, 1980 ; Trayssac, 1981 ; Bisson & Callot, 1986 ; BALLAIS, 1986 ; Callot, 1987, 1991 ; BALLAIS, 1991; Makhlouf, 1993; Benazzouz, 1994, 2000) ont montré qu'actuellement le sable des régions steppiques est d'origine locale, avec une direction NW-SE du vent dominant, et un déplacement parfois trans-atlasique nord-sud. Dans ce contexte, Bisson & Callot, (1986) confirment que « le Sahara ne gagne pas vers le nord; s'il y a des signes de désertification dans la steppe, ils sont d'origine anthropique (...) car depuis au moins deux millénaires les limites désertiques, de ce côté-ci du Sahara du moins, sont d'une remarquable stabilité ». Dans ce registre, notre étude apportera des preuves supplémentaires.

Ce point de la dynamique du sable ne devrait pas cristalliser le débat et occulter l'utilité écologique et environnementale de cette ceinture forestière, ainsi que le rôle joué réellement par le reboisement dans la fixation du sable autochtone. Nous allons présenter plus loin une illustration de la portée de cette action dans la réduction de l'ensablement. Depuis les années 80, le projet subit plusieurs restructurations et des adaptations successives afin de pallier les urgences d'ensablement créées par la sécheresse climatique. Il est sorti de sa délimitation première pour intégrer de nouveaux espaces et de nouveaux défis. Toutefois des difficultés apparaissent comme, le choix des essences comme le pin d'Alep sensible aux maladies et aux chenilles processionnaires.

A Djelfa, ce projet a permis localement de reconstituer des massifs forestiers, et le renouvellement partiel du patrimoine forestier. Comme le montre l'exemple (Figure 20) du reboisement du massif situé au sud-est de la ville de Had Sahary, elle-même au nord du Zahrez Chergui.

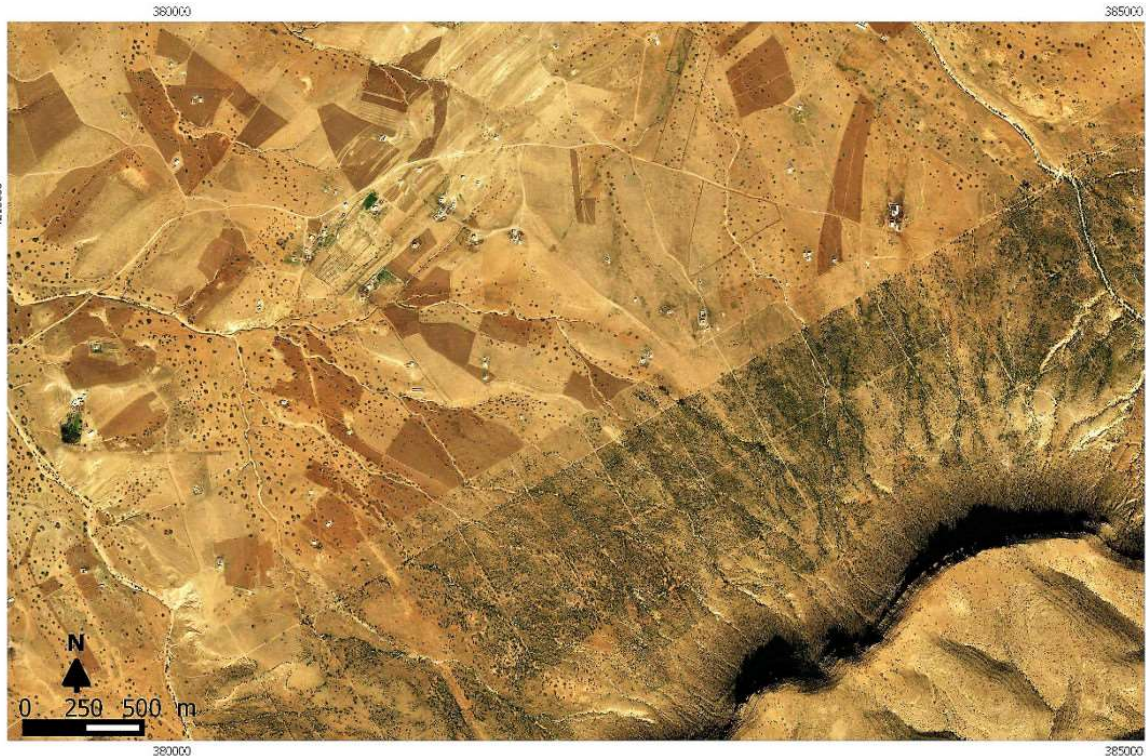


Figure 20 : Reboisement de massif à l'est de la ville de Had Sahary. La partie Sud est réservée exclusivement. Au nord, le labour des terres évolue en mixité avec le reboisement. (GeoEye novembre 2010, 35°21'53"N - 3°26'39"E)

Vu l'ampleur des moyens nécessaires, la mise en œuvre du Barrage Vert s'est transformée en défi, sa réalisation n'a pas été faite de manière constante mais plutôt fluctuante dans le temps. L'Etat devait gérer aussi d'autres priorités comme l'action d'éducation, la santé, l'insertion sociale, etc. Le diagramme suivant indique l'évolution de la surface (en ha) des travaux de peuplement dans la Wilaya de Djelfa. La variabilité des surfaces reboisées d'une décennie à l'autre indique également la fluctuation de l'intérêt porté au projet. Il n'est pas surprenant d'observer un retour en considération du Barrage lors des décennies qui enregistrent une séquence sèche, pendant les années 80 et 2000. Ce regain d'intérêt est porté par la préoccupation de l'action publique de lutter contre l'ensablement. Alors que, lors de la période humide, le sable est moins visible, il suscite moins d'intérêt.

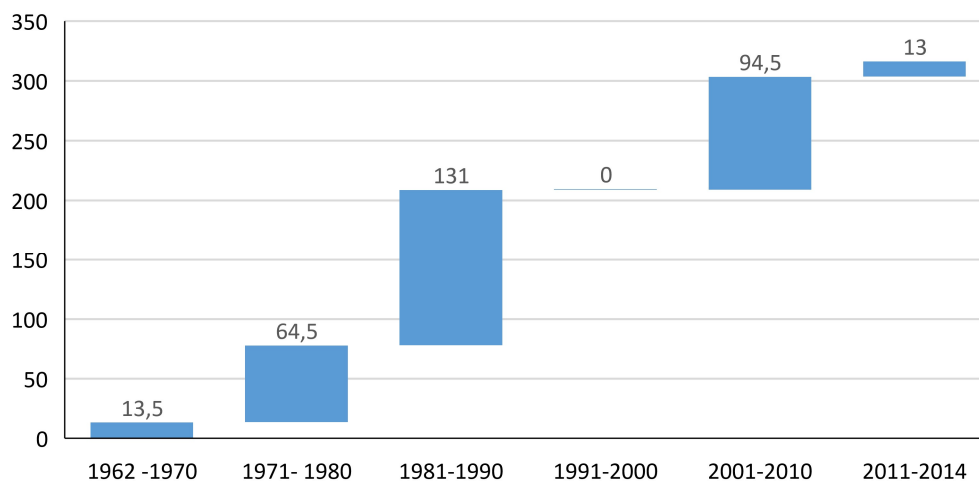


Figure 21 : Travaux de plantation en km² par décennie, réalisés dans le cadre du Barrage Vert dans la Wilaya de Djelfa (Données : services des forêts in DEROUACHE, 2015).

La lecture chronologique des réalisations de reboisement permet de déceler une autre information importante. C'est dans l'urgence des crises d'ensablement que l'action publique de reboisement s'opère. En plus, le pin d'Alep est disponible dans les pépinières et remplit facilement les exigences d'augmentation de production de jeunes plantes : il n'a besoin que de deux ans de croissance en moyenne et exige peu de soins les premières années qui suivent la réalisation. Par ces caractéristiques, il s'est imposé comme essence privilégiée pour les services des forêts. En revanche, les expériences accumulées soulignent le niveau élevé de sa fragilité aux ravageurs, notamment la chenille processionnaire. Cela nécessite un traitement qui s'inscrit dans la durée et de fait, amoindrit les gains et relativise la pertinence du choix d'essence. Assurément, le pin permet d'obtenir des résultats rapides, mais sa durabilité apparaît fragile, coûteuse, et donc compromise.

Par ailleurs, le projet tente d'apporter une réponse à un problème d'une toute autre nature que l'ensablement, il s'agit d'érosion de la biodiversité. En effet, la forêt est fragmentée, en mosaïque, avec comme impact écologique, le fractionnement de l'habitat de nombreux animaux et plantes. Dans sa conception d'origine, le projet aspire aussi à relier les îlots de massifs entre eux. L'objectif est de créer une unité forestière avec comme finalité la préservation de la biodiversité. Dans cette perspective, près de Djelfa, on observe, une bande d'arbres s'étalant sur 9 km, sous forme d'une passerelle biologique pour connecter et relier les deux massifs (Figure 22). En effet, les lieux sont le siège de nombreuses espèces endémiques du patrimoine faunistique sédentaire (perdrix gabra, lièvre) ou migrateur (caille des blés, pigeon ramier, tourterelle des bois), également d'autres espèces menacées nouvellement réintroduites comme la gazelle dorcas, le mouflon à manchettes et le cerf daim (voir l'inventaire in SOUTTOU *et al.*, 2015).

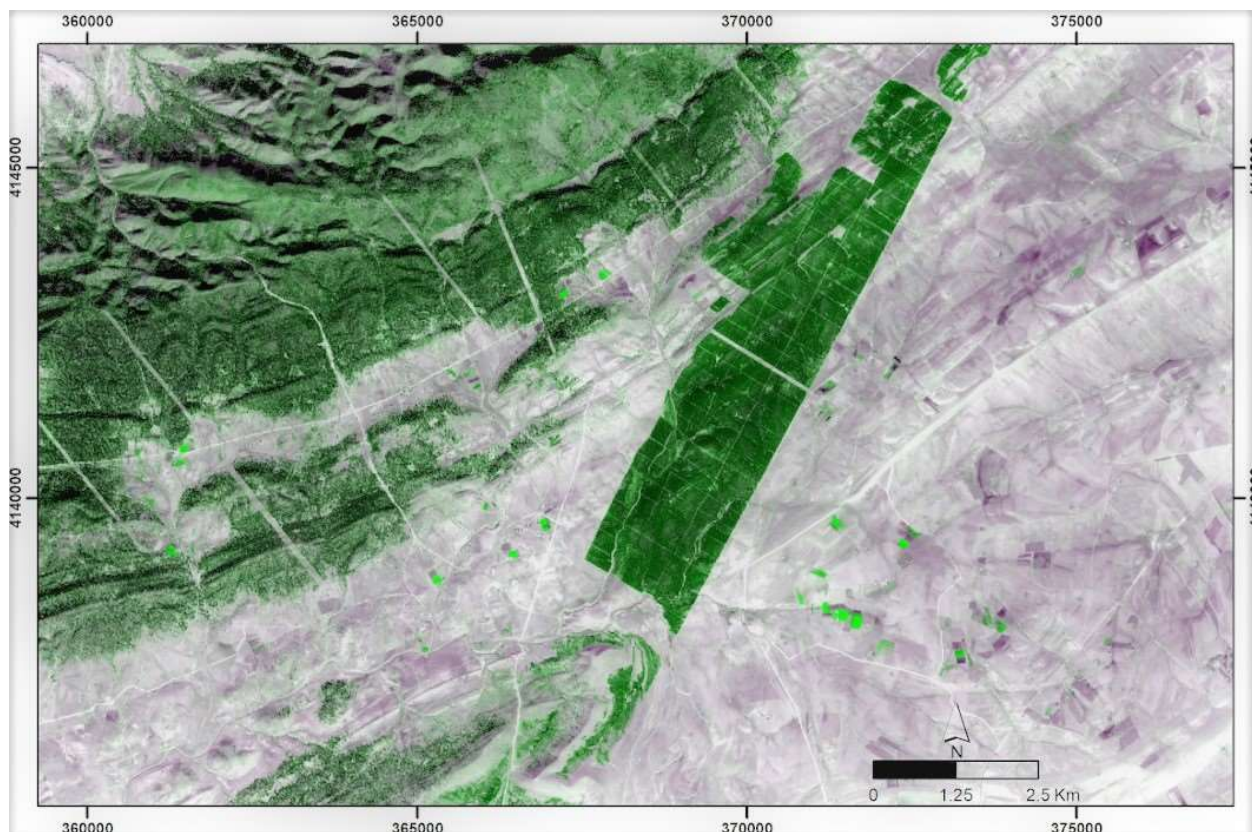


Figure 22 : Une bande végétalisée (passerelle biologique) de 9 km près de Djelfa, pour relier les îlots de massifs forestiers et constituer une unité forestière (composition colorée 4-8-2, Sentinel-2 du 17/10/2017)

Les discussions qui animent le débat sur ce projet portent souvent sur le caractère technique. La sensibilisation écologique et les valeurs de protection environnementale alimentées par ce projet restent non évoquées et méritent d'être scrutées. En effet, durant une vingtaine d'années, le Barrage Vert a occupé une place prépondérante dans l'agenda public et social : il était érigé en cause nationale. Des générations entières ont chanté ses mélodies dans les cours d'école, admiré ses enjeux environnementaux dans les manuels scolaires. Elles ont appris que l'arbre n'était pas uniquement leur ami dans le combat contre l'avancée du sable mais il était leur seul rempart pour protéger le pays du désert. L'incorporation de l'armée dans le projet illustre que l'ennemi n'était pas au-delà des frontières, mais plutôt le sable mouvant qui menace la nation entière. Au matin de l'indépendance, le Barrage Vert fut leur façon à elles de revivre la forêt, de redessiner le paysage, de renverser la trajectoire après la longue période de déclin dans les abîmes de la guerre. Réussir à contrer le désert était la promesse de l'avenir, l'engagement pris envers les générations futures, de rendre ce qu'il leur appartenait en meilleur état ... l'arbre était considéré sacré.



Figure 23 : Barrage Vert à Hassi Bahbah, Djelfa (35°01 N – 3°01 E, Arthus-Bertrand, 2015)

Paradoxalement, il semble que grâce à l'hypothèse communément admise que le sable du Sahara avance vers le nord, il y a eu une très forte mobilisation de tous les acteurs, en résonance à l'écho de la peur du désert. Signalons aussi un décalage entre la place réservée à la forêt et celle donnée à l'herbe ou d'autres plantes endémiques de petite taille. Alors que l'attention était focalisée sur le suivi des bulldozers sillonnant la terre pour tracer des lignes géométriques bien droites, calculées au mètre près, et que l'on admirait l'opération de plantation des arbres de pin d'Alep, à quelques kilomètres de là d'autres transformations s'opéraient : les arbustes et l'Alfa de la flore endémique qui avaient réussi à traverser des millénaires, continuaient d'être coupés pour laisser place à l'agriculture. C'est ainsi que l'espace s'est restructuré en une multitude de mosaïques.

En 2016, un plan d'évaluation en vue de la requalification de ce projet a été lancé, avec la participation des chercheurs, des élus locaux et des collectifs de population. La feuille de route semble orientée vers la prise en charge des revendications de la société par l'intégration de la dimension économique. Cette nouvelle orientation réussira-t-elle à intégrer la population pour redynamiser ce projet ainsi que les territoires concernés ?

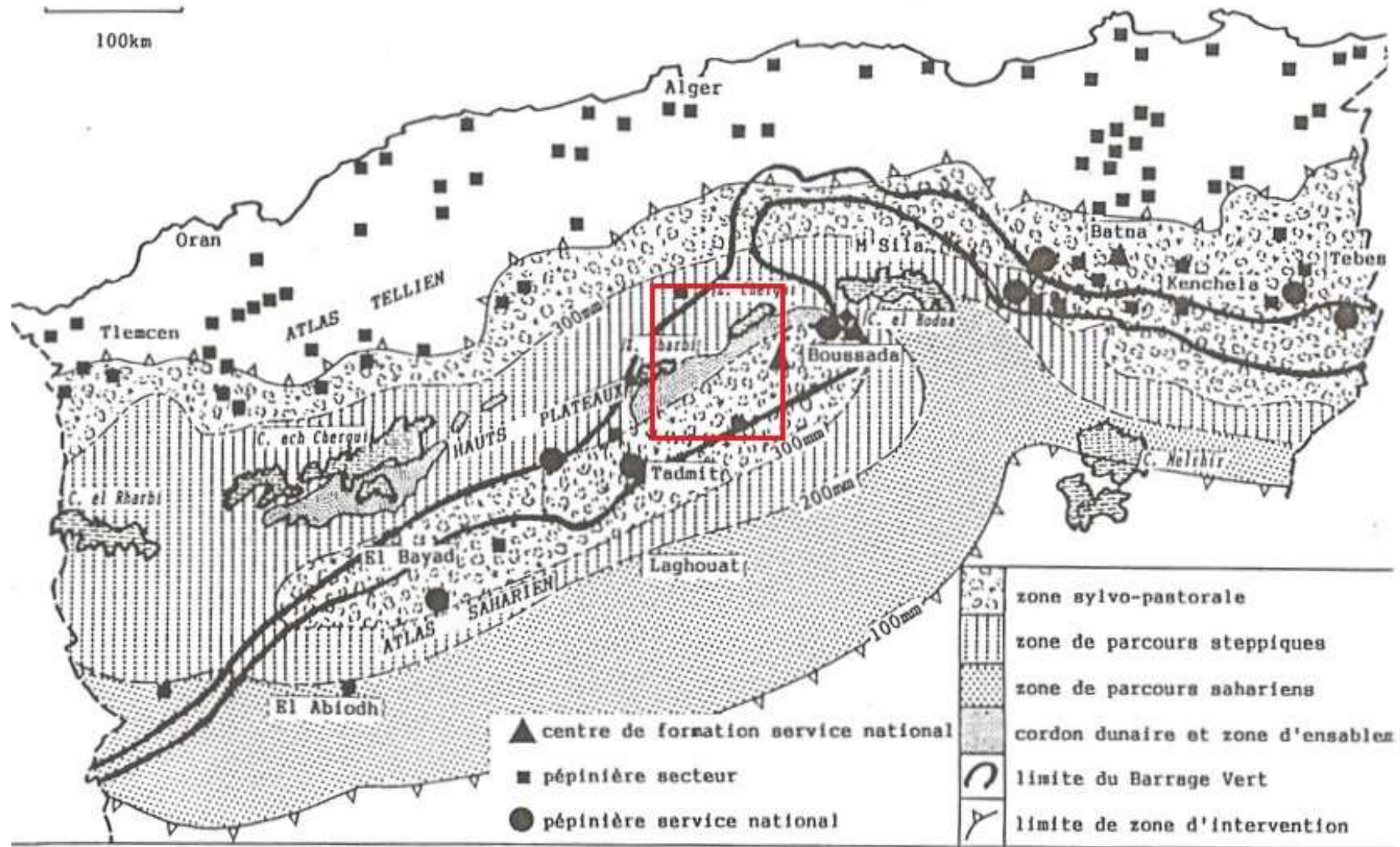


Figure 24 : Carte de délimitation biogéographique des steppes algériennes (Benazzouz, 2000), délimitation de la zone d'étude (rectangle rouge).

1.7. Transformation du mode d'élevage

De profonds changements ont bouleversé le système d'élevage traditionnel qui a réussi à traverser des siècles. Ce système est basé essentiellement sur la transhumance en grands déplacements saisonniers vers le Nord et le Sud, assurés par des nomades en perpétuelle mobilité en quête de la complémentarité végétale.

1.7.1. Déclin du nomadisme et mutation vers l'agro-pastoralisme

Nous ne donnerons qu'un aperçu rapide sur une dynamique qui existait et était considérée comme un système d'utilisation rationnelle des ressources. Au XIV^{ème} siècle, Ibn Khaldoun (1374), décrivait l'élevage dans les zones steppiques comme une transhumance basée sur le déplacement des familles et de leurs troupeaux. Mais, au 20^{ème} siècle, il n'a cessé de reculer pour laisser place à la sédentarisation. La transhumance n'était effectuée en 1996 selon Wael *et al* (2009) que par 5 % de la population steppique, pour 43 % en 1968.

La dynamique de déplacement des pasteurs commence par une remontée vers le Nord dès avril ou mai. Ils stationnent temporairement dans les limites méridionales des montagnes de l'Atlas tellien en attendant l'achèvement de la moisson. Le retour se fait généralement au mois de septembre ; ils arrivent à la steppe en octobre, avec les premières pluies d'automne. Déjà en 1853, Daumas évoque d'autres intérêts de transhumance comme le troc pour échanger les produits (dattes, haïks fins, burnous, plumes d'autruche) contre des produits du Nord (grains de blé, orge)

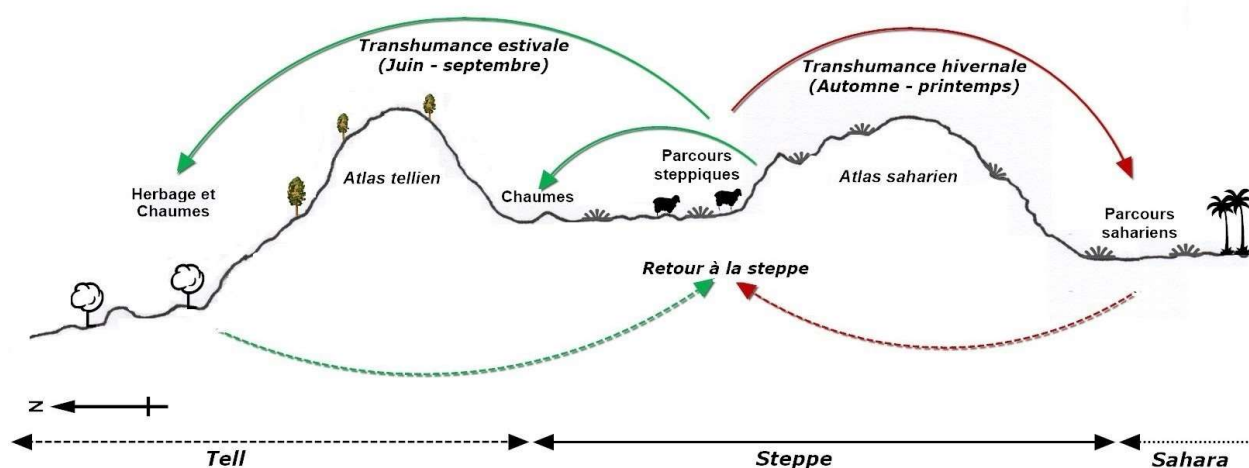


Figure 25 : Mouvements des pasteurs et de leurs troupeaux dans les systèmes d'élevage traditionnels

Pendant les sept années de la guerre d'indépendance (1954-1962) les autorités militaires de l'époque ont interdit le déplacement et ont regroupé les populations dans des centres afin de

contrôler les combattants. « Regrouper les nomades, aligner les tentes le long d'une piste, c'est faire fi des fondements même du nomadisme. Ces villages de toile d'un nouveau genre ont privé les nomades de la plus grande partie de leurs ressources » (Sivignon, 1963). Après l'indépendance, le ralentissement du mode de production traditionnel est accentué, car il est jugé incompatible avec les pratiques modernes. Cela « n'a fait que suivre ce qui a été initié durant la période coloniale : regroupement de la population steppique et abolition du nomadisme » (Hadeid, 2008).

Toutefois, cette dynamique de mutation se trouve amplifiée dans les années soixante-dix. Dans ses travaux Bensouiah (2004) le constate et le lie au début de la complémentation de l'alimentation des animaux, tout comme le défrichement des terres de parcours et à la sédentarisation. La quête de sédentarisation, se trouve confortée par les remarques de M. Despois cité par Sivignon (1963) sur les raisons d'abandon de ce système : il remarque que les grands nomades Ouled Yacoub, depuis qu'ils ont reçu en 1908 la zone d'Aïn Sidi Ali, à la limite de l'ancienne commune mixte d'Aflou, se sédentarisent et ne remontent plus vers le Tell.

Déjà, il y a plus de 30 ans, Bisson & Callot (1986) résumaient ce déclin : « la sédentarisation s'accélère, cela ne surprend guère dans l'Algérie d'aujourd'hui ; par contre ce qui est plus surprenant c'est qu'il reste encore des nomades (...) Alors que les bases sur lesquelles repose le nomadisme traditionnel se sont effondrées ». C'est ainsi, les derniers campeurs avec leurs moutons ont disparu du paysage d'été dans le Nord (Tell) au cours de la décennie 1990-2000. En effet, cette période connaît une forte insécurité en Algérie. Craignant pour leur sécurité ainsi que pour leur bétail, ils ont réduit leurs déplacements. L'impact de cette période est encore mal documenté.

Parallèlement à cette décadence du nomadisme, d'autres chercheurs évoquent une mutation de forme, où l'activité s'organise pour s'adapter aux nouvelles exigences. Hadeid (2008) remarque la perte de la prédominance de cette activité, « La famille nomade est fixée dans les petites agglomérations steppiques ou dans les centres urbains, alors que le père ou les fils pratiquent l'élevage transhumant avec des moyens de mécanisation modernes ». Cette mutation a été vue par Bisson & Callot (1986) sous un autre angle de vue, celui de la compétition d'accès aux ressources végétales, « dont les grands gagnants sont les nomades qui disposent de moyens de transport motorisés, ce qui leur permet, d'être au plus vite dans les secteurs de bon pâturage ».

1.7.2. Mutation de la complémentarité d'élevage

Dans les régions steppiques, le pâturage basé sur des ressources naturelles, est le résultat de plusieurs siècles d'ingéniosité et d'adaptation pour pallier les fluctuations et l'insuffisance des ressources. La manifestation de ce savoir-faire est la complémentarité végétale, développée à travers un système de transhumance et de déplacement. Ce mode s'est transformé en un élevage basé sur la complémentarité alimentaire « concentrés – pâturage ».

Le système d'aide aux éleveurs a pour origine la volonté de gérer les situations d'urgence, afin d'amortir le choc créé par la sécheresse climatique, évitant ainsi des conséquences socio-économiques désastreuses. En termes d'impact environnemental, on invoque souvent que l'aide apportée par l'Etat limite la perte de cheptel par effet régulateur de sécheresse. Elle maintient effectivement un bon nombre d'animaux, ce qui impacte la régénération écologique des parcours pendant la phase sèche la plus critique.

L'expression des nomades « L'orge mange le troupeau » rapportée par Bisson & Callot (1986) traduit bien cette situation pathétique. Celle de s'appuyer sur le pâturage afin de réduire l'utilisation d'orge même si l'herbe est à l'état précoce. Mais elle met également en évidence le fait que cette activité est régie par logique économique, et que ces règles ont été bien assimilées par les nomades. Avec un coût élevé pour acheter des compléments alimentaires (orge principalement), l'activité devient moins rentable. Cette information indique une obéissance de l'activité aux règles du marché. Mais nous ne savons pas si, nous sommes en présence de facteurs de régulation économique ou bien si les éleveurs préfèrent garder un nombre élevé de troupeaux en attente d'années meilleures.

A travers une grille d'évaluation, BENIDIR (2015) privilégie le système transhumant en termes de durabilité, qu'il juge plus conciliant avec les ressources par son effet positif sur la régénération des parcours steppiques. Mais, ce constat est valable s'il est fait sans surpâturage. Avec la persistance du déficit des parcours, et afin de couvrir les besoins de cheptel croissant, cette forme d'aide s'est transformée : d'occasionnelle, elle est devenue une forme structurelle encadrée et encourage l'activité. L'importation d'orge ne cesse d'augmenter, et une part importante de foin et d'orge du Nord est transportée par camions vers ces régions.

Mais cette forme d'aide structurelle, ne traduit-elle pas la volonté du planificateur de dépasser la dualité souvent avancée entre élevage et environnement ? Pour limiter le pâturage traditionnel extensif, et autour du savoir-faire d'élevage ancestral, il faut envisager de construire un modèle d'agro-pastoralisme. Soutenir l'activité est devenu un enjeu avec l'adoption d'une politique de subventions. En effet, dans ce cas, écrit BENIDIR (2015) la durabilité de l'élevage ovin dans la steppe est déjà compromise par la fragilité de l'écosystème steppique, elle se trouve également tributaire par la fluctuation des ressources financières de l'Etat dépendantes de la rente pétrolière.

Nous pouvons remarquer que la complémentarité alimentaire entre le Nord et Sud existait depuis des siècles, mais c'est uniquement sa forme qui a évolué. Au lieu que le bétail ne se déplace pour transhumer quelques mois, afin de chercher sa nourriture au Nord, c'est désormais le complément alimentaire qui se déplace vers le bétail en empruntant le chemin inverse, du Nord vers le Sud.

1.8. Agriculture extensive soutenue par une mécanisation effrénée

Dans cette partie, nous différencierons deux formes d'agriculture : La forme traditionnelle qui est presque une agriculture de subsistance, et la deuxième, contemporaine, mécanisée qui s'étale sur de grandes surfaces.

1.8.1. L'agriculture traditionnelle

Comme nous l'avons vu, la céréaliculture est pratiquée depuis longtemps. Elle se basait sur l'apport d'eau naturelle et le ruissellement, elle se localisait sur des terrains inondés par les décrues ou sur les lits des cours d'eau. Par ailleurs, ces terrains sont aussi des lieux privilégiés pour la végétation naturelle constituant des parcours steppiques. Mais les moyens de labour traditionnels, fondés essentiellement sur la force animale, ne lui permettent pas de s'étendre en surface. Ce que nous allons essayer de démontrer en deux points.

- **Raisons économiques** : l'agriculture traditionnelle basée sur la force animale nécessite des bêtes (ânes ou mules), qu'il faut entretenir (nourriture, soins). Labourer des terres où le rendement est incertain, devient une opération hasardeuse, au vu des précipitations. Capot-Rey (1953) résume cette relation : *Le grain qu'il confie au sol est moins un capital qu'il prête qu'un enjeu qu'il risque ; il n'y a pas de contrat entre la terre et l'homme.*
- **Raisons biophysiques** : L'autre caractéristique de l'agriculture de cette région est le fait de labourer le sol tout de suite après l'arrivée des précipitations. De cette façon les grains profitent de l'humidité résiduelle du sol. Passé un certain délai, le sol devient trop dur pour pouvoir retourner la terre et la chance de revoir la pluie pour reconduire l'opération demeure mince. Donc le labour est une opération rapide dans une période qui ne devrait pas dépasser 15 jours après le passage de l'orage.

Avec la force animale, la surface cultivée se trouve vite limitée par la durée de labour, aussi elle se concentre sur des endroits préférentiels qui sont généralement les larges lits des cours d'eau, des bas-fonds et des daïas afin de profiter au maximum du ruissellement, de l'humidité et de la présence d'un sol.

Les deux raisons évoquées précédemment constituent le socle des contraintes qui ont régulé pendant des siècles l'activité de céréaliculture, en la limitant à des terres fertiles, là où les récoltes ont le plus de chance d'être assurées. Elles ont maintenu ainsi, depuis fort longtemps, un équilibre entre les parcours et l'extension de l'agriculture, qui se limite aux zones optimales dans ces régions. Ce système traditionnel, en petites surfaces apparaît compatible, il ne porte pas atteinte à l'équilibre de la composante écologique steppique. En effet, avec l'araire « les agriculteurs tracent des sillons irréguliers pour contourner les touffes de doum ou de

jujubier » (Larnaude, 1921 cité par Clerc, 2008). Le labour superficiel traditionnel permet la régénération des parcours, la conservation de l'herbe et une meilleure protection contre l'érosion hydrique et éolienne.

1.8.2. L'agriculture contemporaine

La véritable amorce de l'agriculture à grande échelle dans les régions steppiques est apparue à la fin du 19^{ème} au début du 20^{ème} siècle. On observe une exploitation par les colons des parties les moins pluvieuses des hauts plateaux, au-delà de la limite traditionnelle de la culture des céréales afin de cultiver les plaines de Sersou, d'Aflou et de Djelfa. Déjà, de sérieuses réserves ont été émises dès 1907 quant à l'adaptation de la charrue européenne et des labours profonds à tous les types de sols, et notamment dans le parcours steppique (Clerc, 2008).

Dans le paradoxe des mesures, les travaux d'extension des surfaces agricoles entrepris par les colons étaient qualifiés d'aménagement, considérés comme transformation des terrains caillouteux et d'herbe sauvage en plaines cultivables. Alors que pas loin, de petites parcelles de labour superficiel appartenant aux fellahs « paysans » sont discréditées en défrichement.

Dans ces régions, on dispose de peu d'études traitant l'impact de cette mise en culture conquérante sur l'élevage, et les conséquences de la rupture et la déchirure de l'unité végétale steppique, elle assurait l'herbage lors de la migration de transhumance provoquaient la coupure de la route millénaire de transhumance Sud-Nord.

Après l'indépendance, ces régions ont connu une deuxième vague d'accélération de mise en culture. L'arrivée des tracteurs, associée à un gasoil à bas coût, a provoqué le remplacement rapide de la force animale par la force mécanique dans tous les travaux d'agriculture. Dès lors, l'araire traditionnelle a cédé la place à la charrue. Le tracteur laboure en une journée quarante fois plus que l'attelage animal (H. Khatteli, 1981 ; G. Novikoff, 1983 in Talbi, 1997). De plus, la limite imposée par le sol à la force animale (labourer durant 15 jours après l'orage) se trouve caduque avec le tracteur. En effet, la force mécanique permet de continuer de labourer la terre longtemps après l'orage, et de semer tardivement.

Sur une autre échelle géographique, l'exemple le plus marquant, est la mise en culture inappropriée des plaines du Middle-West aux Etats-Unis, qui a causé une grande catastrophe environnementale de 1930 à 1939. De grandes tempêtes de poussière, le «Dust Bowl» ont balayé les terres arables des plaines américaines. Les préjudices furent importants : 30 millions d'hectares abandonnés, provoquant l'exode massif de 3.5 millions d'habitants. L'autre exemple est le projet "Terres vierges" lancé en 1954 au nord du Kazakhstan, 40 millions d'ha des steppes ont été défrichés pour cultiver des céréales du printemps (Lahmar, 2003). Dans cette région à fortes variations pluviométriques, la production chute de 18 à 5 millions de tonnes lors des années sèches. Dans ces conditions, il est devenu presque impossible de tenir l'équilibre

financier des coopératives. Des tempêtes de poussières se sont alors développées et ont causé des destructions écologiques (voir détail de deux évènements en annexe).

Aujourd'hui, le paysage de Djelfa affiche plusieurs formes de mises en culture : une agriculture céréalière à grande échelle, des parcelles de subsistances isolées, ainsi que l'émergence de nouvelles formes basées sur l'irrigation, l'arboriculture et le système de tabias. L'agriculture de céréaliculture à grande échelle se pratique dans les plaines. Principalement à Ain-Oussera, dans les plaines de Maâlba qui s'étalent sur 25 km à l'Est de Djelfa (Figure 26) et les plaines de Moudjbara.

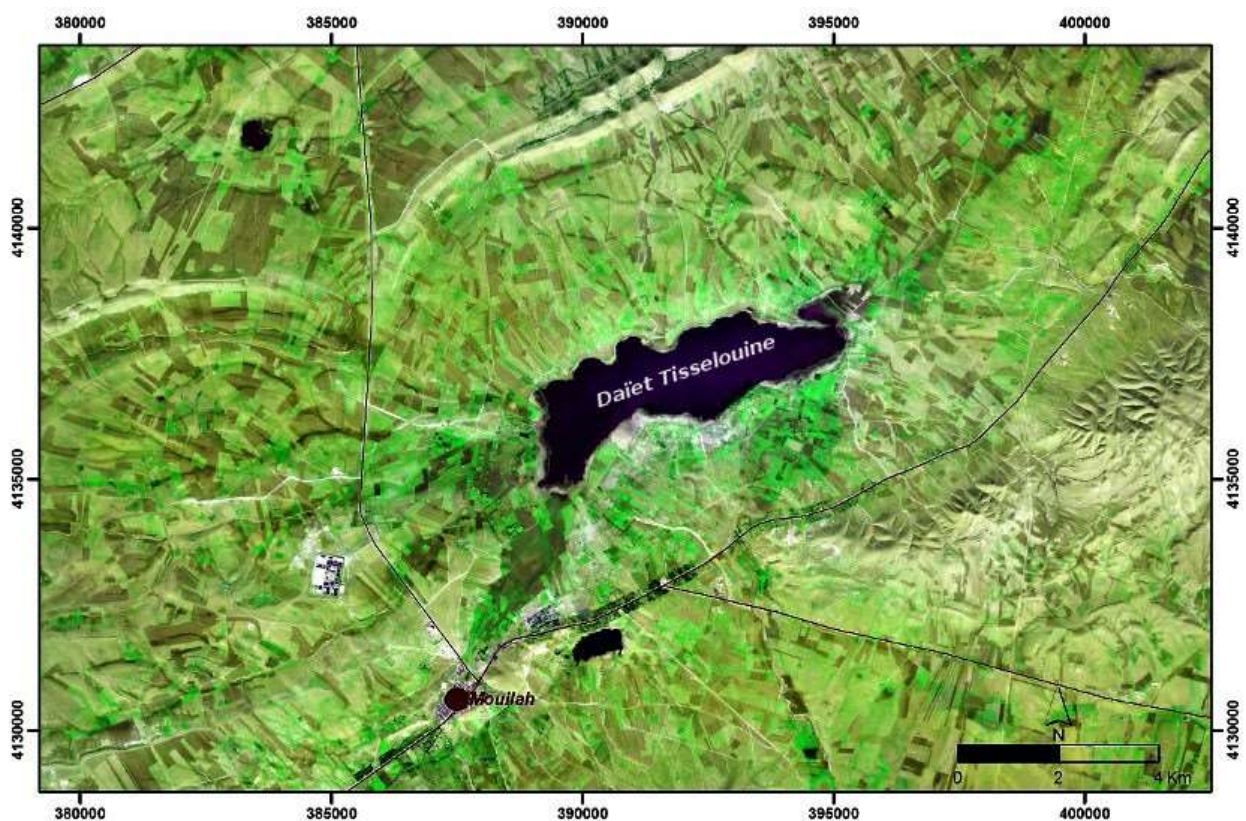


Figure 26 : Mise en culture des plaines orientales, autour de Daïet Tisselouine à 25 km de la ville de Djelfa. Composition colorée 4-8-2. En vert les parcelles de céréales, en brun noir les labours non semés (Image satellitaire Sentinel-2 du 15/12/2015, 34°48'13N - 3°31'9E).

Cette agriculture se pratique de façon presque permanente. Elle utilise tous les outils mécaniques modernes de labour, les semences, l'engrais et la récolte. Sa fragilité réside dans sa dépendance à la pluie qui est très aléatoire, par conséquent les rendements sont fortement perturbés. Dans l'image suivante de Sentinel-2 du 15 décembre 2015, on observe dans l'extrémité orientale des plaines de Maâlba, une mosaïque de parcelles mises en culture autour de Daïet Tisselouine. Elle atteste non seulement d'une métamorphose complète de ce qui était jadis des parcours, mais également d'une forte pression de morcellement, par suite de divisions successives des terres. Bien que le morcellement exprime la valeur accordée à ce patrimoine, au regard des expériences d'autres pays, cette pratique tue l'agriculture. Elle cause la

fermeture d'accès aux parcelles, entrave fortement sa modernisation et cause l'abandon des terres.

Une autre forme d'agriculture est la présence de parcelles disparates cultivées ici et là sans pour autant former de grandes étendues. Cette forme d'agriculture est située généralement dans les secteurs les plus humides, dans les bas-fonds ou suivant les cours d'eau. Toutefois, l'accumulation des facteurs favorables à son extension, la capacité de démultiplier la surface labourée par le tracteur dans un environnement d'accès libre à la terre, concourent à l'installation d'un contexte de compétition au défrichage. Les préfaces de cette mécanisation sont à double conséquences sociales et environnementales :

- La propriété de la terre est collective avec un mode d'organisation tribale. L'absence de propriété foncière privée a été décriée dès le 14^{ème} siècle par Ibn Khaldoun (1374), il la classe comme facteur de déclin. Si en mode d'élevage, la propriété commune (tribale) assurait un certain niveau d'accès à tous les membres de la tribu, en mode agriculture, elle se révèle un vrai facteur d'inégalité sociale entre les individus. Les privilégiés sont ceux qui disposent des tracteurs. Ils s'approprient la terre par la fréquence d'usage avec les mises en culture répétitives
- La disponibilité des terres en accès libre, dès les années 70, avec la présence des tracteurs, confère à l'agriculture un caractère extensif dans l'espace plutôt qu'intensif (sans investissement). En effet, dans la région de Djelfa, les labours gagnent encore les glacis avec peu de sol, les surfaces ensablées et les sols pauvres. L'agriculture se développe au-delà des zones traditionnellement réservées (Figure 27). A une échelle plus large, ces constatations sont constatées par la (FAO, 1995b) : Les subventions sur les carburants et les engrais, particulièrement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, ont souvent exagérément favorisé le défrichement des zones munies du plus grand potentiel dans les régions de parcours arides, pour en faire des terres de culture marginales ».

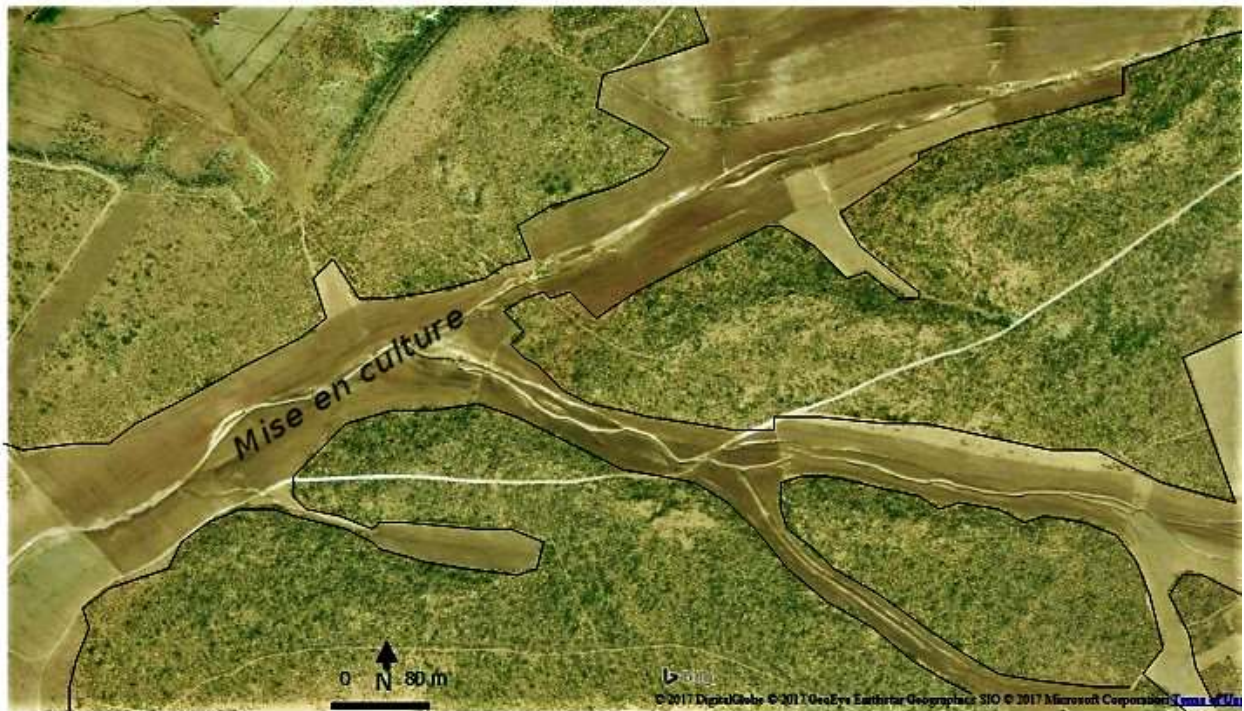


Figure 27 : Défrichement pour une mise en culture pluviale épisodique et aléatoire. Toujours extensive, après avoir conquis les plaines, la mise en culture des terres gagne le haut du relief par défrichement. Les labours dans les lits des cours d'eau augmentent le pouvoir d'incision et favorisent l'érosion hydrique par ruissellement. Djebel Hammar (1250 m) au Nord-Est du Daïet Chouiouia. (Image GeoEye novembre 2013, 34°47'42"N - 3°47'57"E)

En termes d'impact, des réserves sont émises quant à l'inadaptation du labour à charrues à disques. Il est considéré comme négatif, non seulement, pour le sol car il l'expose à l'érosion, mais également pour la végétation car il entraîne une destruction des espèces pérennes. En effet, ce mode de labour expose le sol à l'érosion hydrique mais surtout à l'action du vent, avec des pertes en sol importantes, allant de 50 à 250 t/ha/an (Talbi, 1997). Dans leurs travaux de quantification d'érosion éolienne dans les régions arides (pluviométrie inférieure à 200 mm) dans le sud tunisien BERGAMETTI *et al.* (2015) intègrent l'occupation du sol et la rugosité induites par les éléments pérennes de la surface du sol. Ils signalent également l'importance de l'érosion éolienne depuis les espaces cultivés.

Si le couple agriculture-élevage demeure une composante de la vie des éleveurs, c'est maintenant dans sa forme et dans son extension que l'agriculture peut se révéler incompatible avec le milieu. Le morcellement des parcours par les parcelles cultivées entrave progressivement la souplesse des déplacements et coupe l'accès des animaux à des zones de pâturages. Durant les années 1990, Aidoud (2006) avance le chiffre de 30 à 50 % de la surface de la zone semi-aride et steppique labourée au moins une fois, avec souvent de faibles rendements. Assurément, l'abandon de la terre engendre le recul de la productivité de la phytomasse avec l'apparition d'espèces post-culturelles peu appétantes comme l'arfej (*Rhanterium suaveolens*).

Il semble également que les incertitudes des rendements amènent à la prise de conscience des limites de ce modèle. On assiste à l'émergence de nouvelles formes d'agriculture. Nous pouvons citer l'agriculture irriguée, hiver comme été, qui se base principalement sur les forages et sur quelques points de retenue d'eau (barrage). Elle prend deux aspects ; concentrée dans les plaines (Moudjbara, Messâd...) ou dispersée sous forme de parcelles bien verdâtres l'été, en fort contraste avec le reste du paysage. Notons enfin l'introduction de l'arboriculture, dont de superbes réalisations commencent à se manifester.

Le paysage de la région est parsemé de parcelles en culture arbustive, constatées sur l'ensemble des unités de paysage. A ce stade, il semble qu'on leur réserve les terrains le moins favorable. C'est vers Messâd, qu'on trouve un modèle mixte légumes et arboriculture se développant sur le terrain le plus fertile. Dans l'image qui suit, on observe ces magnifiques réalisations d'agriculture arbustive réalisées au SO de la ville de Hassi Bahbah. Elles évoluent sur une bonne partie des zones concernées par le passage du sable. Le voile sableux reste visible aux limites Est de cette parcelle.



Figure 28 : Mise en culture arbustive près de la ville de Hassi Bahbah. Réalisée sur le chemin du passage du sable, elle évolue à côté d'un voile sableux (Image GeoEye avril 2014, 35° 2'53 N - 3° 0'55E).

Signalons enfin deux autres types de pratiques agricoles moins connus : les mises en culture mixtes avec les arbres utilisés pour la lutte contre l'ensablement et l'aménagement en tabias. Elles illustrent non seulement la diversité des formes d'adaptation aux contraintes de l'environnement, mais également la variété du processus de transformation qui animent cette région.

Quand la densité des arbres de reboisement de lutte contre l'ensablement est faible on observe le maintien ou le retour du labour au pied des arbres. Ce que nous présentons ici (Figure 29), n'est pas une exception mais plutôt des réalisations que l'on trouve à Dar Chioukh, à Hassi Bahbah et Had Sahary, elle est présente dans les hautes plaines comme dans les monts d'Ouled Nail. Nous pouvons évoquer l'émergence d'un nouveau modèle d'agriculture mixte, dont le labour de la terre pour la mise en céréaliculture, s'exerce en juxtaposition avec les réalisations de lutte contre l'ensablement.

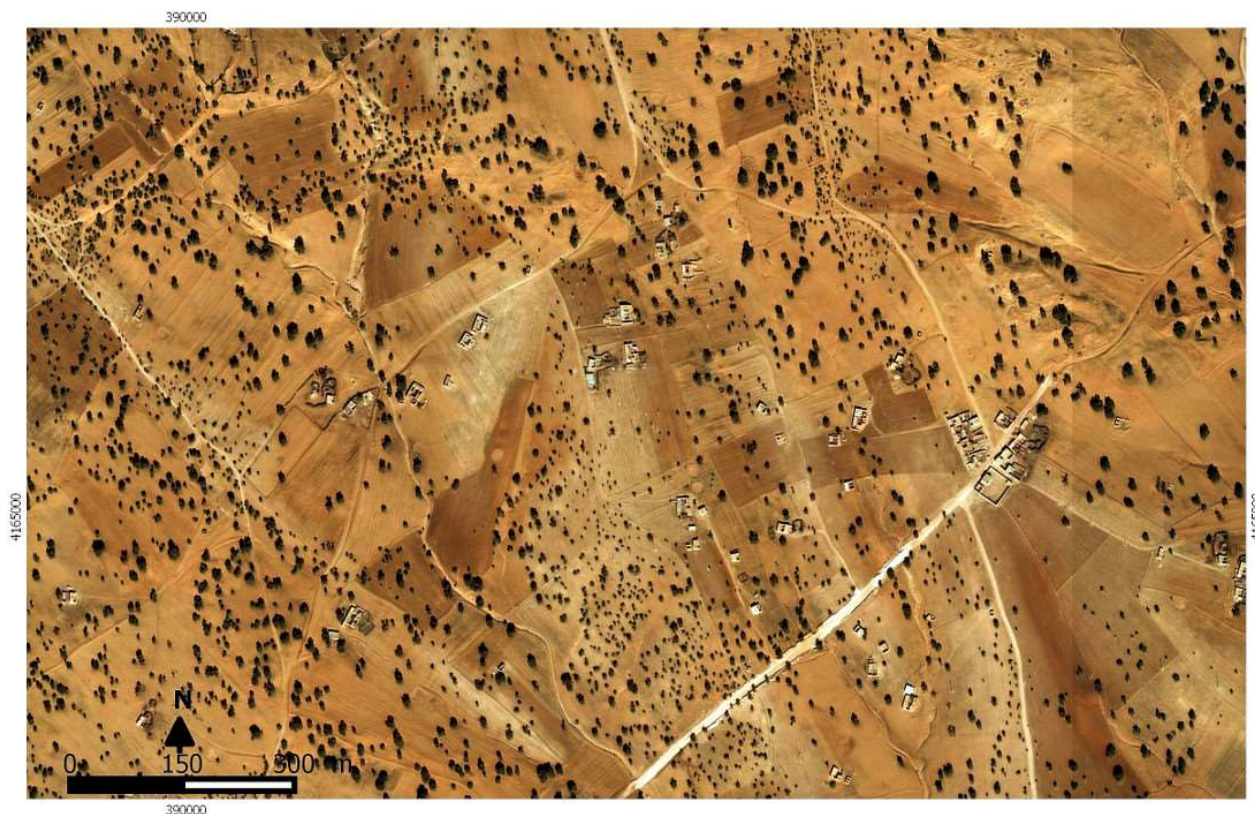


Figure 29 : Reboisement des terres anciennement cultivées pour la lutte contre l'ensablement, labour de la terre au pied des arbres. (Nord-est de Dar Chioukh, Image GeoEye novembre 2010, 35°N - 3°30E)

L'autre nouvelle forme d'adaptation qui apparaît, consistant à valoriser la terre des pentes et des glacis, est la construction de « tabias », sous forme de barrages avec des cordons en pierre pour barrer les cours d'eau. Cette technique piège les limons fertiles et favorise l'infiltration d'eau. Nous avons pu recenser plusieurs sites récemment construits, situés au Nord près de Ain Ouessara et au Sud également. Mais il est trop tôt pour parler d'émergence d'un nouveau modèle et loin encore de parler d'une généralisation. Il est intéressant, de signaler que cette fois-ci il s'agit d'une forme d'agriculture intensive et non pas extensive. En revanche, l'obsession de cultiver des céréales, l'orge principalement, demeure toujours inchangée. Il est regrettable que ces terrasses ne soient pas orientées vers l'arboriculture (oliviers) ; les résultats seraient nettement meilleurs. Ce type d'agriculture en terrasse se pratique jusqu'à la limite du Sahara. Selon Le Houérou (1995), ce système très ancien fut utilisé

par les Nabatéens (1900 à 2300 P.B). Il se manifeste en Tunisie (Gafsa et Matmatas) et en Tripolitaine (J.Nefousa).



Figure 30 : Parcelles d'agriculture de ruissellement sur les versants sud de Djebel Tlila, À 2 km au nord-est de Daïet Chouiouia. (1) Tabias, des murets empierrés de 50 cm de hauteur (2) lignes de labour pour délimiter et réserver l'espace (Image GeoEye novembre 2013, 34°47'50N, 3°42'E)

Les vertus de ce système de cordons empierrés ainsi que son fonctionnement ont été évoqués dans une étude portant sur les risques érosifs liés à l'agriculture dans un milieu semi-aride algérien (Arabi *et al.*, 2007). Les auteurs constatent une variation des performances en fonction de l'importance des averses : une très forte efficacité durant les averses inférieures au seuil de 50 mm de pluie pendant lesquelles ils agissent comme des filtres qui ralentissent la vitesse des écoulements, provoquent une baisse de la compétence du ruissellement et favorisent le dépôt de sables grossiers et de matières organiques en améliorant l'infiltration. Si les pierres sont bien juxtaposées elles filtreront les pailles, les fèces et diverses matières organiques flottantes, ce qui fait dire aux paysans que ce dispositif est bien adapté pour restaurer la fertilité des sols. Le cas, des averses exceptionnelles, supérieures à 50 mm, n'a pas été détaillé par les auteurs.

1.9. Entre héritage et mutation

Comme nous l'avons évoqué, depuis des milliers d'années ces régions sont spécialisées dans l'élevage, attesté par le développement d'un système d'élevage très sophistiqué. Au cours du temps, la transhumance a réussi à apporter la réponse aux problèmes d'équilibre posés par la fluctuation des ressources. Jusque-là, le mouton était au centre de toute préoccupation, relation sociale, ambition, convoitise, conciliation. Présent dans tout événement (fête, tradition, religion, folklore, rite, etc...), influence la gastronomie, le vestimentaire et l'habitat. Il est l'unité de mesure de la générosité et du statut social, le patrimoine mobile des familles et symbole de richesse des individus et des tribus ; la monnaie d'échange et la devise pour acquérir les biens de valeur (maison, terre) ; utilisé pour rémunérer les bergers. Les aïeux, mesuraient et qualifiaient l'étendue de la terre et sa qualité d'herbage par le mouton (étendue « ber » pouvant accueillir 3000 têtes) c'est la traduction exacte de ce qui est devenu, par la suite, la capacité de charge. Dans cette échelle de mesure « mouton » on trouve des graduations dont Sboa (le doigt) est équivalent à 200 têtes et « Aassa » (le bâton du berger qui remplit la poignée et mobilise les cinq doigts) traduit 1000 têtes de moutons.

Dans ces lieux, tout doit s'adapter au mouton, le chemin allant forcément aux parcours, les sources d'eau parsemant la région sont aménagées en points d'abreuvement pour le mouton. Les arbres taillés à hauteur des moutons pour qu'ils puissent se mettre à l'ombre, la végétation sélectionnée pour le mouton. Les autres animaux, le chien, l'âne et la mule étaient au service du mouton. Quant à l'homme, servir et s'occuper du mouton était le métier le plus noble, signe de liberté et de vie au plus près de la nature. Dans cet espace décrit comme monotone, le nomade développe des facultés aiguisées afin d'identifier les variations les plus subtiles des phénomènes naturels, tels que : discerner la disposition des reliefs et la convergence des eaux, décrypter les orages et prévoir la pousse d'herbe. Leur activité exige des connaissances intimes de la flore et leur relation avec les animaux. En perpétuel mouvement, en arpentant les traces des ancêtres. Dans cette école on apprend l'art de déchiffrer le visage du mouton, de savoir saisir d'un regard la fatigue de la marche, la soif, la douleur de la brûlure du soleil, la morsure du froid de l'hiver, l'inquiétude et la peur ; venir en aide pour mettre bas, etc... C'est également autour du mouton que le temps s'organise, pour rythmer les saisons de migration en transhumance.

Dans la richesse de ce foisonnement, l'expérience de l'individu apparaît très modeste, elle fait appel à la mémoire des anciens récitant la poésie, la sagesse et les glorieuses histoires emplies de récits de générosité pour faire face aux inégalités sociales⁶. A chaque génération, il faut s'approprier des pans entiers d'histoire léguée par la génération précédente et, de fait,

⁶ Basé sur l'étude de 21 communautés rurales dans le monde, l'examen de la transmission des disparités à travers des générations apparaît très forte chez les pasteurs par rapport aux autres communautés. Elle est accentuée par l'héritage intergénérationnel des troupeaux (Mulder et al., 2009). Dans la steppe algérienne, la régulation de la dynamique des inégalités sociales s'opère entre autres par des préceptes religieux qui introduisent l'aumône annuel à hauteur d'un mouton pour quarante.

enrichir la mémoire collective par la part d'expérience individuelle et transmettre la culture orale. L'expérience de l'individu se forge et s'enrichit également au sein de la collectivité par l'interaction et la transmission des cultures. Les nomades tissent des liens avec des communautés éloignées, dans le Nord et dans le Sud, le long du chemin emprunté à maintes reprises. En effet, il faut assimiler le droit foncier et les règles régissant le pâturage des parcours entre tribus. La solidarité se déploie, par la souplesse et la tolérance en matière d'herbage pour faire face aux conséquences de la sécheresse et lors de la traversée en transhumance.

Cette description est présentée comme facteur et non pas comme déterminant ou variable de contrôle, car elle peut apparaître manquer d'objectivité scientifique. Si l'analyse de l'imagerie satellitaire permet de caractériser les objets de surface et de mesurer les changements, c'est cette description qui permet non seulement de saisir en profondeur et d'expliquer le sens des changements opérés dans le temps, mais en plus, d'articuler le passé et le présent comme un ensemble (flux), afin d'esquisser la trajectoire future.

Grille de toute lecture et unité de mesure durant des milliers d'années, le mouton a façonné le paysage visuel et le paysage sonore (soundscape⁷), la vie et les interactions sociales. Il dessine les contours du temps et de l'espace. C'est à travers ce profond passé qu'il faut lire les changements qui s'opèrent dans le présent. Sur le long chemin d'adaptation, la mutation vers la pratique d'agriculture à grande échelle apparaît très récente. Elle est liée à la disponibilité de la méca-nisation dans les années 70 et 80. Cette transformation n'avait qu'un seul but, s'inscrire dans le prolongement de l'activité du passé par la production de compléments alimentaires pour le bétail.

En effet, tout le poids de ce long passé d'enracinement millénaire de l'activité d'élevage guide et influence encore les changements actuels. Assurément, dans les régions steppiques algériennes le dense passé qui vient du fond des âges, depuis la transition du Néolithique à la domestication des moutons, exerce une force d'attraction pour la polarisation de l'activité autour de l'élevage. Ce passé demeure le lien invisible qui tisse la trame du processus de transformation avec ses innombrables interactions.

Cette jeune pratique de mise en culture a subi de plein fouet la sécheresse des années 80, suivie par la deuxième séquence des années 2000. La manifestation de l'ensablement atteste de la sévérité mais également des conséquences imprévisibles jusque-là, d'une sécheresse couplée à la mise en culture. Ces deux ondes de chocs ont-elles créé un tournant dans le mode d'exploitation ?

La première résonance à ces échos s'exprime dans l'action publique par la multiplication des travaux de restauration et de mise en défense. De même, chez les agro-pasteurs se dévoile

⁷ Soundscape : nouveau mot (néologisme) introduit en 1977 par Schafer, il exprime « l'environnement acoustique ». Livre traduit en français : Le Paysage sonore, Schafer&Gleize (1979).

la prise de conscience des limites de ce modèle de culture basé uniquement sur les caprices des pluies imprévisibles et le risque d'ensablement bien préjudiciable.

L'évolution actuelle confirme davantage l'emprise humaine sur l'espace, elle dévoile deux formes d'évolution. Celle qui reste liée à l'exercice de l'élevage, en plus de la culture pluviale qui utilise l'irrigation des champs d'orge et de maïs. L'autre forme évolue indépendamment de l'élevage, il est question des potagers de légumes et de la mise en arboriculture. Mais le trait commun à ces deux manifestations est le besoin d'accéder et de mobiliser une nouvelle ressource, il s'agit des ressources en eaux souterraines captées par des forages. C'est dans cette ressource en eau souterraine que s'inscrit désormais l'un des enjeux du futur. Les services de l'Etat doivent se préparer afin d'accompagner ce tournant et proscrire dès à présent l'émergence de pratiques hydrovores.

La culture arbustive prend de plus en plus de place, elle représente probablement le levier de la nouvelle transformation. Cette alternative est une véritable métamorphose en profondeur. Essentielle, elle contribue à la diversification de l'usage des terres, et peut donc offrir un rendement direct à la population, et protège aussi la terre du fléau des dégradations. C'est ainsi que la protection de l'environnement devient non pas un frein mais un paramètre et un moteur de la croissance économique.

1.10. Conclusion

Par sa position entre deux régions contrastées, le Sahara au Sud et l'espace maritime au Nord, la région de Djelfa reçoit des quantités pluviométriques qui permettent le développement de la faune et la flore méditerranéennes. Les conditions plus humides du passé ont permis l'installation des conditions nécessaires au développement du Néolithique, attesté par le nombre important de sites, ainsi que la diversité des gravures.

Carrefour et berceau de civilisation, la Méditerranée engendre un brassage de cultures et de populations pendant les périodes de paix et lors des conquêtes. L'histoire de Djelfa est intimement liée à l'histoire de l'Algérie du Nord, marquée par les six siècles d'occupation romaine. L'avènement de l'islam, à partir du VII^e siècle, emporte l'adhésion de la population, des villes et féodalités. Le commerce devient universel, lors de cette période appelée l'âge d'or d'islam, on assiste à l'émergence des conditions économiques et sociales qui forment de solides bases de la société. La période du déclin coïncide avec l'arrivée de tribus nomades arabes au XI^e siècle, qui est une conséquence plus qu'une cause. Elle est suivie par la présence des Ottomans puis par la période coloniale française. Chaque période a marqué la société et l'environnement.

Actuellement, les années humides autorisent un certain niveau d'activité agricole, surtout de céréaliculture. Mais le principal caractère climatique de la région reste sa fluctuation dans le temps et la variabilité spatiale des précipitations dans laquelle la topographie joue un rôle important. Abrisées derrière les montagnes de l'Atlas Tellien, les plaines de Ain Oussera reçoivent moins de pluie que les Monts des Ouled Nail situés dans l'Atlas Saharien. Les écoulements dans ces régions convergent souvent vers des dépressions endoréiques.

L'extension de l'agriculture, la transformation des éleveurs en agro-pasteurs et le déclin du nomadisme sont autant d'aspects marquant cette dynamique socio-environnementale. De nouvelles manifestations confirmant l'émergence de nouvelles pratiques qui traduisent une meilleure valorisation des ressources avec l'intégration progressive des contraintes climatiques et des risques d'ensablement.

L'examen de la dynamique environnementale du climat, d'ensablement et de la couverture végétale nous incite à explorer et questionner les démarches d'analyse. Nous allons passer en revue quelques approches dans la partie qui suit.

Chapitre 2 : Evolution des méthodes de diagnostic

Nous allons passer en revue quelques approches et méthodes d'évaluation et de cartographie de la dégradation dans l'environnement aride et semi-aride. Ces méthodes varient considérablement en fonction des objectifs d'étude, de l'étendue de l'espace à caractériser et du type de dégradation à étudier. Les outils d'étude peuvent évoluer également, avec l'avènement de nouveaux outils qui permettent une meilleure compréhension grâce à l'amélioration de la qualité de suivi. Nous détaillerons quelques approches, dans l'idée de nous en servir afin d'influencer, voire d'adapter notre méthodologie. Nous débutons par quelques programmes lancés au niveau mondial.

Dans cette partie, ce sont les approches d'état de dégradation qui nous intéressent par rapport aux approches du risque de dégradation. Car l'évaluation de l'état relève d'observations, de mesures de la dynamique, tandis que l'évaluation du risque relève de l'anticipation et d'une prospective souvent entreprise par modélisation.

2.1. La notion d'irréversibilité de la rupture de stabilité

Dans la définition donnée par le PNUE, un paysage est considéré comme stable lorsqu'il existe un équilibre entre la morphogénèse (vitesse de l'érosion) et la pédogénèse (vitesse de l'altération de la roche et de la formation du sol). Il suffit d'une perte de terre de 12 à 15 t/ha/an (soit moins de 1 mm/an) pour dépasser la vitesse moyenne d'altération des roches, et donc, pour que l'équilibre entre morphogénèse et pédogénèse soit rompu (PNUE-Plan Bleu & Antipolis, 2003).

La notion de seuil de rupture de stabilité peut être appliquée à des écosystèmes variés : géomorphologiques, écologiques, anthropiques et socio-économiques. Ainsi, la dégradation des terres peut être conçue comme un processus dans lequel les perturbations ont dépassé la résilience de la terre. Elle concerne la perte irréversible de la capacité de charge ou du potentiel de production à des échelles de temps humaines. Elle englobe tous les processus de dégradation qui impliquent une perte irréversible ou une réduction de la productivité potentielle de la terre (Hill *et al.*, 2008).

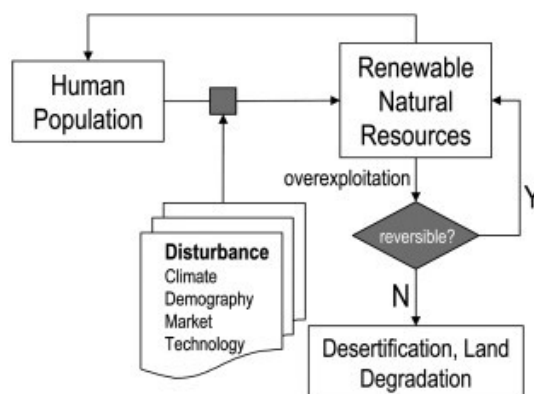


Figure 31 : Boucle de régénération entre la disponibilité des ressources naturelles et leur utilisation (Hill et al., 2008)

Sous cet angle de vue, des méthodes ont été développées pour déceler et mesurer, voire simuler, afin de les prévoir, les impacts sur la nature induits par l'activité humaine. Mais, « dans le Bassin Méditerranéen, vu l'influence millénaire de l'homme sur le façonnement du paysage, il est impossible de quantifier séparément la part de l'érosion due à l'homme et celle due à la nature seule » (PNUE-Plan Bleu & Antipolis, 2003).

2.2. La dégradation : un concept en évolution objet d'une attention internationale

La « désertification » est un concept utilisé pour la première fois en 1927 par Louis Lavauden, pour décrire l'action destructrice des hommes sur les « forêts » du Sahara (Lavauden, 1941; Davis, 2012; Magrin *et al.*, 2016; Richardson *et al.*, 2017).

Au niveau mondial, le constat d'une détérioration croissante de l'environnement incite les Nations Unies à organiser la première conférence sur l'Environnement à Stockholm en 1972. Un Comité Inter-états pour le contrôle de la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) et un organisme, le PNUE (le Programme des Nations Unies pour l'Environnement) sont créés au terme du congrès. Les premières études sur la dégradation des sols, réalisées en 1974 par La FAO et l'UNEP, produisent une carte au 1/15 000 000 : celle-ci dresse l'état des risques et les facteurs de dégradation des sols (eau, vent, sel). Elle couvre le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord où la « désertification semblait progresser » (Brabant, 2008).

La conférence sur la désertification UNCCD à Nairobi en 1977 propose la définition suivante : « La désertification est la diminution ou la destruction du potentiel biologique de la terre qui peut conduire finalement à l'apparition de conditions désertiques. Elle est un des aspects de la dégradation généralisée des écosystèmes ». Un plan d'action (PADC) pour combattre la désertification est rédigé avec 28 recommandations préconisant les actions à entreprendre. De nombreux programmes de suivi de la dégradation des sols et de désertification ont été développés, nous en exposons quelques-uns et les détaillons en annexe.

En 1989, les travaux de GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation) sont achevés. La carte à l'échelle 1/10 000 000 de l'état de dégradation des terres dans le monde sous l'effet des activités humaines est présentée en 1990 au congrès de Kyoto puis au Sommet de Rio en 1992. Les résultats de ces travaux révèlent qu'une superficie de 19,6 millions de km², soit 16 % des terres exploitables, est concernée par une forme de dégradation. L'érosion hydrique est la plus répandue avec 56 % des terres dégradées, suivie de l'érosion éolienne qui en concerne 28 % (Brabant, 2008).

En 1994, l'Observatoire du Sahara et du Sahel a élaboré un programme Réseau d'Observatoire de Surveillance Environnementale à Long Terme (ROSELT/OSS). Il s'appuie localement sur douze observatoires pilotes répartis dans les pays africains : Maroc, Algérie, Tunisie, Égypte, Cap-Vert, Sénégal, Mauritanie, Niger, Mali, Éthiopie, Kenya. L'équipe Roselt/OSS a proposé une base théorique pour classer et suivre la désertification, ainsi que la dynamique de la biodiversité et la diversité végétale en réponse aux perturbations et au stress (Le Floch, 2005). Son intérêt réside dans l'harmonisation des approches et des méthodologies de mesure et de collecte à une échelle régionale. Elle ouvre ainsi la possibilité de réaliser des études comparatives à différentes échelles entre des observatoires qui appartiennent à différentes régions écologiques.

Comme le recommandait la conférence de Rio, la Convention des Nations Unies de Lutte contre la Désertification (CNULD) est adoptée en 1994. Une nouvelle définition de la désertification est proposée par la CNULD : « dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».

Pour faire face au besoin d'avoir de nouvelles données actualisées sur le changement d'affectation des terres qui peuvent entraîner la dégradation des sols, la FAO lance le programme LADA (Land Degradation Assessment in Drylands) en 2008. Ce programme est principalement fondé sur des données spectroradiométriques d'imagerie satellitaire à résolution modérée MODIS, d'une suite de satellites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sur une période de 23 ans (1981- 2003), complétées par des données climatiques et/ou socio-économiques). La chaîne de traitement est basée sur le calcul de la moyenne annuelle de NDVI (*l'indice de végétation par différence normalisé*) et sur la production de biomasse. Les points chauds (hot spots) identifiés requièrent un traitement particulier sur des images Landsat de 30 m de résolution.

Des membres de l'équipe de ce programme Nachtergaele et al. (2011) reconnaissent que la méthode s'est révélée controversée. Bien que cette analyse soit en mesure d'identifier les zones d'intérêt où la végétation a diminué ou augmenté, la relation directe avec les facteurs de la dégradation des sols n'a pu être établie.

Actuellement, la situation reste toujours préoccupante. Selon le bilan de la FAO : Land and Water Division(2015), l'érosion emporte de 25 à 40 milliards de tonnes de couche superficielle, chaque année, réduisant considérablement les rendements agricoles et la capacité du sol à emmagasiner et à recycler le carbone, les nutriments et l'eau. Les pertes de production céréalière dues à l'érosion sont estimées à 7,6 millions de tonnes par an.

2.3. Désertification un concept discuté

Les régions arides ou semi-arides sujettes aux processus de dégradation et de désertification ont attiré l'attention des chercheurs sur la relation entre la végétation et les précipitations. Mais la majorité de ces études souffre d'un manque de données climatiques fiables soit par manque de profondeur historique, soit en raison de la qualité des données et de la densité très faible des stations. En fournissant une mémoire de plus en plus longue, la télédétection permet de documenter les conséquences des récentes séquences de sécheresse par l'examen de leurs effets sur la végétation. Les études qui s'intéressent à la dynamique de la végétation, sont souvent réalisées à l'échelle locale ou régionale. La dynamique est couramment examinée par les variations dans le temps de la valeur d'indice de Végétation Différentielle Normalisée (NDVI).

A l'échelle du Sahel et de l'est de l'Afrique, Nicholson *et al.* (1990) ont démontré sur une série mensuelle (1982-1985) la présence d'une forte corrélation entre la croissance végétative exprimée par le NDVI et les variations des précipitations. Ce lien s'observe aussi bien au niveau mensuel qu'annuel. Depuis, de nombreux travaux (Tucker *et al.*, 1991 ; Herrmann *et al.*, 2005 ; Anyamba & Tucker, 2005) abondent les conclusions faites par Tucker et Nicholson (1999) qui ont constaté que la limite nord de la verdure végétale du Sahel fluctuait jusqu'à 150 km entre une année humide et une année sèche qui se suivent, en réponse aux variations des précipitations. Et que la végétation dans les années 90 a atteint les mêmes limites nord d'avant la grande sécheresse qui a sévi entre les années 70 et 80.

Les effets de la grave sécheresse de 1983-1984, touchant l'ensemble de la région du Sahel, ont été étudiés à l'aide d'images satellitaires par plusieurs auteurs, notamment Tucker et al. (1991). Ils ont souligné un déplacement orienté vers le sud. D'autres, sur une série de 20 ans entre 1983 et 2003 rapportent une tendance à l'augmentation de la verdure dans le Sahel, tirée par une amélioration significative pendant les années 90. Cette dynamique est décryptée comme une réponse de la végétation à l'arrivée de précipitations (Herrmann *et al.*, 2005).

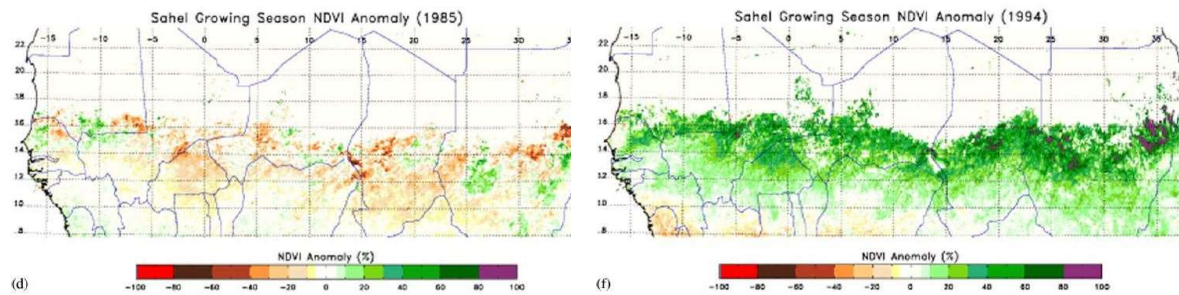


Figure 32 : Dynamique du couvert végétal dans le Sahel en 1985 et 1994 (Anyamba & Tucker, 2005)

L'accumulation de ces nouvelles connaissances a introduit des doutes sur la thèse d'un désert toujours en progression. (Anyamba & Tucker, 2005). Elles indiquent, qu'avec cette grande variation, nous sommes en présence d'un modèle « fluctuant », d'un désert en perpétuel mouvement expansion/contraction plutôt qu'un désert en expansion continue.

De plus, une discussion intéressante sur la désertification se trouve actuellement renouvelée. Elle trouve son écho dans le développement durable, et l'émergence du dogme d'adaptation au changement climatique. Pour Gagnol, (2012) le thème de désertification est une invention coloniale, il ajoute : « Ce terme de la désertification a conduit, et peut conduire encore, à la disqualification des usages et des stratégies locales qui reposent en grande partie sur la mobilité ». En effet, l'ignorance des paramètres globaux conduit souvent à responsabiliser les populations locales de la dégradation et de la désertification. Les conclusions de Boudet (1972) dans l'Afrique tropicale sont révélatrices de cet état d'esprit d'époque. Il écrit « Si les agriculteurs apparaissent comme les artisans de la désertification de l'Afrique par la hache et le feu, les éleveurs portent probablement une forte responsabilité dans la désertification de l'Afrique sèche ».

Il conduit également à la stigmatisation systématique des pratiques d'exploitation des ressources, qui sont le résultat de milliers d'années d'ingéniosité et d'adaptation dont la sagesse nous échappe encore. En Afrique du Nord, en particulier les pasteurs nomades, étaient accusés directement de la dégradation. Davis (2012) note qu'en 1906, un des plus éminents experts français de l'Afrique du Nord s'exclamait que, à cause des incendies et du surpâturage en Algérie, « la forêt fait place à la brousse, la brousse à la végétation herbacée, la végétation herbacée au sol nu, qui finit par être lui-même arraché et qui devient la proie du vent ». Plus récemment encore Taïbi (2015) présente une discussion intéressante à ce sujet en réinterrogeant les concepts de la désertification et de la dégradation. Elle revient sur ces points et en développe de nouveaux, comme l'imprégnation de la vision religieuse et la vision paradisiaque de jadis...etc.

Mais, la désertification (au sens impact anthropique) écrit Côte (2014), « agit à l'échelle locale, voire régionale, mais pas générale. Elle a pu renforcer l'aridification, elle ne l'a pas créé. Celle-ci est bien un fait climatique naturel, de grande ampleur dans le temps. (...) L'intervention

humaine a pu l'anticiper, l'accélérer (à l'échelle des temps humains). Mais c'est une évolution irréversible à l'échelle du temps géologique »

2.4. L'évaluation de la dégradation des zones steppiques

L'existence des processus conduisant à la dégradation des zones steppiques algériennes a été démontrée dans plusieurs études. Les résultats de l'inventaire des terres et forêts achevé en 1980 par le BNEDER (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural), soutenu par l'inventaire cartographique des nappes Alfatières (CNTS, 1988) ; ils ont montré un état de dégradation préoccupant. Mais ces états de surface ne traduisent pas le niveau de leur vulnérabilité à la dégradation. Pour les protéger, il est impératif de connaître les lieux où la menace est la plus sévère. C'est dans cette optique, que le CNTS (Centre National des Techniques Spatiales) a acquis une série d'images Landsat Thematic Mapper (TM) constituée de 22 scènes allant du 11 avril au 25 mai 1989 afin de réaliser une Carte de sensibilité à la désertification.

La méthode traite et analyse des données d'indicateurs physiques (sol, eau, surface terrestre – albédo), d'indicateurs biologiques (végétation, population...) et anthropiques (occupation de terre, paysage, nomadisme). Le but consiste à réaliser des cartes thématiques d'occupation du sol, morpho-pédologiques et d'ensablement. Ensuite, un degré de sensibilité est attribué aux différents niveaux des cartes produites. La deuxième opération de traitement consiste à combiner les informations thématiques produites auparavant. Une matrice de décision est conçue pour guider l'assemblage des informations. Le résultat est une carte synthétique (ci-dessous) de sensibilité à l'érosion, catégorisée en cinq classes du plus extrême « désertifié » au moins exposé « peu ou pas sensible ». Nous affichons un extrait de cette carte sur la région de Djelfa.

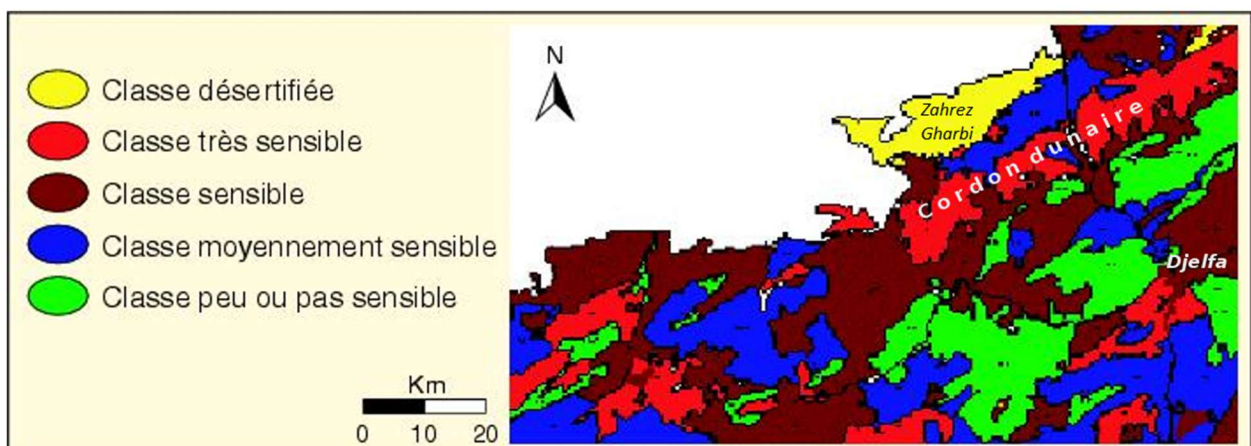


Figure 33 : Carte de sensibilité à la désertification de la région de Djelfa (Oussedik et al., 2003)

Les résultats de ces travaux mettent en lumière que les terrains les plus sensibles à la désertification se localisent au niveau des édifices sableux et autour des voiles sableux. Pour le

deuxième niveau dit « terrains sensibles à la désertification », il s'agit essentiellement de terrains occupés par une steppe dont le taux de recouvrement ne dépasse guère les 20%. Cette sévérité de sensibilité concerne également les terrains plats de parcours facilement accessibles, et les terrains en pente accentuée affectés par une érosion hydrique intense.

Au niveau des zones steppiques algériennes, la carte globale révèle l'ampleur de la dégradation. Sur les 20 millions d'hectares, 7 millions d'hectares sont en état dégradé, soit 35% de la steppe nécessitent en urgence des aménagements. De plus, 5 millions d'hectares (25%) menacés se trouvent dans un état avancé de dégradation.

2.5. Des indicateurs biologiques pour caractériser le surpâturage

Un indicateur biologique (bio-indicateur) peut être utilisé pour décrire les étapes et les variations de la phytomasse et de la composition de la végétation, de la modification de la composition floristique (régression, remplacement), d'érosion de la diversité, de la réduction du couvert végétal et de la diminution de la capacité de croissance (Jauffret, 2001).

Pour caractériser la régression végétale dans les zones steppique de Regassa près d'El Bayadh dans l'ouest algérien, Aidoud & Touffet (1996) ont utilisé un indicateur biologique typique de la région, l'Alfa, graminée pérenne reconnue pour son adaptation à la sécheresse. Pour 100 placettes échantillonnées dans des parcelles délimitées. Leur méthode consistait à mesurer la phytomasse sur une période de onze cycles annuels. La variation de la biomasse a été assimilée à la production nette. Ces données se trouvent fortement corrélées aux précipitations sur la même période. Les auteurs ne précisent pas l'état antérieur des parcelles afin d'évaluer si la surexploitation antérieure de l'alfa ne perturbe pas cette approche.

Le surpâturage est défini comme étant un prélèvement végétal par pâturage supérieur à la production annuelle des parcours. Des mesures de quantification introduites pour mesurer les relations entre, d'un côté, la production fourragère de la biomasse végétale consommable et, de l'autre, les effectifs d'animaux ont montré que dans la steppe algérienne, « en 1968, La steppe était déjà sursaturée, la charge pastorale réelle était deux fois plus élevée que la charge potentielle. Malgré les sonnettes d'alarme tirées par les pastoralistes de l'époque, la situation s'est en fait aggravée. En 1998, les parcours se sont fortement dégradés, la production fourragère a diminué de moitié et l'effectif du cheptel dix fois supérieur à ce que peuvent supporter les parcours » (Nedjraoui & Bédrani, 2008).

Ces chiffres illustrent le niveau de pression auquel sont exposées les zones steppiques, ainsi que le niveau de perturbation de l'équilibre entre les ressources naturelles et leur exploitation. Mais la capacité de charge calculée à partir de la production fourragère, à elle seule, ne peut être lue, comprise et interprétée sans la situer dans le contexte global des règles et mécanismes qui régissent l'activité de l'élevage. La part que jouent actuellement les ressources pastorales naturelles des steppes dans la ration alimentaire est mineure, Aidoud *et al.* (2006) évaluent

cette part et avancent le chiffre de 30 %. C'est ainsi que la steppe est nommée « bergeries à ciel ouvert » (Boutonnet (1991) in Aidoud *et al.* (2006)).

Sans connaissance de ce contexte, la recherche de résolution amène à poser des solutions d'équilibre à une fonction mathématique entre, d'un côté, la capacité de charge et, de l'autre, la pression exprimée en nombre de cheptels. Par exemple, Ziad (2006) énumère dans les préconisations, la proposition de réduire de trois quarts la charge pastorale pour ne conserver que 25 % du cheptel ovin actuel. Alors que la solution doit prendre en considération la complexité du système qui intègre le complément alimentaire et les éleveurs en tant qu'acteurs au centre de toute solution. Car pour eux (les éleveurs), le maintien de l'activité apparaît vital au prix de l'exode vers les villes.

Dans la région du Sahel, Toutain & Lhoste (1978) soulignent les difficultés rencontrées lors de l'exercice d'évaluation de la capacité de charge réelle : d'abord, l'effectif est variable avec la saison en raison de la mobilité des troupeaux d'une zone à l'autre et de la perméabilité des limites de zone ; aussi, à l'époque du dénombrement, il existe une surcharge temporaire marquée en raison de l'attraction de certains points d'eau. D'autres problématiques s'ajoutent pour faire corres-pondre les échelles (pression/état). Entre, d'un côté des données socioéconomiques définies sur des unités administratives à échelle régionale, et de l'autre, des données de production ou de dégradation élaborées sur une échelle différente, beaucoup plus fine. En fait, les données du bétail, l'aire de pâturage ont généralement une dimension plus grande et ne collent pas avec le suivi parcellaire fin des parcours.

Le rôle protecteur que joue le couvert végétal sur le sol, est détaillé et étudié par plusieurs auteurs. Des travaux menés dans le Colorado (Reynolds *et al.*, 2001) portaient sur la surveillance de l'érosion éolienne, à l'aide de capteurs à impact de particules situés à 5 cm au-dessus de la surface. Ils révèlent une perte de sol beaucoup plus importante sur des surfaces herbacées pâturées que sur des surfaces voisines similaires non perturbées. Si ces pratiques s'étendent largement, il en résulte qu'elles peuvent participer, voire causer, l'épuisement de la fertilité du sol.

Cette relation protectrice de la végétation au profit du sol, est beaucoup plus marquée sur le sol sableux, car, lorsque les dunes sont couvertes de végétation au-dessus d'une valeur seuil (30%) Ash et Wasson (1983), elles se trouvent protégées par la végétation de telle sorte que même les vents forts n'atteignent pas le sol. Il n'en résulte pas d'érosion avec mobilité du sable. Par contre, quand les zones de sable sont nues, même des vents relativement faibles au-dessous de la vitesse seuil de 6 m/s, Fryberger (1979) auront un impact érosif marqué par un transport de sable (Yizhaq & Ashkenazy, 2016).

Il convient donc qu'un certain niveau de couvert végétal demeure de façon permanente, pour protéger les sols de l'action éolienne, et contre l'action érosive au moment de l'arrivée des orages pendant la saison estivale. Enfin, pour « maintenir au sol le tapis de semences qui assurera le renouvellement du tapis végétal annuel » (Toutain & Lhoste, 1978).

2.6. Le matériel éolien risque et ressource

Si le processus d'ensablement est considéré complexe en raison des mécanismes qui le prédéterminent, nous pouvons dire qu'il y a unanimité pour estimer les conséquences d'ensablement comme néfastes. En effet, Le sable mis en mouvement par le vent a toujours été une menace pour les sols fertiles, l'agriculture, les infrastructures et les habitats. Dans les terres arides, on estime que le sable dunaire est dépourvu de caractéristiques positives. L'empiétement des dunes de sable est devenu l'image de la dessiccation et de la désertification dans les terres arides et semi-arides (Helldén, 1988).

Cependant, quelques travaux mettent en lumière certains points positifs de l'action éolienne, comme le déplacement d'éléments fins d'aérosols désertiques. Des réalités souvent masquées par la vision dominante axée uniquement sur les conséquences négatives. Ici, le produit fin, dans sa version dynamique, est apprécié comme un apport positif, alimentant des sites pauvres en matériel fin (lithosols). Dans son état relativement stable, le sable peut être utile comme un substrat favorable pour la végétation.

Pour comprendre l'influence des apports éoliens fins (aérosols en mouvement) à la fertilité des sols du plateau central du Colorado, Reynolds *et al.* (2001) se sont basés sur la méthode d'analyse magnétique (oxyde de fer), combinée à des analyses géochimiques et texturales. Ces travaux confirment la présence de poussière éolienne dans les jeunes sédiments superficiels. L'analyse granulométrique suggère que la proportion de poussière éolienne varie entre 20-30%. Ces résultats corroborent les résultats d'autres travaux bien documentés sur l'importance d'apport sédimentaire dans le sol des zones arides. Ce qui fait de « la poussière éolienne (limon et argile soufflés par le vent) une composante importante des écosystèmes arides, car elle peut contribuer à la formation des sols et fournir des nutriments essentiels » (Reynolds *et al.*, 2001).

A une autre échelle spatiale, outre Atlantique, Perry *et al.* (1997) soulignent dans leur étude que les panaches de poussière émanant des régions arides d'Afrique du Nord sont clairement visibles depuis l'imagerie satellitaire. Cette poussière s'étend sur des milliers de kilomètres et peut persister plusieurs jours. Ils notent que les incursions de poussière nord-africaines dans le territoire des États-Unis persistent pendant environ 10 jours et se produisent en moyenne 3 fois par an sur la période 1992 à 1995. Pendant ces épisodes de poussière, la masse fine de sol dépasse $10 \mu\text{g m}^{-3}$ et domine la poussière locale. Et cela, même dans les états du centre, terre du phénomène " Dust bowl ". Dans le même sens, Li *et al* (2007) soulignent le rôle du vent dans la redistribution des particules. Les plus fines ayant une teneur en éléments nutritifs plus élevée, et tendent à être transportées à des hauteurs plus élevées. Par ailleurs, Alvarez *et al* (2012) insistent sur le rôle du processus éolien dans la dynamique végétale.

Par ailleurs, dans les terres arides, le contrôle de la dynamique du sable reste un paramètre d'aménagement important afin de protéger les espaces cultivés, les infrastructures et éviter les dommages aux bâtiments et aux ouvrages. Mais un nouvel enjeu apparaît, Tsoar (1990),

s'interroge : comment tirer des bénéfices du sable normalement considéré comme improductif ?

La caractéristique thermique du sable est la lenteur de pénétration (conductivité thermique). Elle représente un décalage considérable entre le rayonnement solaire maximum de midi et les maximums à différentes profondeurs. Le retard est si grand qu'à une profondeur de 28 cm, la valeur maximale n'est atteinte qu'à minuit. Le processus inverse se produit la journée, la température minimale à la surface est enregistrée au lever du soleil, mais n'est atteinte qu'à midi à la même profondeur de 28 cm. Sous certaines conditions d'humidité, ce gradient de température favorise un écoulement nocturne ascendant de la vapeur causant ainsi la rosée souterraine. Par conséquent, la zone sableuse, est un lieu approprié pour les cultures hors saison et les plantes tropicales, dont la maturation est stimulée par ces conditions particulières (Salisbury, 1952; Migahid, 1961; cités par Tsoar, 1990).

C'est par sa mobilité que le sable se rend nuisible à la végétation, et non pas à cause de l'absence d'humidité. Une couverture sableuse est capable d'emmagasiner l'eau des précipitations et de fournir un substrat « fin » bien plus favorable à la formation d'un sol que la surface dure, de type lithosol dominante dans les régions arides. Une fois stabilisé, le sable est vite reconquis par la végétation. Dans les steppes algériennes, Melzi (1993), sur la base d'observations de terrain après le passage d'une série d'années de sécheresse, remarque qu'avec le retour des précipitations, les zones les plus ensablées ont connu une meilleure reprise de la végétation. Il ajoute que le sable semble jouer le rôle d'un facteur « régulateur » des effets de la dégradation, en favorisant la croissance et le développement des plantes.

Sur des accumulations sableuses stabilisées, il se crée un « micro-environnement », un véritable biotope qui évolue différemment, sinon indépendamment du milieu environnant. C'est un refuge pour une multitude d'animaux (rongeurs, insectes, serpents, etc.) et d'espèces végétales (Long, 1954 cité par Pouget, 1980). Elles jouent un rôle également dans la régénération des plantes, par le refuge qu'elles fournissent aux jeunes plantes et aux grains pour germer.

2.7. Discussion des méthodes

Depuis 1977, date de la première conférence sur la désertification des Nations Unies, De nouvelles connaissances ont été acquises et la définition de la désertification a évolué pour les intégrer. L'une des plus importantes est la compréhension des oscillations climatiques qui ont engendré dans leur sillage un désert fluctuant, qui avance et recule. Cela a remis en doute l'idée du désert en progression constante.

Ces fluctuations du désert sont enregistrées au niveau continental, dues à des facteurs globaux liés aux flux atmosphériques, aux courants océaniques, etc. Mais ces résultats contrastent parfois avec des études à des échelles locales, qui montrent que l'action anthropique est aussi responsable de la dégradation, car l'agissement de l'homme peut infliger de graves séquelles à l'environnement. Elles se manifestent par la dégradation des sols, la régression végétale et la désertification. L'amélioration constatée pendant les années humides au niveau global, avec l'augmentation des précipitation, semble « n'avoir fait qu'arrêter l'hémorragie, sans pour autant entraîner une amélioration environnementale notable » (Ozer *et al.*, 2005).

Nous pouvons constater là qu'il nous manque encore beaucoup de connaissances pour comprendre les mécanismes qui agissent lors du changement d'échelle (globale – locale). Il se peut que la question soulevée par une problématique spatiale trouve sa réponse dans la dimension temporelle. En fait, on ne peut pas confirmer la mise en place de désertification sur une durée de 25 ans, car c'est une période courte, on ne peut réfuter la présence de dégradation, sur la base du reverdissement lors des quelques courtes séquences humides. Car la désertification, souligne Côte (2014) agit à une échelle locale, mais pas générale, elle a pu renforcer l'aridification, elle ne l'a pas créé. Pour la durée d'étude de la sécheresse, il est trop tôt pour conclure. Car « la sécheresse, écrit Rognon (1991), résulte d'une anomalie du climat qu'il faudrait pouvoir analyser sur une durée plus longue que celle des observations météorologiques ».

Pour ce qui concerne les méthodes d'évaluation au niveau du globe, le programme GLASOD a pu dresser une carte mondiale sur l'état de dégradation des terres sous l'effet des activités humaines à une échelle 10 000 000^{ème}. Ainsi, il a livré une méthodologie et des outils applicables à l'échelle de petites régions. Toutefois, la carte livrée était entachée par quelques imprécisions sur quelques états, dues au « manque d'un référentiel facilement utilisable » (Brabant, 2008).

Quant à la méthode LADA, la résolution spatiale des images satellitaires utilisées, nous paraît un sérieux handicap. En effet, cette échelle ne permet pas de visualiser les prémices des événements (signaux faibles de dégradation) qui sont à l'origine de la dégradation. En plus, cette approche ne détecte pas certaines situations du changement d'affectation d'utilisation des terres, de régression végétative et modification dans la composition du couvert végétal. Nous le présentons à travers deux exemples :

- Des petites parcelles disparates sont régulièrement mises en culture dans la steppe : des intrusions de défrichement commises sur les parcours. Ces petites actions ne sont pas visibles à une telle échelle. Alors que l'addition de leurs impacts peut produire l'étincelle de départ d'un processus de dégradation du sol et de végétation.
- Le changement régressif des espèces de végétation et la modification des compositions sont souvent le préambule d'une dégradation. L'anthropisation des formations sableuses stabilisées, amplifie le signal de chlorophylle ; L'indicateur NDVI passe plus au vert et par conséquent la zone est aperçue comme stabilisée. Alors qu'en termes de prévention, ce sont des zones sensibles dont il faut surveiller l'anthropisation.

Dans le même sens, en Afrique du Sud la vérification détaillée des résultats obtenus a révélé sur le terrain que seule environ la moitié des sites considérés comme des points chauds pourraient être évalués comme souffrant de dégradation des sols (Nachtergaele *et al.*, 2011).

Quant à la méthode d'oscillation basée sur le NDVI, à l'échelle du Sahel, elle a permis d'enrichir notre compréhension de la fluctuation des limites du désert et de ses liens avec les variations climatique. Mais cette méthode rencontre quelques contre-exemples. D'après Manetsa *et al.* (2011) certaines études mettent en évidence la constance de la valeur du NDVI malgré la hausse de la pluviométrie. Il peut y avoir un biais introduit par le temps écoulé entre l'arrivée des pluies et le reverdissement de la végétation. En outre, la méthode indique uniquement la « baisse – retour » de la verdure (NDVI), mais ne renseigne en rien sur la qualité. Sur les dernières séquences de sécheresse (Le Floc'h, 2005) ajoute que l'impact de ces sécheresses est minime là où l'impact des activités humaines est faible ou nul.

Le reverdissement constaté après la fin de la sécheresse, est non seulement nuancé sur le plan environnemental, avec des remarques évoquées précédemment, constatant qu'au niveau local, le retour de la verdure ne traduit pas le retour aux conditions initiales avant la désertification. Mais également nuancé en termes de conséquences économiques, dont il a été démontré que le préjudice économique d'une crise d'ensablement comme le « Dust Bowl » a duré longtemps après l'accalmie de la crise environnementale (Hornbeck, 2012). Par ailleurs, dans une récente étude menée à l'Université du Maryland, les auteurs affirment l'extension du désert. Thomas & Nigam (2018) concluent que depuis 1920, le Sahara s'est élargi de 10%, il en résulte 711 000 km de désert supplémentaire.

Au niveau des zones steppiques, la carte globale de la sensibilité à la désertification, élaborée sur la base des images TM offrait une précision spatiale convenable à la conduite des actions précises, presque au niveau parcellaire. Mais en termes d'application nous n'avons pas constaté une grande utilisation dans les services de pilotage opérationnel au niveau local. Par ailleurs, à une échelle nationale, cette carte a offert une couverture globale couvrant l'ensemble des zones steppiques ; ainsi que la réalisation d'une classification harmonisée sur l'état et le niveau de dégradation. Mais, cette démarche n'a pas été reproduite, et cela malgré l'accumulation d'expériences et la disponibilité au téléchargement libre des images

satellites, dans un contexte où les acteurs locaux d'aménagement ont besoin des outils de suivi afin d'évaluer la portée de leur action.

Notre revue nous a permis de constater que les études pour cartographier et dresser un état ou un diagnostic de dégradation et désertification se basent généralement sur l'imagerie et la collecte de données. Mais l'approche la plus répandue pour cartographier la vulnérabilité, est celle basée sur les systèmes experts. Comme celle utilisée dans les programmes GLASOD et LADA, ainsi que par le CNTS pour produire la « Carte de sensibilité à la désertification ». La qualité des résultats produits par ce système dépend étroitement des connaissances introduites par l'expert par le biais des règles d'inférences (SI... ALORS... SINON...). Mais « ce genre de système à base de règles pondérées permet bien de définir l'incertitude que l'on possède sur une proposition, mais il n'est pas adapté pour gérer l'imprécision. De plus, les degrés de confiance se dégradent très vite si on a quelques propositions dans lesquelles on a peu de confiance » (Dromigny-Badin, 1998).

Au cours de cette étude, devant la complexité de considérer les paramètres globaux au niveau local, notre démarche consiste à lire la dynamique environnementale en lien, d'une part avec l'évolution du mode d'exploitation des ressources et de l'autre avec les fluctuations des précipitations, vu que la pluviométrie est considérée comme le paramètre global le plus déterminant dans les changements environnementaux dans ces régions.

Par ailleurs, dans ce travail, nous étions confrontés à un problème de vocabulaire, pour décrire les différentes phases d'ensablement. L'expression « processus d'ensablement » est utilisée pour décrire le changement constaté entre des états de surface marqués par la progression chronologique de la surface ensablée. En revanche, il n'existe pas de terme pour définir le processus inverse, celui constaté lors de la contraction et le repli de la couverture sableuse suivi généralement par le reverdissement du paysage. Il faut peut-être introduire le « processus de désensablement ».

Chapitre 3 : Site d'étude, outils et données

Le site d'étude se distingue par une évolution de surface très dynamique. Sa principale caractéristique est liée à une interaction entre l'occupation du sol et les agents érosifs éoliens et hydriques. Ce caractère nécessite des données spécifiques avec un traitement adéquat pour déceler la dynamique.

3.1. Le site d'étude

Le site d'étude est situé à 35 km à l'est de Djelfa, dans les Hautes Plaines de Djelfa, entre 1000 et 1100 mètres d'altitude. Le relief (Figure 35) est découpé en deux dépressions distinctes formant Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia. Elles sont séparées par la ligne de partage des eaux dessinée par un relief peu accidenté qui est le prolongement du Djebel Tlila vers le SW. Les principaux reliefs sont le Djebel Guedid (1491m) et le Djebel Sbaa (1454m) au sud et le Djebel Tlila (1411m).

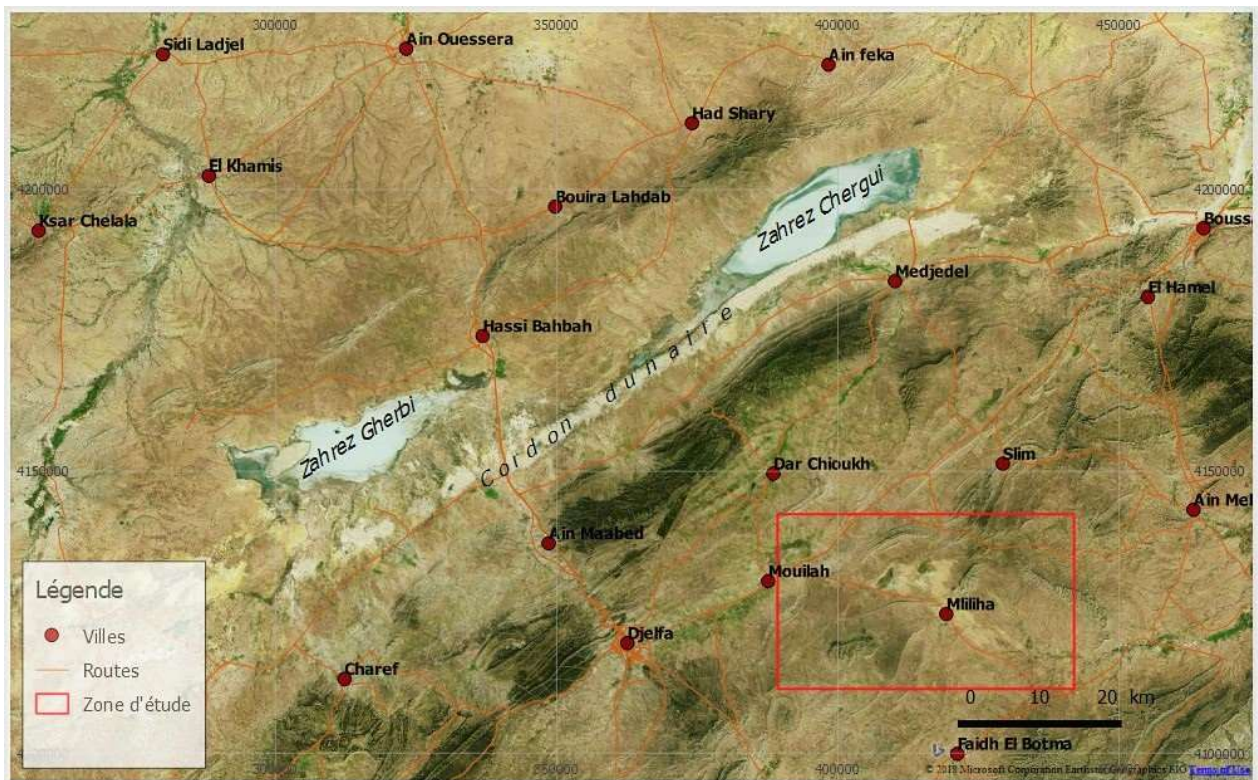


Figure 34 : Carte de localisation de site d'étude au niveau régional

Les eaux de surface de la dépression du Nord se concentrent pour donner naissance à la dépression de Daïet Tisselouine située à une altitude de 1110 mètres. La dépression du Sud recèle les deux cuvettes de Daïet Chouiouia à une altitude de 1120 mètres. La daïa, avec une largeur de 1 à 2 km s'étale sur une longueur de 9 à 10 km, avec une orientation WSW-ENE. Le dénivelé des plaines qui entoure la daïa est relativement faible. Vers le nord de la daïa, après 3

et 4 km, la topographie plane disparaît, et l'altitude grimpe rapidement à la rencontre de Djebel Tilla pour atteindre 1411 mètres. A ce niveau, l'altitude décroît progressivement vers l'Ouest, le relief se transforme en faibles collines au niveau de Ras Touil (1200 mètres) puis s'efface au niveau des plaines au nord-ouest à 1150 mètres d'altitude (Figure 35, Figure 37).

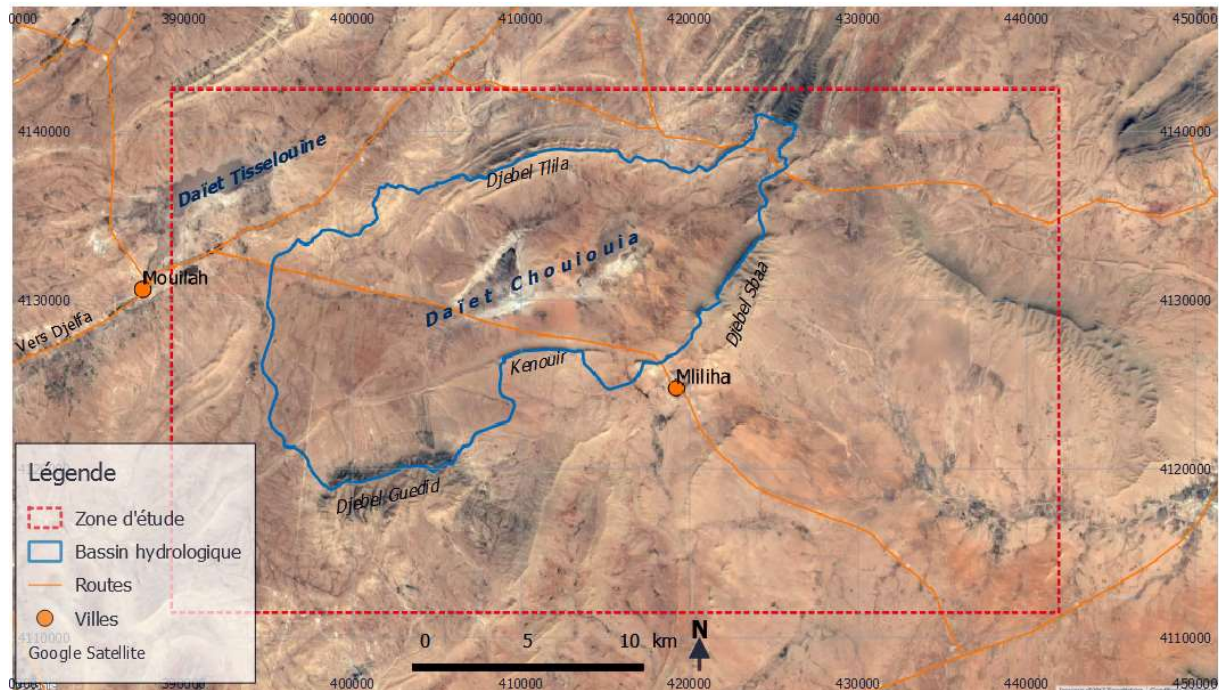


Figure 35 : Carte de localisation du site d'étude

Au Sud, après une étendue plate d'environ 4 km le Djebel Kenouir forme un abrupt de 100 m, presque vertical. Après ce relief, l'altitude baisse progressivement vers le Sud. Le contact du plateau méridional avec le Dj. Kenouir dessine une ligne (barrière) qui se prolonge sur une trajectoire presque droite de 20 km d'Ouest en Est.

Le bassin hydrographique de Daïet Chouiouia est facilement identifiable. Il suit les crêtes du relief excepté dans la partie Nord-Ouest où le terrain devient plat, très peu accidenté. Sur ces terrains plats, l'eau stagne pour former une petite Sebkhah qui mesure entre 800 m de long et 350 m de large. Elle est située au sud de Daïet Tisselouine et à l'est de Mouilah. Dans la partie SW du bassin, le réseau hydrographique qui draine la partie Nord du Djebel Guedid, 1491 mètres, situé au sud de la barrière de Kenouir, entaille deux ouvertures dans cette bordure topographique au niveau de Kef Djelid pour que l'écoulement d'eau puisse arriver à la daïa. Du côté Est, le Djebel Sbaa (1454 m) domine la terrasse de plaine et la Daïa ; avec sa direction SW-NE, il constitue une barrière sur 6 km.

D'une façon générale, nous pouvons classer la topographie du bassin en trois catégories concentriques : la daïa au centre du bassin est le lieu plat et le plus bas où convergent les eaux de ruissellement ; puis, le plateau qui entoure la daïa et en dernier le relief formé de Djebels qui entourent l'ensemble. Au-delà du bassin de la dépression, en direction du sud-est la

topographie basse. Donc le bassin de la dépression se trouve plus élevé que cette partie (Figure 36).

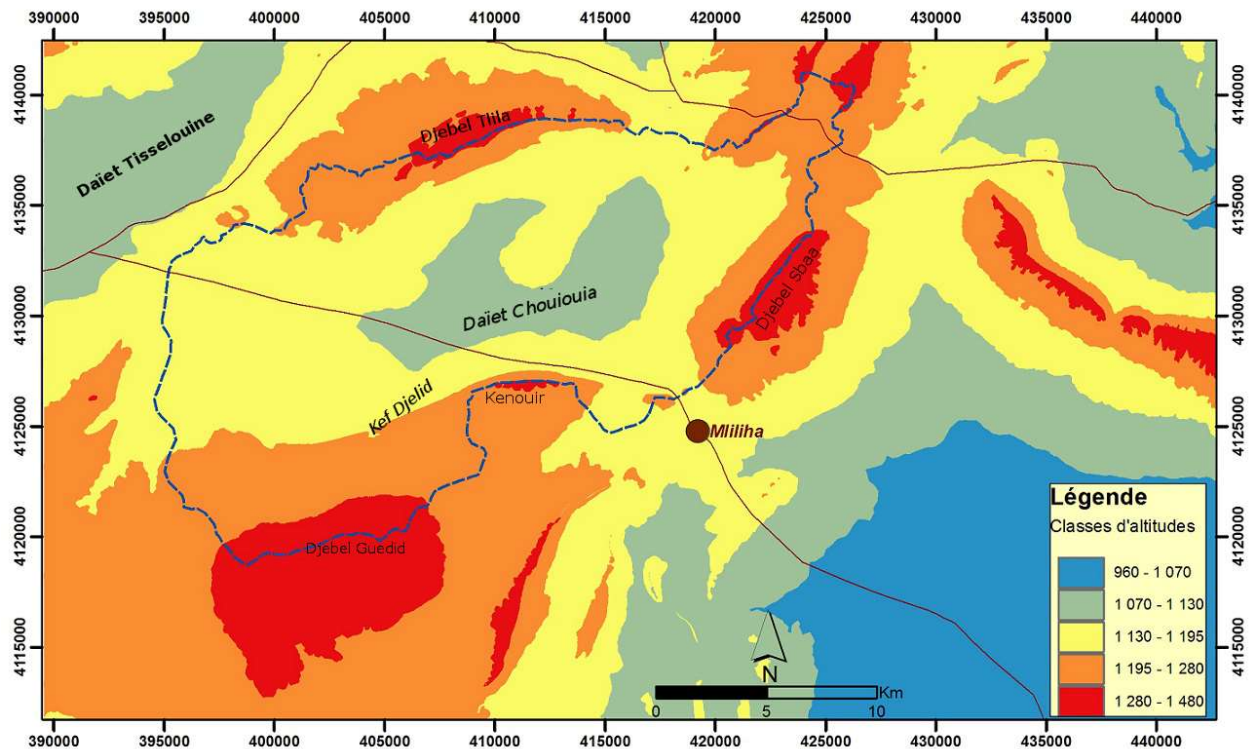


Figure 36 : Carte d'altitude en vue planimétrique réalisée depuis un MNT de résolution 10 mètres.

Pour tenter de répondre aux interrogations soulevées dans notre problématique, le site d'étude est choisi de façon à intégrer l'ensemble du bassin hydrographique fermé, ainsi que le couloir de dépôt éolien qui s'étale vers le Sud-Est, en passant par la ville de Mliliha, soit une zone de 31 km sur 52 km (Figure 35). Sur le plan hydrographique, le relief forme un bassin fermé sur une surface de 257 km² qui a une forme allongée SW-NE, une largeur de 10 km et une longueur de 30 km.

L'action éolienne est tributaire de la disposition du relief de la dépression, ouverte vers les plaines du Nord-Ouest côté vent dominant, et fermée tout autour sauf une petite ouverture topographique de 3 km au Sud-Est entre le prolongement de Kenouir et du Djebel Sbaa (Figure 37). Cette forme en « V » force le vent à concentrer le flux éolien dans ce passage. Vers le Sud-Est jusqu'aux plaines de Aïn Errich, s'étend sur 30 km un couloir de dépôt de sable, jusqu'aux abords de la bordure Sud de l'Atlas Saharien avant le Sahara, une partie de ce couloir sableux est visible sur figure suivante (Figure 37).

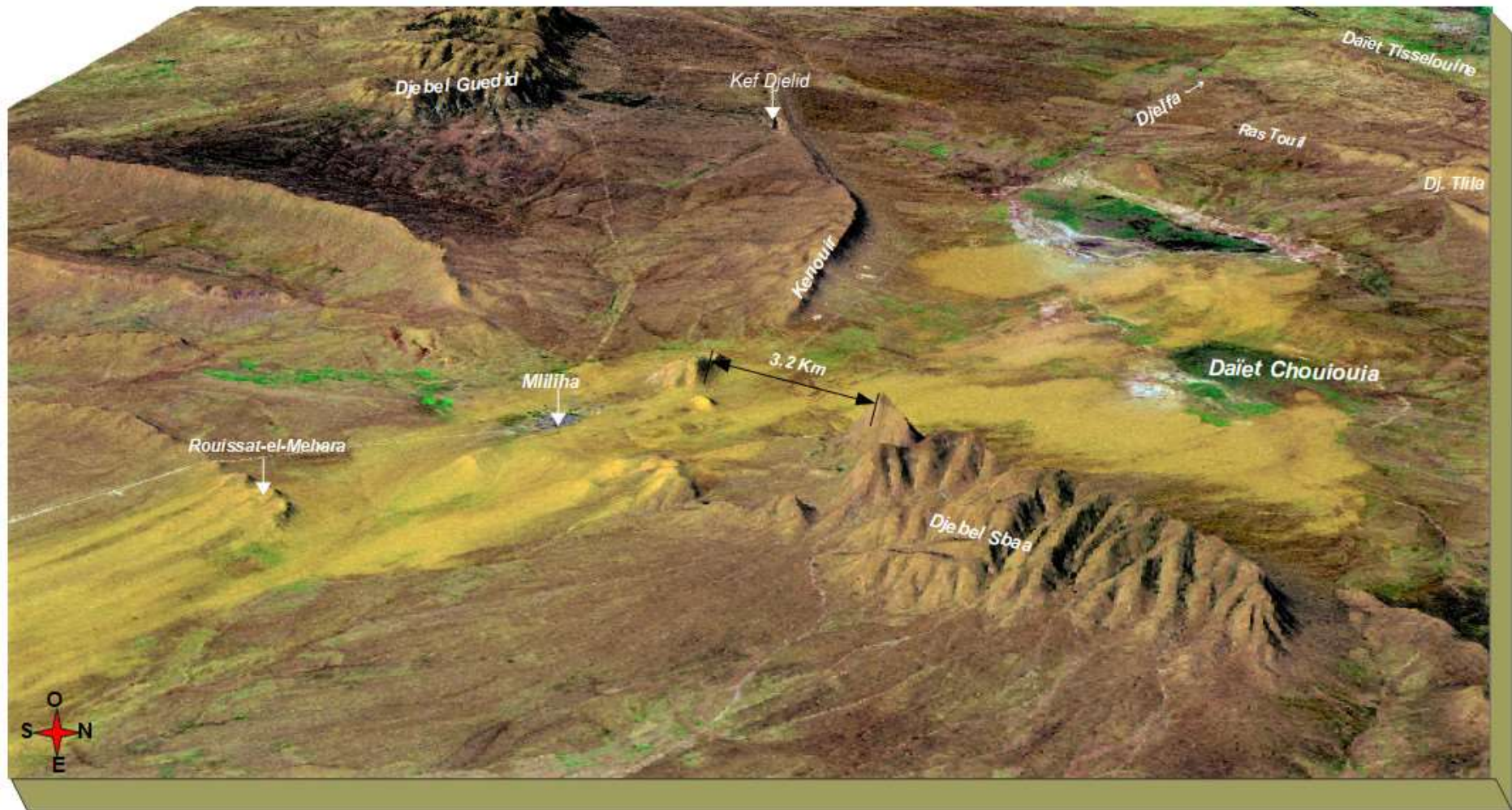


Figure 37 : Vue perspective de la région et l'état d'ensablement en 2001. Modèle Numérique de terrain (courbes de niveau) avec précision altimétrique de 10 mètres, habillé par une image en composition colorée (541), fusionnée avec une image panchromatique pour augmenter la résolution spatiale à 15 mètres. (Sur la perspective, l'échelle d'altitude est exagérée de 2,5 - image satellitaire Landsat 7 ETM+ de mars 2001).

3.2. Caractériser la sécheresse

Les sécheresses sont des phénomènes complexes pour lesquels il existe plusieurs définitions, les outils qui peuvent être utilisés pour leur suivi sont également nombreux (Beaudin, 2007). On trouve dans la littérature une variété d'indicateurs élaborés par des spécialistes pour caractériser la sécheresse. Ils peuvent être classés en fonction des disciplines ou des besoins recherchés : sécheresse météorologique, sol, climat, végétation. Ces outils sont classés en deux catégories :

- Ceux qui se basent sur les données climatiques disponibles, habituellement collectées dans les stations météorologiques : du plus simple, comme le calcul de pourcentage au plus complexe comme l'indice de Palmer.
- Ceux qui s'appuient sur les effets de la sécheresse, comme le rendement agricole par l'approche agro-climatique, l'état de la surface et de la végétation exprimés par des indicateurs de stress végétal, de température de surface. Ces informations sont généralement extraites à partir d'images aéroportées et satellitaires.

Nous avons passé en revue un ensemble de ces indicateurs et devant cette diversité nous avons opté pour le SPI (Standardized Precipitation Index) car il nous permet de décrypter, caractériser et mesurer l'intensité de la sécheresse sur de multiples échelles du temps.

3.2.1. Définition de l'indicateur SPI

Devant la difficulté des variétés des indicateurs « des spécialistes de la question ont pris conscience que l'indice devait être simple, facile à calculer et statistiquement adapté et significatif » (OMM, SPI). Le nouvel indicateur doit apporter une lisibilité sur les déficits des précipitations qui aide par la suite à la compréhension des impacts sur l'humidité du sol, l'écoulement des cours d'eau et les stocks d'eau souterrains. McKee *et al.*(1993) ont mis au point le SPI (SPI Standardized Precipitation Index). Il est exprimé dans l'équation suivante :

$$SPI = \frac{(P - Pm)}{\sigma p}$$

Avec :

P : Précipitation totale d'une période (mm)

Pm : Précipitation moyenne historique de la période (mm)

σp : Ecart-type des précipitations de la période (mm)

Pour déterminer l'intensité de la sécheresse sur une échelle de temporalité, McKee *et al.* (1993) ont fourni une matrice de classement de sévérité (Tableau 1). Les valeurs positives

indiquent des précipitations supérieures à la médiane. En revanche, les valeurs négatives indiquent un déficit de précipitation par rapport à des quantités inférieures à la médiane.

Tableau 1: Grille de sévérité du SPI

Valeurs SPI	Caractéristiques
2.0 et plus	Extrêmement humide
de 1.5 à 1.99	Très humide
de 1.0 à 1.49	Modérément humide
de -0.99 à 0.99	Proche de la normale
de -1.0 à -1.49	Modérément sec
de -1.5 à 1.99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Nous sommes conscients des limites du SPI, qui ne reposent que sur les quantités des précipitations, sans accorder trop d'importance aux autres éléments permettant d'évaluer le bilan hydrique du sol, tel que l'évaporation et l'évapotranspiration. Mais ces limites ne réduisent en rien son utilité, car dans les zones steppiques algériennes, la pluie constitue de loin le facteur le plus déterminant de la qualité d'une saison et de la réussite d'une année agricole. Dans ces régions, la terre réagit de façon spectaculaire et assez rapidement par l'apparition d'une couche de verdure quelques jours après l'arrivée des pluies. En effet, les quantités de pluies reçues détermineront la réponse végétale des plantes endémiques, de l'herbe de pâturage ou des cultures de l'homme.

3.2.2. Généralisation d'utilisation du SPI

Sur le plan opérationnel, le SPI est utilisé depuis 1994 dans le Colorado pour le suivi de la sécheresse. Depuis 2005, il est aussi inclus dans la mallette des indicateurs fournis par « Drought Monitor » (NDMC, 2005) pour caractériser l'intensité et l'étendue des sécheresses agricoles et hydrologiques.

Lors de l'atelier interrégional sur les indices et les systèmes d'alerte précoce applicables à la sécheresse qui s'est tenu à l'Université du Nebraska, à Lincoln (États-Unis d'Amérique), en décembre 2009, les experts ont adopté et approuvé la déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse. Ils recommandaient et préconisaient l'utilisation, par tous les Services météorologiques et hydrologiques nationaux, de l'indice de précipitations normalisé (SPI – *Standardized Precipitation Index*) comme critère d'évaluation de la sécheresse en météorologie (OMM, 2012). En juin 2011, le Seizième Congrès météorologique mondial a adopté une résolution par laquelle il approuvait ces deux recommandations (lien de la déclaration⁸).

⁸ <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09>

Dans le climat méditerranéen, de nombreux travaux de recherche mettent en valeur l'apport du SPI dans l'analyse climatique. Citons ici deux réalisations de Beaudin (2007) et de Vicente-Serrano & López-Moreno (2005) qui ont pu démontrer l'efficacité de cet indicateur à caractériser la sécheresse du climat méditerranéen.

Les travaux de Beaudin (2007) ont porté sur la région d'Andalousie en Espagne. La méthode consiste à confronter des résultats de SPI et des indicateurs issus de l'analyse d'une base de données importantes d'images satellitaires. D'un côté, le SPI a été calculé sur les données de 8 stations climatiques et de l'autre sur les indicateurs d'imagerie traduisant le stress végétal VCI (*Vegetation Condition Index*) et le TCI (*Temperature Condition Index*). Les résultats de cette comparaison reflètent une bonne corrélation tout au long de l'année, sauf pendant la saison d'irrigation, durant laquelle le stress végétal calculé par l'imagerie est fortement entaché par l'apport en irrigation. Vicente-Serrano et López-Moreno (2005) ont travaillé sur l'évaluation de la réponse hydrologique par la mise en relation avec les séquences de sécheresse climatique exprimées par le SPI sur une région montagneuse d'Espagne méditerranéenne. Ils ont réalisé des corrélations à la fois spatiales et multi-échelles temporelles pour démontrer le lien fort entre la réponse hydrologique et l'indicateur SPI.

3.2.3. Les avantages de l'indicateur SPI

Le SPI se base sur une série de précipitations de longue durée. Il peut être calculé sur des temporalités variées en fonction du besoin et du sujet recherché. Les pluies peuvent aller d'une semaine, 1 mois, 3 mois, 6 mois, 1 à 2 ans.

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer à minima de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus. Ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994). Le SPI se révèle très efficace pour identifier les cycles secs ou humides et ainsi faire sortir les périodes dites proches de la normale. L'autre atout du SPI est sa souplesse (adaptabilité) spatiale pour caractériser des climats variés. « L'indice étant normalisé, il est possible de représenter de la même manière les climats humides et les climats arides » (OMM, 2012). Cette souplesse est valable aussi lors du changement d'échelle géographique. Le SPI reste comparable quelle que soit l'étendue du territoire. C'est un indicateur de calcul statistique communément utilisé pour caractériser la sécheresse climatique locale ou régionale.

Pour faciliter le calcul, un programme libre est téléchargeable sur le site de l'université du Nebraska, aux Etats Unis (lien de téléchargement⁹). Après la constitution de fichiers des séries climatiques, il est possible d'opérer un seul traitement informatique avec plusieurs paramètres de « pas de temporalité ». Exemple : 3 mois, 6 mois, 9 mois, 1 ans, 12 mois, 24 mois.

⁹ : <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>

3.2.4. Recherche des ruptures climatiques

Bien que des diagrammes puissent être utilisés dans la description des séquences de sécheresse, la détection des ruptures dans une série de données caractérisée par un régime de séquences purement aléatoires n'est pas chose aisée. Nous avons eu ainsi recours au test de Pettitt. Dans la littérature statistique, aussi bien que dans les études caractérisant l'évolution des séries climatiques, le test de Pettitt est couramment utilisé. Reconnu pour sa robustesse et sa fiabilité à détecter dans une série le moment auquel se produit une rupture et ainsi évaluer son seuil significatif. Cependant, ce test est plutôt dédié à la détection d'une rupture que d'une tendance (Lopez & Leynet, 2011). En effet, une évolution du climat peut prendre la forme d'une progression ou d'une dégradation de moyenne continue. Ces formes de trajectoire ne sont pas perceptibles par ce test.

Pour mémoire, le test de Pettitt est une dérivation du test de Mann-Whitney, non paramétrique qui ne nécessite pas d'a priori et d'hypothèses sur les données. Il consiste à découper la série principale en deux sous-séries organisées par ordre croissant. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes (Kingumbi *et al.*, 2000).

Avant de passer les séries à l'analyse de détection des ruptures par des tests non paramétriques, il est conseillé de valider l'hypothèse de la conformité des séries à la loi normale. Pour cela, nous avons retenu, le test statistique de Shapiro-Wilk. En effet, Le test de *Shapiro-Wilk* est le test de normalité le plus utilisé, parce qu'il est puissant par rapport à de nombreux tests alternatifs (Shapiro *et al.*, 1968). La pertinence du test de Shapiro-Wilk a été approuvée dans de nombreux travaux (Chen, 1971; Srivastava & Hui, 1987; Alva & Estrada, 2009). Dans ce travail, Il a été réalisé à partir du logiciel STATISTICA. Ce produit développe une extension du test décrit par Royston (1982) qui permet de l'appliquer à de grands échantillons, jusqu'à 2000 observations (Manuel STATISTICA de Statsoft).

En plus de l'analyse des fluctuations climatiques, nous allons également analyser la dynamique et les changements des paysages à partir des données aéroportées. Ainsi dans la partie qui suit, nous allons présenter les traitements réalisés à partir des photos aériennes et des images satellites présélectionnées.

3.3. Restitution du paysage semi-aride

3.3.1. La télédétection outil de prédilection pour le suivi des espaces steppiques

La télédétection joue un rôle capital et grandissant dans l'amélioration des connaissances sur le déroulement des écosystèmes terrestres. En effet, elle offre la possibilité d'observation, d'étude et de suivi à des échelles géographiques et de temporalités multiples. La télédétection a été largement utilisée pour détecter et quantifier la désertification et son expansion (Abdellaoui, 2010; Benazzouz, 2000; Bensaid, 2006; Callot *et al.*, 1993; Callot & Oulehri, 1996; Desjardins *et al.*, 2005; Escadafal, 2012; Hostert *et al.*, 2001; Marticorena & Bergametti, 1995; Taibi, 1997).

Avec une étendue de plus de 200 000 km² et compte tenu des conditions d'accès qui rendent l'exploration de terrain difficile, la télédétection est un outil de choix pour étudier les grandes étendues de la zone steppique algérienne. Elle offre une vision globale et répétée dans le temps et dans l'espace. Dans le désert et les régions semi-arides, le manque de couvert végétal accompagné par un ciel souvent dégagé du nuage offrent à l'imagerie spatiale un accès direct aux sols. Dans ces régions, les objets de surface sont mis à nu. Ces conditions facilitent la réalisation des suivis diachroniques, tel que l'étude de changement des processus environnementaux. Cependant, il existe d'autres facteurs qui affectent la capacité à reconnaître les objets de surface. Pendant la saison estivale, la forte luminosité dégrade la qualité d'image par le fort contraste et des zones ombres.

Les observations réalisées à partir des images satellitaires collectionnées pour cette étude constituent un énorme gisement d'information. Couplées à des images aériennes de 1957, elles couvrent une période de 60 ans. En effet, ce patrimoine d'images forme la mémoire visuelle des états de surface et de la dynamique des paysages et des modèles. Un suivi temporel rapproché permet d'étudier les modifications survenues sur l'état de surface par rapport à un état initial, il autorise donc un suivi de la dynamique des processus environnementaux, et l'analyse des changements observables dans le paysage.

En télédétection, l'identification et la reconnaissance des objets de surface se basent sur leur réflectance, chaque surface possède ainsi une signature spectrale spécifique. Nous évoquons quelques caractéristiques spectrales de la région. Nous présentons d'abord deux images en composition colorée du site d'étude. La première de 1995 correspond à une année humide, l'eau stagne dans les deux daïas, mais le sable est omniprésent. La deuxième image au printemps 2011, la surface sableuse se retracte.

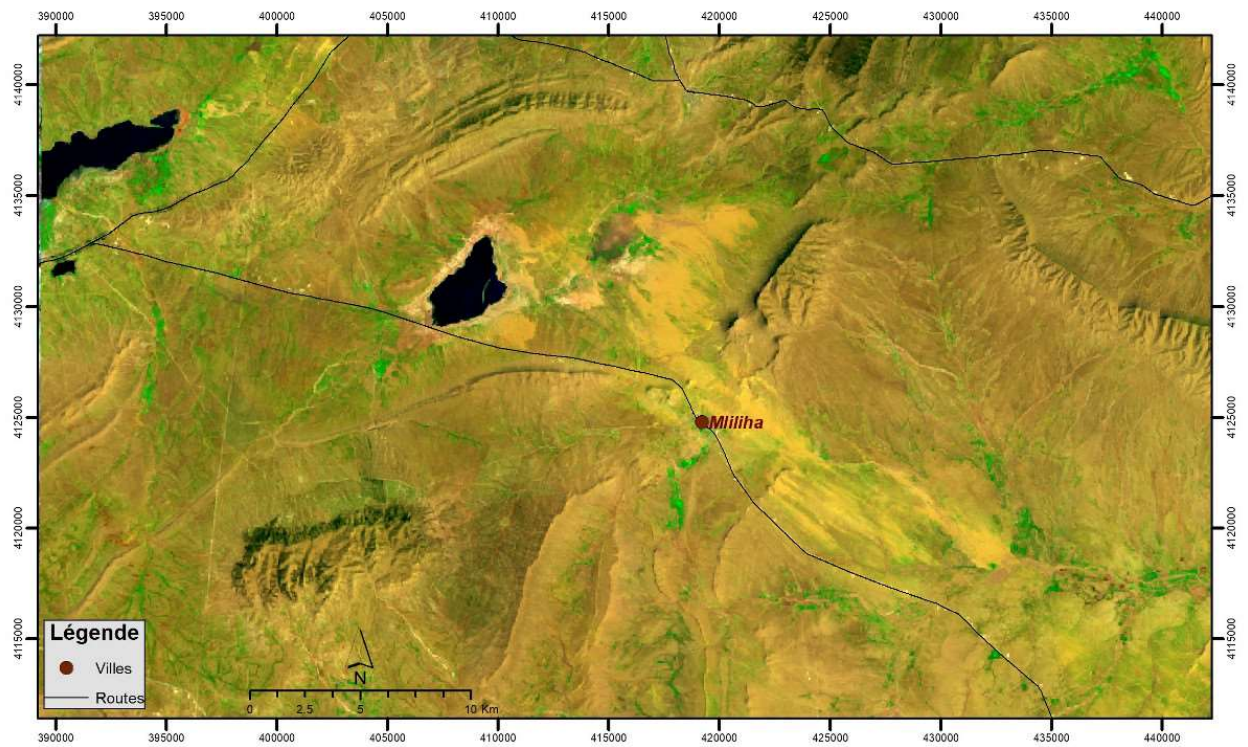


Figure 38 : Image en composition colorée (5-4-1) image Landsat 5 TM mai 1995

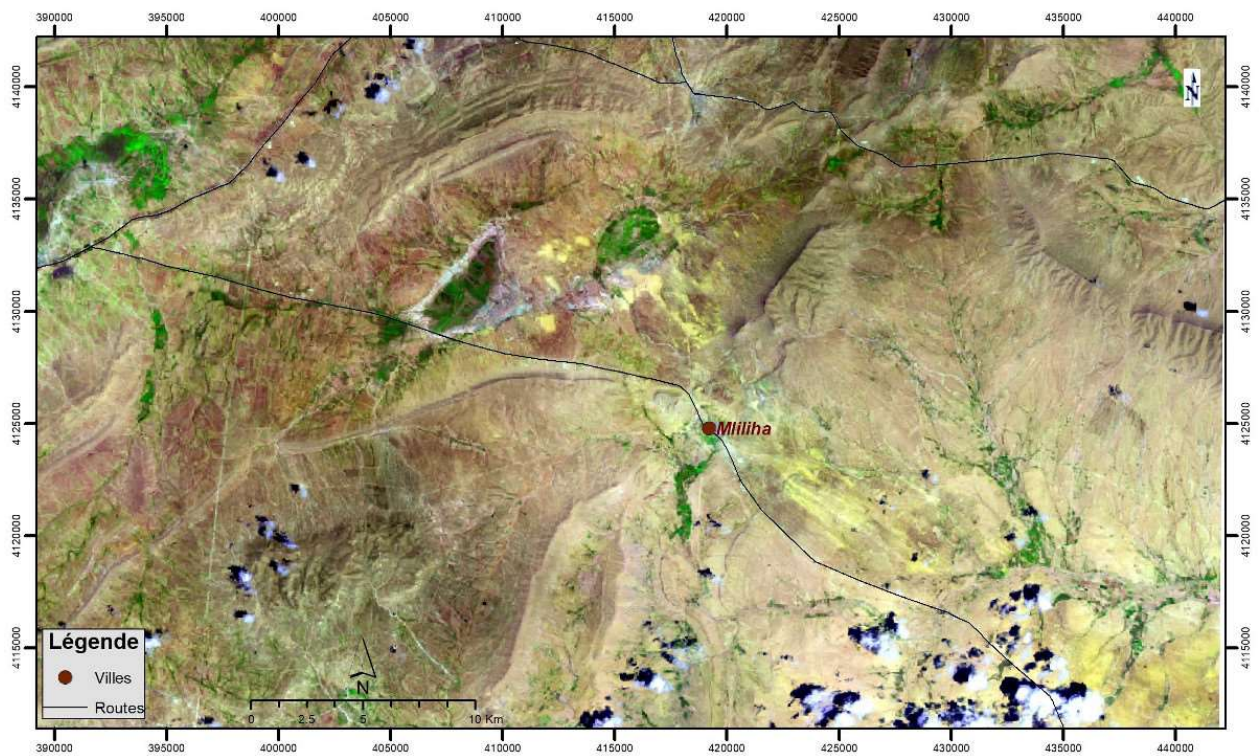


Figure 39 : Image en composition colorée (5-4-1) image Landsat 7 ETM+ avril 2011.

3.3.2. Le profil spectral des surfaces semi-arides

La signature spectrale des objets terrestres se répartit en trois grandes catégories bien documentées, on trouve : la végétation, l'eau et le sol. Afin d'illustrer cette catégorisation, nous avons choisi la région située à l'est de Djelfa, couvrant des daïas, des plaines mises en culture ainsi que la présence de produit sableux. Il s'agit de la région d'étude qui sera présentée dans la chapitre suivant. L'histogramme « scatterogramme » de deux bandes (TM1 et TM5) issues d'une image Thematic Mapper, indique qu'il est possible de reconnaître les objets de surface et d'affiner la classification en associant les sujets à leur signature spectrale (Figure 40). Dans le diagramme, un ilot (en bleu) se détache du reste du nuage de points, Il garde des valeurs très faibles dans l'infrarouge (canal 5) et relativement basses dans le canal 1. Il s'agit des surfaces en eau qui remplissent les cuvettes des dépressions de daïas et sebkha.

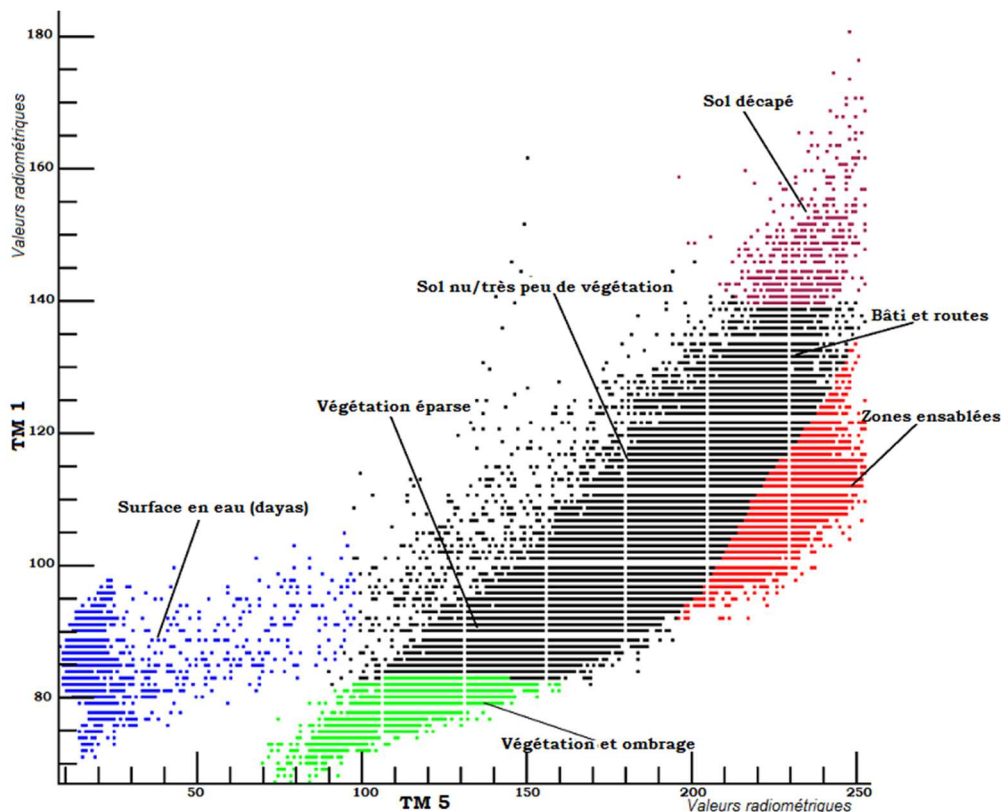


Figure 40 : Scatterogramme des bandes TM1 et TM5 du site d'étude, image Landsat 5 TM, 1995

La végétation saine en pleine croissance pendant le printemps (forte activité chlorophyllienne) absorbe le rayonnement dans l'infrarouge et réfléchit des valeurs relativement moyennes dans le MIR. Elle se localise principalement sur les plaines bordant Daïet Tisselouine, sur le plateau occidental de Daïet Chouiouia et sur les cours d'eau.

L'ombre des reliefs observée sur les images nous renseigne sur la taille du relief et sur la position du soleil. Facilement identifiable au pied de Djebel Sbaa, le long du Djebel Kenouir et dans les dénudations de relief, du côté septentrional, ces zones d'ombre absorbent le rayonnement dans le canal du bleu et reflètent très peu de signal dans l'infrarouge. Par contre,

les zones qui enregistrent les réflexions les plus fortes correspondent aux affleurements rocheux, dans des sites où la couche supérieure du sol est décapée. Ces phénomènes se localisent sur :

- Les bordures de daïas, aux couches très blanchâtres très peu végétalisées. Le substratum en calcaire gypseux est exposé directement à l'air libre. Ce décapage semble entretenu par l'érosion hydrique et la corrasion éolienne.
- Les points d'abreuvement sont des creusements de 1,5 mètres de profondeur en moyenne sur une circonférence de 50 mètres. Entaillés récemment d'un côté et de l'autre de la route. Ils servent à retenir l'eau des pluies pour le bétail (moutons). Sur la route menant de Mlilha direction sud-est vers Ain-Riche, nous avons pu recenser 14 points sur une distance de 10 km. Dans ces points creusés récemment, le décapage du sol fait apparaître également la couche blanchâtre du substratum qui enregistre une très forte réflectance, bien visible sur les images satellites.

Le dépôt sableux présente de fortes valeurs de réflectance. Il se distingue facilement sur l'image en composition colorée, avec des couleurs jaunâtres. Des îlots de sable très vifs présentent plus de réflectance. Ils se manifestent lors des conditions climatiques favorables et se localisent sur les bordures méridionales de la daïa. Le dépôt sableux localisé sur le plateau et le long du couloir de transit présente, lui aussi, une forte réflectance avec plus au moins une certaine continuité durant la phase de stabilité de la couverture sableuse. Mais lors de la phase de rétraction, le produit sableux est morcelé par quelques parcelles revêtues de végétation. De ce fait, la réponse spectrale est fortement impactée par le signal de la végétation. De même, la fine couche de sable poussiéreuse qui se dépose sur la végétation, enveloppe les surfaces, s'accumule contre le relief pour former un placage sableux. Cela impacte également la réflectance et par conséquent la discrimination des objets.

Les autres thèmes qui se distinguent par leur spectre sont : les cours d'eau secs riches en produits alluviaux, le bâti de la ville de Mlilha, et les routes. Tous disposent d'une forte réflectance spectrale. Notons que dans les milieux arides, le domaine du moyen infrarouge couvert par les canaux 6 de TM, le canal 7 d'ETM+ et de Landsat 8 et le 12 pour Sentinel-2, est très sensible aux réponses spectrales des roches et des minéraux. Souvent utilisés dans le domaine de la géologie. Ils peuvent produire des images spectaculairement riches en couleur grâce notamment à la présence d'humidité. Les minéraux fondus par l'eau de pluie, transporté dans des cours d'eau, deviennent une forme de traceur colorant le trajet jusqu'à la source.

3.3.3. Les caractéristiques spectrales du produit éolien

Les sous thèmes de la classe spectrale du sable ont été évoqués par plusieurs auteurs. Dans le sud tunisien, des mesures de la réflectance *in-situ* ont été faites par Escadafal (2012). Elles couvrent le domaine spectral dont les longueurs d'ondes varient entre 350 et 2450 nm, avec la distinction de trois types de sols (sableux, limoneux et gypseux).

Avec une bonne connaissance du terrain d'étude, il est relativement aisé d'affiner des sous-catégories de sables (voile sableux, dunes, accumulations sableuses...) par interprétation d'images et d'en extraire leurs caractéristiques spectrales. Cela suppose de prendre les précautions nécessaires à toute photo-interprétation afin que les valeurs radiométriques analysées ne reflètent pas un état conjecturel (météorologique, spécificité pédologique).

Il est bien admis que la rugosité des surfaces influence et diminue la réponse spectrale des sols. Un sol dégradé réfléchit plus le rayonnement qu'un sol sain. L'humidité résiduelle dans les dépôts limoneux et/ou sableux perturbe la réponse spectrale (sol plus foncé). Les couches de sable plus épaisses disposent d'une meilleure réflectance que les couches les plus fines ou bien couvertes par la végétation.

Des précautions s'imposent au vu du remodelage du sable. À la suite d'un événement éolien, le vent dépose une fine couche de sable sur les surfaces y compris sur les formes sableuses existantes, affectant leur réflectance spectrale. Dans ce cas, se baser uniquement sur les profils pour généraliser le traitement peut conduire à un résultat conjecturel, lié à la perte de l'identité spectrale des parcelles recherchées. Toutefois, L'objectif de la classification entreprise dans cette étude est de déterminer les zones ensablées afin de caractériser leur évolution dans le temps., nous n'avons donc pas fixé comme objectif une précision des formes de sable.

Une meilleure discrimination dépendra du bon choix des canaux. Pour un même site, chaque faciès thématique peut requérir ses propres canaux de classification. De nombreuses méthodes existent pour identifier les canaux porteurs d'informations intéressantes. L'objectif de ce travail oriente le choix de la méthode, qui est l'analyse du profil spectral du sable, sur les quatre types d'images constituant les séries temporelles (TM, ETM+, Landsat 8- OLI et Sentinel-2). Mais la démarche de choix des canaux pour la classification n'est pas une règle. Dans certains cas d'apprentissage par neurone pour la classification, il semble qu'un meilleur résultat ait été obtenu en gardant l'ensemble des canaux MODIS (Dusseux, 2014). A Laghouat, Taibi (1997), par crainte de perte d'informations, a basé la classification sur les 6 canaux Thematic Mapper.

Sur quatre types d'images satellitaires (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 et Sentinel-2) qui seront utilisées dans cette étude nous avons réalisé un profil spectral du produit sableux. Des pixels représentatifs des zones ensablées ont été sélectionnés. Pour que cette sélection soit bien représentative des faciès à caractériser, nous avons réitéré l'opération trois fois sur des images à temporalités différentes. Les résultats affichés présentent la moyenne radiométrique des trois images (Figure 41). Pour minimiser l'effet des variations saisonnières,

seules des images de printemps ont été retenues. Nous avons écarté quelques images présentant des contrastes impactés par l'humidité. Les images prises après des pluies, sont généralement faciles à identifier, car marquées par la présence d'accumulation d'eau dans la dépression.

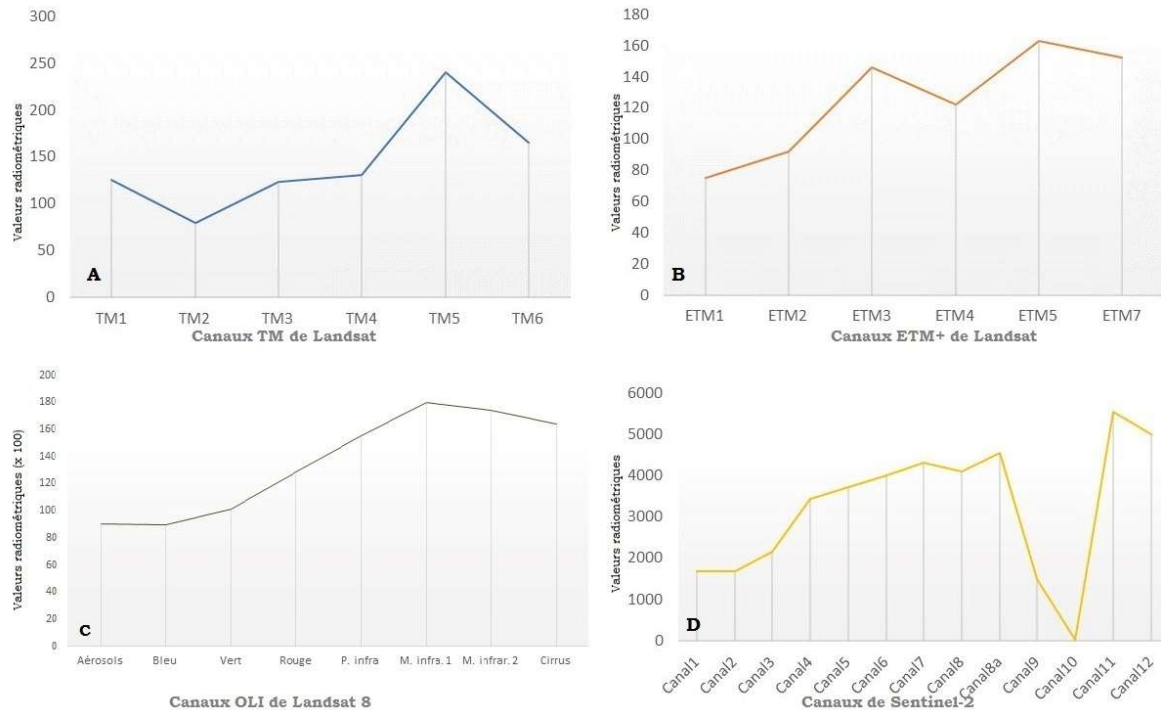


Figure 41 : Courbes des signatures spectrales en valeurs radiométriques de la même parcelle ensablée dans les canaux de différents satellites (TM, ETM+, Landsat 8 OLI, Sentinel-2). Le canal 8a de Sentinel chevauche la bande radiométrique du canal 8 (Figure 45).

Les courbes de la Figure 41 montrent que le sable enregistre de fortes valeurs dans les canaux qui couvrent le domaine spectral de moyen infrarouge TM5 ; ETM5 ; le canal moyen infrarouge 1 de Landsat 8 et le canal 11 pour les images de Sentinel-2. D'un autre côté, les valeurs les plus basses des zones ensablées se localisent dans le domaine du visible et plus exactement dans le bleu et le vert. Ces deux derniers sont généralement utilisés dans la différenciation entre les objets : sol / végétaux, zones côtières.

Les parcelles ensablées gardent leur homogénéité, celle d'un profil spectral caractérisé par de faibles valeurs dans le bleu et le vert et de fortes réflectances dans l'infrarouge. Ces courbes nous renseignent sur la principale caractéristique du produit sableux, son manque de rétention d'humidité en surface. Pour notre sujet, les deux bandes susceptibles de contenir des informations qui ne se dupliquent pas, et qui disposent de la capacité à faire le contraste par leur forte amplitude, sont le canal du domaine du visible, le bleu et le moyen infrarouge.

3.3.4. Cartographie de l'ensablement par imagerie satellitaire

Par leur étendue et leur manque d'accessibilité, le Sahara et les régions steppiques demeurent un terrain propice à l'utilisation des images satellites. Ces documents fournissent des couvertures de plus en plus précises, avec des bandes spectrales variées et des fréquences temporelles élevées. De nombreuses études et applications ont vu le jour dès le début de l'avènement de cette technologie.

Dans cette brève revue, nous citons quelques travaux d'intérêt qui portent sur la région ou des thématiques semblables. Escadafal (1989) signale la difficulté d'identifier les éléments de surface dans le milieu aride, sujet à l'influence des sols nus et à la forte réflectance. Deux méthodes retiennent l'attention, la classification et le domaine des indicateurs. Par ailleurs, l'image panchromatique a également été utilisée dans un processus de reconnaissance des formes sableuses par l'utilisation de la morphologie mathématique (Callot *et al.*, 1993).

Ces dernières années, les connaissances des processus éoliens ont amplement progressé, enrichies par de nouveaux modèles comme le DMP (Dust Production Model) proposé par Marticorena & Bergametti (1995). En revanche, notre connaissance des interactions et de la juxtaposition entre l'action éolienne et hydrique morphologiquement actives reste moins abondante. En fait, les deux processus ont plutôt tendance à être étudiés de manière compartimentée, indépendamment l'un de l'autre.

En complément des observations de terrain des formes sableuses, Callot & Oulehri (1996) ont utilisé l'imagerie pour l'étude des migrations de sable éolien au nord-ouest saharien (piémont méridional de l'Atlas saharien). Pas loin de Djelfa, dans la région de Laghouat, Taibi (1997) utilise des images MSS de 1977 et TM de 1999 pour étudier la végétation, réaliser une carte géomorphologique, et restituer les formes des daïas. À l'Est, Benazzouz (2000) utilise également l'imagerie pour produire des cartes en composition colorée afin d'explorer l'Atlas saharien oriental. Sur la base d'une série d'images ETM+ traitées par classification, Bensaid (2006) produit une carte d'occupation du sol dans la région de Naama (partie de la steppe occidentale) tout en mettant en lumière les formations sableuses. Au niveau des travaux institutionnels, la réalisation de la carte de la sensibilité de la steppe à la désertification réalisée par CNTS se base essentiellement sur la carte d'occupation du sol. Cette dernière délimite les principales formations végétales et les thèmes du sol (sol nu, sable), elle a été réalisée par une classification supervisée des trois bandes TM : proche infrarouge, rouge et bleu (Oussedik *et al.*, 2003).

Au Maroc, sur une série couvrant une période de 40 ans d'information satellitaire entre 1964 et 2003, Desjardins *et al.* (2005) ont mis en évidence une dynamique des dunes de sable dans la région de Tafilalet. En Tunisie méridionale, Ghram-Messedi & Delaître (2007) appliquent également une classification sur des images TM, afin de cartographier les états de surface en plaines et piémonts de la région de Menzel Habib.

Afin de trouver une méthode cartographique des surfaces de sable qui soit facilement reproductible (quelles que soient les images et les dates d'acquisition), nous avons exploré le domaine des indicateurs. Le recours aux indices se trouve d'autant plus justifié par le besoin de normaliser les traitements, et d'explorer un nombre important d'images, pour chercher de nouvelles manifestations de surface intéressantes qui puissent enrichir cette analyse. Nous avons testé plusieurs indicateurs. Nous en détaillons deux : l'EMI (Eolian Mapping Index), IVS « indice de voile sableux » (Abdellaoui, 2010).

Eolian Mapping Index (EMI), appartient à la catégorie des indices d'état de surface, élaboré par l'United States Geological Survey (USGS). EMI est un modèle simple, le résultat est une image à composition colorée des bandes respectives infrarouges, du rouge ainsi que de leur rapport. Les images mettent l'accent sur les zones dépourvues et de faible densité de végétation. Les couleurs varient du bleu au jaune, la graduation de jaune indique une forte réflectance et une forte érodibilité, les autres couleurs représentent la végétation ou l'urbanisme. Le résultat de traitement EMI sur l'image TM de la région est restitué ci-dessous (Figure 42).

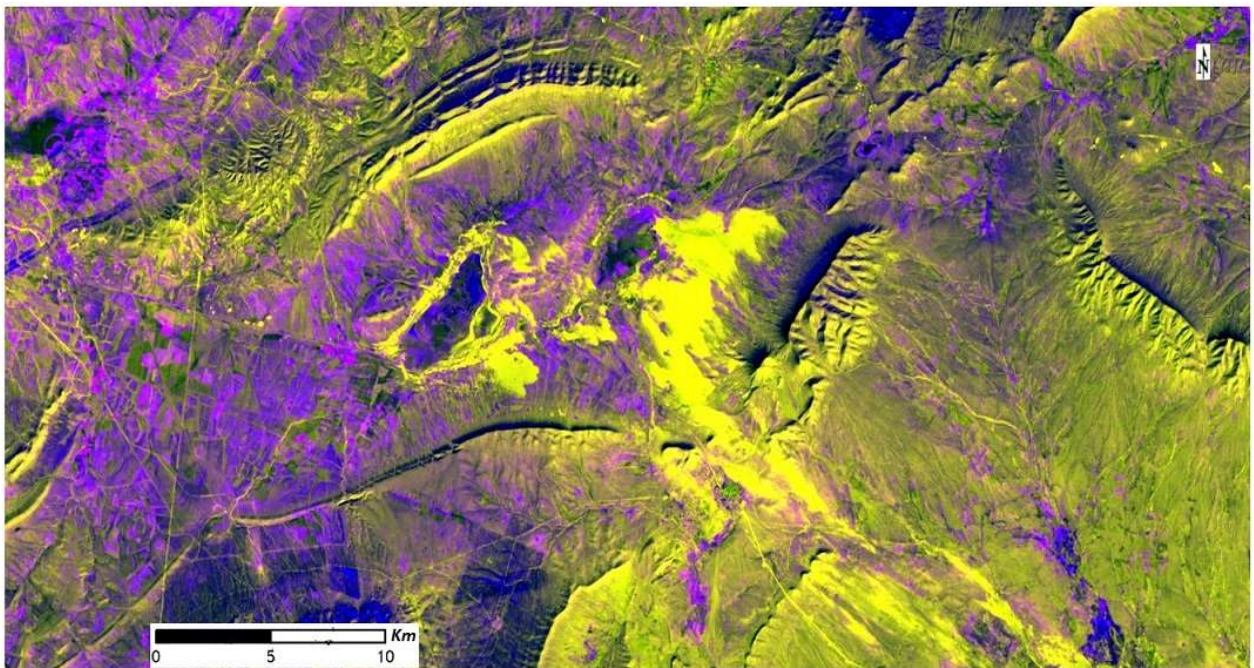


Figure 42 : Résultat de l'indice EMI sur une image TM mars 1998

Cette image permet de se faire une idée rapide de l'état d'ensablement du secteur. Le gradient de nuances du jaune sert de guide pour estimer le potentiel d'érosion ou la vulnérabilité au vent. Les jaunes plus brillants ont un potentiel d'érosion plus élevé que les jaunes plus ternes. Les autres couleurs indiquent peu ou pas de potentiel d'érosion éolienne. Bien que l'image indique les zones de dépôt de sable, les sommets de relief se trouvent classés dans les zones à fort potentiel d'apport éolien, alors que le sol est constitué de matériaux plus grossiers et notamment la roche de gré dur. Cette anomalie peut être expliquée par le fait que

ces reliefs dénudés de végétation soient directement exposés à la lumière du soleil, ce qui génère une forte réflectance.

Au vu de ces résultats, nous avons choisi de ne pas utiliser cet indicateur. Ce choix se trouve conforté aussi par l'absence d'information sur son utilisation opérationnelle et le manque d'utilisation de cet indicateur par la communauté scientifique.

Avant d'expérimenter les indicateurs, rappelons-nous que, leur objectif est de réduire la complexité du multi-spectral dans une seule valeur simple et expressive. Selon Naizot et al. (2004), « ils permettent de résumer l'information apportée par les canaux en une seule variable ». Plus récemment, en captant l'intérêt et le besoin des études thématiques de disposer d'un indicateur spécialisé pour identifier les zones ensablées, Abdellaoui (2010) propose un nouvel indicateur appelé IVS (indice de voile sableux) et Escadafal (2012) élabore l'indicateur IC « indice de couleur » pour caractériser les voiles sableux. Le test de « IC : indice de couleur » s'est avéré capable de délimiter les zones ensablées, excepté sur des images prises à la suite d'un événement humide. Par ailleurs, l'indice de voile sableux (IVS) proposé par Abdellaoui (2010) a été conçu spécialement pour mettre en lumière « le voile sableux éolien », il utilise trois canaux Bleu, Rouge et proche InfraRouge.

$$IVS = (b1 + u*b2 + v*b3) / (1 + b1)$$

Où : **b1, b2, b3** désignent respectivement les canaux Bleu, Rouge et proche IR ;
Les constantes u et v à 1.5 et 2.5 respectivement.

A la mise en pratique des questions surgissent. L'indicateur exige des constantes dont nous ne connaissons pas les règles qui les préfixent (région ? couleur du sable ? Origine de sable ? ...). Il a été expérimenté par les auteurs sur la région de Laghouat avec des images TM et TM+. Après test sur notre site, cet indicateur restitue efficacement le bâti. Mais en affectant les mêmes constantes, l'indice semble très sensible, des plaines de sol sableux labourées ont été identifiées comme voiles sableux. D'autres questions se posent quant à son usage avec les capteurs de nouveaux satellites (Landsat 8 et Sentinel-2), avec quelles valeurs pour les constantes de l'indicateur. Pour le besoin de cette étude, nous exploitons également des images satellite de nouvelle génération. Donc, au vu de ces interrogations, nous avons décidé de ne pas utiliser cet indicateur.

3.3.5. Les indices radiométriques d'analyse de la végétation

Une des caractéristiques de la propriété spectrale de végétation est la faible réflectance dans la bande rouge, suivie par une forte augmentation dans le proche infrarouge. La plupart des indices de végétation sont basés sur le calcul d'écart de réflectance dans le visible et dans le proche infrarouge. De nombreux indices de végétation existent comme illustrés ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques des différents indices de végétation (Brun, 2004)

Dénomination	Formule	Caractéristiques	Auteurs (in Girard & Girard)
Différence	$R - PIR$	Forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget (1980)
Rapport	$RVI = PIR / R$ ou d'autres canaux Indice pigmentaire $XS1 / XS2$ (SPOT)	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	Knipling (1970), Viollier et al. (1985)
Indice de végétation par différence normalisée	$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil (hot spot)	Rouse et al. (1974), Tucker (1979)
Indice de végétation transformé	$TVI = (NDVI + 0,5)^{1/2}$	Essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	Deering et al. (1975)
Indice perpendiculaire de végétation	$PVI = (PIR - aR - b) / (a^2 + 1)^{1/2}$ où a est la pente de la droite des sols et b son ordonnée à l'origine	Diminution de la contribution spectrale des sols, mais sensibilité à diverses caractéristiques des sols	Richardson & Wiegand (1977)
Modèle "Tasseled cap"	formule générale: $a1(V) + a2(R) + a3(PIR) + a4(PIR)$ où a1, a2, a3, a4 sont des constantes dépendant du capteur (MSS ou TM)	Transformation orthogonale des 4 canaux pour réduire la sensibilité à la contribution spectrale des sols, sans pouvoir l'éliminer complètement	Kauth & Thomas (1976)
Indice de verdure (issu du précédent)	$GVI = -b1(V) - b2(R) + b3(PIR) + b4(PIR)$ où b1, b2, b3, b4 sont des constantes dépendant du capteur (MSS ou TM)		Jackson (1983)
Indice de végétation ajusté au sol	$SAVI = [(1+L)(PIR-R)] / (PIR+R+L)$ avec $L = 0,5$ pour diminuer l'effet du sol	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	Huete (1988)
indice de végétation résistant aux effets atmosphériques	$ARVI = (PIR - RB) / (PIR + RB)$ avec $RB = R - g(B-R)$ où g est fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	Kaufman & Tanre (1992)
Indice de végétation amélioré	$EVI = 2,5 [(PIR - R) / (PIR + 6R - 7,5B + 1)]$	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI et minimise l'effet du sol	Huete (1997)

Le plus connu est le NDVI (l'Indice de Végétation par Différence Normalisée) qui peut être corrélé à de nombreuses propriétés des plantes. Principalement développé dans le but de catégoriser la végétation, il est également reconnu pour sa capacité à estimer la teneur en chlorophylle et ainsi caractériser l'état de santé des plantes afin de repérer les changements phénologiques et d'évaluer la biomasse verte et les rendements. (Frampton *et al.*, 2013 ; Kalaitzidis *et al.*, 2017).

Cependant le NDVI possède quelques faiblesses intrinsèques aux conditions atmosphériques et aux contraintes de voile nuageux. De plus, des travaux de recherche ont pu constater que dans les régions arides, l'indice de végétation (NDVI) ne donne pas de très bons résultats (BONN & CHILLASSE, s. d.; Elmore *et al.*, 2000; Hostert *et al.*, 2003; Escadafal, 2012). Sur des terrains à faible couverture végétale, les résultats de l'indice NDVI sont souvent entachés d'erreurs. Les classes se trouvent confondues à cause de la réflectance du sol nu ou à la végétation épars.

Après le test de plusieurs indicateurs, nous avons retenu le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) proposé par Huete (1988). Cet indicateur tient compte de l'incertitude due à l'influence du sol (Frampton *et al.*, 2013). Il incorpore le facteur de correction « L » qui varie en fonction de la densité du couvert végétal entre (1) pour une faible végétation et (0) pour une végétation dense. Avec cette dernière valeur, il devient NDVI. La valeur de compromis de ce facteur d'ajustement « L » est de (0.5). Cet indicateur s'est révélé particulièrement intéressant par sa capacité à discriminer la végétation, il donne de meilleurs résultats que le NDVI. Il permet d'intégrer la réflectance du sol pour la minimiser. Il a été utilisé dans des environnements similaires un peu plus au Sud dans la région de Laghouat par Kemmouche *et al.* (2008).

3.4. Les données

La détection et l'analyse des changements de surface se font par le suivi de la dynamique de couverture végétale et du manteau sableux. Cette approche multithématique et à double échelle de temporalité a été retenue. Elle nécessite l'acquisition de diverses données couvrant d'un côté, une période suffisamment longue pour l'analyse diachronique et de l'autre, une précision temporelle pour le suivi fin. Nous utilisons des photos aériennes anciennes, des séries d'images satellite, des séries de données climatiques, altimétriques ainsi que des données cartographiques, plus les relevés sur le terrain.

3.4.1. Approche conceptuelle des données

L'approche conceptuelle introduit une distinction de contenu (données, informations et indicateurs...etc.), elle trouve sa maturité avec la multiplication du contenu numérique. Les études d'intelligence économique (Fayard, 2006; Legroux, 2008) et d'environnement (l'OCDE, 1994) utilisent souvent ces concepts de classification de contenu. En géographie, la différenciation existe entre la base de données géoréférencée et le système d'information géographique, qui lui dispose de la capacité de combiner des données multi-sources et de calculer des indicateurs avec des algorithmes pré-implémentés.

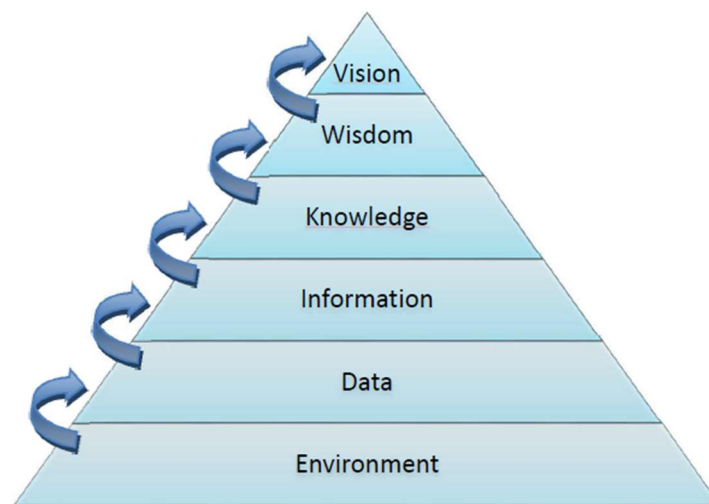


Figure 43 : La hiérarchie de contenu (selon Carpenter & Cannady, 2004)

Pour rappel, la donnée est le résultat direct d'une mesure. Elle peut être collectée directement sur le terrain par sondage (enquête) ou par un outil de supervision (satellite) ou être présente dans des bases de données par exemple les données climatiques. La mesure élémentaire sans contexte ne permet pas d'élaborer une analyse et de prendre une décision. En revanche, l'information est le traitement et la contextualisation de la donnée, pour lui procurer un sens et une interprétation. Comme le traitement des données climatiques, ou des

images satellitaires. Généralement, elle est sectorielle, fortement thématique : végétation, pédologique, ensablement, climatique...etc.

Indicateur : dans les études d'environnement, de nombreux indicateurs ont été proposés pour caractériser l'état, le suivi, la dynamique et la prévision. Par leur capacité d'exprimer la complexité d'un phénomène dans une seule valeur quantitative ou qualitative ou de la caractériser et suivre son évolution. Les indicateurs synthétiques sont devenus un moyen de communication, de présentation des résultats de recherche pour les décideurs et un moyen de communication avec les citoyens.

Pour l'élaboration des indicateurs d'environnement dans le modèle « Pression-Etat-Réponse » l'OCDE (1994) a défini l'indicateur comme : un paramètre ou une valeur, calculé à partir de paramètres, donnant des indications sur ou décrivant l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique, d'une portée supérieure aux informations directement liées à la valeur d'un paramètre. Dans ce modèle conceptuel « P-E-R », les indicateurs de pression décrivent souvent les effets indésirables d'activité anthropique et d'altération des écosystèmes. Les indicateurs d'état sont utilisés pour la description (physique, chimique et biologique) d'un environnement, d'un milieu fortement anthropisé, leur traitement chronologique indique la tendance d'évolution. Les indicateurs de réponse pour décrire les actions entreprises pour corriger les effets indésirables (prévention, réhabilitation), servent au suivi d'avancement des mesures prises.

Construire une analyse sur la base d'indicateur suppose que cet indicateur soit robuste, fiable et précis, ce qui protège l'interprétation et assure sa cohérence dans le temps. En plus, il faut qu'il soit sensible pour pouvoir mesurer les changements et apporte une lisibilité facile au phénomène exprimé. Dans le processus décisionnel, les indicateurs fournissent de nouvelles connaissances pour sécuriser la prise de décision.

3.4.2. Les données climatiques

Les données climatiques utilisées ont été acquises auprès de l'Office National de Météo d'Algérie (ONM), structure responsable de la gestion des stations météorologiques au niveau national. Elles correspondent aux précipitations, aux vents et aux températures couvrant la période (1980-2010) de la station de Djelfa. Avant 1995, la station météorologique de Djelfa se trouvait en centre-ville (donc impactée par l'activité urbaine). La nouvelle station de type METAR (METeorological Airport Report¹⁰) ouverte en 1995 est située à l'extérieur de la ville à 3 km au Sud-Est, positionnée sur les hauteurs d'un plateau ouvert, culminant à 1180 mètres

¹⁰ Normalisation d'enregistrement et de transmission développée par l'Organisation de l'aviation civile internationale, approuvée par l'Organisation météorologique mondiale.

d'altitude, au point de référence (latitude 34°39'13.49"N, longitude 3°16'50.29"E)¹¹. Signalant que la station est de nouveau rattrapée par l'étalement urbain de la ville.

Pour couvrir certaines spécificités de cette étude, comme la précision pluviométrique sur l'échelle temporelle plus fine ou une période d'enregistrement plus longue, nous avons eu recours à d'autres sources. Dans ce qui suit, nous développons brièvement les étapes de récupération et l'harmonisation des données OMM (Organisation Météorologique Mondiale), en vue de leur d'exploitation. Cependant, les autres données seront citées au moment de leur utilisation.

Les données climatiques OMM disponibles au téléchargement, ont été récupérées depuis le site de NCEI¹² (National Centers for Environmental Information) entité de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Il s'agit d'un système complet, dans lequel on trouve à la fois les données climatiques historiques, de plus, il continue d'être alimenté par des données récentes quotidiennes. Pour la station de Djelfa, les données les plus anciennes et les plus détaillées remontent à 1973. Il existe plusieurs niveaux de granularité dans ces données : mensuelles, quotidiennes, et à un pas de temps de 3 heures.

Après un premier traitement de mise en forme, ces données ont été intégrées dans une base de données Access avec un schéma simple qui reprend la structure des fichiers d'origine. Cette base est constituée de 4 tables et 2 vues ; ces deux dernières ont été ajoutées pour gérer les agrégats et le calcul de transformation de température de Fahrenheit (°F) en degrés Celsius (°C) et les précipitations d'inch vers le « mm ». Le tout s'intègre aisément dans un environnement Business Objects afin de faciliter l'interrogation et l'exploration des données. Une petite précision, les données actuelles de ce système (NCEI) proviennent de l'Office National de Météo (ONM).

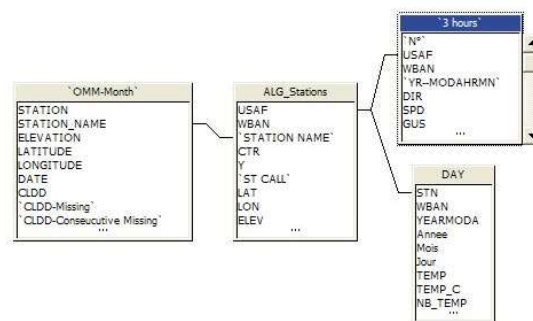


Figure 44 : Schéma simplifié de la base constituée par les données OMM

¹¹ Géolocalisation faite depuis Google Earth, les coordonnées livrées avec les données officielles (Latitude 34°, 20' Nord, longitude 3°, 23' Est) renvoient à 40 km au sud de la station.

¹² <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/summaries/monthly> (utilisé en 2014)

3.4.1. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Nous avons utilisé deux MNT de résolution 10 et 30 mètres. Le premier produit à partir de courbes topographiques de 10 mètres d'équidistance issu de la carte topographique 1/50.000. Il ne couvre que le site d'étude. Le second de 30 mètres est la dernière version du MNT SRTM Void Filled (Shuttle Radar Topography Mission). Acquis sur le site USGS (U.S Geological Survey, <https://earthexplorer.usgs.gov>). Il couvre le nord de l'Algérie. Ce MNT est issu du satellite radar transporté à bord de la navette spatiale Endeavour en 2000. Les données de ce nouvel MNT ont été publiées avec une résolution d'environ 30 mètres, contrairement à la version précédente « SRTM Non-Void » d'une résolution de 90 mètres. Le début de cette mise à disposition mondiale a débuté le 24 septembre 2014. Les données MNT ont été utilisées dans le cadre de ce travail pour le calcul de la courbe hypsométrique, des classes d'altitude, des pentes, et comme support de restitution en trois dimensions pour les photos aériennes et les images satellitaires.

3.4.2. Les données satellitaires à moyenne et à haute résolution

Par leur disponibilité, en téléchargement libre, et leur résolution radiométrique et spatiale adaptée, les images du programme Landsat ont constitué la base de ce travail. Ce programme s'est enrichi dès 2013 par le lancement d'un nouveau module Landsat 8 (LDCM). Nous avons également mobilisé les images fournies par le nouveau satellite Sentinel-2 de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) lancé le 23 juin 2015. Ce dernier offre une meilleure résolution spatiale. Les principales caractéristiques des images Landsat sont résumées en annexe.

Notre région est couverte par une image Landsat MSS datant de l'année de son lancement en 1972. Cela nous donne accès à l'état de surface d'il y a 45 ans. La suite des satellites Landsat 4 et 5 qui embarquent le capteur Landsat Thematic Mapper (TM), lancé respectivement en 1982 et 1984, ont continué d'enrichir le catalogue d'images de la région jusqu'aux dernières qui datent de mai 2012 avant la fin de service en 2013. Le satellite « Landsat 7 », qui embarquait un radiomètre amélioré ETM+, a été lancé en avril 1999. Malheureusement, depuis mai 2003, il a été victime d'une défaillance mécanique sur l'un de ses miroirs. Désormais, l'instrument ETM+ fournit des données dégradées, seuls les 30 kilomètres situés au centre de la bande sont utilisables. Notre zone d'étude se trouve sur une partie bien couverte par la partie utilisable de l'image.

Le dernier satellite Landsat-8 (LDCM : Landsat Data Continuity Mission) a été lancé le 11 février 2013. Le radiomètre OLI (Operational Land Imager) acquiert des images dans neuf bandes spectrales du visible au moyen infrarouge. Sept de ces bandes spectrales étaient déjà présentes sur l'instrument ETM+ de Landsat 7, avec deux canaux supplémentaires destinés principalement à la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm) et à la détection des nuages (1380 nm).

Le satellite Sentinel-2, lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ASE), se compose de deux satellites identiques : le premier (Sentinel-A), lancé le 23 juin 2015, et le deuxième (Sentinel-B), lancé le 7 mars 2017. Avant le lancement du deuxième satellite, la résolution temporelle était d'une image tous les dix jours. Mais une fois le deuxième satellite lancé, la résolution temporelle a augmenté pour atteindre une image tous les cinq jours. Le Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) acquiert 13 bandes spectrales allant des longueurs d'onde visibles et proches infrarouge (VNIR) à infrarouge à ondes courtes (SWIR) (Tableau 3).

Tableau 3 : Résolutions radiométriques et spatiales des images Sentinel-2

Bande	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial Resolution (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20
TCI*	RGB	Composite	10

La résolution spatiale varie selon la bande spectrale :

- 4 bandes à 10 mètres : bleu (490 nm), vert (560 nm), rouge (665 nm) et proche infrarouge (842 nm).
- 6 bandes à 20 mètres : 4 bandes étroites pour la caractérisation de la végétation (705 nm, 740 nm, 783 nm et 865 nm) et 2 bandes SWIR plus grandes (1 610 nm et 2 190 nm) pour des applications telles que la détection de neige / glace / nuage ou la végétation, l'évaluation du stress hydrique.
- 3 bandes à 60 mètres principalement dédiées aux applications météorologiques et aux corrections atmosphériques (443 nm pour les aérosols, 945 nm pour la vapeur d'eau, et 1375 nm pour la détection des cirrus).

Les images Sentinel-2 offrent une excellente opportunité pour l'étude et la surveillance de la végétation en raison de leurs caractéristiques spatiales, spectrales et temporelles améliorées par rapport à Landsat (Frampton *et al.*, 2013). De plus, les données de ces observations (images) sont complètes et ouvertes (Open-Data). Les jeux de données sont disponibles sur la plate-forme de téléchargement de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Au cours du développement de Landsat 8 et Sentinel-2A, les scientifiques des deux projets ont travaillé ensemble pour étalonner les capteurs pour permettre une utilisation conjointe des

données de Landsat 8 et Sentinel-2A (NASA, 2016). Le diagramme de comparaison radiométrique des bandes (Figure 45) permet de visualiser la plage de couverture radiométrique de chaque bande, et également trouver l'équivalence d'une combinaison d'un satellite à l'autre.

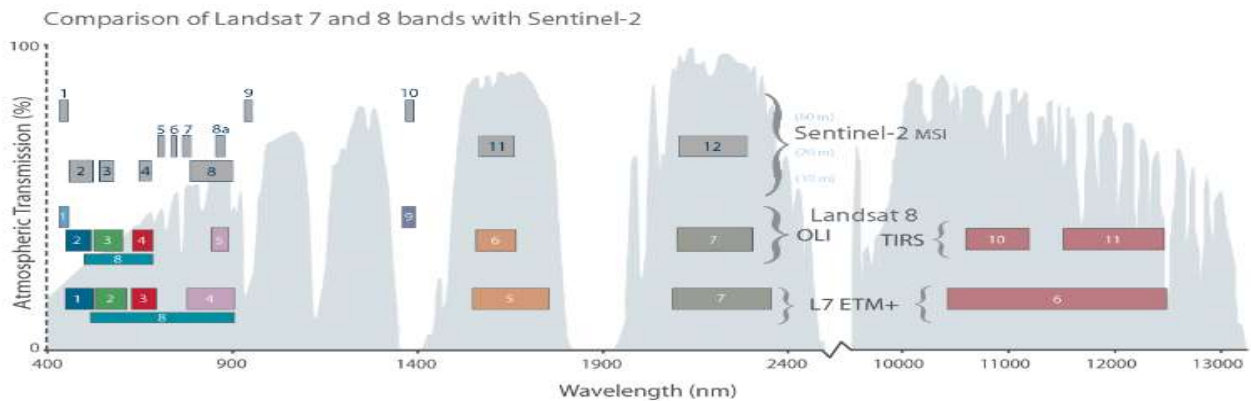


Figure 45 : Comparaison radiométrique des canaux des satellites : L7 ETM+, Landsat 8 et Sentinel-2 source (NASA, 2016)

Par ailleurs, tout au long de l'étude, nous avons eu recours aux images optiques à très haute résolution de GeoEye, (5 mètres/pixel). Ces images fournissent une information spatiale et texturale riche, facilitant l'accès aux détails de l'état de surface et de l'utilisation des terres / couverture (Aber *et al.*, 2012). De ce fait, ils constituent une source complémentaire précieuse pour surveiller la dynamique des processus environnementaux. La reconnaissance des objets du terrain d'étude facilite l'interprétation visuelle de ces images.

Depuis 2013, USGS fournit et met en ligne progressivement tout un patrimoine d'images ortho rectifiées. Cette série d'images est catégorisée dans une classe « Landsat Legacy » (Tri-Decadal Global Landsat Orthorectified Overview). Les images sont fournies avec le système de coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) et sur le système de référence géodésique mondial 1984 (WGS84). La précision de positionnement sur l'image finale ne dépasse pas la barre supérieure d'erreur de 100 mètres pour MSS et 50 mètres pour TM et ETM+ (USGS, 2015).

Pour cette étude, nous avons collectionné 250 images variées, issues de différents satellites. La plus ancienne de Landsat MSS date de 45 ans, 1972. Les plus récentes viennent de Landsat 8 et de Sentinel-2. Ce catalogue riche en images est aussi complété par d'autres à haute résolution extraites depuis l'outil Esri-Arc Gis ou Google Earth.

3.4.2.1. Outil de gestion des images satellitaires et des métadonnées

Pour cette étude, nous avons collecté 250 images variées issues de différents satellites. Dès le début de ce travail, il nous est devenu indispensable de mettre en place une méthode rigoureuse par la réalisation d'un outil de traçabilité et de gestion de stock d'images. Caloz & Collet (2011) suggèrent de documenter l'information collectée relative aux entités et à leurs attributs, au cours de la construction de la base de données géographiques. Pour nous, il s'agit des métadonnées qui sont des informations qui décrivent les images satellitaires (type, date et heure de prise), ou des Méta-informations qui concernent la contextualisation d'utilisation d'images (remarques thématiques, avancement ou recul de la couverture sableuse, état de végétation, hydrologie...etc.). Notre intérêt de gérer cette information est motivé à la fois par :

- La gestion des téléchargements depuis une plate-forme évolutive et dynamique. La liste des images proposées par USGS, s'enrichit au fur et à mesure du contenu historique récupéré dans leurs archives. À chaque recherche, de nouvelles images peuvent apparaître. Donc, la question qui s'est souvent posée : est-ce que cette image est nouvelle ou a-t-elle déjà été téléchargée auparavant ?
- Le besoin de gérer et de consigner les remarques thématiques, des annotations sur l'intérêt et la qualité de chaque image en lien avec le sujet, surtout sur les phénomènes qui caractérisent la dynamique de la région (sable, végétation, hydrologique...).
- Au final, le besoin est une vue synthétique et globale qui facilite le ciblage des images en fonction de divers critères d'interrogation, soit ils portent sur les temporalités (saisons, mois) ou en lien avec les événements thématiques (période de sécheresse, retour d'humidité).

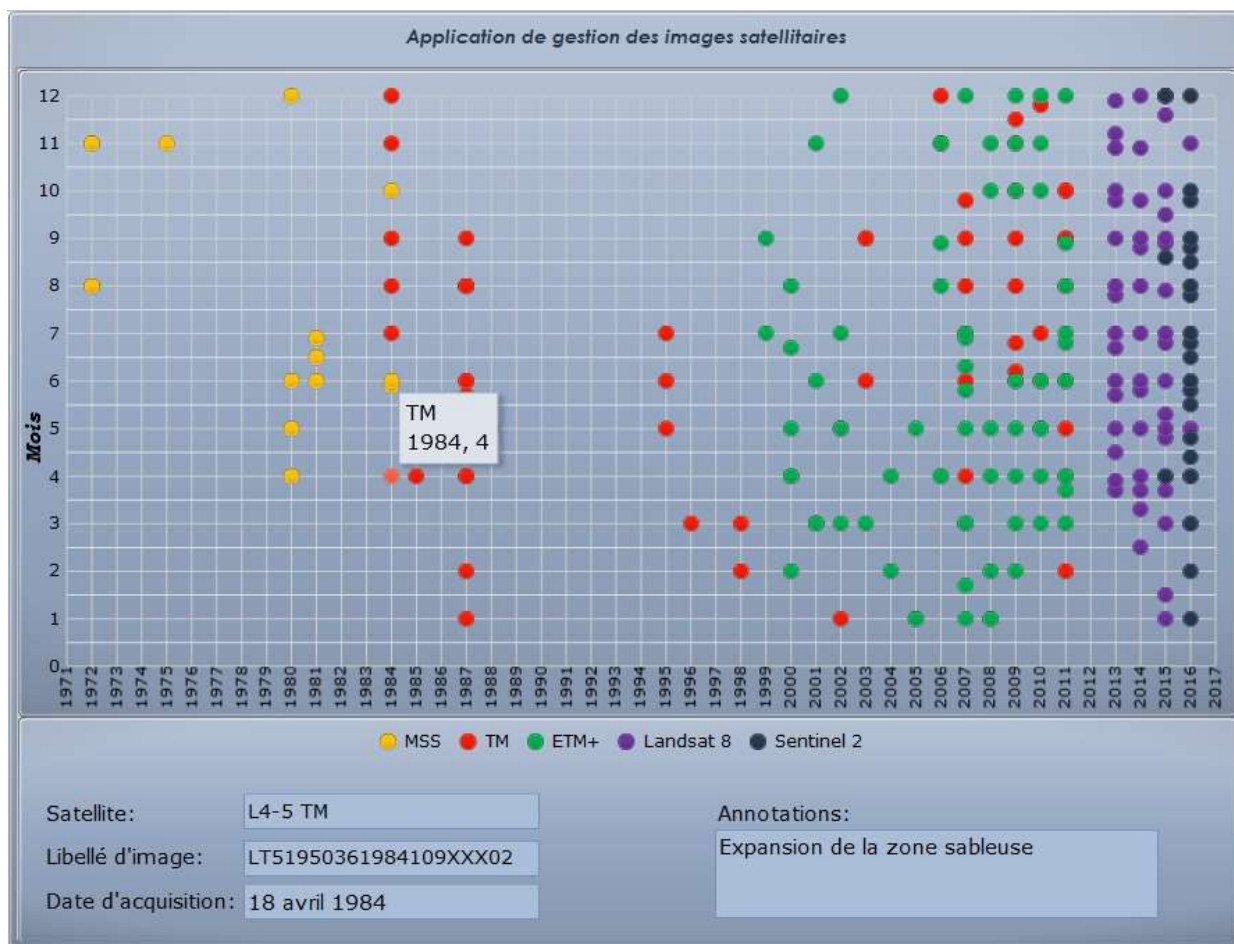


Figure 46 : Application de gestion des Méta-informations issues d'images satellitaires

La Figure 46 montre l'interface de cet outil de gestion d'images. Il offre ainsi une visualisation rapide et globale du nombre d'images collectées à partir des différentes plateformes web citées précédemment (cf. sitographie). Entre autres, il permet d'opérer des choix de sélection d'images en fonction des périodes recherchées : annuelles ; intra-annuelles ; thématiques ou techniques. Cette application a été réalisée avec SAP Dashboard. Sur les 250 images collectées seules 36 ont été exploitées.

3.4.3. Les photographies aériennes

Nos recherches de supports anciens ont abouti à collecter des photographies aériennes d'archives au service historique de la défense (Département des archives définitives, Division armée de l'air) à Vincennes. En effet, la région est couverte par deux missions verticales : AV53 du 2 février 1957 avec 373 photos, et la mission AV71 du 13 février 1957 avec 245 photos.

A partir d'une fiche plot de ces deux missions, qui indique le numéro de la photo contenant les photographies aériennes, nous avons retenu 40 photos au 1/20 000 sur la première mission et 7 autres photos au 1/10 000 sur la seconde mission. La reproduction est obtenue à partir de

la numérisation du tirage positif original en très haute définition (1024 pixels/mm²). Les dimensions de chaque image sont de 7500 x 7200 pixels.

Le choix des photos a été principalement orienté par le besoin de couvrir les endroits qui offrent le plus de contraste spatial, plus de diversité c'est-à-dire des sites à la fois fortement exposés à l'ensablement et d'autres moins, des sites couvrant une partie du relief (Djebel) et d'autres correspondant à des plaines, des dépressions (daïa) ou des plateaux.

3.4.4. Récapitulatif des données utilisées

Le tableau suivant synthétise toutes les données utilisées avec leurs caractéristiques d'utilisation. D'autres supports sont produits par digitalisation manuelle, comme la carte de délimitation du bassin versant topographique, elle a été réalisée à partir des courbes de niveau disponibles et du réseau hydrographique. La faible taille du bassin versant étudié a rendu l'opération relativement aisée.

Tableau 4 : les principales données utilisées dans ce travail

Type	Documents	Caractéristiques
Cartographiques	Cartes topographiques (Papier scanné)	1/200.000 (1892, Service géographique de l'armée, feuille de Djelfa, N° 46) 1/50.000 – (1959, SGA - Section Géographique de l'Armée) Feuilles N° 314 (DIAR ECH CHIOUKH) ; 313 (SLIM) ; 343 (MAALBA) et 344 (MLILIHA) 1/200.000 (1954, AMS - Army Map Service) US. Army, Washington) NI-31-3 (ZAHREZ CHERGUI), 31-7 (Djelfa)
	Cartes géologiques	1/200.000 (Papier scanné), échelle insuffisante
	Carte des sols	1/200.000 (Papier scanné), échelle insuffisante
	MNT	10 et 30 m (Bonne précision)
	Réseau hydrographique	Sur la base de carte 1/50.000 (INC)
	Délimitation des bassins	Digitalisé
	Photos aériennes	AV53 du 2 février 1957, 47 photos, couverture partielle du site
Images satellitaires	MSS	Faible radiométrie et spatiale
	TM	Moyenne radiométrie
	ETM+	Moyenne radiométrie + Défauts de miroir
	ELT 8	Bonne radiométrie, disponible 24h après la prise d'images
	Sentinel-2	Bonne résolution spatiale/ radiométrie, disponible 24h après la prise d'images
Climatiques	ONM : Officiels	Pluviométriques, température, vents (mensuels, 1980- 2010)
	OMM : Base de données	Pluviométriques, température, vents (quotidien + 3 heures de 1970 à 2016)
	Seltzer	Pluviométrie, Inondations (1915 – 1938)

3.5. Synthèse

La concrétisation de ce travail coïncide avec la mise à disposition abondante des données Landsat par USG, au même titre que le lancement du Satellite Sentinel-2 par ESA. De ce fait, les d'explorations se sont enrichies au fur et à mesure de la disponibilité des images satellitaires.

Dans la perspective du développement de nouveaux axes d'analyse à des échelles spatiales et temporelles variées, les anciennes images ont été presque systématiquement analysées. Dans l'objectif de trouver des sujets intéressants, qui s'inscrivent dans l'axe d'analyse développée, ou pour enrichir une argumentation. Donc le résultat de traitement d'image affiché ici, représente le traitement d'un nombre très important d'images. Sans qu'il soit au final présenté dans cette étude.

Par ailleurs, l'utilisation de nouveaux produits d'images satellitaires (Landsat 8 et Sentinel-2) s'est accompagnée de plusieurs difficultés, non seulement le manque de littérature, mais surtout le manque de maturité des outils. Des versions des logiciels utilisés ne supportent pas bien ces nouveaux produits, et ne les intègrent pas dans leur traitement pré-implémenté.

Chapitre 4 : Traitement des images aériennes et satellitaires

4.1. Traitement des photographies aériennes

Les images achetées sont livrées au format de fichier TIFF. Dans un premier temps, nous avons procédé à la suppression des bordures noires présentes sur les anciennes photographies aériennes. Ces bordures intègrent généralement les métadonnées des clichés. Ce travail préparatoire permet la suppression de zones vides d'information et apporte une meilleure vision de la zone couverte lorsque les clichés sont implémentés dans un SIG.

Les distorsions géométriques au sein d'une photographie aérienne résultent de déformations engendrées par l'optique du capteur, par l'angle de la prise de vue ou bien par le relief. Ce dernier étant présent dans notre zone d'étude, cette distorsion est amplifiée. Pour redresser et géolocaliser ces images, nous avons eu recours au géoréférencement. L'accès à des serveurs distants à partir des logiciels SIG (par liens WMS, WCS) offre désormais la possibilité d'utiliser de nombreuses bases de données cartographiques facilitant le géoréférencement des images. Dans ce cadre, notre choix s'est porté sur les images haute résolution accessibles depuis le logiciel ArcGis. Il s'agit des références géographiques en mode planimétrie (latitude et longitude).

Le calage des images a été réalisé à partir des points facilement identifiables, principalement des objets naturels (les confluences des cours d'eaux et les intersections de quelques routes) car le bâti est très rare. A noter qu'il reste difficile de déterminer des points de calage dans un paysage qui a fortement changé durant ces 50 dernières années. La méthode de transformation utilisée est basée sur un polynôme de 1^{er} ordre. Les résultats obtenus affichent des résidus faibles évoluant autour de 4 mètres, ils traduisent une bonne qualité. Les tableaux qui restituent les points de calage et les résidus des images utilisées dans cette étude, sont donnés dans l'Annexe. L'exemple d'une série de géoréférencements est illustré Figure 47. Au total, nous avons géoréférencé 47 photos aériennes.

L'objectif recherché de géoréférencement est la délimitation des contours des objets du paysage (sable, végétation...), afin d'en extraire la variable surfacique. Les photos ne présentent pas la même qualité visuelle, cela réduit de facto l'intérêt de traitement automatisé type « morphologie mathématique ». La méthode d'interprétation visuelle est retenue, elle nécessite la digitalisation manuelle des faciès présents sur les photos aériennes (sable, végétation, ravinement). Une codification (identifiant) est introduite pour pouvoir les différencier dans la requête lors de la restitution.

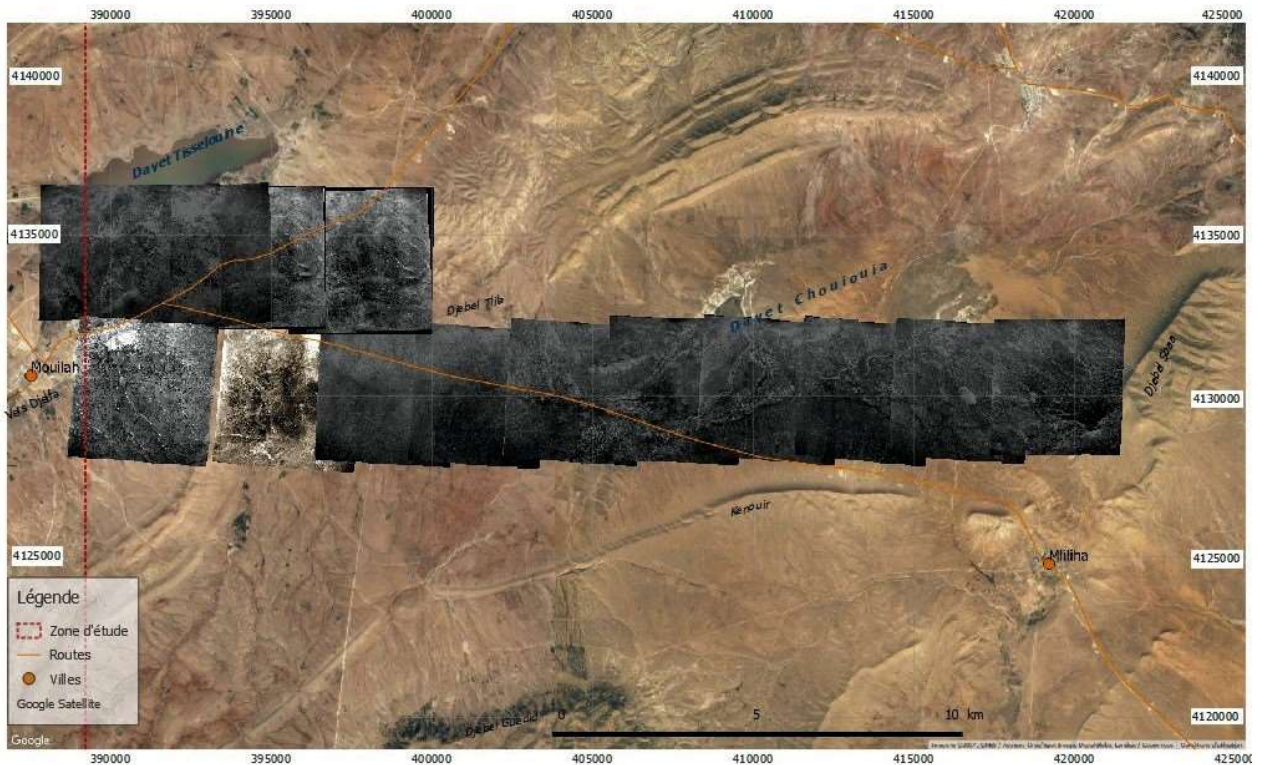


Figure 47 : Exemple de géoréférencement des vues aériennes de 1957 sur le site d'étude
 (Source : Service historique de la défense - Division armée de l'air, fond cartographique Google)

L'approche manuelle (justifiée) menée pour restituer les faciès des paysages des photographies aériennes sera différente pour les images satellites, qui elles, bénéficient d'une approche automatique ou semi-automatique par les méthodes de classification.

4.2. Prétraitement des images satellitaires

Les images satellitaires requièrent souvent un traitement préalable à l'analyse. Nous développons la composition colorée et l'amélioration de contenu par fusion, en revanche la partie correction des défauts de miroirs de Landsat 7 est développée en annexe.

Le rayonnement enregistré par le capteur embarqué sur une plateforme spatiale est modifié lors de son passage dans l'atmosphère. L'objectif des corrections radiométriques et atmosphériques est de convertir les valeurs de réflectance enregistrées dans l'atmosphère en valeurs de réflectance de surface. Elles permettent donc, de normaliser les images pour les études multi-temporelles afin d'obtenir la même référence radiométrique. Nous utilisons des images dont la majorité a été corrigée de manière automatique au préalable par l'USGS. Les méthodes de ces corrections sont décrites par USGS, Hagolle (2013) et Hagolle et al. (2015). Nous avons réalisé quelques corrections atmosphériques sur des images tests (Landsat TM et ETM) avec le module FLAASH (Atmospheric Correction Model Input Parameters) d'ENVI. Ces tests n'ont pas révélé d'amélioration significative dans les résultats obtenus. Soulignons que la

correction atmosphérique sur les images Sentinel-2 n'a pas pu être faite en raison des limites de la version du logiciel utilisés (Envi 5.1).

4.2.1. Composition colorée

Elle est souvent utilisée en télédétection, pour faire ressortir les éléments de l'espace. Elle augmente la capacité de distinguer et reconnaître les objets de paysage visuellement ce qui rend l'interprétation plus aisée dans un processus de photo-interprétation. Elle tient compte des signatures spectrales des objets de surface. C'est pour cela qu'il existe une multitude de compositions colorées envisageables pour mettre en avant et traiter un sujet en particulier (Forêt, Urbanisme, Eau, Végétation irriguée, Sol et géologie...). Le Tableau 5 récapitule les principales caractéristiques des compositions colorées utilisées. Les images produites dans ce document en composition colorée, sont issue de traitement d'images de Landsat MSS, Landsat-5™, Landsat-7 (ETM+), Landsat-8 et Sentinel-2 sont produites à partir de ces bandes.

Tableau 5 : description des compositions colorées utilisées

Rendu	Description	MSS	TM	ETM+	L8	SA2
Naturelle	Utilise les bandes du domaine visible	6	3		Nir,	4
	Sol, végétation, urbanisme apparaissent de couleur naturelle.	5	2		Red,	8
	Les zones déboisées, la végétation clairsemée ne sont pas détectées. Les types de végétation, l'eau peu profonde sur sol ne sont pas détectés	4	1		bleu	2
Naturelle-like (allure naturelle)	Intègre le canal le plus riche en information agricole		5	5		4
	La végétation saine colorée en vert vif, les prairies en vert, végétation clairsemée en orange et brun et l'eau en bleu. Les zones roses représentent le sol stérile,		4	4		8
			1	3		2
Géologique	L'image de cette combinaison est orientée pour les études géologiques, elle fournit des images très riches pour les régions désertiques.		7			12
			4			11
	Sables, sols et minéraux sont mis en évidence dans une multitude de couleurs.		2			2

Le rehaussement des compositions colorées est une opération que nous avons réalisée systématiquement. L'objectif est d'améliorer la qualité visuelle pour l'interprétation, ces images serviront à définir la nature des parcelles d'apprentissage. L'ensemble des supports d'images présentés dans ce document ont subi ce traitement.

4.2.2. Amélioration du contenu radiométrique et spatial des images

L'objectif de la fusion est d'améliorer la qualité spatiale ou radiométrique des images. La littérature scientifique du domaine de la télédétection est riche dans le traitement de ce sujet, et diverses méthodes ont été implémentées dans des outils et logiciels. Elles peuvent être classées en deux catégories : l'amélioration de la qualité spectrale et l'augmentation de la résolution spatiale. Dans cette étude, nous avons utilisé la fusion avec finalité spatiale. Il s'agit de combiner les données de la bande panchromatique plus riche en information géométrique avec des canaux multi spectraux présentant une moindre résolution spatiale, mais qui offrent une richesse spectrale et donc, thématique importante. Le but de la fusion est d'obtenir une image trichrome riche sur le plan spectral et fine sur le plan spatial.

Des règles de rapport d'échelle entre l'image haute résolution et basse résolution ont été introduites afin d'assurer l'efficacité de la fusion des images. Muller & De Béthune (2000) préconisent de respecter un ratio inférieur à 5 lors du choix des images à fusionner. Selon eux, une valeur supérieure, correspond à un trop grand écart des résolutions spatiales. En outre, il faut prendre des précautions supplémentaires dans un environnement très changeant comme notre site d'étude. En effet, il est indispensable préférable que les images à fusionner soient issues de la même date afin d'éviter les perturbations induites par le changement de paysage.

Les images concernées par la fusion respectent les règles de rapport d'échelle entre l'image à haute et à basse résolution. Pour les images de composition colorée, nous avons eu recours à la technique d'interpolation bilinéaire. L'image à faible résolution présente trois canaux de composition colorée, à laquelle il faut rajouter l'image de haute résolution dans un deuxième temps. Le résultat à la sortie est une image RVB à haute résolution, les images ont servi lors d'illustrations des résultats par des cartes et des MNT. La figure suivante présente le résultat d'une fusion composition colorée RVB 541 avec la bande panchromatique de la même série de l'image satellite ETM de mars 2001 (Figure 48), afin d'améliorer la résolution spatiale (15 mètres/Pixel). La qualité visuelle est améliorée pour faciliter la photo-interprétation et la restitution des résultats.



Figure 48 : Composition colorée 5-4-1 après fusion superposée sur MNT, Daiet Chouiouia
(Image du 24 mars 2001)

4.3. Traitement de l'imagerie pour l'étude des formes semi-arides

L'analyse thématique consiste à transformer les données numériques des images en catégories descriptives discriminant différents éléments de l'image. Le tout est restitué à travers des cartes thématiques pour une utilisation finale. La littérature est très riche de méthodes et de techniques de transformation produisant une variété de classification. Selon González *et al.* (2013) il existe deux méthodes de catégorisation. Sous la première on trouve trois catégories :

- Le classificateur spatial basé sur l'analyse de la relation entre les pixels voisins, en considérant ses propriétés (texture, proximité, taille, forme, répétition).
- Le classificateur temporel utilise des images multi-temporelles pour suivre le caractère spécifique d'un objet.
- Le classificateur orienté objet, hybride spatial et spectral qui inclut des étapes préalables de segmentation pour guider la classification et obtenir ainsi un objet complètement assigné à une classe possible.

La deuxième méthode suivie dans ce travail, est la classification en deux types : supervisée et non supervisée. Les exemples ci-dessous illustrent quelques approches testées au cours de ce projet.

4.3.1. La classification des images satellitaires

Dans ces régions l'un des problèmes de la classification est le fort contraste créé par le relief. Dans la partie exposée au soleil, on enregistre des valeurs très intenses. La lumière du soleil est réfléchi par des surfaces rocheuses ou caillouteuses sans végétation et presque à la verticale avec le soleil matinal. Ces fortes valeurs contrastent avec des valeurs basses d'ombre noire créée sur le côté opposé au soleil. Il est bien clair, que ce fort contraste permet de discriminer facilement ces régions, mais la complexité réside dans la reconnaissance des objets situés dans ce même espace.

L'évaluation quantitative est faite par l'utilisation de la matrice de confusion et l'indice de Kappa. Pour rappel, la matrice de confusion est régulièrement utilisée pour la validation des résultats de classification. Elle permet d'évaluer la précision de l'interprétation de chaque thème. Les données d'entrée de validation doivent être différentes de celles ayant servi à réaliser l'apprentissage. Les points de validation ont été choisis depuis l'image en composition colorée. Quant à l'indice de Kappa, produit dérivé de la matrice de confusion, est également utilisé pour le contrôle de la qualité et la précision de la classification. En d'autres termes, les valeurs de l'indice traduisent la confiance accordée à la classification. Il est meilleur quand sa valeur est proche de +1, une valeur supérieure à 0.6 affiche un accord satisfaisant et un accord excellent quand elle dépasse 0.8. Mais selon Foody (2002) la cible recherchée doit être 0.85.

4.3.1.1. Classification non supervisée

La classification non supervisée groupe automatiquement les pixels en classes en fonction de leurs similitudes spectrales. Cette dernière met en évidence des points qui peuvent être utilisés lorsque l'on dispose de peu d'informations sur la zone d'étude. Dans cet exercice, nous avons testé de nombreuses méthodes de classification non supervisée dont l'ISODATA (Ball et Hall, 1965). Cette dernière regroupe automatiquement les pixels dont les radiométries sont proches, sans faire référence à des zones témoins (parcelles d'apprentissage dont la nature est connue). Nous présentons deux résultats de classification sur image MSS (Figure 49) et ETM (Figure 50).

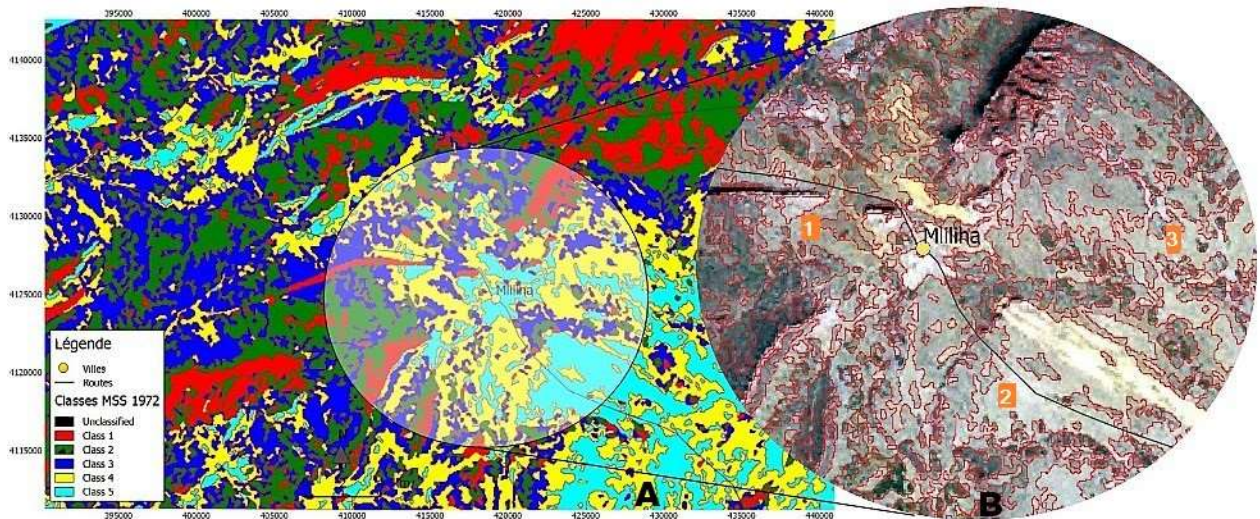


Figure 49 : Classification non supervisée avec la méthode ISODATA d'image MSS 1972 (A), la délimitation produite superposée sur le fond en composition colorée de la même image (B)

Une difficulté est rencontrée avec la méthode ISODATA pour la discrimination des objets de surface. Quel que soit le paramètre, le nombre de classes et le nombre d'itérations. L'indice de Kappa affiche une valeur très réduite (0.01), et la confusion se trouve également dans toutes les classes. Sur la carte en composition colorée Figure 49-(B), il est visible sur les points (1 - 2 et 3) que le sol nu est parfois classé comme sable.

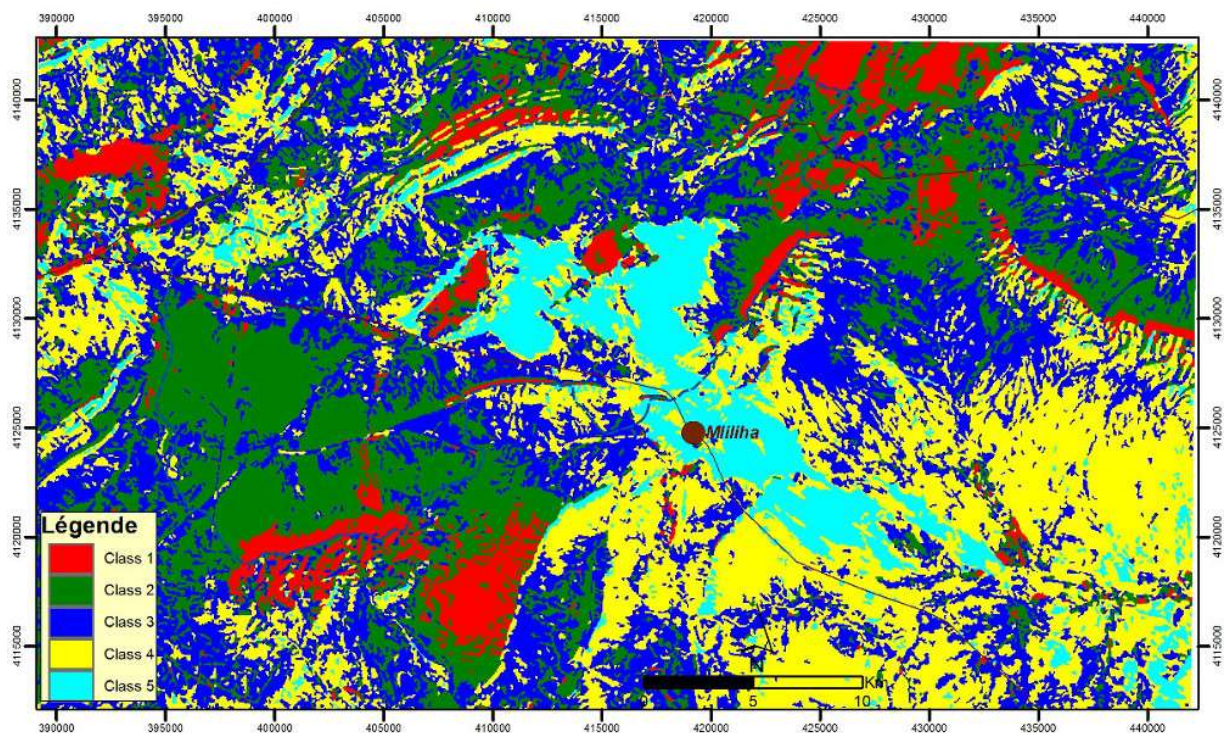


Figure 50 : Classification non supervisée avec la méthode ISODATA d'image ETM mars 2001

La précision globale de cette classification (ISODATA) sur l'image ETM (Figure 50) reste très insuffisante. L'indice de Kappa indique une valeur de 0,015 considérée très faible. L'analyse de la matrice de confusion indique que les quatre premières classes enregistrent des confusions

importantes, dont la précision évolue entre 5% et 22%. En revanche, la classe 5 qui représente le sable est bien identifiée. Par ailleurs, nous avons constaté que les images du printemps donnent des résultats relativement meilleurs que ceux de l'été, mais de manière générale cette classification n'a pas produit de résultats satisfaisants.

4.3.1.2. Classification supervisée des faciès semi-arides

C'est la méthode la plus utilisée dans le traitement des images pour l'occupation du sol en zone aride à semi-aride (Benazzouz, 2000; Bensaid, 2006; Callot & Oulehri, 1996; Desjardins *et al.*, 2005; Ghram-Messedi & Delaître, 2007; Oussedik *et al.*, 2003; Taibi, 1997). Elle se base sur des parcelles d'apprentissage qui correspondent à des « vérités terrains » issues de relevés *in-situ* ou obtenues par photo interprétation. La qualité d'une classification est donc dépendante d'une bonne connaissance du terrain étudié. Les parcelles d'apprentissage ont été définies par photo-interprétation depuis les compositions colorées. Nous avons retenu cinq classes : Sable ; Terrain nu ; Parcours ; Végétation saisonnière et végétation pérenne. Cette dernière classe « végétation pérenne » traduit les arbres du barrage vert, et les arbustes (forêt) du Djebel Guedid Tlilla. La « végétation saisonnière » regroupe les parcelles d'agriculture, ainsi que l'herbe verte qui se développe sur les cours d'eau pendant le printemps. La classe « terrain nu » sans végétation est introduite pour améliorer la discrimination de la surface ensablée (voir l'annexe parcelles d'apprentissage superposées sur l'image en composition colorée).

Afin de s'assurer de la bonne séparabilité spectrale des parcelles d'apprentissage, nous avons appliqué une méthode statistique d'évaluation. Il s'agit de la méthode « Jeffries-Matusita » implémentée dans le logiciel ENVI. Elle produit des résultats par couple de thèmes d'apprentissage, dont les valeurs varient entre (0 et 2). Les valeurs supérieures à 1,9 indiquent que les paires ROI (Region Of Interest – Parcelles d'apprentissage) ont une bonne séparabilité. En revanche, pour des valeurs inférieures à 1, il est conseillé d'examiner l'intérêt de maintenir leur séparabilité, et d'évaluer la possibilité de les regrouper dans le même thème.

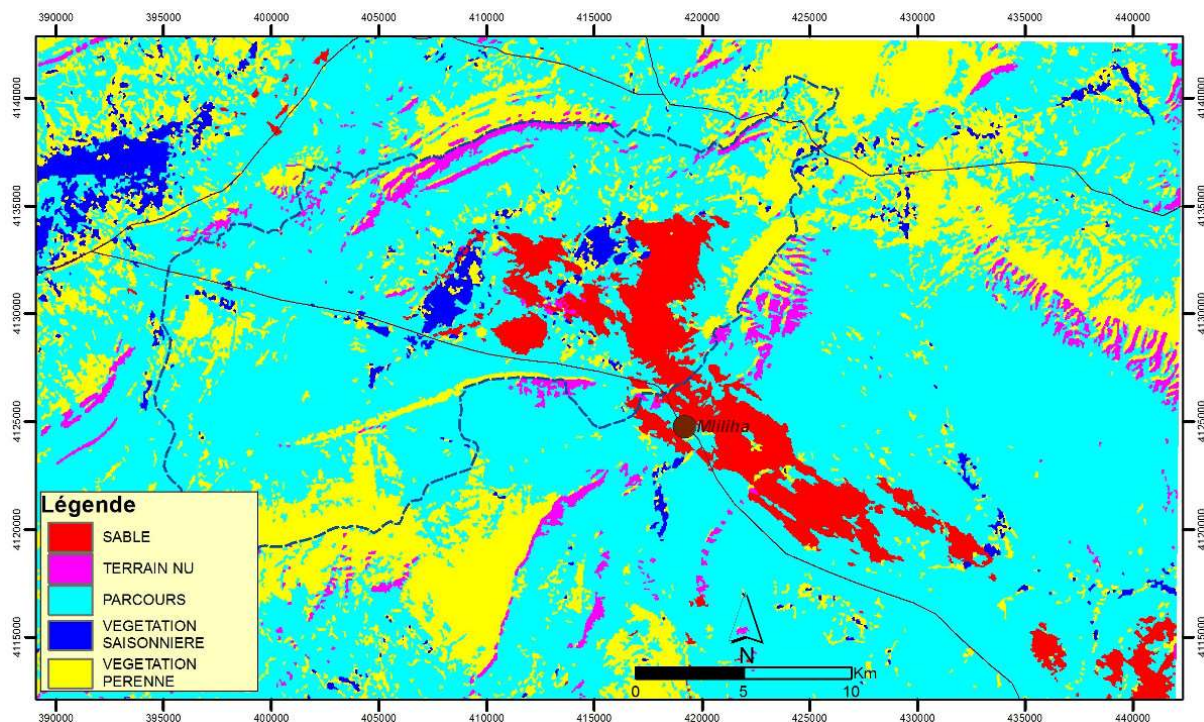


Figure 51 : Résultat d'une classification supervisée sur l'image ETM de mars 2001

Sur la même image, les résultats et la précision de cette classification (Figure 51) sont meilleurs par rapport à la classification non supervisée (Figure 50). En effet, l'indice de Kappa passe à 0.44, mais toutefois sans atteindre le niveau acceptable pour la validation de la classification. Signalons tout de même, qu'à ce stade, nous n'avons choisi que cinq classes, soit une catégorisation manquant de détails. Par ailleurs, l'analyse de la matrice de confusion confirme également la bonne classification du sable avec un taux de précision avoisinant les 100% (annexe). Les terrains nus affichent 59% de précision, cependant la classe de la végétation pérenne ne recueille que 23% de précision. Au même titre, l'examen de la séparabilité spectrale des parcelles d'apprentissage indique des valeurs inférieures au seuil de 1,9 sur les paires (végétation pérenne – parcours ; végétation pérenne – végétation saisonnière) en revanche les valeurs sont acceptables sur la classe sable.

D'autres tests de classification supervisée sur d'autres images n'ont pas produit de résultats satisfaisants. Les confusions qui ont été observées entre certaines classes sont liées aux zones d'ombre formées par le relief. On constate également des imprécisions dans la délimitation de la végétation qui peut-être s'expliquent par la forte réflectance du sol et le manque de couvert végétal. C'est pourquoi, ce mode de discrimination des classes s'est avéré difficile. Par conséquent, nous avons opté pour deux traitements séparés : l'un pour la délimitation du sable en retenant la classification supervisée, et l'autre pour la cartographie de la végétation en utilisant des indices spécifiques.

Pour la délimitation du sable, les bandes retenues pour chaque satellite sont TM1 et TM5 ; ETM1 et ETM5 ; le Moyen infra-rouge 1 et le bleu pour Landsat 8. Par ailleurs, comme nous l'avons présenté (Tableau 3 et Figure 45), la résolution spatiale des bandes spectrales des

images Sentinel-2 n'est pas uniforme. Les bandes 2 ; 3 ; 4 et 8 offrent une résolution de 10 m/pixel contre 30 m/Pixel pour le reste. Pour ces images, nous avons privilégié la résolution spatiale ; de fait le canal 8 remplace le canal 11 couvrant le domaine infra-rouge. Les canaux retenus pour la classification sont les 2 et 8.

Dans une même classe, nous avons regroupé l'ensemble de produit sableux, à savoir l'accumulation sableuse, et les îlots de sable vif qui ne présentent qu'une petite surface, et ne se manifestent que temporairement. Les résultats présentés plus loin, de la classification supervisée issus de l'utilisation de ce couple de bandes produisent une précision convenable selon l'indice de Kappa dans la délimitation des zones ensablées.

4.3.2. Indicateur de délimitation du sable

Le sable présente des valeurs basses dans le bleu et le vert et des valeurs hautes dans le moyen infrarouge. Sur ces constatations, nous pouvons nous inspirer de la formule de l'indice de végétation (NDVI) avec le calcul de la différence normalisée pour construire un indicateur. Dans la littérature, il existe de nombreux travaux qui ont reproduit cette démarche pour adapter l'indicateur NDVI à leur thème, nous citons deux exemples dans des domaines variés. L'indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI) (McFeeters, 1996), adapté récemment par Xu (2006) dont l'objectif est de proposer une méthode pour cartographier les contours maritimes des plages; l'indice de couleur (IC) (Escadafal, 2012), qui exploite l'écart de réflectance entre les deux bandes vertes et rouges, afin de discriminer les voiles sableux.

Fort de ces études nous proposons d'exploiter l'écart entre le canal bleu du domaine du visible et le moyen infrarouge :

$$\text{Indice de sables vifs} : ISV = \frac{\text{Mir}-\text{Bleu}}{\text{Bleu}+\text{Mir}}$$

Sur les deux satellites TM et ETM+ cela correspond au MIR. Le moyen infrarouge représente le Canal 5 et le Bleu le canal 1. Le résultat de ce calcul produit une nouvelle image en « niveau de gris », avec de nouvelles valeurs comprises entre -1 et +1. L'analyse de ces niveaux de gris nous renseigne sur la présence de sable. Celui-ci se distingue par des valeurs radiométriques élevées (positives) bien identifiables contrairement aux autres faciès tels que l'eau qui est retranscrit par des valeurs faibles (négatives). Le sable apparaît donc en blanc et les autres objets évoluent entre le noir et le gris. Ainsi, l'indice facilite grandement l'opération d'identification des zones ensablées. Nous l'avons appliqué à toute une série d'images temporelles issues de différents satellites (TM, ETM+, Landsat 8 et Sentinel-2). Nous affichons un exemple d'image de mai 1995 prise par Landsat TM (Figure 52), la délimitation des contours est faite par un seuillage visuel.

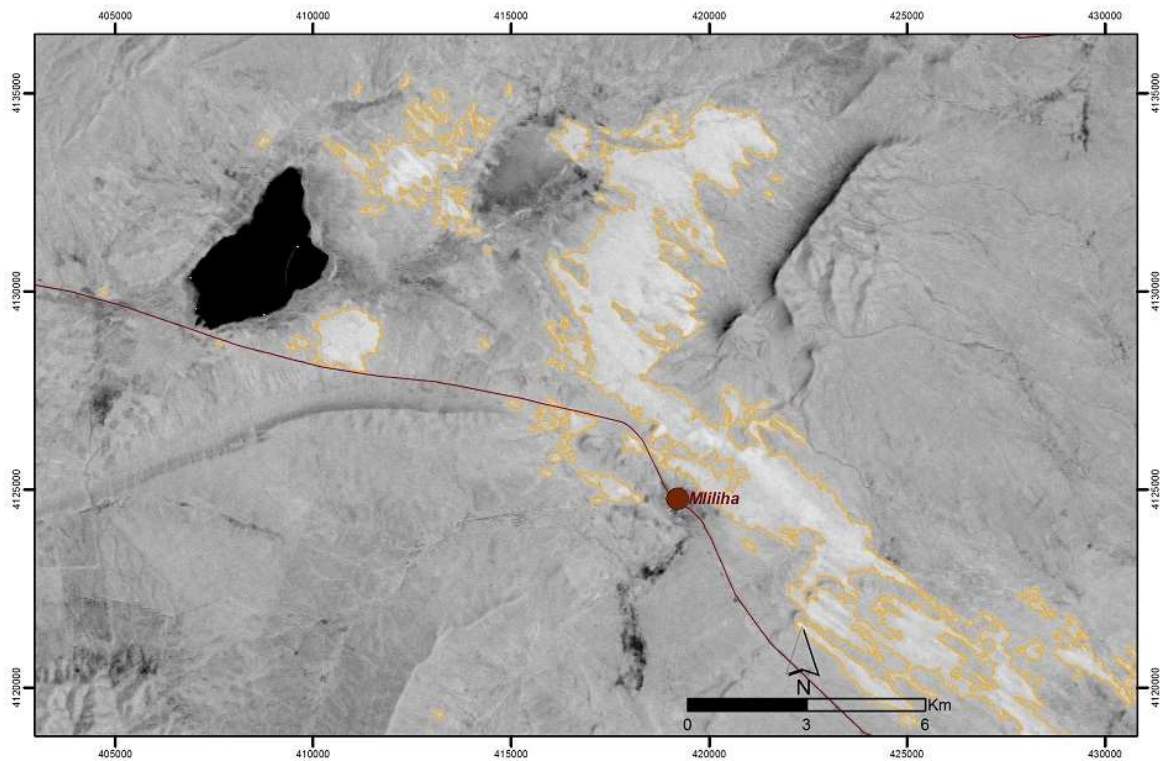


Figure 52 : Carte en niveau de gris calculée à partir de l'indice du sable vif (ISV). Les accumulations sableuses en blanc (contour jaune rajouté) se distinguent nettement du reste des objets. L'eau dans la daïa prend une couleur noire due à des valeurs négatives.

Le sable identifié sur les images présente une légère différence en termes de superficie entre les deux méthodes : classification supervisée et calcul par d'indice. Cette différence varie entre 5 et 13 %. Nous nous sommes rendus compte que l'indicateur développé offre une meilleure délimitation des espaces ensablés. Par contre, en termes de robustesse, c'est-à-dire la possibilité de l'appliquer sur toutes nos images, il semble « fragile ». Ses faiblesses résident dans sa sensibilité à l'humidité. Nous avons recensé plusieurs images pour lesquelles il n'arrive pas à produire une délimitation cohérente. Cela peut s'expliquer par la présence d'une humidité résiduelle dans le sable à la suite d'un événement pluvieux.

Dans le cadre de ce travail, nous manipulons plusieurs images acquises à différentes dates, correspondant à des saisons humides ou sèches. La méthode de mesure doit être harmonieuse pour autoriser la comparaison temporelle d'une image à l'autre. Nous avons donc opté pour garder une seule méthode de mesure homogène pour l'ensemble des images, à savoir la classification supervisée.

4.4. Détection des changements et des dynamiques

Les méthodes pour la détection du changement à partir de données multi-dates sont nombreuses et multiples, l'article de Lu *et al.* (2004) intitulé : « Change détection techniques » recense les techniques les plus répandues, le domaine d'application ainsi que l'intérêt porté pour chaque méthode. Il apparaît, qu'il n'y a pas une méthode parfaite, et le choix d'une dépend du domaine d'application, de la qualité des données, et de la nature des changements recherchés.

Dans notre étude, nous avons préféré utiliser la méthode de détection du changement en post-classification qui consiste à comparer des résultats après la classification. Les images classifiées sont transformées en vecteur afin d'être analysées dans un SIG. Les résultats produits par cette méthode dépendent de la qualité de la classification.

Ce choix est justifié, par la diversité des données multi-dates : des séries temporelles avec des images satellitaires d'une résolution spatiale et radiométrique diversifiées. En effet, les plus anciennes sont des photos aériennes (produit optique), suivies des images MSS, TM, ETM, Landsat 8 et Sentinel-2. Ce choix satisfait également l'objectif recherché qui est d'étudier l'évolution de la surface ensablée. Par ailleurs, il offre deux avantages :

- Éviter les opérations de normalisation radiométrique pour éliminer les divergences des capteurs entre satellites afin que les images soient comparables image à image.
- Produire des cartes thématiques en mode vecteur sur l'état d'ensablement, et cela pour chaque pas de temporalité. Un produit directement exploitable dans un SIG pour l'examen d'un état de surface d'une séquence particulière.

L'ensemble des images classées, ainsi que leur vectorisation thématique sont introduits dans un SIG (Système d'Information Géographique). La production des indicateurs de mesure, la détection du changement et l'identification des tendances d'ensablement, l'ensemble de ces opérations sont réalisées dans cet outil (SIG). La principale limite de cette méthode est qu'elle ne permet pas de voir et de constater les variations et l'évolution des sous thèmes d'ensablement (exemple : évolution d'un voile sableux vers des dunes). Mais cette limite ne concerne peu notre site. La méthode est synthétisée dans le diagramme suivant (Figure 53).

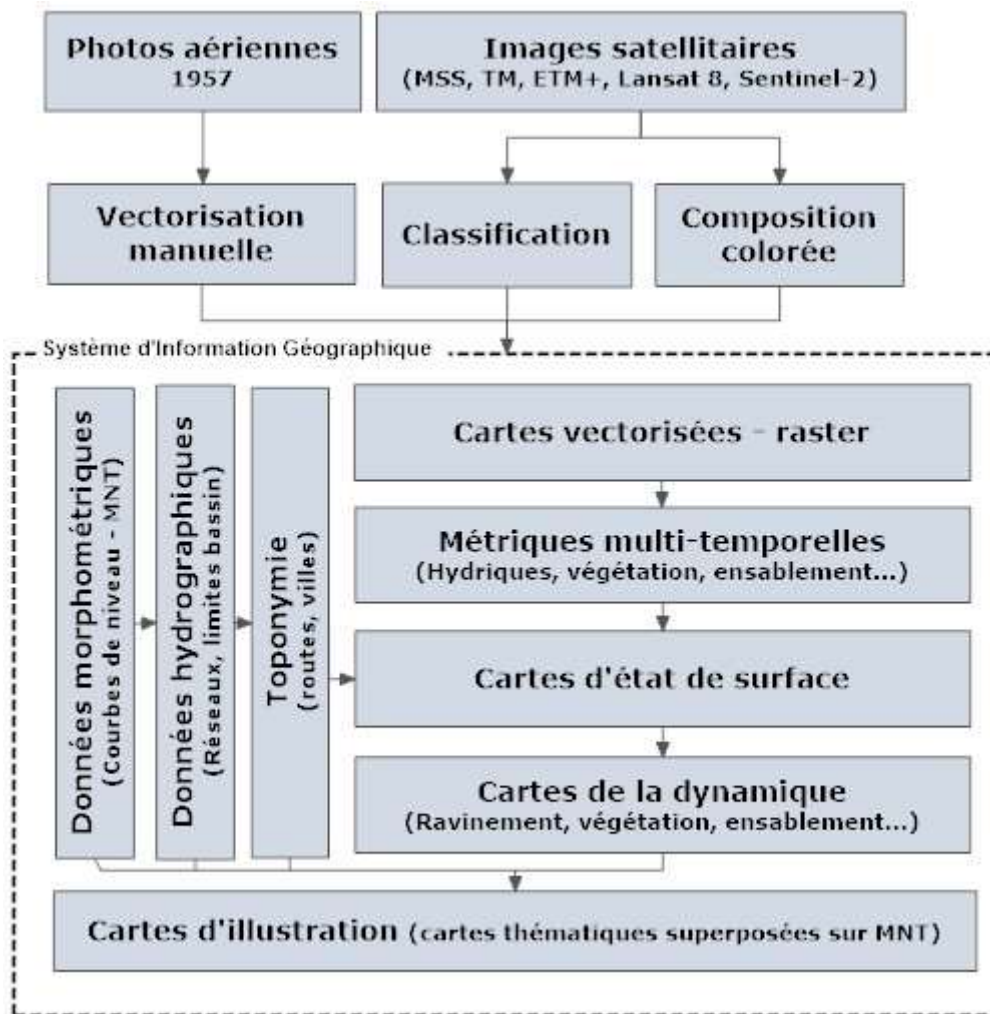


Figure 53 : Les étapes de la production des métriques et des cartes thématiques

4.5. Validation des changements détectés

L'objectif consiste à s'assurer de la qualité des résultats, et à déterminer la précision et l'exactitude des thèmes issus de la classification et la vérité du terrain. Cette opération est considérée par Caloz & Collet (2001) « comme un concept complexe comprenant la référence à plusieurs critères et pouvant se dérouler en plusieurs étapes ». Comme c'est souvent le cas des études de détection des changements effectués à partir des séries temporelles, la validation des résultats des changements constatés pose de vraies difficultés. En effet, l'évaluation de la précision des états du passé, n'a qu'une valeur relative, car la référence elle-même est une représentation du terrain (d'autres cartes). Dans notre cas, la difficulté se trouve à une double échelle, temporelle et spatiale :

- Périodes antérieures : des études couvrant le site sont très rares, encore plus celles qui concernent les plages et périodes couvertes par l'imagerie. Nous avons eu recours à deux astuces. La première est de produire systématiquement une image en

composition colorée qui sert de support de validation. La seconde est d'interroger la mémoire des habitants pour décrypter le paysage et confirmer certaines constatations.

- Période actuelle : sur une échelle de temporalité mensuelle, nous avons constaté une forte dynamique des formes sableuses localisées en petites parcelles. Des changements ont été constatés sur une fenêtre de période très courte. Nous n'avons pas pu effectuer des campagnes de terrain répétitives pour valider ce constat sur le site.

La validation de la classification des images récentes est faite par deux méthodes

- Validation des résultats à partir d'observations effectuées sur le terrain. Elle est rendue possible, car le site est de dimension raisonnable et accessible, traversé par une route. De plus, il est possible de prévoir la date de passage des satellites sur le site pour la faire coïncider avec la visite de terrain et faire correspondre les résultats des observations in-situ exactement avec la prise d'images. L'exercice a bien fonctionné pour l'acquisition du 27 octobre 2013 du satellite Landsat 8 et pour l'acquisition du 08 août 2017 avec le passage du satellite sentinel-2. Cette dernière visite coïncide avec des événements de vents de sable empêchant d'explorer longtemps le site.
- Validation sur des images de haute résolution, en prenant soin de respecter la correspondance des dates entre les deux supports d'images.

En premier lieu, nous avons appliqué une validation qualitative. Elle se pratique par une comparaison visuelle, par superposition entre le résultat de traitement et l'image en composition colorée. Un focus est fait sur la précision géométrique, en l'occurrence la précision de la délimitation des bordures de la couverture sableuse.

En plus de la validation qualitative, nous avons appliqué une évaluation quantitative par l'utilisation de la matrice de confusion.

DEUXIEME PARTIE : LES PROCESSUS DES HAUTES STEPPEES

Chapitre 5 : Dynamique éolienne	112
Chapitre 6 : Variabilités spatio-temporelles des précipitations	120
Chapitre 7 : Paramètres hydromorphologiques.....	151
Chapitre 8 : La dynamique du couvert végétal	171

Chapitre 5 : Dynamique éolienne

Le vent est un agent d'érosion azonal (Riser, 2010), l'action de la dynamique éolienne trouve son efficacité par la rencontre de conditions favorables : vent puissant, présence de matériaux fins qui peuvent être pris en charge et absence de végétation (Callot, 2008). Toute l'année, le vent est presque omniprésent dans les hautes plaines steppiques. Il est responsable du remaniement des sables (Bensaïd, 2006). La région de Djelfa réunit donc les conditions favorables pour le déclenchement de l'érosion éolienne (Makhlouf, 1993).

Dans la région de Djelfa, comme dans le reste des zones steppiques, la dynamique éolienne se manifeste par l'apparition de zones de dépôts sableux. Cela traduit la force et la fréquence des vents morpho dynamiquement actifs. Ceux-ci sont présents toutes les saisons et mobilisent les particules disponibles. Dans les paragraphes suivants, nous analyserons la fréquence directionnelle de ces vents sur la période de 1980 – 2000.

5.1. Caractéristiques annuelles

Il est important de connaître la part du vent calme et non efficace, car tous les vents ne se transforment pas en vent de sable. Dubief (1959) constate qu'au Sahara, des vents assez violents avec des vitesses relativement constantes, ne soulèvent pas un grain de sable alors qu'au même lieu des vents plus faibles mais instables, déclenchent des vents de sable importants. Ce sont les brusques sauts de vent qui assurent la mobilisation des grains de sable (Delannoy *et al.*, 2016). Dans la région de Djelfa, les vents calmes représentent la part la plus importante avec 29%. En parallèle, les vents considérés non efficaces, avec des vitesses de 1-6 m/s représentent également une part majoritaire de 46%. Quant aux vents efficaces, ils avoisinent les 24% (Tableau 6).

Tableau 6: régime des vents calmes et efficaces, par catégorie de vitesse dans la région de Djelfa.
(Période 1980 – 2000, données ONM)

	01-06	06-10	10-16	>= 16	% par direction
Nord	10.74	4.43	1.18	0.18	16.53
Nord-Est	1.22	0.28	0.05	0.00	1.54
Est	1.27	0.29	0.05	0.01	1.62
Sud-Est	1.60	0.69	0.14	0.01	2.45
Sud	10.48	4.00	0.95	0.08	15.51
Sud-Ouest	5.72	2.25	0.82	0.05	8.84
Ouest	4.57	1.94	0.44	0.04	6.99
Nord-Ouest	10.52	4.61	0.97	0.12	16.22
Vent calme					28.88
Total	46.13	18.47	4.60	0.49	98.57

Les résultats de l'analyse de la direction des vents efficaces à l'échelle annuelle sont présentés Figure 54. La rose des vents est de type bimodal, elle indique la présence de trois directions préférentielles dominantes pour les vents efficaces. Le secteur N à NW à égalité autour de 24% chacun, et le secteur Sud d'environ 21%.

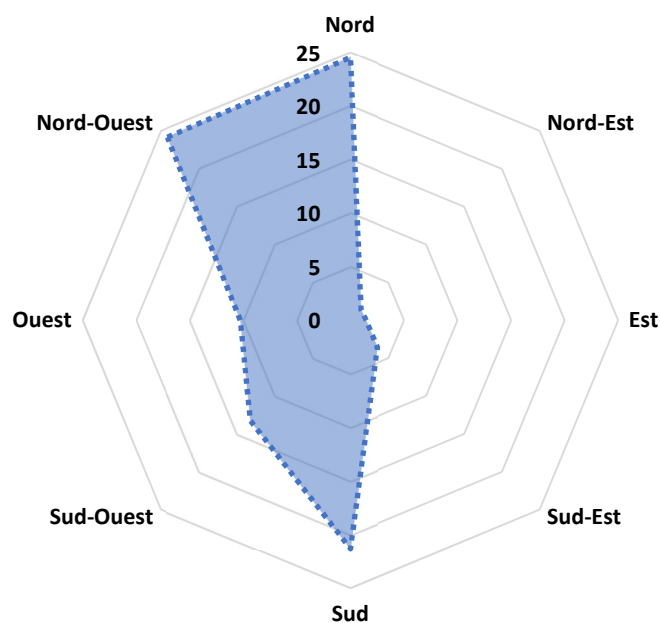


Figure 54 : Rose du régime des vents efficaces (supérieurs à 6 m/s) sur la période 1980 – 2000.
(Région de Djelfa, données ONM)

Ces résultats soulèvent plusieurs questions. En effet, le caractère très orienté de la rose des vents pourrait s'expliquer par le contexte géographique particulier de la station météorologique comme la présence de reliefs ou d'obstacles divers forçant le vent à prendre

une direction préférentielle. Or il n'en est rien, la nouvelle station est située sur une position dominante, à l'écart de toute influence directe. En revanche, l'ancienne station (à l'arrêt depuis 1995) est quant à elle située dans la zone urbaine de Djelfa. Ce contexte urbain est également signalé par Durand (1988) « la station de Djelfa est bien abritée des vents du Nord-Est, de l'Est et du Sud-Est ». Faute de pouvoir accéder à l'emplacement précis de la station, nous n'avons pas pu observer et vérifier son installation.

Au cours de l'année, le vent ne s'exerce pas de la même intensité et de façon homogène, et surtout, il change de direction d'une période à l'autre. Raison pour laquelle nous développons maintenant ces deux points.

5.2. Analyse mensuelle des directions des vents

L'analyse mensuelle des vents efficaces Figure 55 fait apparaître des tendances qui peuvent être regroupées par périodes :

- Les vents efficaces du N et du NO, dominant de novembre à mars. Sur cette période les seuls vents du Nord et Nord-Ouest représentent 67% en janvier et 60% en février. Elle couvre la période pluvieuse et le début du printemps.
- Les vents du Sud et du Sud-Ouest dominant entre juin et septembre, avec un maximum au mois de juillet (56 %) et août (53 %) en pleine sécheresse estivale. Le vent sirocco chaud du Sud est parfois accompagné par un vent de poussière. Il est aussi occasionnellement porteur de perturbations orageuses, résultat de la pénétration depuis le Golfe de Guinée.
- Les mois d'avril, mai et octobre présentent des valeurs mitigées. Ce sont des mois de transition entre deux systèmes saisonniers dominants.

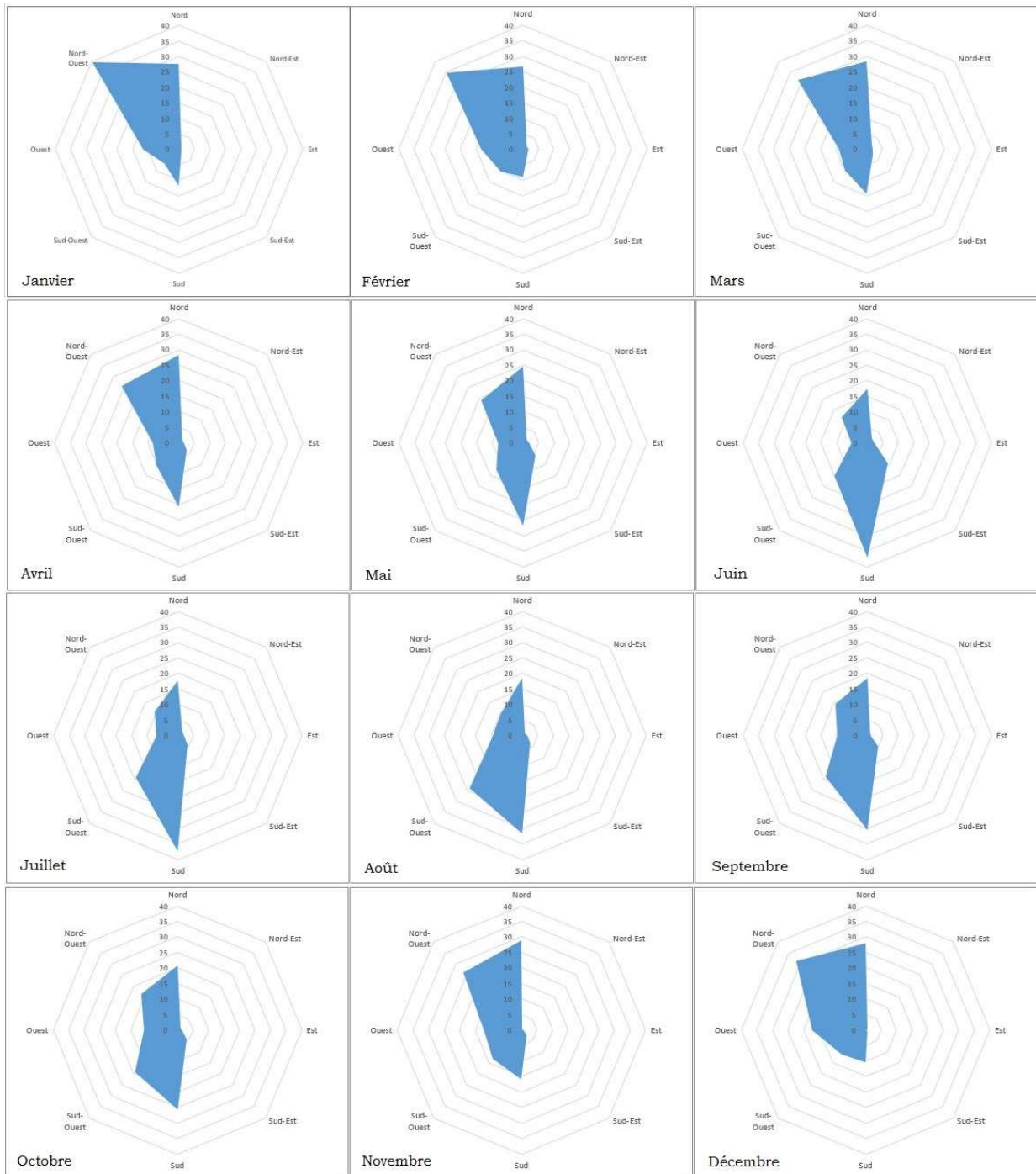


Figure 55 : Rose directionnelle des vents efficaces mensuels sur la période 1980 - 2000, station de Djelfa (données ONM)

Les vents efficaces sont responsables du transit du sable, mais la forme la plus spectaculaire et la plus visible de ce transfert, est le vent de sable (Figure 56, Figure 57). Raison pour laquelle, nous allons examiner l'intensité de ces événements.



*Figure 56 : Vent de sable sous forme de panaches soulevés par des rafales de vent.
(Photo prise depuis Rouissat-el-Mehara, perspective Ouest le 09/08/2017, 34°41'24"N - 3°47'33"E)*



*Figure 57 : Soulèvement de matière lors des rafales de vent entrecoupées par des périodes d'accalmies.
(Site d'étude, route menant de Mouilah à Mliliha, le 09/08/2017, 34°45'51"N - 3°33'12"E)*

5.3. Intensité des évènements des vents de sable

La répartition de la fréquence des vents de sable est très variable d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre. La Figure 58 illustre comment les vents se distribuent annuellement et mensuellement. La fréquence élevée du nombre de jours de vent correspond aux couleurs vives orangé-rouge. Celles-ci traduisent une forte intensité du vent.

En termes de distribution mensuelle, l'intensité se localise principalement entre mars et octobre. En effet, une fréquence très forte est enregistrée en 1994 (10 jours, dont 7 concentrés sur le mois de juillet). Par la suite, l'activité baisse pour reprendre en 2003 avec la même intensité qu'en 1994 (10 jours de vents de sable, principalement répartis entre août et septembre). Les années 2005 et 2008 représentent l'intensité la plus forte sur la période (avec respectivement 19 et 28 jours). Par ailleurs, Le détail de ces événements, indique que les années 2002 et 2004 ont enregistré les manifestations les plus extrêmes sous forme de trois tempêtes de sables.

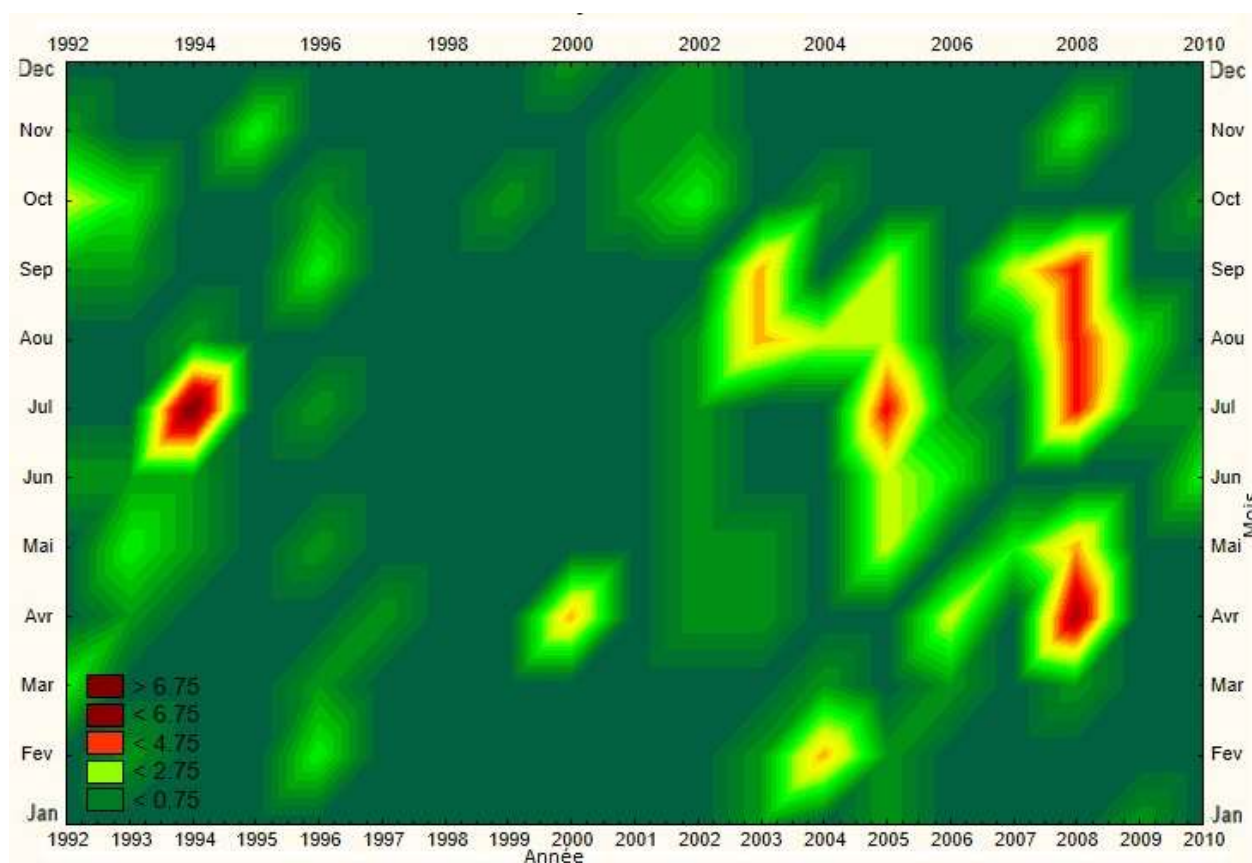


Figure 58 : Répartition mensuelle et annuelle de la fréquence des vents de sable constatée à Djelfa période 1992 – 2010 (données ONM)

5.4. L'analyse directionnelle du vent de sable

Les données climatiques de l'ONM à notre disposition ne nous permettent pas de mener une analyse détaillée des directions du vent sableux. Nous avons voulu examiner cette dimension avec une granularité temporelle fine basée sur chaque événement sableux au lieu des totaux mensuels. Nous avons eu recours à la base de données climatiques constituée par les fichiers de l'OMM.

A partir d'une requête, nous avons extrait les données du vent avec l'activité du sable, contenant : la date complète (année, mois, jour, heure), la vitesse du vent, la vitesse de rafale, la direction du vent et la visibilité. Au niveau de la station, cette information est renseignée par l'expert : il choisit une information normalisée depuis une liste de nomenclatures parmi les trois informations de hiérarchisation de cette table et la clé utilisée dans le fichier (Tableau 7).

Tableau 7 : Table de nomenclatures des observations des évènements de poussière et sable

Clé	Catégorie
07	<i>Dust or sand raised by wind at or near the station at the time of observation, but no well-developed dust whirl(s) or sand whirl(s), and no duststorm or sandstorm seen or, in the case of ships, blowing spray at the station</i>
08	<i>Well developed dust whirl(s) or sand whirl(s) seen at or near the station during the preceding hour or at the time of observation, but no duststorm or sandstorm</i>
09	<i>Duststorm or sandstorm within sight at the time of observation, or at the station during the preceding hour.</i>

Dans l'exemple (Figure 59), le 30 août 2003 on constate un vent de sable avec une vitesse moyenne de 56 km/h à 17h, une visibilité réduite à 500 mètres. C'est le même niveau de détail de données qui est intégré dans la base.

Heure	Temps	Température	Biométéo	Humidité	Pt. de rosée	Vent moyen (raf.)	Visibilité
20h		30.3 °C	31.4	28%	9.7 °C	7 km/h	8 km
17h			32.8	20%	6.8 °C	56 km/h	500 m
14h			35.8	18%	7.5 °C	28 km/h	6 km
08h		23.7 °C	23.7	31%	5.8 °C	11 km/h	2 km

Figure 59 : Exemple des mesures du vent de la journée du 30 août 2003¹³

Après l'extraction des données, l'étape suivante a consisté à convertir des vitesses du vent en km/h et la catégorisation des directions du vent. Pour le nombre de classes, nous avons choisi de garder une cohérence avec nos traitements antérieurs. A cet effet, une table de correspondance de 8 classes de direction a été créée pour servir de base de conversion des données de valeurs en degrés vers une classe directionnelle. Enfin, le traitement proprement dit a été réalisé par la suite. L'agrégation des résultats est consignée dans Tableau 8.

¹³ <http://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/30/aout/2003/djelfa/60535.html>

Tableau 8 : fréquence (effectifs) et orientation des vents de sable sur le période 1989 – 2000

Direction	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Nord		1	1	1		1	3	2	1		1		11
NE		1			1	1							3
Est						1				1			2
Sud-Est			2	2	2	2	1	1	1	1			12
Sud			1		4	4	2	1	6	3	1		22
Sud-Ouest		3	2	3	3	4		1	2	4	2		24
Ouest		2	3	3	1	1	1	3	2	4	1		21
Nord-Ouest	1	5	1	6	1		3	2	1	1	2	1	24
Total	1	12	10	15	12	14	10	10	13	14	7	1	119

Dans le tableau nous pouvons voir une forte activité causée par le vent du Sud, du Sud-Ouest, et du Sud-Est représentant respectivement 22, 24 et 12 évènements sableux, soit la moitié (48%) du total. On trouve aussi le vent du Nord avec 11 évènements et Nord-Ouest avec 24 évènements, les deux totalisent 29% de l'activité globale. Les plus faibles sont le vent de l'Est et du Nord-Est. La répartition mensuelle laisse voir un système rythmé ; deux mois sans activité durant lesquels le vent de sable disparaît (décembre et janvier), de février à octobre, l'activité est à son niveau le plus haut tout en gardant une certaine stabilité. La transition entre ces deux rythmes se manifeste par une augmentation rapide sous forme de rupture entre janvier et février, elle passe de 1 à 12 évènements. En l'occurrence, le mois de novembre assure une deuxième transition, mais moins abrupte. L'explication que nous pouvons avancer ici, est que ces évènements restant peu fréquents, les séries sont très peu peuplées. Cela fait apparaître les évènements exceptionnels d'une année avec des valeurs extrêmes. En effet, 42% du total du mois de février et 40% de celui de mars se trouvent concentrés dans une seule année 1989. Pour valider ces propos, nous avons refait le même calcul, mais sur une série plus longue, depuis 1952 soit une période de 60 ans (Tableau 9). Les résultats obtenus confirment un réajustement de la distribution des valeurs mensuelles.

Tableau 9 : répartition d'orientation des vents de sable sur le période 1952 – 2015.

(Station de Djelfa, source OMM)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Total général
Nb de jour	11	28	30	44	48	56	56	25	21	25	15	7	366

Chapitre 6 : Variabilités spatio-temporelles des précipitations

Seltzer *et al.*, (1946) comparent déjà dans leurs travaux les données de précipitations de la période 1878-1913 aux données de 1913-1938. Ils constatent que les pluies de la seconde période étaient supérieures à celles de la première période dans le nord de l'Algérie. En revanche, elles sont inférieures à la normale des précipitations dans le Sud. Il conclut que la pluie serait en augmentation dans la partie la plus arrosée de l'Algérie, et en diminution dans la partie la plus sèche.

D'autres travaux évoquent ce caractère de variabilité, Medjerab et Henia (2013) l'expriment par la migration et le déplacement des courbes des isohyètes. Bisson & Callot (1986), sur un terrain plus loin, toujours dans la steppe, à El Abiodh examinent cette irrégularité en termes de pluies utiles. Le bilan cartographique de l'ANRH illustré par deux cartes (page 26, Figure 14 page 27) permet une lecture régionale de cette variabilité spatiale.

Dans ce chapitre, nous examinerons d'abord la recrudescence des événements orageux qui peut traduire une dégradation de la qualité des précipitations : leur évolution dans le temps ainsi que leur répartition saisonnière et mensuelle. En plus de la dégradation de la qualité, il semble que l'augmentation des événements orageux favorise la variabilité spatiale à une échelle fine.

En dernière partie, à partir d'une série de données sur les précipitations couvrant une durée de 40 années, nous analyserons l'évolution du climat. Elle peut se traduire par des séquences d'années successives d'assèchement ou d'humidité, par un dérèglement saisonnier ou une modification dans la structure du régime pluviométrique.

6.1. Évolution des perturbations orageuses

Au printemps-été, les orages sont essentiellement dus à la forte instabilité atmosphérique que les hautes températures provoquent, durant la journée, dans la steppe sud Algéroise (Isnard, 1950). En effet, en saison chaude elle enregistre des orages très fréquents accompagnés de précipitations sous forme d'averses, à l'origine de crues rapides. Djelfa enregistre entre 30 et 40 jours d'orage chaque année. La probabilité d'orage sur certains mois d'été peut atteindre un orage tous les trois jours.

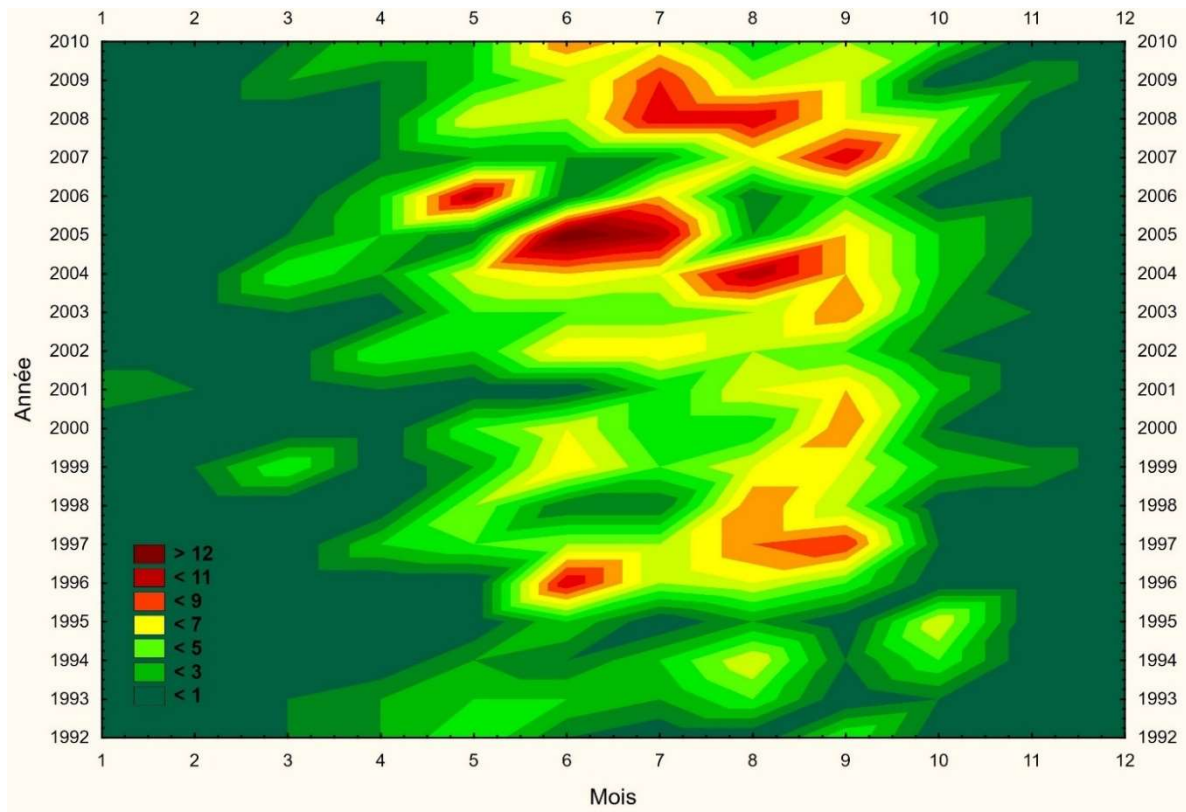


Figure 60 : Diagramme temporel des évènements orageux, région de Djelfa de 1992 à 2010
(Données : ONM)

La Figure 60 exprime l'intensité mensuelle des évènements orageux (en rouge pour les plus nombreux) sur la région de Djelfa de 1992 à 2010. Comme l'illustre le diagramme ci-dessus (Figure 60), la période d'activité orageuse s'étale du mois de mai au mois d'octobre pour décroître progressivement et disparaître vers novembre avec la baisse des températures. Les îlots de chaleur (orangé-rouge) qui traduisent une intensité orageuse se localisent sur la partie haute du diagramme, particulièrement dès les mois de juillet 2003, juin-juillet 2004 et 2005. On constate également que, sur cette série, l'activité orageuse est particulièrement soutenue ces dernières années, notamment entre 2003 et 2009. Mais basé uniquement sur 18 ans de données, le nombre d'échantillons apparaît insuffisant pour conclure à une tendance maintenue dans le temps ou à une forme d'évolution du climat, au même titre qu'une péjoration conjecturale. Généralement ces orages sont à l'origine d'évènements sévères et produisent des pluies torrentielles (Figure 61).



Figure 61 : Inondations dans la ville de Djelfa suite au passage d'un orage le 08 septembre 2015 (APS, Algérie Presse Service)

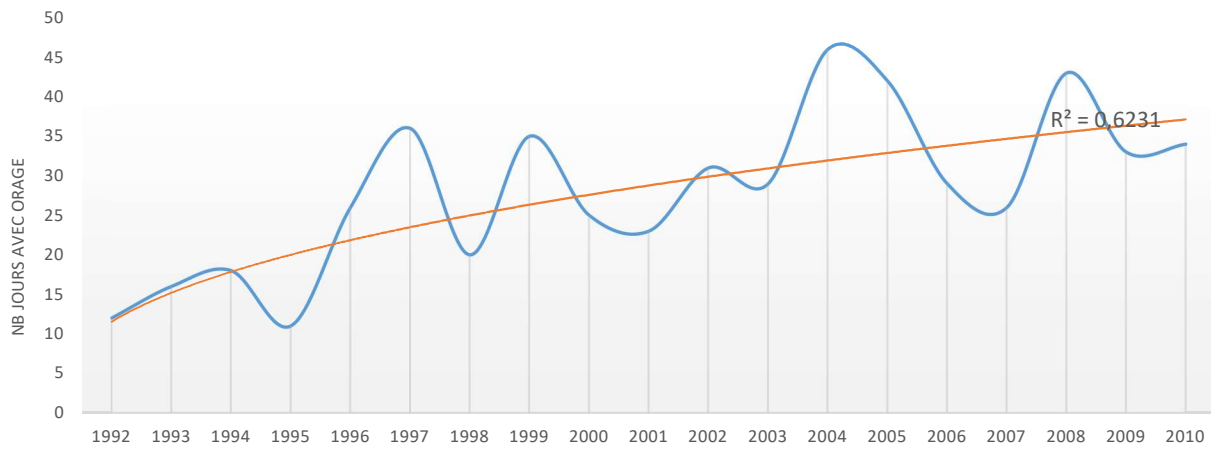


Figure 62 : Evolution annuelle de l'activité orageuse à Djelfa entre 1992 et 2010 (données : ONM)

La courbe d'évolution (Figure 62) indique une irrégularité annuelle de la fréquence des orages mais elle est orientée à la hausse. Quant à la courbe de tendance, elle prend une direction positive pour exprimer l'accroissement et la progression globale des pluies orageuses sur la période. Sur une échelle géographique plus large, MEDJERAB (2007) constate une augmentation de la fréquence des pluies intenses. Cette augmentation des pluies a lieu durant la saison chaude (de mai à octobre). Elle traduit une dégradation de la qualité des précipitations. En effet, elle arrive à un moment inopportun pour la végétation pendant la période de dormance estivale. Des travaux antérieurs portant sur la répartition des pluies torrentielles signalent aussi leur concentration. Une journée est considérée torrentielle si elle reçoit plus de 30 mm de précipitation. À Djelfa, on comptabilise 23 jours de pluies torrentielles sur la période 1913-1938. L'activité est maximale pendant les mois de décembre et mai avec 5 événements. Le mois de novembre en comptabilise 3 et les mois de septembre, janvier et avril n'affichent que deux pluies torrentielles (Seltzer *et al.*, 1946).

A l'intérieur de la même zone climatique, les précipitations d'origine orageuse très localisées accentuent l'écart pluviométrique et jouent un rôle positif dans la variabilité spatiale des précipitations de la région steppique. Nous pouvons le voir sur la (Figure 63) issue d'une image satellite de la région prise par Landsat 7 le 17 juillet 2002 peu après le passage d'un orage producteur de pluies intenses. La zone impactée par la pluie dessine un « couloir » d'une

largeur moyenne de trente kilomètres en bordure nord-est de la ville de Djelfa. Les stations météorologiques environnantes, Boussaâda et Ksar-Chellala, n'enregistrent pas de précipitations ce jour-là.

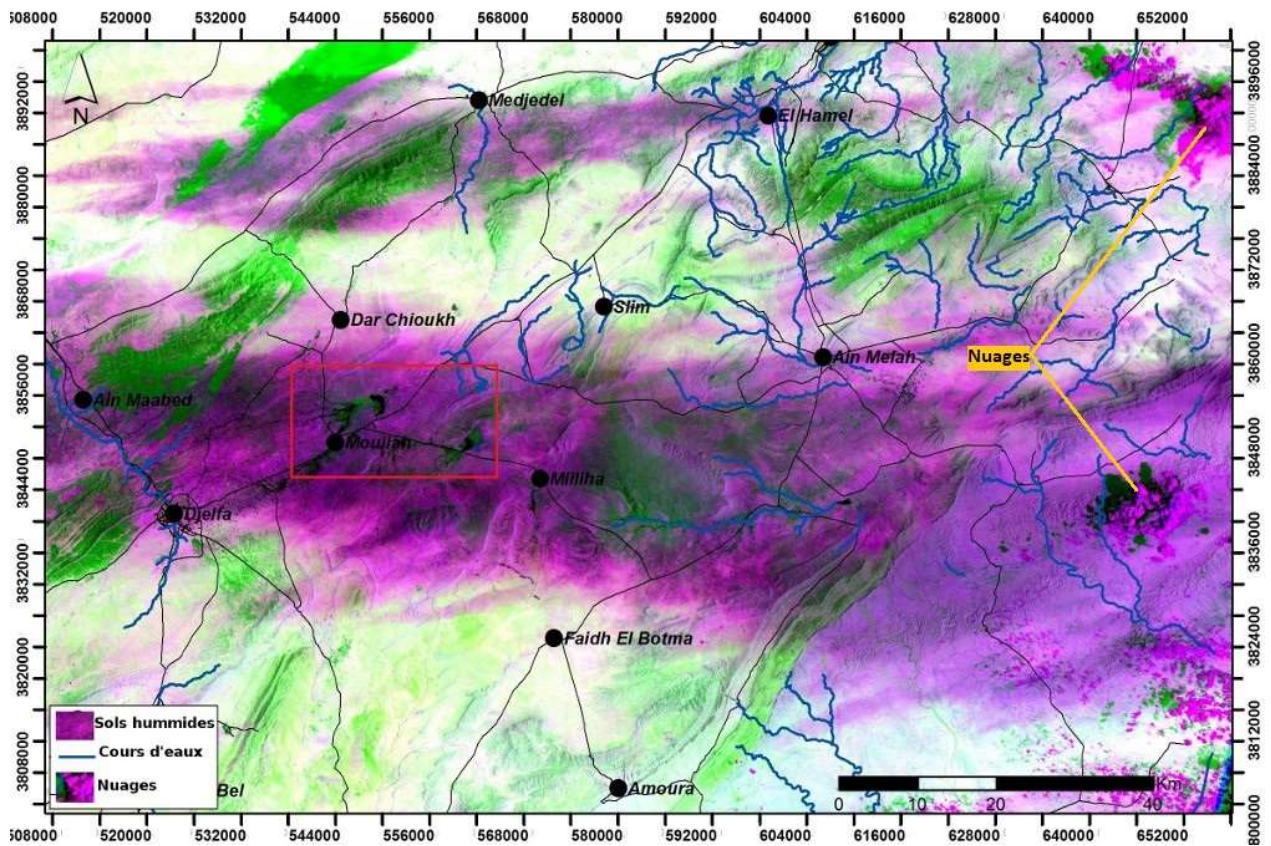


Figure 63 : Carte d'humidité du sol après le passage d'un orage à l'Est de Djelfa, composition colorée RGB 4-5-3 image satellitaire Landsat 7 ^{ETM+} prise le 17/07/2002 (sol humide en couleur mauve). Cette combinaison démontre les différences d'humidité du sol en fonction des capacités d'absorption de l'infrarouge par l'eau. Le rectangle rouge est la zone étudiée Figure 64

A une dizaine de kilomètres à l'est de la ville de Djelfa, les pluies tombent avec des quantités significatives, engendrant l'apparition de ravines et une accumulation d'eau sous forme de mares dans les Daias comme le montre la Figure 64.

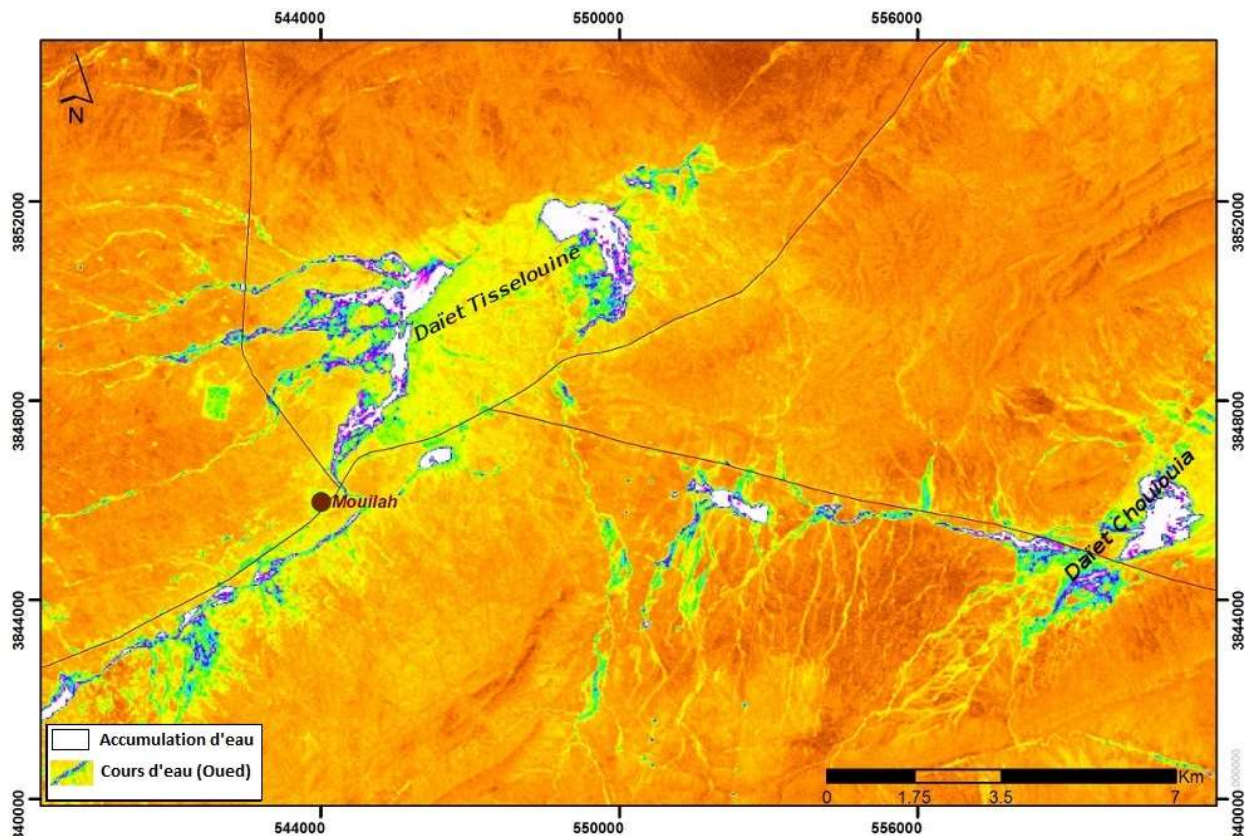


Figure 64 : Carte de début d'accumulation d'eau dans les daïas peu après le passage d'orage. Image Landsat 7 ^{ETM+} du 17/07/2002, traitée par l'indice d'humidité (formule dans l'annexe).

Pour avoir une idée de l'impact des pluies orageuses et de leur caractère préjudiciable, nous avons consigné sur les sept dernières années, les phénomènes climatiques marquants, évoqués par la presse. On constate que ces événements de crues ont engendré des dommages sur les habitations, sur les ouvrages, et ont causé des pertes de cheptel et des vies humaines. Le dernier en date, le 29 septembre 2017 à Moudjbara (25 km, au sud de Djelfa), a coûté la vie à une femme et ses deux enfants emportés par la crue d'un oued.

Ces dernières années, la recrudescence des précipitations orageuses suggère que la variabilité spatiale des précipitations devient de plus en plus marquée. Au niveau local, elle peut traduire aussi une modification d'apport pluviométrique de la saison sèche dans le volume global annuel. Ces éléments sont déterminants dans le choix des échelles de temporalité exposées ci-après afin de caractériser l'évolution du climat.

6.2. Variabilité temporelle des précipitations

L'étude de la variabilité temporelle des précipitations sera examinée non seulement sur une échelle annuelle, mais également sur des échelles plus fines, afin de capter les modifications d'apport pluviométrique des saisons les plus favorables à l'activité végétale et à l'agriculture. En effet, une description macroscopique des variations des précipitations ne permet pas de comprendre la sécheresse et ses multiples facettes. C'est pourquoi, nous avons opté pour des échelles de temporalité variées et fines qui s'emboîtent entre elles.

Des outils statistiques ont été utilisés pour caractériser et définir le degré d'appréciation des variations climatiques. La description de l'évolution des précipitations par des indicateurs va nous permettre plus loin de rechercher une relation de causalité entre elles et la dynamique d'ensablement.

6.2.1. Le choix des temporalités de SPI

Nous allons utiliser le SPI (Standardized Precipitation Index) pour la région de Djelfa afin de caractériser, quantifier et mesurer le déficit en précipitations sur une série de données climatiques représentant 40 années de 1975 à 2015. A la lumière des variables exposées ci-après, sur les facteurs climatiques déterminants à la fois la croissance végétale et la réponse hydrogéologique, nous proposerons une délimitation des pas de temporalité.

6.2.1.1. Les critères de temporalité

- Les pluies d'automne et d'hiver, arrivant durant la période où les températures décroissent, sont moins exposées à l'évaporation. Elles conservent leur capacité d'infiltration et elles constituent le stock d'eau estival pour les végétaux à longues racines. Pour l'agriculture, c'est à cette période d'octobre à décembre que les travaux de préparation du sol commencent en vue des semis pour la culture pluviale.
- Les pluies de printemps interviennent au moment clé du développement végétal. En effet, grâce à l'élévation de la température, l'exigence en humidité augmente. Ces pluies sont déterminantes pour l'agriculture.
- L'été, par ses fortes chaleurs, met la végétation en dormance estivale (Pouget, 1980). D'autres auteurs, comme (Grouzis *et al.*, 2014), constatent que le déficit en eau, à un moment où le besoin est faible ou quasi nul, n'a pas d'impact négatif. L'excès d'eau au moment de la dormance de la végétation serait même nuisible pour celle-ci.

- Les pluies d'été arrivent alors que les températures s'élèvent vers leur maximum. Elles subissent une forte évaporation, ce qui limite leur infiltration dans les couches superficielles du sol. Certains chercheurs, comme MESBAH (1991), avancent que plus de 90% de cette eau repart dans l'atmosphère par évaporation et que la transpiration par les végétaux est négligeable devant l'évaporation.
- Dans le milieu steppique, chaque pluie est bénéfique pour la végétation y compris durant la saison chaude. En effet, Pouget (1980) note que des espèces steppiques (*alfa et chamaephytes vivaces*) ont développé des systèmes de feuillage ou racinaires bien adaptés aux contraintes de la région. Il existe aussi des plantes herbacées à racines chevelues qui s'étalent près de la surface tirant profit de cette forme de précipitation. D'autres, ont un cycle végétatif réduit pour profiter des moindres pluies.

L'étude de la pluviométrie sous son seul aspect quantitatif annuel ne peut être le seul marqueur permettant de déceler une sécheresse quelles que soient les formes de celle-ci. Elle peut même biaiser et compromettre les résultats. Il est donc nécessaire de prendre en compte des temporalités plus fines qui permettent la prise en compte de l'hivernage et du cycle végétatif.

6.2.1.2. Les échelles de temporalité

Trois temporalités ont été fixées :

- SPI-12 : une période de 12 mois, allant de début septembre à fin août pour caractériser la sécheresse sur une année agricole.
- SPI-6 : une période de 6 mois, de début novembre jusqu'à fin avril où on observe les pluies utiles à la végétation. Cette échelle permet d'apprécier la variation saisonnière des précipitations entre les années bénéficiaires et déficitaires.
- SPI-4 mois : de janvier à avril, les pluies les plus utiles de cette période détermineront la qualité du printemps et le succès des récoltes. Ce pas de temporalité permet d'écarter l'influence des pluies de saison chaude et d'automne.

6.3. Analyse par temporalité

6.3.1. Indice SPI sur 12 mois : sécheresses annuelles

La dynamique de l'indicateur SPI-12 sur la série chronologique de Djelfa (Figure 65) illustre le caractère fortement aléatoire des pluies. En effet, on observe, une très forte variabilité pluviométrique interannuelle basée sur l'oscillation entre des années d'extrême humidité et des années d'extrême sécheresse. Les années les plus arrosées peuvent recevoir des quantités de précipitations avoisinant le triple des précipitations des années sèches ; ainsi le rapport de pluies entre l'année la plus humide 1992 avec 512 mm, et la plus sèche 1978 avec 184 mm est de 2,8 fois.

Cette fluctuation entre des années excédentaires et d'autres déficitaires se fait parfois d'une manière rapide et brutale sur une durée très courte. Entre 1976 et 1978, les pluies reculent de 443 à 184 mm. Le constat est le même entre 1992 et 1994 où les pluies baissent de plus de moitié, de 512 à 225 mm.

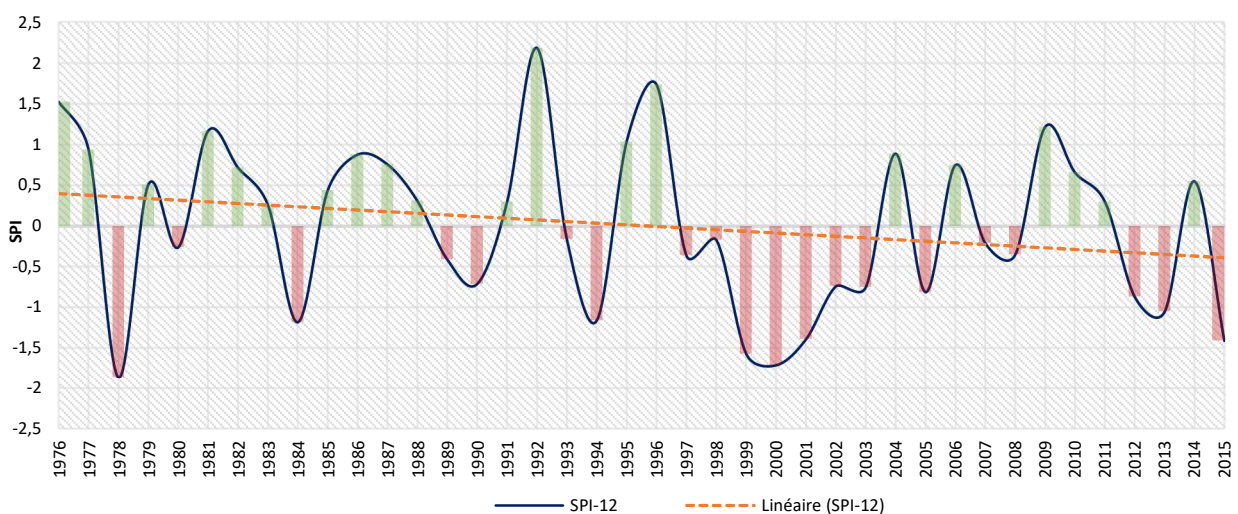


Figure 65 : Diagramme de séquence de SPI-12 Mois doublé par la courbe de tendance.
(Période 1975 – 2015 années agricoles, station de Djelfa)

Une simple observation de la distribution des valeurs de l'indicateur SPI-12 à Djelfa laisse entrevoir une évolution polyphasée des précipitations où l'année 96 – 97 représente la limite.

- De 1975-1996, nous observons 7 années négatives contre 14 positives, soit un rapport de deux où pour chaque année déficitaire correspondent deux années excédentaires.
- De 1997 à 2015, nous observons seulement 6 années positives contre 13 négatives, soit pour 5 années sèches correspondent 2 années humides. Le rapport « année négative/année positive » est inversé entre les deux phases, ce qui reflète une fréquence importante de sécheresse.

Le graphique (Figure 65) illustre également un autre effet marquant : la succession entre les années positives et négatives. Il existe une forme d'alternance entre les années sèches et humides, sauf sur deux périodes ; 1985-1988 considérée comme humide et 1998-2003 considérée comme sèche. Cette dernière séquence pluriannuelle constituée par la succession de 7 années négatives correspond à la période sèche la plus longue.

Sur cette série de 40 années, la courbe de tendance linéaire s'oriente de valeurs positives vers des valeurs négatives. Effectivement, elle passe de 0,5 à -0,5 ce qui caractérise un recul général des quantités des précipitations, et l'amorce d'une transition du climat vers des années de plus en plus déficitaires. En fonction du degré d'intensité de la sécheresse, les années ont été regroupées dans quatre classes (Tableau 10) :

- La forme la plus dominante de la sécheresse est de catégorie « légère sécheresse » avec 13 sur 21 cas de sécheresse recensés soit 62%. Le risque de rencontrer ce type de sécheresse est d'une fois tous les 3 ans.
- La sécheresse modérée est présente dans 5 cas sur l'ensemble des années négatives soit 24%. L'exposition de la région à ce type de sécheresse est d'une fois tous les 8 ans.
- Les années de catégorie « grande sécheresse » ne sont rencontrées que trois fois, observées en 1978, 2000 et 2002 avec une pluviométrie annuelle respective de 184, 152 et 214 mm. La région subit cette sévérité de sécheresse en moyenne une fois tous les 13 ans.

Tableau 10: Classement de la sévérité de la sécheresse des années en fonction de SPI-12.
(Période 1975 – 2015, station de Djelfa, données : ONM)

Indice SPI-12	Catégorie	Nombre de fois sur 40 ans	Fréquence
De 0 à -0.99	Légère sécheresse	13	1 fois tous les 3 ans
De -1 à -1.49	Sécheresse modérée	5	1 fois tous les 8 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	3	1 fois tous les 13 ans
< -2.0	Sécheresse extrême	0	

La période 1997-2003 est marquée par la persistance chronique des sécheresses, durée suffisamment longue pour que la sécheresse climatique évolue vers un déficit agricole, puis la dégradation de la couverture végétale avec un impact socio-environnemental négatif.

6.3.2. Indice SPI sur 6 mois : sécheresse agricole

Comme sur le SPI-12 mois, l'observation du diagramme d'évolution du graphique SPI-6 laisse entrevoir la même forme d'évolution (Figure 66). En effet, les précipitations évoluent en mode polyphasé. L'année 1996 marque le point de bascule ; elle symbolise la fin d'une période et le début d'une nouvelle phase.

- La première phase dure jusqu'en 1996 ; la fluctuation entre les années sèches et humides est à l'avantage de ces dernières. Les périodes positives qui traduisent des hausses de précipitations sont nombreuses. Les séquences présentent une morphologie (une assise) large, dont la durée moyenne est constituée d'une succession de 3 à 5 années positives, interrompues par des séquences sèches courtes et peu intenses.
- La deuxième phase de 1997 à 2015 débute par un affaissement continu des précipitations s'étalant sur 6 années. Les années positives sont rares et leur présence se fait sur des périodes courtes et peu intenses.

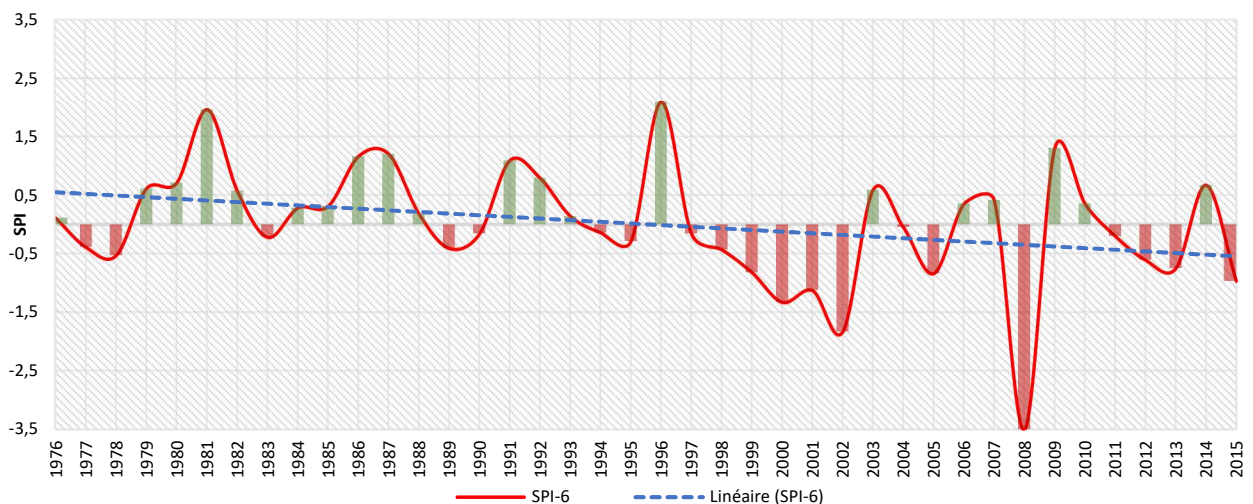


Figure 66 : Diagramme de séquence de SPI-6 Mois doublé par la courbe de tendance.
(Période 1975 – 2015, station de Djelfa)

Les éléments marquants de cette série ; le 1^{er} étant la série de 6 années négatives (97-2002), le second est le degré de sévérité et l'intensité de la sécheresse de l'année 2008. En effet, avec un SPI-6 autour de (- 3,5) c'est l'année la plus sèche des 40 années. Sur l'ensemble de la période, la courbe de tendance passe du positif au négatif ; elle indique ainsi une diminution des précipitations sur cette plage de temporalité.

Le classement des années en fonction de la sévérité des sécheresses du SPI-6 n'indique pas de transformation majeure à celle du SPI-12. L'aléa climatique est toujours présent. Tous les deux ans, la région se trouve impactée par une séquence de « légère sécheresse ». Le peu de précipitation saisonnière reçu en 2008 augmente le degré de sévérité, elle glisse désormais dans la catégorie « sécheresse extrême » (Tableau 11).

Tableau 11: Classement des années en fonction de la sévérité de la sécheresse de SPI-6.
(Période 1975–2015, station de Djelfa, données : ONM)

Indice SPI-6	Catégorie	Nombre de fois sur 40 ans	Fréquence
De 0 à -0.99	Légère sécheresse	15	1 fois tous les 2 ans
De -1 à -1.49	Sécheresse modérée	3	1 fois tous les 13 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	1	1 fois tous les 20 ans
< -2.0	Sécheresse extrême	1	1 fois tous les 40 ans

6.3.3. Indice SPI sur 4 mois : sécheresse printanière

La courbe d'évolution de SPI-4 (Figure 67) conserve l'aspect des deux courbes précédentes SPI-12 et SPI-6, mais elle nuance la différence constatée auparavant entre les deux phases. La courbe de tendance linéaire glisse depuis des valeurs positives vers le négatif, mais elle est moins marquée que celle du SPI-12 et SPI-6. Le graphe présente deux valeurs extrêmes, ce qui correspond aux deux années 2000 et de 2008.

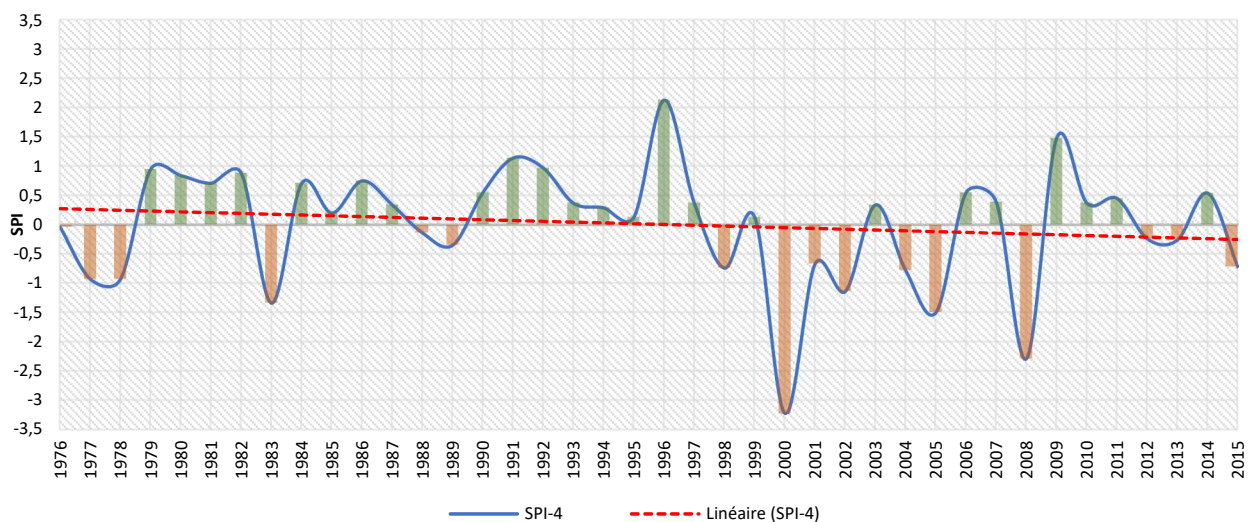


Figure 67 : Diagramme de séquence de SPI-4 Mois doublé par la courbe de tendance
(Période 1975 – 2015, station de Djelfa)

Sur cette gamme de temporalité, la fréquence de la classe « sécheresse légère » baisse à 11 évènements. La probabilité d'un taux de retour diminue pour s'installer à une année sur quatre. Le même constat de baisse est aussi observé sur la « sécheresse modérée » avec un taux de retour une fois tous les 20 ans (Tableau 12).

Tableau 12 : Classement des années en fonction de la sévérité de la sécheresse de SPI-4.
(Période 1975 – 2015, station de Djelfa, données : ONM)

Indice SPI-4	Catégorie	Nombre de fois sur 40 ans	Fréquence
De 0 à -0.99	Légère sécheresse	11	1 fois tous les 4 ans
De -1 à -1.49	Sécheresse modérée	2	1 fois tous les 20 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	1	1 fois tous les 40 ans
< -2.0	Sécheresse extrême	2	1 fois tous les 20 ans

L'indicateur SPI-4 accentue le degré de sévérité de l'année 2000 à un niveau extrême. Le risque d'exposition à cette sévérité de sécheresse augmente pour passer à une fois tous les 20 ans. Aussi, nous pouvons constater que les deux cas de sécheresses extrêmes ont frappé durant la même décennie, formant une très grande sécheresse (1998 et 2008). Par conséquent, le SPI-4 renforce la mise en évidence du caractère extrême du climat.

6.4. Analyse par croisement des temporalités

À la suite des résultats précédents portant sur l'analyse par SPI, il devient clair qu'il n'existe pas une seule forme de sécheresse mais plusieurs. L'année peut être perçue comme étant humide sur le plan annuel (SPI-12 positif) mais sèche sur une période plus courte, notamment les périodes les plus favorables à la végétation (SPI-6, SPI-4 négatif). Ce sont les raisons pour lesquelles, nous avons introduit cette nouvelle analyse comparée. Elle consiste à superposer les échelles de temporalité dans le but d'exposer les éléments suivants :

- Décrypter le degré d'homogénéité de la sécheresse évaluée par les trois indicateurs de sécheresse (SPI-12, SPI-6, SPI-4). L'évaluation (l'appréciation) de la sévérité est-elle identique ?
- Déceler la « morphologie » intra-annuelle de la sécheresse, revient à calculer l'écart entre indices de temporalité différente.

Pour faciliter cette analyse par rapprochement, nous nous sommes intéressés à l'évolution du couple de temporalités (SPI-12, SPI-6) et (SPI-12, SPI-4), puis nous avons mesuré leurs divergences quand elles se manifestaient.

Pour chaque comparaison, nous avons restitué sur le même diagramme les deux courbes SPI concernées. Le nouvel indicateur introduit représente la divergence calculée par l'écart

entre le SPI cible et le SPI de référence. Il se trouve représenté par des barres dans les diagrammes (Figure 68, Figure 69). Les barres vertes de valeurs positives reflètent le renforcement du régime pluviométrique hivernal, et les barres rouges de valeurs négatives traduisent la tendance d'inversion du régime de précipitation. L'évaluation de la divergence par le calcul de l'écart « SPI-6 – SPI-12 » permet de déceler la part des précipitations inutiles qui tombent durant la période la plus sèche de Mai à Août.

6.4.1. Comparaison entre SPI-6 et SPI-12 mois

Globalement, les deux courbes ont le même tracé avec parfois localement des décalages. La courbe du SPI-6 suit la tendance du SPI-12. Les courbes tendent vers les mêmes formes d'évolution de la sévérité de sécheresse (Figure 68). Toutefois il apparait une divergence sur l'année 2008.

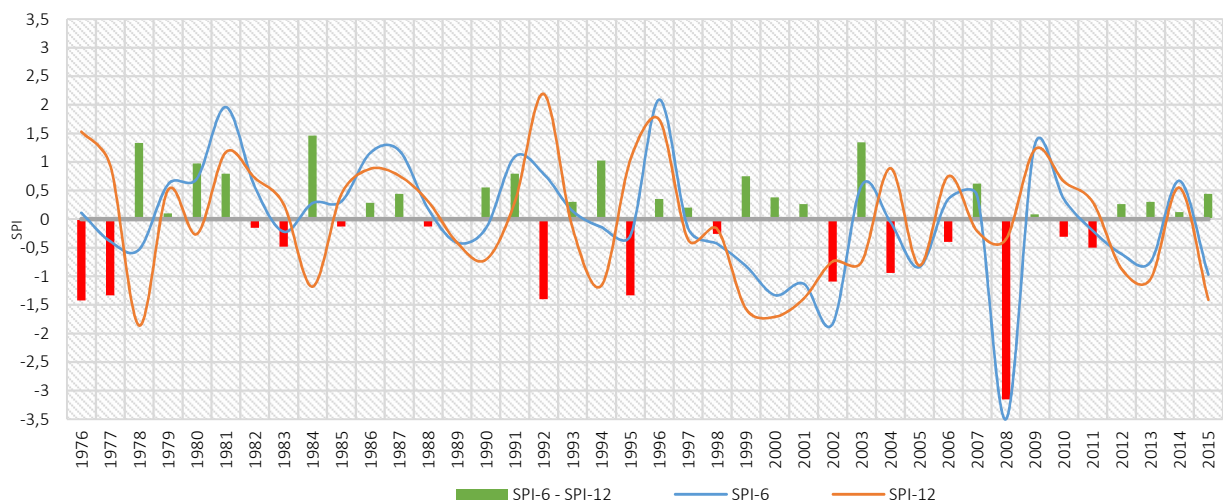


Figure 68 : Courbes des SPI-12 et SPI-6 mois et histogramme des différences entre SPI-6 – SPI-12. (Station de Djelfa, SPI-12 : année agricole)

Hormis l'artefact de l'année 2008, on peut observer 5 évènements qui présentent un écart supérieur à 1 : 1976, 1978, 1984, 1992 et 2008.

- Année 1976, avec un SPI-12 à 1,53 ; cette année est classée dans la catégorie « Extrême humide ». Cependant, elle est considérée comme année normale par le SPI-6. De fortes précipitations sont tombées pendant la saison sèche.
- Année 1978, considérée par le SPI-12 comme la plus grave en termes de sévérité de sécheresse. Avec une valeur d'indice de -1,86, cette année est classée dans la catégorie « grande sécheresse ». A l'inverse, le SPI-6 l'évalue en simple sécheresse. Au cours de cette année, le déficit de précipitations se concentre dans la période estivale sèche non utile. D'ailleurs, selon les statistiques de FAOSTAT (2015), la production agricole des

céréales augmente légèrement cette année-là et l'année agricole était considérée comme bonne.

- Année 1984, classée dans la catégorie « sécheresse modérée » par le calcul du SPI-12 alors qu'elle est jugée normale par le SPI-6. Les précipitations s'accroissent entre novembre et avril.
- Année 1992, considérée positive par les deux SPI avec respectivement 0,69 pour le SPI-6 et 2,19 pour le SPI-12. Mais des pluies estivales importantes nuancent la qualité de cette année.
- Année 2003, classée négative avec une valeur SPI de -0,75 et positive pour le SPI-6 avec une valeur de 0,7. Cela s'explique par un recul des précipitations non utiles et le renforcement de pluviosité hivernale ce qui a conduit à la réussite de cette année agricole selon les statistiques de FAOSTAT (2015).
- Année 2008 le SPI-12 n'enregistre pas d'anomalie particulière de sécheresse, tandis que le SPI-6 indique une sécheresse dans la catégorie de sévérité la plus extrême. Ce considérable écart de -3,15 s'explique par des pluies abondantes pendant l'été qui ont donné des précipitations correctes au cours de cette année, alors que l'hiver n'a reçu que de faibles quantités. L'année 2008 reflète une inversion totale du régime pluviométrique.

6.4.2. Comparaison du SPI-4 mois sur le SPI-12 mois

Sur le diagramme suivant, la divergence du couple SPI-12 et SPI-4 s'accroît par rapport au couple précédent. En effet, l'écart du ressenti de la sécheresse augmente. Les années 76, 77, 83, 2000 et 2004 présentent un écart ($\text{SPI-4} - \text{SPI-12}$) négatif symbolisant un déficit en précipitation beaucoup plus concentré sur la période janvier à avril (Figure 69).

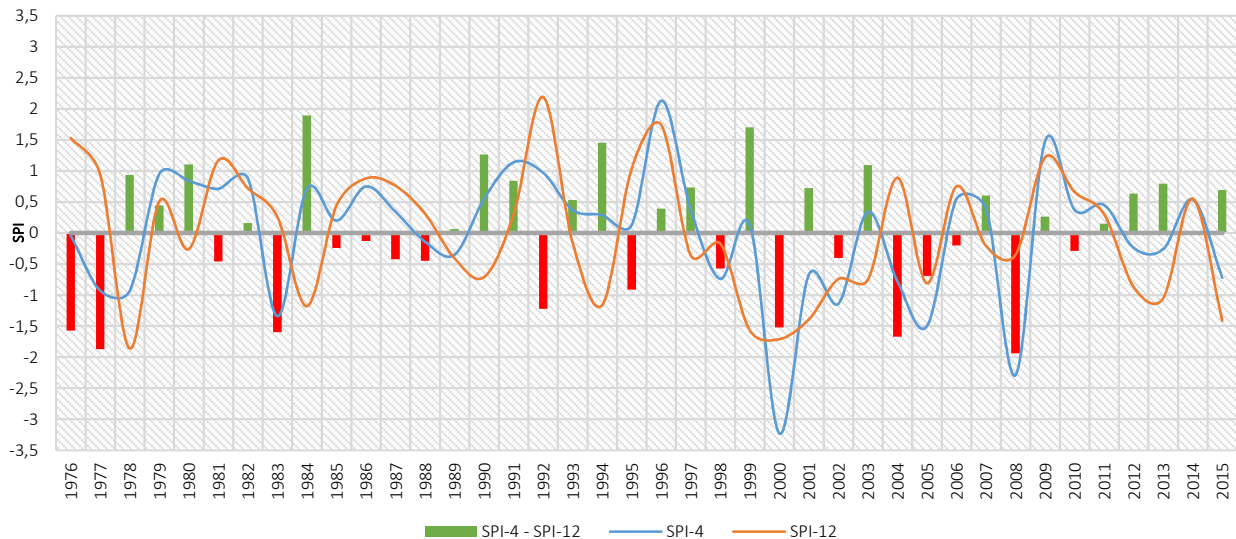


Figure 69 : Courbes des SPI-12 et SPI-4 mois et histogramme des différences entre (SPI-4 – SPI-12).
(Station de Djelfa, SPI-12 : année agricole)

- Année 2000, année négative pour le SPI-12 et le SPI-4 avec une forte valeur de ce dernier à -3,23, le classant dans la catégorie « sécheresse extrême ». Ceci s’explique par des précipitations automnales jugées correctes. En revanche, celles-ci ont été rares sur la période suivante, de janvier à avril, pour réapparaître tardivement vers le mois de mai (Figure 70).
- Année 2008, les valeurs d’écart des couples SPI-4 – SPI-12 et SPI-6 – SPI-12 sont conformes. Cela corrobore le phénomène observé d’inversion du régime des précipitations. L’hiver et le printemps ont été particulièrement secs. Le retour des pluies a été observé au mois de mai, l’abondance et le maximum ont été enregistrés au mois d’août avec 78 mm. Le déficit pluviométrique s’est concentré sur la période novembre 2007 à avril 2008.

La Figure 70 compare les précipitations mensuelles moyennes (période 1975 à 2015), aux trois années 2000, 2002 et 2008. Elle montre la variabilité des sécheresses. La baisse des précipitations devient visible, elle descend au-delà de la moyenne pendant la saison hivernale. Il en résulte deux remarques : la faiblesse des précipitations des années 2000 et 2002 accentue la sécheresse sans toucher à la structure du régime pluviométrique. Par contre, l’année agricole 2008 représente la seule année à « régime inversé » : Les précipitations de septembre et octobre 2007 sont plutôt favorables, suivies de 6 mois particulièrement secs (jusqu’au mois de mai). Puis des pluies abondantes ont été enregistrées pendant la saison estivale et faibles durant la saison hivernale.

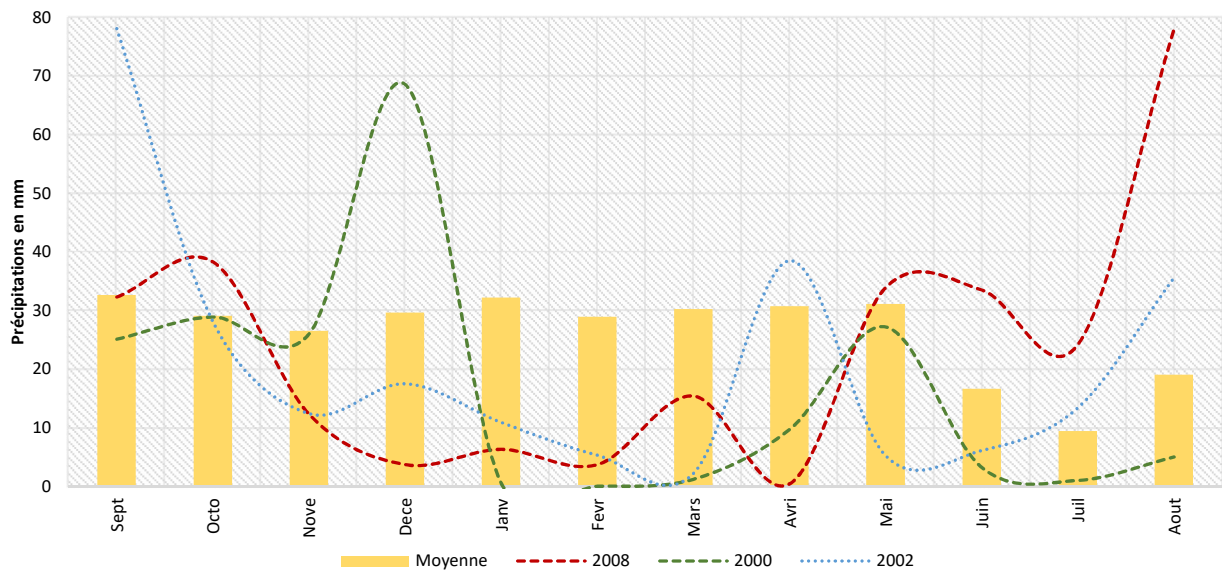


Figure 70 : Diagramme des précipitations mensuelles moyennes période 1975 - 2015, et courbes des précipitations des années agricoles : 2000, 2002 et 2008, les deux premières années accentuent la sécheresse, l'année 2008 marque l'inversion du régime pluviométrique (Station de Djelfa)

6.5. Détection des ruptures climatiques

Cette partie a pour but d'identifier les changements majeurs potentiels dans le régime de précipitations. Pour cela, nous emploierons des outils statistiques de détection des ruptures (voir le point 3.2.4. Recherche des ruptures climatiques) dans les séries chronologiques à partir des trois indicateurs SPI.

Un des résultats les plus importants du test proposé est de répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il une rupture significative dans les séries traduisant un changement de régime de précipitations ?
- Si la rupture existe, sur quelle série de temporalités s'exprime-t-elle au mieux ? Est-elle annuelle ou localisée uniquement sur les SPI-6, SPI-4 ?
- Si la non-stationnarité est constatée, le point de rupture se trouve-t-il au même endroit sur l'ensemble des temporalités ?

Les résultats de ces tests de normalités indiquent que l'hypothèse de normalité est respectée par les deux séries SPI-12 et SPI-6 (Les résultats de ces tests sont restitués dans l'annexe). Nous pouvons donc procéder à la recherche des ruptures. Avec un niveau de signification fixé à 5%, le test de détection des ruptures appliqué aux deux séries indique. Le SPI-12 ne révèle pas la présence d'une rupture, en revanche, le SPI-6 met en évidence l'existence d'une rupture de stationnarité pluviométrique. Sur l'ensemble des tests la valeur de « p-value » a été calculée par la simulation Monte Carlo.

6.5.1. Rupture sur des séries pluviométriques annuelles

La recherche des ruptures dans les séries chronologiques SPI-12 est effectuée dans un premier test avec un niveau de significativité de 5%. Le récapitulatif du traitement statistique est exprimé dans les deux tableaux qui suivent (Tableau 13 et Tableau 14) ; de même le graphique schématise la présence ou non de la rupture.

Tableau 13 : descriptif statistique SPI-12 Mois

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
SPI 12	40	0	40	-1,860	2,190	0,001	1,012

L'interprétation du test suppose deux hypothèses contradictoires, l'une négative H_0 avec des données considérées homogènes et l'autre positive H_a qui valide l'hypothèse de la rupture.

Si la rupture est avérée, elle indique la date à partir de laquelle il y a un changement dans les données.

Tableau 14: Résultats statistiques du test de Pettitt SPI-12 Mois

Test de Pettitt (SPI-12)	
K	160.000
T	1996
p-value (bilatérale)	0,122
alpha	0.05

Alors que la p-value calculée est supérieure au niveau de significativité défini à un seuil $\alpha=0,05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Comme indiqué dans le Tableau 14, le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 (alors qu'elle est vraie) est égal à 12,24%. Donc, nous pouvons conclure qu'il n'existe pas de point de non-stationnarité.

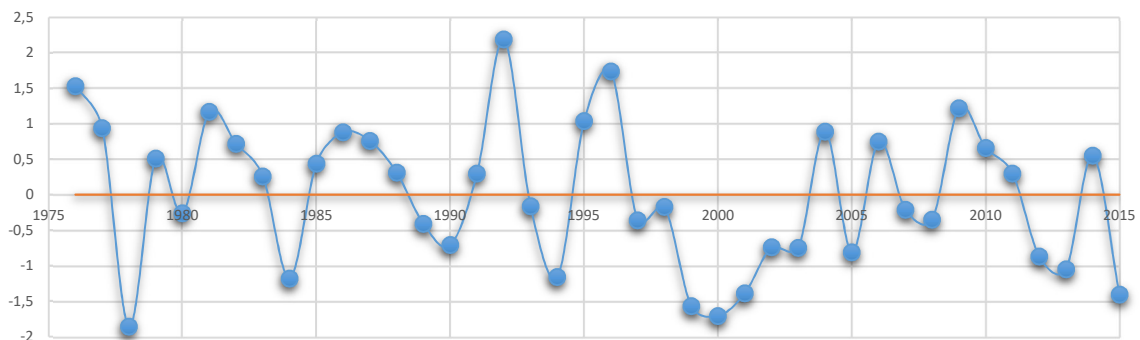


Figure 71 : Diagramme de rupture sur les séries SPI-12 Mois et test de significativité à 5% (Période 1975-2015, station de Djelfa)

Au vu de l'absence de détection de rupture avec ce seuil, nous avons dans un second test refait le traitement avec un niveau de significativité supérieur fixé à 13%. Cette fois-ci, le test retient l'hypothèse H_a de la présence d'une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données. Il traduit une rupture de stationnarité des précipitations annuelles. Elle est localisée à la fin de l'année 1996 et au début de 1997 comme l'illustre le diagramme suivant (Figure 72).

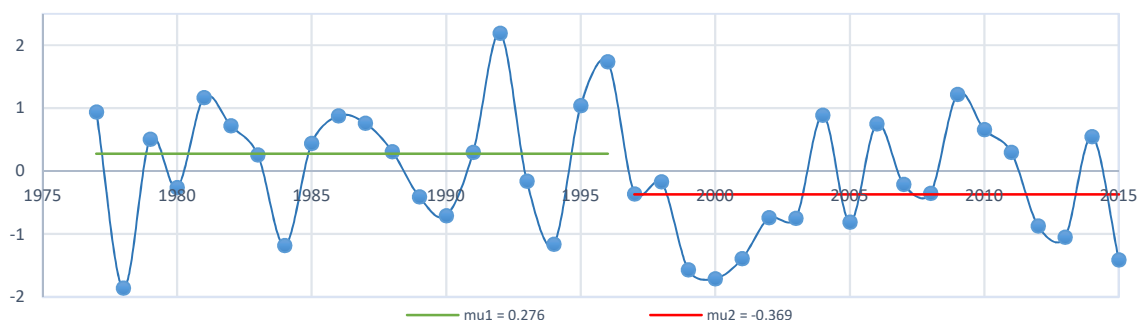


Figure 72 : Diagramme de rupture sur les séries SPI-12 Mois et test de significativité à 13% (Période 1975-2015, station de Djelfa)

L'écart entre les deux moyennes SPI avant et après est égal à 0,645. En effet, la moyenne de précipitations recule de 336 mm à 289 mm entre les deux phases, soit un déficit de précipitations de 14% ce qui équivaut à 47 mm par année.

6.5.2. Ruptures sur des séries pluviométriques semestrielles

Les résultats des traitements sur des séries SPI-6 mois sont exposés dans les tableaux et le diagramme qui suivent.

Tableau 15: descriptif statistique SPI-6 Mois

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
SPI06	40	0	40	-3,500	2,090	0,003	1,014

Alors que la p-value calculée est inférieure au niveau de significativité alpha définie à 0,05, l'hypothèse nulle H_0 est rejetée, ce qui suppose que les données sont homogènes. On retient donc l'hypothèse alternative H_a , qui suggère la présence d'une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 3,01%.

Tableau 16: Résultats statistiques du test de Pettitt sur les séries SPI-6 Mois

Test de Pettitt (SPI-6)	
K	198.000
T	1996
p-value (bilatérale)	0.030
Alpha	0.05

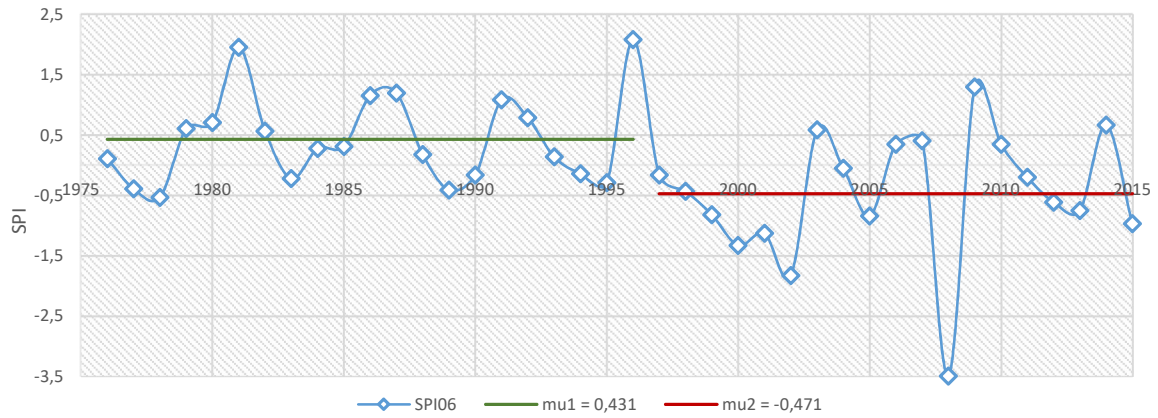


Figure 73 : Diagramme de rupture climatique sur les séries SPI-6 Mois.
(Période 1975-2015, station de Djelfa)

Le test de Pettitt admet une rupture localisée en 1996 avec un seuil de confiance de 99 %. La moyenne des précipitations pour la période novembre – avril chute de 23%. En effet, sur la première phase jusqu'en 1996, la moyenne était de 195 (mm), puis elle recule de 45 mm pour se positionner à 150 mm sur la période suivante.

6.6. Le constat de la sécheresse

Il serait simpliste d'expliquer le déclin constaté des précipitations matérialisées par la rupture de 1996 en lien avec les changements climatiques. En effet, l'incertitude inhérente aux méthodes utilisées, l'échelle du temps des séries et l'échelle géographique utilisée, suscitent un doute sur la capacité de la station de Djelfa d'être représentative du climat régional. D'autant plus dans un environnement où les précipitations, comme nous l'avons vu précédemment, sont marquées par une grande variabilité à la fois dans l'espace et dans le temps.

Par ailleurs, l'objectif est d'analyser la dynamique d'environnement, notamment l'ensablement et ses liens causals possibles avec le climat, plus particulièrement avec la sécheresse. Sachant que l'ensablement est un phénomène régional qui s'étale sur des étendues bien au-delà de la région de Djelfa. Donc, il faut faire correspondre les échelles des deux thématiques (ensablement-climat), ou du moins s'assurer de l'articulation du climat constaté au niveau local avec le niveau régional, voire national. Ce changement d'ordre de grandeur permet ainsi d'affiner le niveau d'analyse en évaluant la manière dont le climat de la région de Djelfa, par sa station, s'intègre dans un espace plus vaste : celui des régions steppiques. Il est question également de déceler les facteurs d'exception ou d'inversion du ressenti de la sécheresse.

Additionner ces éléments, nous amène encore à nous interroger sur nos hypothèses, tant sur le plan temporel lié à la longue durée, que sur le plan spatial en lien avec la généralisation des résultats :

- Avec des séries climatiques plus longues, la rupture climatique constatée resterait-elle identique, changerait-elle de position ou s'effacerait-elle ?
- Si les résultats indiquent localement des séquences humides et des séquences sèches, peuvent-ils être généralisés à une échelle régionale ?
- Est-il raisonnable d'admettre régionalement la rupture climatique constatée pour la station de Djelfa en 1996 ?

Afin d'éviter les pièges de la généralisation des résultats et tenter de répondre à ces questions, une procédure de validation est appliquée. Pour cela, quatre dimensions ont été introduites, réparties sur deux axes d'analyse : le spatial et le temporel. Dans la figure suivante (Figure 74), nous avons synthétisé et détaillé les dimensions qui seront utilisées dans l'étape suivante de validation.

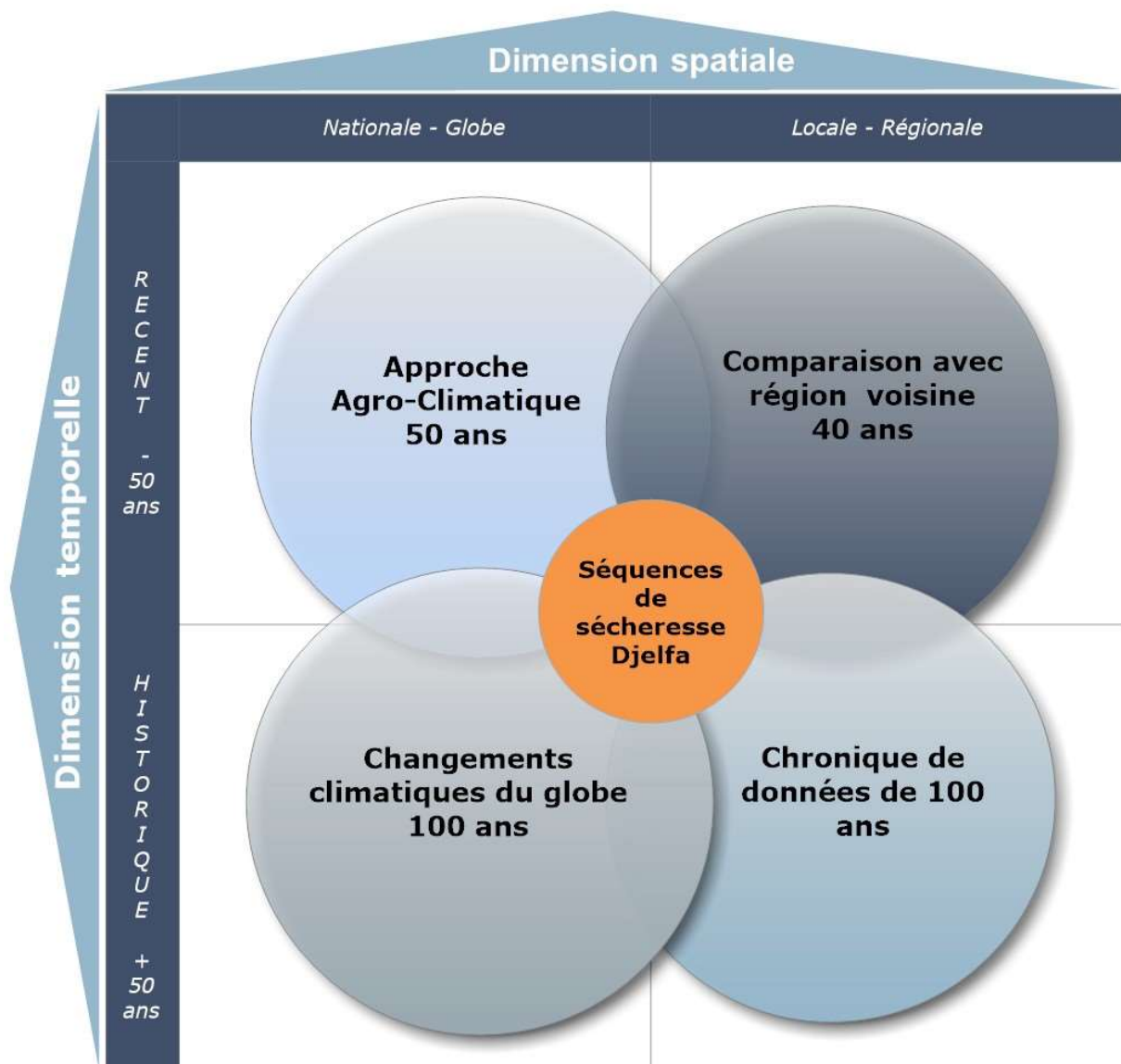


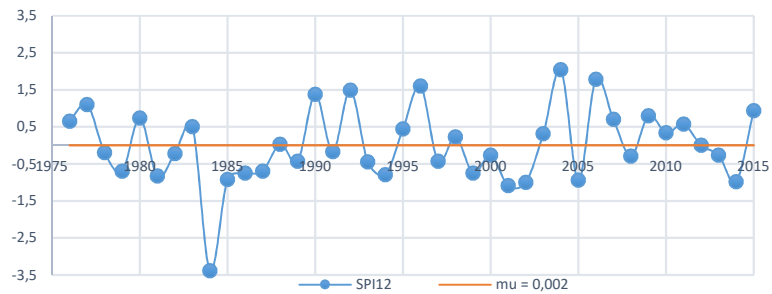
Figure 74 : Schéma de validation par des dimensions spatio-temporelles

6.6.1. Validation par comparaison avec une région voisine

Nous avons comparé la manifestation de la sécheresse ou l'abondance des précipitations entre les deux stations voisines de Djelfa et de Boussaâda, cette dernière est située à 100 km au nord-est de Djelfa (Figure 34). À cet effet, le SPI de Boussaâda est calculé sur la même période de 40 années allant de 1975 à 2015 (Figure 75).

Figure 75 : Tableau et diagramme du test de Pettitt sur SPI-12 Mois.
(Période 1975-2015, station de Boussaâda)

Test de Pettitt (SPI-12)	
K	110.000
T	2002
p-value (bilatérale)	0.507
Alpha	0.05



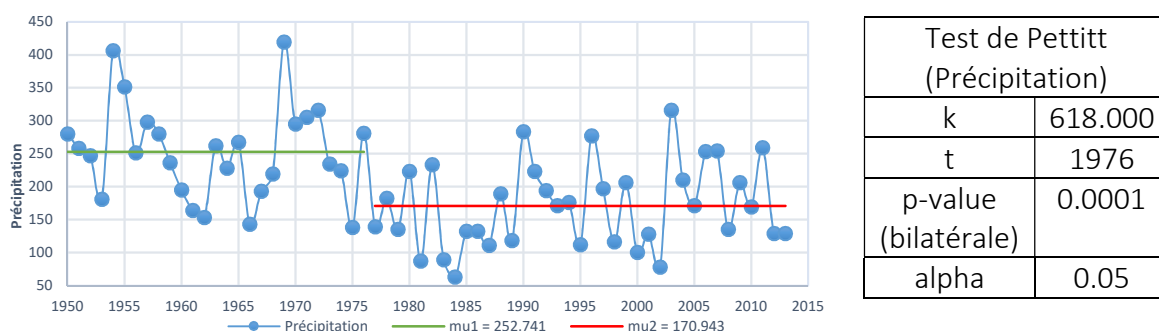
Visiblement, la courbe du SPI ne présente pas une forme d'évolution multi-phases. Le test de Pettitt de recherche de rupture le confirme (Figure 75). En effet, la p-value calculée est supérieure au niveau de signification du seuil alpha. Donc le postulat de départ qui suppose des données homogènes, est retenu. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 50,70%.

La comparaison entre les résultats obtenus par ce traitement avec les résultats obtenus auparavant sur la station de Djelfa, incite à considérer les éléments suivants :

- Une séquence de sécheresse qui débute en 1984 pour se terminer en 1987. Avec une forte valeur négative du SPI : -3,39, la sécheresse qui sévit en 1984 est considérée comme la plus grave sur toute la série des enregistrements de la station de Boussaâda. Elle est classée dans la catégorie « sécheresse extrême ». Sur cette séquence, seule l'année 1984 enregistre des résultats similaires aux deux stations. Mais ces résultats engendrent un classement des SPI différents (Djelfa est identifiée dans la catégorie « sécheresse modérée »). Les autres années de 1985 à 1987 constituant cette séquence, n'ont pas été identifiées comme étant déficitaires à Djelfa.
- Une autre séquence de sécheresse est repérée sur la période de 1997-2003. Illustrée par l'affaissement de la courbe SPI, cette séquence est également identifiée sur la station de Djelfa.

Sur la base d'une échelle de temps plus longue allant de 1950 à 2015, le test de Pettitt détecte la présence d'une rupture de stationnarité localisée en 1976 (Figure 76). L'écart de la moyenne des précipitations annuelles confirme ce résultat. Effectivement, la moyenne de deux phases décline de 252 mm à 170mm, soit un recul de 33%. Cette échelle de temps plus longue, révèle aussi la présence de deux autres précédentes séquences de sécheresses de 60-63 et de 66-68. Pas loin, la station de Djelfa ne détecte pas la présence de ces deux séquences sèches. Seule l'année 66 est identifiée sèche avec un SPI à -0,9.

Figure 76 : Tableau et diagramme du test de Pettitt sur les précipitations.
(Période 1950-2015, station de Boussaâda)



6.6.2. Validation par l'approche agro-climatique

De nombreux travaux ont étudié la sécheresse exprimée et mesurée par rapport à ses effets. Barakat & Handoufe (1998) se sont basés sur les données de la production agricole pour identifier, caractériser les années humides et les années sèches au Maroc. D'autres comme Yacoubi *et al.* (1999), sur la base de la typologie de la sécheresse agricole céréalière ont élaboré une méthode d'alerte précoce de la sécheresse.

En Algérie, les terres emblavées se localisent dans des zones pluviales. La production agricole algérienne est dominée par les grandes cultures, en particulier les céréales (AQUASTAT, 2015). Cette production est très variable du fait de l'irrégularité des précipitations. Elle est donc fortement exposée aux aléas de la sécheresse. Il se trouve que les quantités de céréales produites résultent de la qualité et des quantités de précipitations reçues. Ce contexte climatique étant similaire à notre site d'étude, nous pouvons en déduire que la région se prête au jeu de la comparaison en mobilisant l'approche qui suit.

Les régions steppiques, dont Djelfa, ne sont pas spécialisées dans la production des céréales. Mais l'objectif ici, est de positionner les séquences de sécheresse locale de Djelfa dans un contexte de sécheresse nationale. En effet, la variabilité de la production des céréales au niveau national exprime et reflète la variabilité du climat qui règne sur le nord de l'Algérie. Cette analyse compare l'échelle locale à l'échelle nationale.

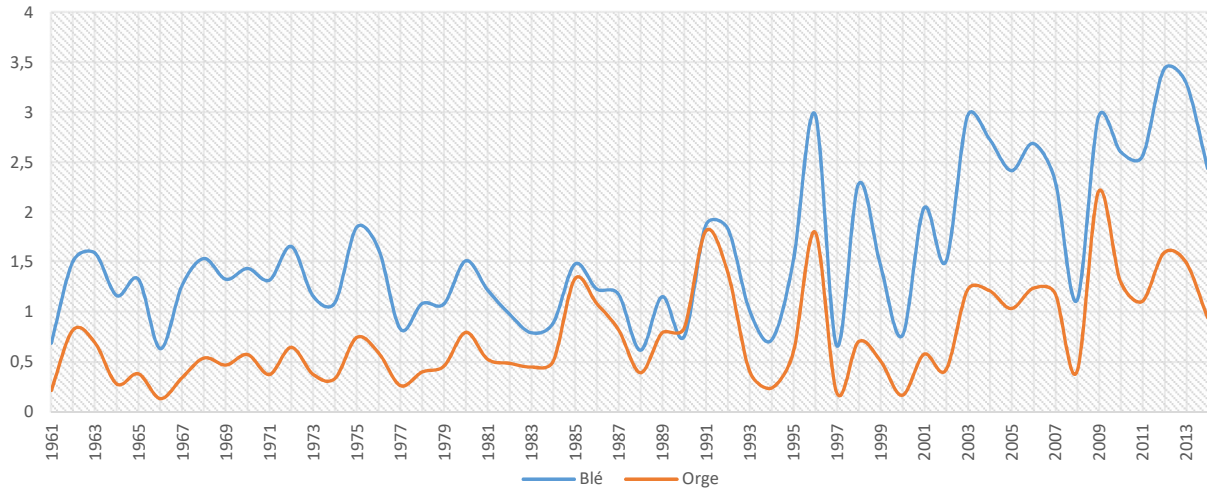


Figure 77 : Production d'orge et de blé en Algérie, exprimée en millions de tonnes.
Données : FAOSTAT (2015)

Une forte relation entre les productions de blé et d'orge est visible sur la Figure 77. Ces oscillations de production sont corrélées avec les variations des précipitations : les périodes de forte production correspondent aux années humides, celles de faible production reflètent des années déficitaires en pluviométrie. Depuis 1997, la courbe du blé s'écarte progressivement de la courbe de l'orge. Cela est dû à l'augmentation de la surface cultivée et à l'amélioration du rendement. Mais la réponse aux précipitations reste proportionnellement identique.

Avant de procéder à la comparaison du ressenti de la sécheresse entre les deux échelles géographiques, nous avons évalué l'intensité de la relation entre le couple SPI- Production selon les critères suivants :

- Temporalité : les trois niveaux d'emboîtement SPI sont examinés (SPI-4, SPI-6, SPI-12).
- Échelle géographique : nous avons choisi les deux stations voisines Djelfa et Boussaâda.
- Production : l'orge moins exposé aux variations d'intensification, qui sont concentrées visiblement sur le blé depuis 1997. C'est la raison pour laquelle nous l'avons choisi.

L'intensité de cette relation est évaluée par le calcul du coefficient de corrélation entre chaque série de SPI des deux stations et la production. Les résultats de ce traitement sont affichés dans le diagramme suivant.

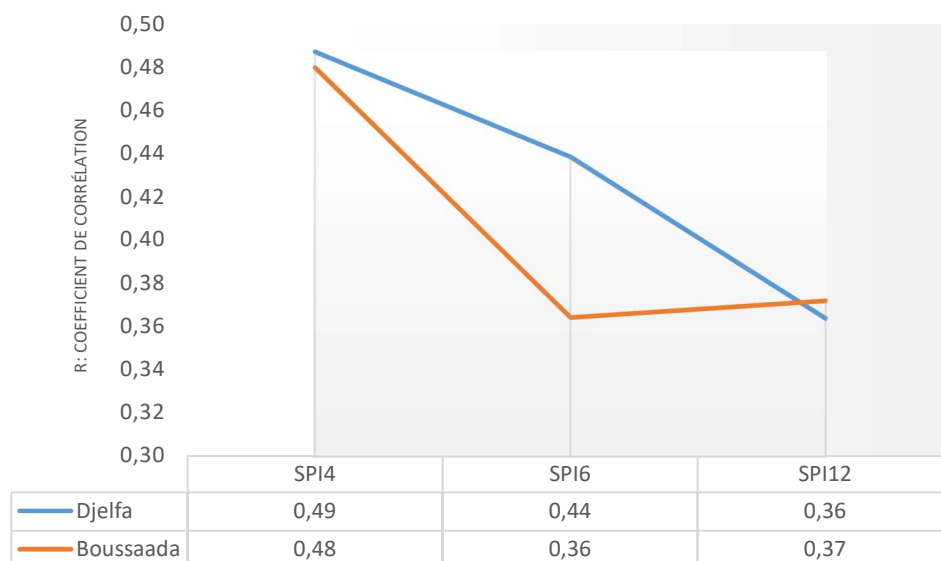


Figure 78 : Coefficient de corrélation (R) entre SPI et la production d'orge sur la série (1975 – 2014)

L'indice SPI qui répond au mieux à la production nationale d'orge est le SPI-4. Pour le SPI-6, les valeurs des deux stations diminuent, Djelfa glisse autour de 0,44, et Boussaâda chute pour atteindre la valeur de 0,36). Pour le SPI-12, de nouveau, on retrouve une corrélation commune entre les 2 stations avec une intensité faible à 0,37.

Afin de comparer la détection et le ressenti de la sécheresse entre les deux échelles, nationale et locale, il est utile de décomposer la série par un morcellement des séquences sèches qui sont reconnues au niveau national et de vérifier le ressenti au niveau local à Djelfa.

- La période de sécheresse 1977-1978 est détectée à deux niveaux d'échelles : régionale et nationale.
- La seconde période de sécheresse, qui a sévi en Algérie entre 1980 à 1984, s'est manifestée de façon différente entre l'échelle locale et l'échelle nationale. Le détachement de la station de la région de Djelfa est marqué par la détection d'une seule année sèche en 1984. Alors qu'à l'échelle des Hautes-Plaines et l'Atlas Saharien, d'autres travaux réalisés sur la région d'El Abiodh signalent une immense sécheresse ressentie dans les années 80 (Bisson & Callot, 1986), cette sécheresse n'est pas vraiment perceptible par la station de Djelfa.
- La période de 1988 -1989 est reconnue comme négative sur les deux échelles.
- La séquence suivante de sécheresse est composée des trois années 1993 – 1995 : Djelfa, s'écarte une autre fois du ressenti de sécheresse perceptible sur l'ensemble du territoire. Cette période n'est pas considérée sèche à Djelfa.

- L'année 1997 est la plus grave en termes de production, ce qui a amené la FAO, dans le programme de Veille Mondiale, à émettre une alerte spéciale sur l'Algérie : « les mauvaises conditions météorologiques enregistrées pendant la période de végétation ont affecté les récoltes de céréales. La production céréalière totale de 1997 devrait tomber au niveau le plus bas atteint depuis 20 ans » (FAO/SMIAR, 1997). Cependant cette ampleur n'est pas constatée à Djelfa, l'année est considérée normale par les trois indicateurs SPI.

- Le 05 Avril 2000, le FAO a lancé une alerte spéciale N°304. Comme le confirme le diagramme qui suit (Figure 79), l'alerte prévoit une autre année de récoltes médiocres et des perspectives d'agriculture très défavorables à cause de la sécheresse dans les pays d'Afrique du Nord (FAO/SMIAR, 2000). Effectivement, dans la région de Djelfa cette séquence de sécheresse est ressentie. Tous les indicateurs SPI la détectent, d'ailleurs elle est classée comme étant la plus intense de la série par SPI-4 dans la catégorie « sécheresse extrême ».

- Les séquences suivantes de sécheresse de 2002, 2008 ont été bien ressenties dans la région de Djelfa, en conformité avec l'échelle nationale.

- En revanche, l'année 2014 est classée comme normale dans cette région alors qu'elle est déficitaire au niveau national.

A l'opposé des périodes sèches, pendant les années humides, la région de Djelfa adopte la même tendance que l'échelle nationale. En effet, elle affiche une cohérence et concordance d'appréciation sur l'ensemble des années humides : 1980, 1985, 1991, 1992, 1996, 2003, 2007, 2009. La sensibilité de cette station à identifier toutes les années humides mais seulement une partie des séquences sèches, révèle des incertitudes et des réserves quant à sa capacité d'exposer et d'exprimer toute la rudesse du climat liée au manque de précipitations. Désormais, il devient clair, qu'une station perchée à 1144 mètres d'altitude, exposée directement au vent du nord porteur de pluies, peut constituer un îlot d'exception pendant les périodes sèches.

6.6.3. Validation sur une échelle historique longue

Nous avons reproduit les données annuelles de précipitations sur une échelle temporelle de 100 années civiles en se basant sur les travaux publiés par Hirche *et al.* (2007). Les données produites¹⁴ sont passées par un processus de qualification par rapprochement et de mise en correspondance sur la série la plus récente des données de l'ONM (1975-2015).

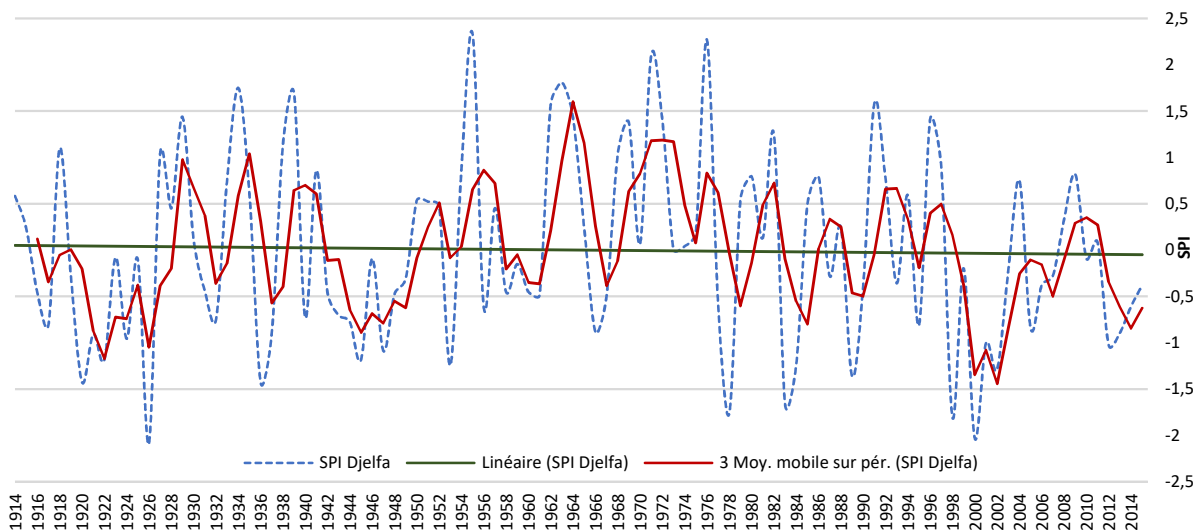


Figure 79 : Evolution du SPI annuel et courbe des moyennes mobiles sur une période d'un siècle 1914 – 2015 (Station de Djelfa, source de données : Hirche et al. (2007))

Sur cette série d'un siècle, le test de Pettitt n'indique pas la présence d'un point de rupture de stationnarité avec le niveau de signification fixé à 5%. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 40,72%. On constate aussi que la droite se réajuste pour s'approcher de zéro, elle se positionne désormais sur une pente de -0,001. Ces deux éléments indiquent la présence par le passé (avant 1975) d'autres événements de sévères sécheresses, ce qui vient contrebalancer et équilibrer ceux constatés dans notre première série, après la période de 1975.

Interroger la mémoire longue des séries chronologiques révèle par le biais de la courbe de moyenne mobile, la présence de trois grandes séquences de sécheresse. La dernière, la plus récente, se localise entre 1997-2003, période déjà identifiée auparavant. Mais l'élément nouveau, est la présence de deux autres séquences de sécheresse. La première se localise entre 1919 – 1926 et la deuxième débute en 1942 et se termine en 1949 (Figure 79). MEDEJERAB & HENIA, (2013) dans leur étude sur la migration de la courbe isohyète de 400 mm, considérée comme indicateur de l'agriculture céréalière, constatent que durant la décennie 1920-1930, la courbe recule de 33 kilomètres vers le nord. La décennie 30 correspond à un début de l'extension de l'isohyète 400 mm dans les zones intérieures. La deuxième séquence de 7 ans entre 1942 et 1949 a laissé des séquelles dans la mémoire populaire. Les faibles pluies tombées

¹⁴ La digitalisation du graphique est faite dans le programme « Plot Digitizer »

n'ont pas permis de produire l'herbe pour le bétail et les céréales. Ces années sont appelées « les années du bon » en référence aux bons de rationnement alimentaire gérés par l'administration pour organiser la distribution des denrées alimentaires.

Sur cette décennie (1942-1949), MEDEJERAB & HENIA (2013) constatent également une généralisation de la diminution des précipitations, marquée par un retrait important de la courbe isohyète 400 mm dans l'ensemble de la région pouvant atteindre 134 km.

Globalement, le climat régional est un climat semi-aride naturellement ponctué de nombreuses sécheresses. L'exemple le plus marquant est la séquence 1865-1868. Elle a engendré une terrible famine, qui fit périr entre 10 % et un tiers de la population algérienne. Cet épisode a été développé dans le premier chapitre (1.3.5. Période française, page 19).

6.6.4. Validation à l'échelle du globe

A cette dimension du globe, ce test ne cherche pas à examiner les problématiques de transfert et d'inversion d'échelle comme cela était le cas dans les tests précédents. Notre intérêt est porté ici sur la comparaison des résultats obtenus sur des échelles géographiques différentes car il est admis, par un bon nombre de chercheurs, notamment par les experts du groupe GIEC, que les paramètres globaux sur la circulation atmosphérique (circulation thermohaline, oscillation Nord-Atlantique, oscillation australe) ont des effets importants sur les régimes climatiques régionaux. Les résultats des travaux du GIEC de juin 2008 présentent les variations des précipitations sur un diagramme (latitude/temps) restituant cette dimension temporelle (Figure 80). Il couvre une période séculaire. Cette analyse permet de localiser et d'extraire les séquences de sécheresses constatées et de faire une comparaison avec notre région de Djelfa.

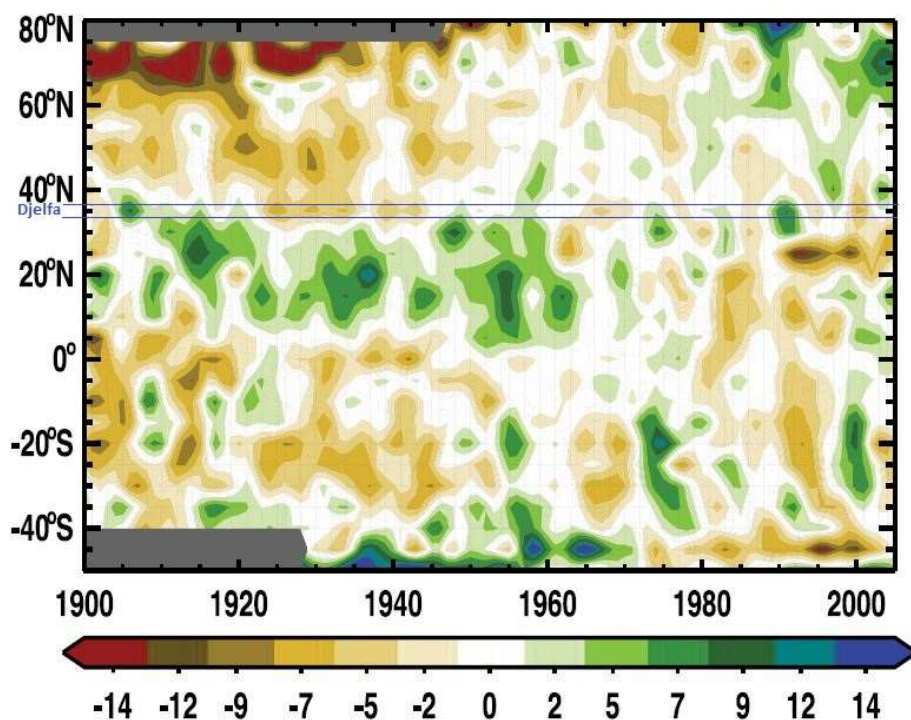


Figure 80 : Diagramme latitude/temps de la moyenne annuelle des anomalies de précipitations. Précipitations (en %) pour la période 1900-2005 (GIEC et al., 2008).

A partir du diagramme, nous pouvons constater l'oscillation des précipitations entre des périodes positives et d'autres négatives plus prolongées au cours de la période.

- A. La présence de trois séquences positives courtes, la première vers 1910, la deuxième située en 1975 et la dernière vers 1990. L'année 1910 n'a pas pu être comparée avec Djelfa par manque de données. Pour la séquence suivante de 1975, le SPI-12 confirme l'augmentation des précipitations reçues. Par contre, le SPI-6 en accord avec le SPI-4, la dégrade du fait qu'il s'agit de pluies non utiles tout en harmonie avec la courbe de production nationale. La dernière séquence positive de 1990 est ressentie comme étant positive localement mais ne reflète pas un caractère exceptionnel comme le laisse croire le diagramme (Figure 77). Seule la courbe de production agit proportionnellement. En effet, elle indique qu'il y a eu un accroissement de la pluviosité sur la partie nord de l'Algérie.
- B. Trois séquences négatives plus au moins longues, la première dure de 1925 jusqu'à 1935, la deuxième de 1938 à 1943 et la dernière vers les années 2000. La comparaison des séquences sèches montre que les trois séquences négatives ont bien été identifiées localement sur les données de la station de Djelfa.

La validation multi-dimensionnelle d'appréciation de la sécheresse ressentie par la station de Djelfa révèle la bonne capacité d'exprimer les séquences humides. Par contre, elle ne détecte qu'une partie des années sèches constatées soit dans la région steppique ou au niveau national.

6.7. Synthèse

L'indicateur SPI confirme sa capacité à caractériser les fluctuations des précipitations de la station de Djelfa. Il a été appliqué sur une série climatique satisfaisante couvrant 40 années de données. Ces variations ont été examinées sur trois dimensions temporelles : annuelle (années agricoles), semestrielle (novembre à avril) et trimestrielle (janvier à avril).

Le constat de cette analyse est la présence de grandes fluctuations annuelles. En effet, 3 années sont classées dans la catégorie de grande sécheresse. La période est marquée également par la présence de séquences climatiques constituées de suite d'années qui se ressemblent en termes de quantité de précipitations reçues. Pour les séquences sèches, il existe plusieurs séquences courtes, mais la plus longue s'étale entre 1997 et 2003 soit une période de 6 ans. Les autres dimensions temporelles relativisent la sécheresse ou l'accentuent. Toutefois, sur une échelle historique plus longue (un siècle), les séries indiquent la présence d'autres séquences de sécheresse longue : de 1920 à 1926 et entre 1943 et 1949.

La rupture des précipitations constatée sur la série de 40 années (1975-2015) est positionnée en 1997. Elle est marquée par le recul de la moyenne de 336 mm à 289 mm, soit un déficit de précipitations de 14%. Là aussi, sur une échelle historique d'un siècle, l'anomalie s'efface pour devenir une caractéristique de ce climat.

Les principales caractéristiques du climat semi-aride sont sa forte variabilité spatiale et sa fluctuation temporelle. Cet étage climatique couvre une bonne partie de la steppe algérienne. C'est autour de ce cachet que la végétation de la région s'est adaptée, que par le passé l'activité humaine s'est organisée pour tirer profit des ressources fluctuantes. Dans ces régions, les précipitations constituent un paramètre clé du système hydrologique d'un bassin versant. Dans ce qui suit, nous développons les caractéristiques hydromorphologiques du site d'étude.

Chapitre 7 : Paramètres hydromorphologiques

Dans le milieu semi-aride, le ruissellement est un agent d'érosion hydrique très actif, il transporte les éléments fins vers les points topographiques les plus bas et sur les terrasses d'épandage. Ces accumulations sédimentaires sont susceptibles de fournir du produit au vent. Nous avons donc souhaité caractériser les modelés (les dépressions fermées, les versants, les terrasses) du bassin versant alimentant Daïet Chouiouia et son réseau hydrographique.

Les paramètres qui pilotent les caractéristiques des écoulements sédimentaires hydriques sont bien documentés et recensés. Ils dépendent de caractères actifs (climat, intensité des précipitations, inondations, température, etc.), et de caractères passifs (topographie, pente, texture du sol et son degré d'altération) ainsi que de l'état de la végétation (nature, agriculture et densité du couvert). Selon El Hage Hassan *et al.* (2015), dans les études de risque, les caractères actifs peuvent être assimilés à l'aléa et les caractères passifs à une partie de la vulnérabilité qu'il est possible de regrouper sous l'appellation de : sensibilité à l'érosion.

7.1. Les indices morphologiques - morphométriques retenus

Pour étudier l'hydrologie d'un bassin endoréique en lien avec les processus d'ensablement, nous avons considéré le bassin versant d'une daïa comme unité d'étude, sachant que, la daïa est avant tout une dépression topographique fermée. Après un épisode pluvieux, une retenue d'eau se forme. Elle est parfois pérenne jusqu'au début de l'été avant de disparaître sous l'effet de l'évapotranspiration et de l'infiltration. La compréhension des paramètres hydromorphologiques de cette unité hydrographique, nous permet d'apprécier le niveau d'activité de l'action hydrique et ses apports sédimentaires. De cette façon, nous pouvons appliquer certains indicateurs morphométriques pour le caractériser. La littérature est riche de ce type d'indicateurs. Delahaye (2005) les a recensés et regroupés en quatre catégories (Figure 81). Pour le besoin de l'étude nous avons retenu quatre indicateurs, au moins un pour chaque catégorie :

- Le coefficient de compacité pour décrire la forme ;
- La courbe hypsométrique et les pentes pour le volume ;
- L'indice total qui mesure le réseau hydrographique ;
- La densité de drainage comme indice croisé tenant compte du réseau du bassin et de la surface.

Les deux indicateurs de volume et de forme ont été calculés aussi pour l'ensemble des sous-bassins à titre de comparaison. A cette fin, nous avons délimité le bassin hydrographique.

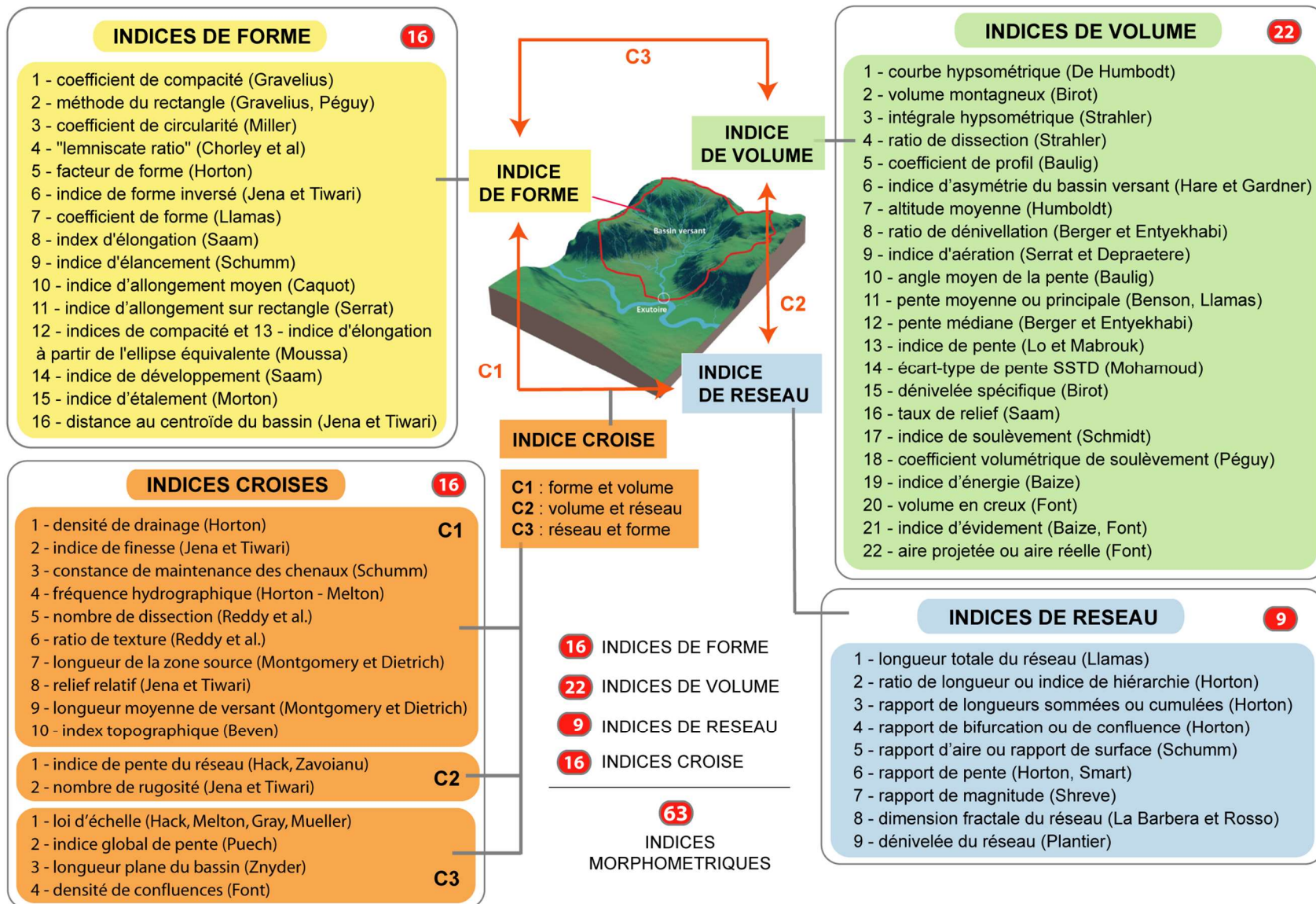


Figure 81 : Catégorie des indices morphométriques en hydrologie (Delahaye, 2005)

7.1.1. Forme des bassins

Il est bien admis que la forme du bassin joue un rôle très important dans la concentration des écoulements dans l'exutoire (cuvette). Pour la même pluie, la forme allongée d'un bassin génère un plus faible débit de pointe qu'un bassin sous forme d'éventail (allongé). L'indice de compacité de Gravelius (1914) K_G est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Il se détermine depuis un SIG ou une carte topographique. Pour un bassin versant de forme quasiment circulaire, le résultat est proche de 1, et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

$$k_G = \frac{p}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- K_G est l'indice de compacité de Gravelius,
- A : surface du bassin versant [km²],
- P : périmètre du bassin [km].

A partir d'une requête spatiale, nous avons calculé les caractéristiques géométriques ainsi que l'indice de compacité dans l'objectif d'une comparaison ultérieure entre bassins. Nous avons appliqué ce calcul à l'ensemble des sous bassins versants de la région (carte des sous-bassins versants, Figure 17). Les résultats sont restitués dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Indice de Gravelius des sous bassins versants endoréiques de la région de Djelfa

Bassins	Surface km ²	K_G
Zahrez Gherbi	1497	1.79
Zahrez Chergui	2020	1.46
Dar Choiukh	754.2	1.50
Djelfa	2494	1.47
Guedid	854.4	1.51
Idrissia	1792	1.41
Daïet Chouiouia	256.9	1.48

D'après les résultats de cet indicateur, le bassin le plus allongé est celui de Zahrez Gherbi avec 1,79. Les autres bassins évoluent autour de 1,5. Ces résultats démontrent qu'à l'échelle de la région de Djelfa, les bassins d'alimentation des dépressions endoréiques ont des formes globalement allongées.

7.1.2. Les volumes

Pour mettre en place le calcul de la courbe hypsométrique, nous avons eu recours au MNT produit par la NASA (SRTM) d'une précision de 30 mètres d'altitude. La courbe Hypsométrique, s'adapte aussi aux bassins fermés. Nous avons calculé la coupe hypsométrique pour l'ensemble des sous bassins de Zahrez, bassin N°17 dans la codification des bassins faite par l'ANARH.

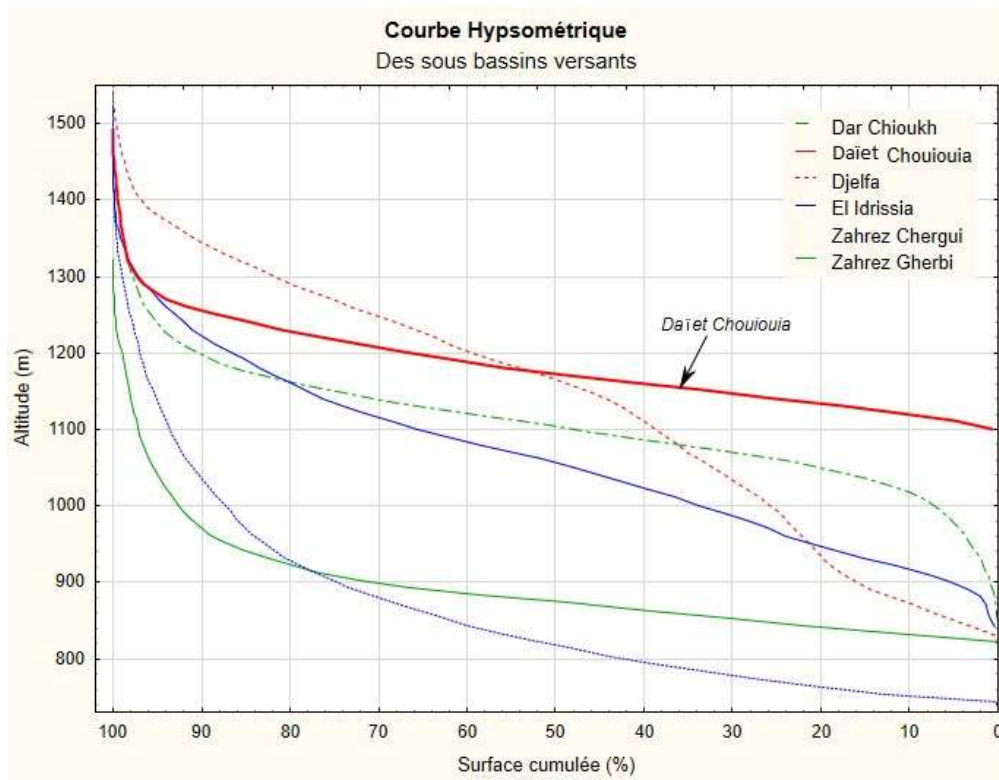


Figure 82 : Courbes Hypsométriques des sous bassins versants endoréiques de Zahrez

A la première lecture de la Figure 82, le sous-bassin Daïet Chouiouia se trouve en altitude par rapport aux autres. En effet, il est situé dans les monts d'Ouled Nail. Bien que tous les bassins évoqués soient endoréiques, les sous-bassins de Djelfa et de Dar Chioukh drainent l'eau de l'Atlas pour la déverser plus bas vers la dépression du Zahrez. Nous pouvons ainsi déterminer les caractéristiques suivantes :

- Altitude moyenne du sous-bassin Daïet Chouiouia est de 1170 mètres.
- Altitude la plus fréquente : prééminence des altitudes comprises entre 1100 et 1250 m (90 % de la surface du bassin).
- Très peu de surface dans les hauteurs, à partir de 1300 mètres, soit 3%. Cependant, l'altitude monte rapidement, ce qui donne une pente très importante.
- La courbe se stabilise sur tout le long jusqu'au point le plus bas, ce qui traduit une plaine douce, classée dans la catégorie de vieux bassins en termes d'érosion.

7.1.3. Les pentes

Le relief de ce site est marqué par le contact direct entre la plaine et la montagne. Le contact ne se fait pas par un long piémont avec augmentation d'altitude progressive, mais plutôt par une élévation de la pente assez rapide. La forte pente est un handicap pour l'activité agricole, mais elle génère un ruissellement qui induit des conditions favorables au développement de la végétation plus en aval. Grâce à cet apport d'eau supplémentaire, l'agriculture prédomine dans les dépressions et les plaines.

Cependant, si les pentes sont très importantes, sur un sol peu protégé, les averses occasionnelles peuvent devenir dangereuses, en présence d'inondations qui transportent des sédiments vers l'aval pour remplir la dépression. Par ailleurs, Floret *et al.* (1986) soulignent un autre risque dans le cas d'absence totale de pentes, le sol se transforme en zones inondables, qui interdit l'installation de cultures irriguées, et même de vergers, en raison de l'absence de drainage.

Pour l'élaboration de la carte des pentes (Figure 86), nous avons retenu quatre classes de pentes (voir Tableau 18) traditionnellement utilisées dans le contexte méditerranéen (El Hage Hassan *et al.*, 2015). Le calcul des pentes est réalisé sur la base de MNT de 10 mètres de précision.

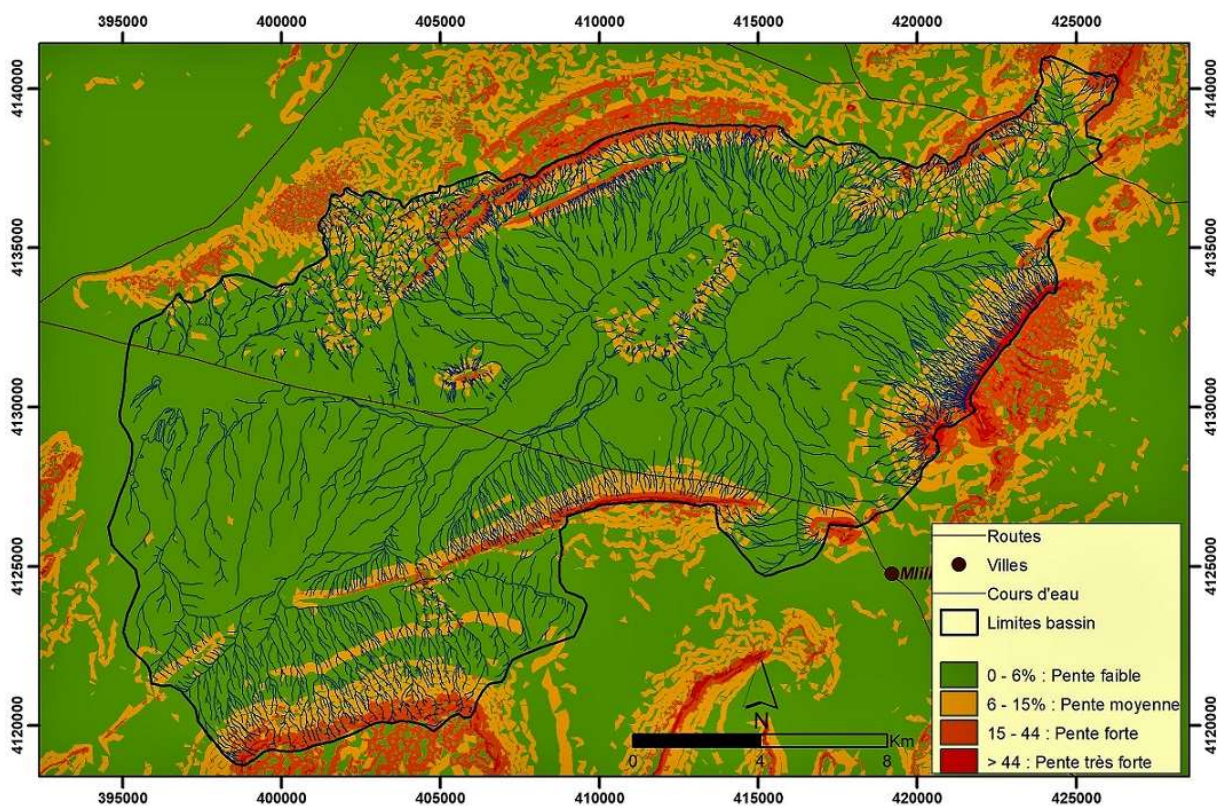


Tableau 18 : classes des pentes avec les superficies occupées dans le bassin de Daïet Chouiouia

Pentes en %	Classe de pente	Superficie (km ²)	% de superficie bassin
< 6	Pente faible	201.7	78.54
6 - 15	Pente moyenne	40.4	15.73
15 – 44	Pente forte	13.1	5.1
> 44	Très forte	1.6	0.62

D’après la carte et le tableau (Tableau 18), ce sont les faibles pentes qui dominent à l’échelle du bassin de Daïet Chouiouia avec (78%) et la part de pente moyenne est autour de (16%). A l’inverse les fortes pentes se localisent dans les Djebels qui bordent la dépression, avec seulement 6% de la surface globale.

7.1.4. La densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant (BENTEKHICI, 2006).

$$D d = \frac{\sum L}{A}$$

A partir d’une requête spatiale, la somme des longueurs des arcs du réseau est de 1450 km et la surface du bassin de la Daïet Chouiouia est de 257 km². Donc, la densité de drainage est de 5,6 km/km²

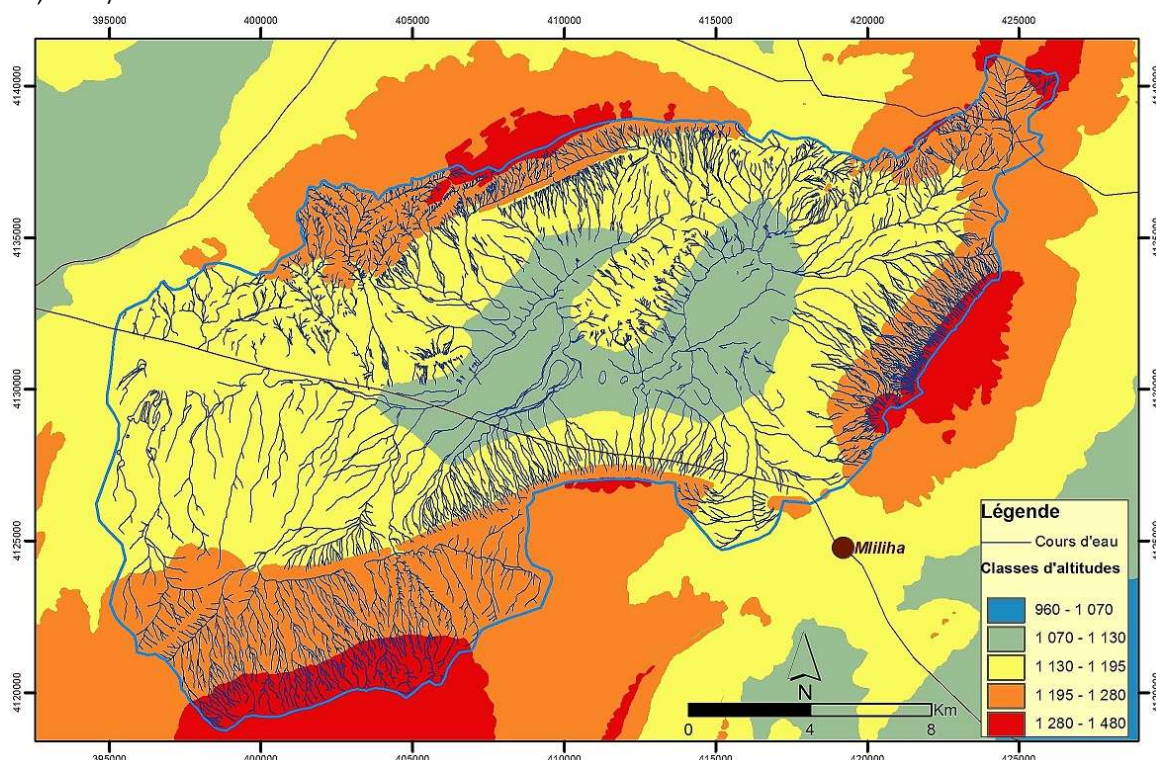


Figure 84 : Carte de réseau hydrographique restituée sur les classes d’altitude, bassin de Daïet Chouiouia

Si on suit la classification de la densité de drainage des bassins des régions sèches donnée par J-RODIER (FAO, 1995a), notre bassin est considéré comme perméable au niveau des formations superficielles. En effet, des recouvrements sableux et des amas d'éboulis rocheux occupent une bonne partie de sa surface. Par ailleurs, Floret *et al.* (1986) ont montré que le coefficient d'infiltration dans les steppes du sud tunisien dépend de la texture du sol. Il est de l'ordre de 60 à 90 % pour les sols sableux profonds, de 30 à 45 % pour des sols limoneux et il baisse dans des sols squelettiques, variant entre 20 à 30 %. Dans le bassin de daïa, il est clair que le réseau se concentre sur les versants des glacis du relief et sur les pentes fortes. La plaine de l'Ouest n'a pas une forte densité de réseau hydrographique. Toutefois, l'activité d'érosion qui se manifeste par incision est très présente dans le paysage (Figure 84).

7.2. Ruissellement et ravinement

L'ensemble des indicateurs morpho-métriques détaillés auparavant, suggèrent que l'érosion hydrique est peu active dans cette région. Mais chaque milieu dispose de ses propres facteurs spécifiques qui doivent être pris en considération pour examiner l'érosion. En effet, les travaux de HEUSCH (1970) en moyenne montagne méditerranéenne du Maghreb, suivis par des dizaines d'autres travaux de terrain réalisés dans la cadre d'un partenariat entre IRD et INRF (Institut de Recherche Forestière, Algérie) mettent en lumière les spécificités de ces régions.

Les résultats de ces travaux (Roose *et al.*, 1993 ; Arabi *et al.*, 2007 ; Roose *et al.*, 2012) mettent en évidence le faible apport de l'érosion en nappe (moins de 2 t/ha/an) qui demeure moins importante que le ravinement et l'ablation des cours d'eau. C'est ainsi que plus de 90 % des pertes en terre annuelles peuvent être enregistrées en une seule averse exceptionnelle par ruissellement des versants. C'est ce mode qui joue le rôle majeur de transports hydriques de sédiments. Sur la figure suivante (Figure 85), on observe que la densité du réseau hydrographique se concentre sur les fortes pentes exposées aux vents du Nord.



Figure 85 : Au pied du Djebel Kenouir des chenaux, puis des ravins alluvionnés en direction de la daïa, en tronquant et incisant le glacis jusqu'à l'assise gypseuse (34°43'50"N- 3°42'E).

Le fort ravinement de la région agit lors des averses exceptionnelles, pendant lesquelles les pluies lessivent des terres émiettées par la désagrégation. Le relief facilite l'action de ruissellement exceptionnel chargé de sédiments qui dévale les pentes, creuse des ravines, puis se dépose en aval dans la daïa. A certains endroits, on observe sur les cours d'eau la disparition du sol qui laisse place à des galets, du gravier et parfois de la roche nue (Figure 89).



Figure 86 : Cours d'eau occasionnel décape la faible couche du sol malgré la faible pente. Djebel Kenouir en arrière-plan (34°44'3"N - 3°45'26"E)

7.3. Bordures des daïas

L'examen des bordures des daïas fournit des éléments clés pour l'examen d'éventuel creusement de la cuvette de daïa. Les bordures nous renseignent également sur les traces laissées par la déflation éolienne de la dépression. De plus, l'intérêt porté à l'identification des zones sensibles ou susceptibles de fournir des éléments à l'action hydrique, met en évidence l'apparition à certains endroits d'une couche friable autour des daïas. C'est pour ces deux raisons que nous avons préféré examiner ce point particulier.

Le fond plat de la daïa se trouve encaissé dans la surface du plateau. Le contact entre ces deux unités topographiques forme une zone qui entoure la daïa avec une légère pente. Elle est constituée d'une couche de calcaire blanc. Cette description recoupe les remarques de Russo, (1947) lors de son étude des daïas de dépression des hauts-plateaux de l'Est Marocain. Sur le terrain, comme sur les images satellitaires, les bordures se distinguent facilement par une couche de calcaire d'une blancheur éblouissante.



Figure 87 : Disparition complète de la couche mince du sol sur la bordure Sud de Daïet Chouiouia. Djebels Sbaa et Kenouir en arrière-plan (2013, 34°44'35"N - 3°39'45"E)

Sur le terrain, nous avons constaté que ces bordures présentent deux formes d'évolution selon le côté de leur positionnement par rapport à la daïa. Pour étudier ces caractéristiques, une analyse cartographique a été réalisée en deux étapes :

1. Composition colorée « géologique » de l'image satellitaire Sentinel-2 (Figure 88), suivie par une digitalisation de la bande de bordures afin de mesurer la surface et d'identifier les points de contact avec les cours d'eau ;
2. Analyse temporelle comparative de quelques points choisis le long des bordures. Nous avons eu recours aux anciennes photos aériennes comme images de référence et à l'image satellitaire optique de très haute résolution.

Depuis l'image en composition colorée spécifique, les bordures de daïas se laissent facilement distinguer par leur composition géologique. Elles sont bien identifiables par leur couleur blanche et bleu (Figure 88). Les bordures méridionales présentent des couleurs et des formes qui peuvent les distinguer de la bordure septentrionale de chaque cuvette. En effet, les couleurs de l'image sont plus bleues vers le sud en raison de forts processus d'érosion. Le sol est exposé à l'action mécanique d'abrasion du sable lors de son déplacement. Projeté par le vent, le sable bombarde et pulvérise le sol jusqu'à la disparition complète de la couche superficielle et l'apparition d'une couche de calcaire. Par ailleurs, les formes des bordures sont plus larges et plus étalées vers le sud, dans la zone de passage de sable.

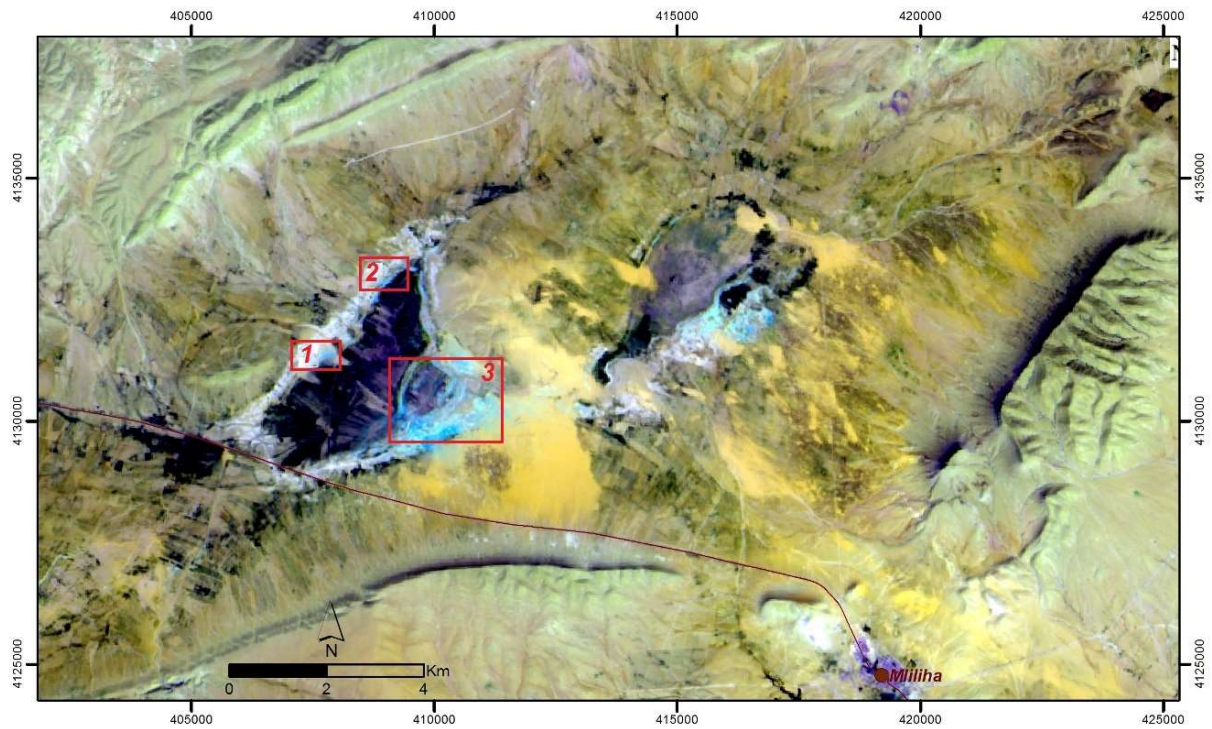


Figure 88 : composition colorée (dite géologique RVB 12-11-2 résolution 10 mètres), image Sentinel-2 du 15 avril 2016. Les zones encadrées en rouge sont concernées par l'analyse temporelle de 60 années.

La surface couverte par ces bordures est de 5.80 km² pour la daïa occidentale et de 4.58 km² pour l'orientale, soit un total de 4% de la surface globale du bassin versant. Le moindre chenal d'écoulement pluvial creuse la roche soluble qui constitue des bordures, action accentuée par la concentration des eaux. En effet, tous les écoulements du bassin convergent vers la dépression et traversent cette couche calcaire (Figure 89).

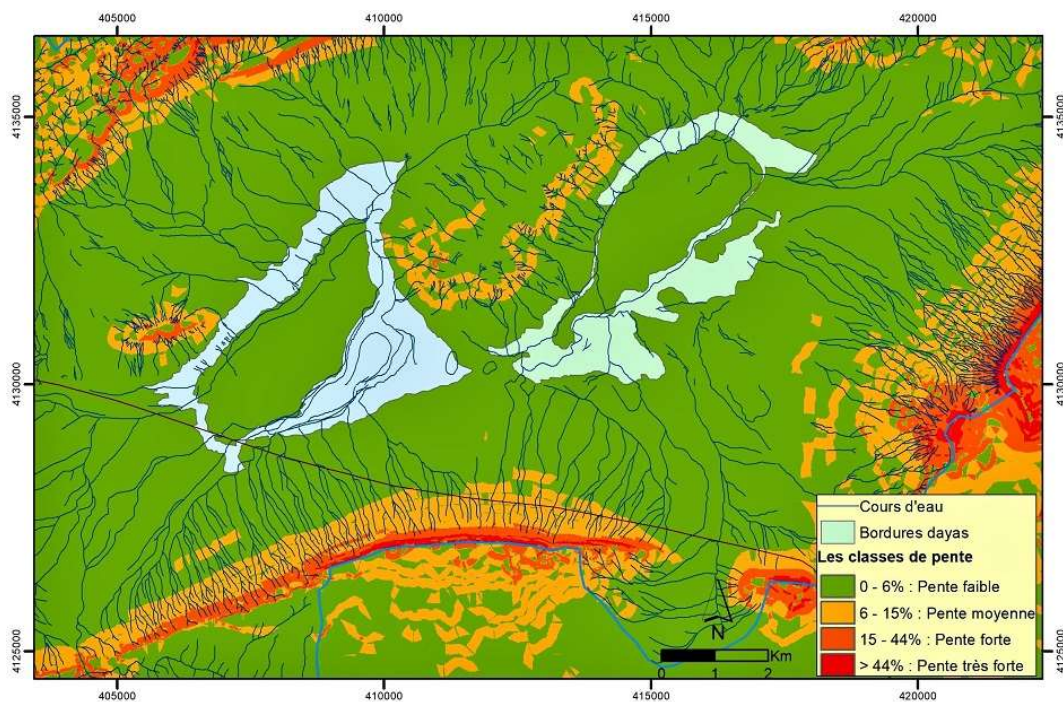


Figure 89 : cartographie des bordures de Daïet Chouiouia

Si les bordures nord ne sont pas exposées directement à l'action abrasive du sable éolien, leur caractère friable et la plus grande solubilité de la roche gypseuse les exposent particulièrement à l'action hydrique. Au contact de l'eau, cette roche se dissout ce qui entraîne des éboulis (Figure 90). Nous avons suivi quelques d'oueds dans leur traversée de cette couche soluble. Tous ces oueds augmentent leur capacité d'incision non pas parce qu'une légère pente se présente, mais à cause de la roche qui se dissout au contact de l'eau. Parfois, sans présence de cours d'eau en amont, de petits chenaux en forme de chevelure se forment sur cette bande en creusant le sol.



Figure 90 : Oued traverse la bordure nord de la daïa. Sur un sol calcaire riche en gypse sans pente l'eau creuse ce canyon en forme de « U ». Le cours d'eau attaque à la base la roche soluble et la fait s'écrouler par pans entiers. L'érosion peut aussi être mécanique lors des orages violents (2013, 34°44'39"N - 3°39'E)

Comme indiqué dans le titre de la Figure 88, 3 sites positionnés sur les franches de la daïa vont être analysés pour identifier les changements morphologiques opérés entre 1957 et 2017.



Figure 91 : Changements des bordures nord de Daïet Chouiouia sur une période de 60 ans (A- photo N° 186-SHD 1957; B- Image GeoEye 13/02/2017, Esri).

Les deux sites 1 et 2 (*Figure 91*) sont positionnés sur les bordures nord de Daïet Chouiouia. Le contraste entre la daïa et ses bordures apparaît relativement moins marqué par le passé, car aujourd'hui ces dernières se détachent de l'ensemble du paysage. Les bordures semblent bien végétalisées sur les photos aériennes comparées à l'état actuel. Sur le site 1, on observe des parcelles mises en culture dans les années 50 dont le maintien semble difficile au regard de l'état du sol très érodé. Sur le site N° 2, quatre maisons de campagne ont été construites sur la bande de bordure. Ceci a eu un apport positif, traduit par la végétalisation de certaines parcelles (C) et (D), indiquées par des ellipses rouges.

La fragilité de la couche gypseuse à l'érosion et à l'action de l'eau est constatée également sur d'anciennes photos (1957) par la présence de quelques ravins. Cette action est actuellement accentuée par la destruction de la végétation ce qui favorise le développement du ravinement. En effet, on constate que les bordures nord de la daïa sont rongées par des griffes d'incision hydrique. Parfois, elles prennent naissance au contact de bande soluble et disparaissent aussi vite la traversée de la couche terminée, sur quelques dizaines de mètres.

On observe la présence de quelques arbres sur le site 2. Depuis, ils ont été déracinés afin de permettre le labour de la terre. Plus récemment, les arbres regagnent un peu de terrain. La daïa de Chouiouia bénéficie d'un plan de reboisement de tamarix (partiellement visible sur le site 2, image (B), localisé sur des zones de stagnation d'eau, projet lancé dans le cadre de la lutte contre l'ensablement.

Les images qui suivent (*Figure 92*) présentent le site N° 3 situé sur les bordures sud-est de la daïa. Il s'agit de la photo aérienne de 1957 et l'image satellitaire de 2017.



Figure 92 : Evolution de l'état de surface des bordures méridionales de Daiet Chouiouia
(A- photo N° 188-SHD 1957 ; B- Image GeoEye 13/02/2017, Esri)

Sur la période étudiée (60 ans), la forme globale des contours des bordures est conservée. On ne constate pas de dynamique de limites des bordures vers le sud sous l'effet de la

corrasion. En revanche, l'effet de l'action de la corrasion devient nettement visible, sur l'image de 2017.

Dans les années 50, le plateau septentrional, zone de passage préférentiel du sable, ne présente pas de traces qui indiquent la présence d'activité éolienne intense (ce point sera abordé plus loin). Donc, l'étalement méridional des bordures suggère la présence d'un agent morphologique actif. En effet, la dissolution du gypse semble jouer un rôle majeur dans le remodelage et le creusement des bordures. Il se manifeste par un décrochage de niveau entre le plateau et la cuvette, associé à la présence de talus d'érosion sur les bordures. L'analyse de l'image couplée aux observations du terrain, met en lumière les contours déformés des bordures méridionales de la daïa, allongées vers le sud. La présence d'îlots déchiquetés de terre cultivable ou couverte par de la steppe sont autant d'indices qui plaident pour une extension latérale préférentielle tournée vers le sud. Mais, précisons que sur une durée de 60 années d'imagerie, nous n'avons pas pu déceler de preuves d'une extension latérale mesurable de la daïa. Sous l'effet du vent chargé de sable « corrasion » un décapage mécanique s'exerce jusqu'à la cuirasse. Il est visible sur les bordures sud.

La forte action de la corrasion se manifeste sur les bordures méridionales de la daïa. Exposées au vent dominant chargé de sables essentiellement quartzeux, elles subissent un décapage même sur la carapace gypseuse. Le bilan morphologique final est celui d'un processus de creusement hydro-éolien dont une partie est compensée par l'apport sédimentaire hydrique.

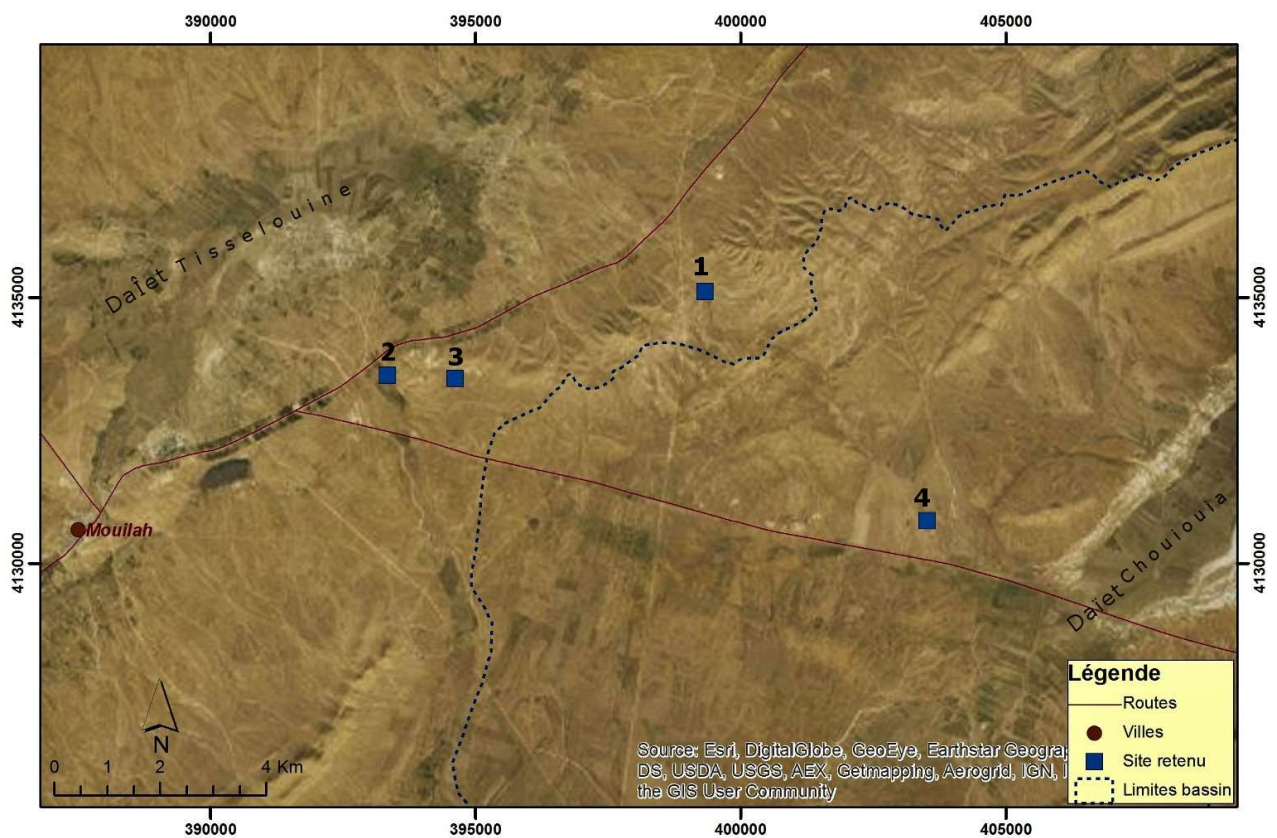
En termes d'accélération de creusement de la dépression, nous n'avons pas pu identifier sur le terrain la présence de butes témoins. La recherche de traces n'indique pas de présence de surcreusement autour des poteaux électriques édifiés dans les années 70 et traversant la daïa. Nous pouvons signaler également le maintien du tracé, partiellement effacé, de l'ancienne route qui la traversait. En effet, le creusement dans ce site semble moins perceptible car actuellement, le déblaiement éolien de la cuvette semble à peu près équilibré avec les apports sédimentaires alluviaux. Ces constatations contrastent avec les remarques de Benazzouz (2000) signalant un surcreusement actif et rapide dans les grandes dépressions hydro-éoliennes du Hodna et des Zibans situées à l'est de la zone d'étude. En revanche, pour faire cette mise en parallèle, ne serait-il pas trop simpliste d'imaginer que les mêmes mécanismes agissent avec les mêmes proportions à des échelles différentes ?

Nous n'avons pas examiné cette dimension comparative, mais au regard des dynamiques qui vont être présentées dans les parties qui suivent, il semble que l'hypothèse formulée concernant le bilan de notre site est très dépendante de l'intensité des crises d'ensablement. Un déséquilibre sédimentaire entre l'apport alluvial de sédiments apportés par les cours d'eau et la déflation éolienne peut être observé lors des séquences d'ensablement. Il se traduit par un appauvrissement sédimentaire et dégradation des sols.

7.4. Analyse diachronique d'érosion hydrique

Principale source d'apport sédimentaire, l'érosion hydrique est très présente dans le site d'étude avec une dynamique probablement accélérée par le recul du couvert végétal naturel. Pour se faire une idée sur cette dynamique, l'analyse diachronique se révèle adaptée pour examiner l'évolution des formes d'érosion entre les photos aériennes de 1957 et les images satellitaires de haute résolution récentes notamment les images de GeoEye.

Dans cette partie, nous examinerons les modifications opérées le long de ravins et dans les nappes de dépôts alluviaux. Nous exposerons brièvement quelques exemples de cette dynamique, quatre sites retenus situés entre Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia (Figure 93).



Le site N°1 se situe sur de petites ondulations de relief. Sur la Figure 93, on peut observer que ce site présente des versants, d'un côté, dénudés de végétation, et de l'autre, marqués par la présence du ravinement. Il se trouve que la région était déjà, avant les années 1950, animée par une forte activité d'érosion hydrique ancienne. Elle se manifestait par d'intenses ravinements généralisés sur l'ensemble des versants.

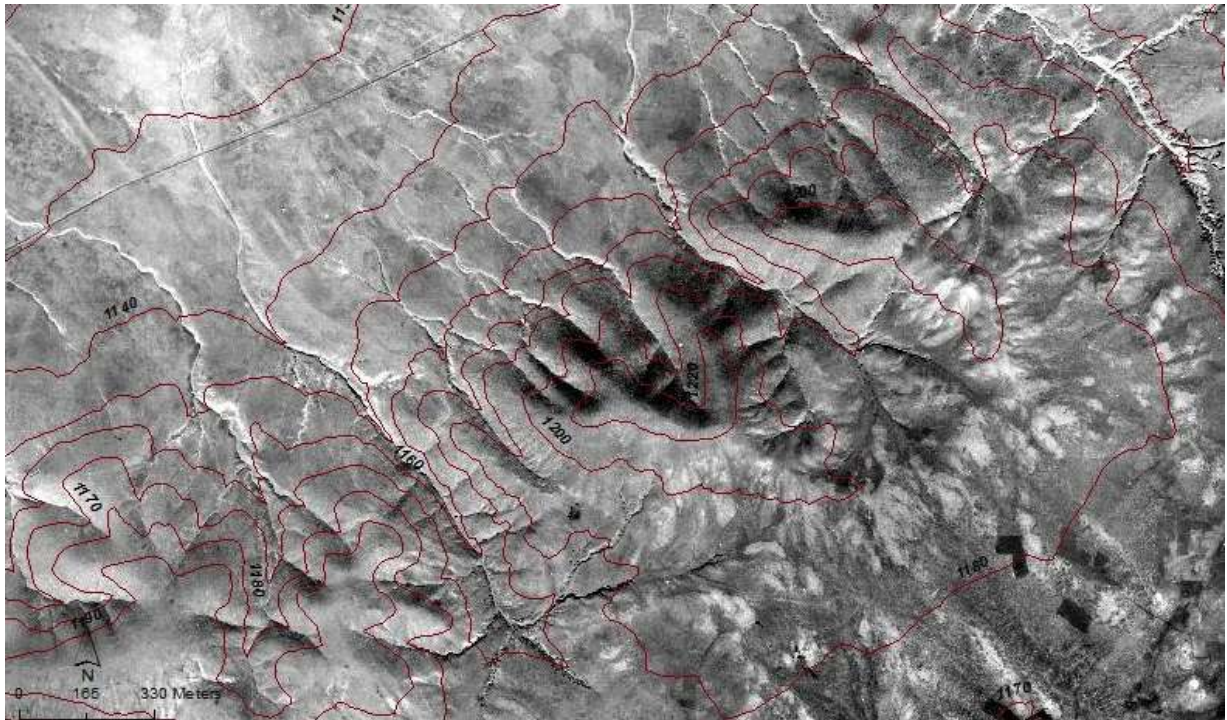


Figure 94 : Ravinement très actif sur des versants dégarnis de végétation
(site 1, photo AV53 du 2 février 1957, cliché N° 175, SHD, 34°46'51"N - 3°34'18"E)

Sur ces lieux, l'analyse diachronique ne révèle pas de présence d'une extension généralisée des ravins. Les formes des cours d'eau restent presque identiques, exceptés certains ravins qui présentent une érosion régressive liée à l'écoulement. Leur dynamique spatiale du creusement apparaît très forte. Nous présentons deux cas : Site N°2 et N°3.



Figure 95 : Site 2, dynamique régressive d'érosion liée à l'écoulement de l'oued Mazouz
(A- AV53 du 2/2/57, N° 273, SHD. B- Image GeoEye 13/02/2017, Esri, 34°46'31"N - 3°32'2"E)

L'Oued Mazouz prend sa source à 25 km au Sud, sur le versant occidental de Djebel Guedid (Figure 37). Il produit de très forts écoulements torrentiels lors des événements orageux. Entre les deux images, le point abrupt qui marque l'érosion régressive dans le lit de l'oued recule de

142 mètres, sur une période de 60 ans, soit une moyenne de 2,3 mètres par an. La progression de ce creusement est stabilisée et stoppée par la construction d'une digue en pierre, sur l'image (Figure 95-B), la dynamique est matérialisée par les deux lignes 1957 et 2017.

Sur les ondulations de relief de Ras Touil, le même phénomène décrit précédemment est observé sur le site 3 (Figure 96). Il s'agit d'un petit ravin isolé qui présente une dynamique progressive intense. Il a avancé de 31 mètres en 60 ans, soit une moyenne de 0,5 mètre par an.

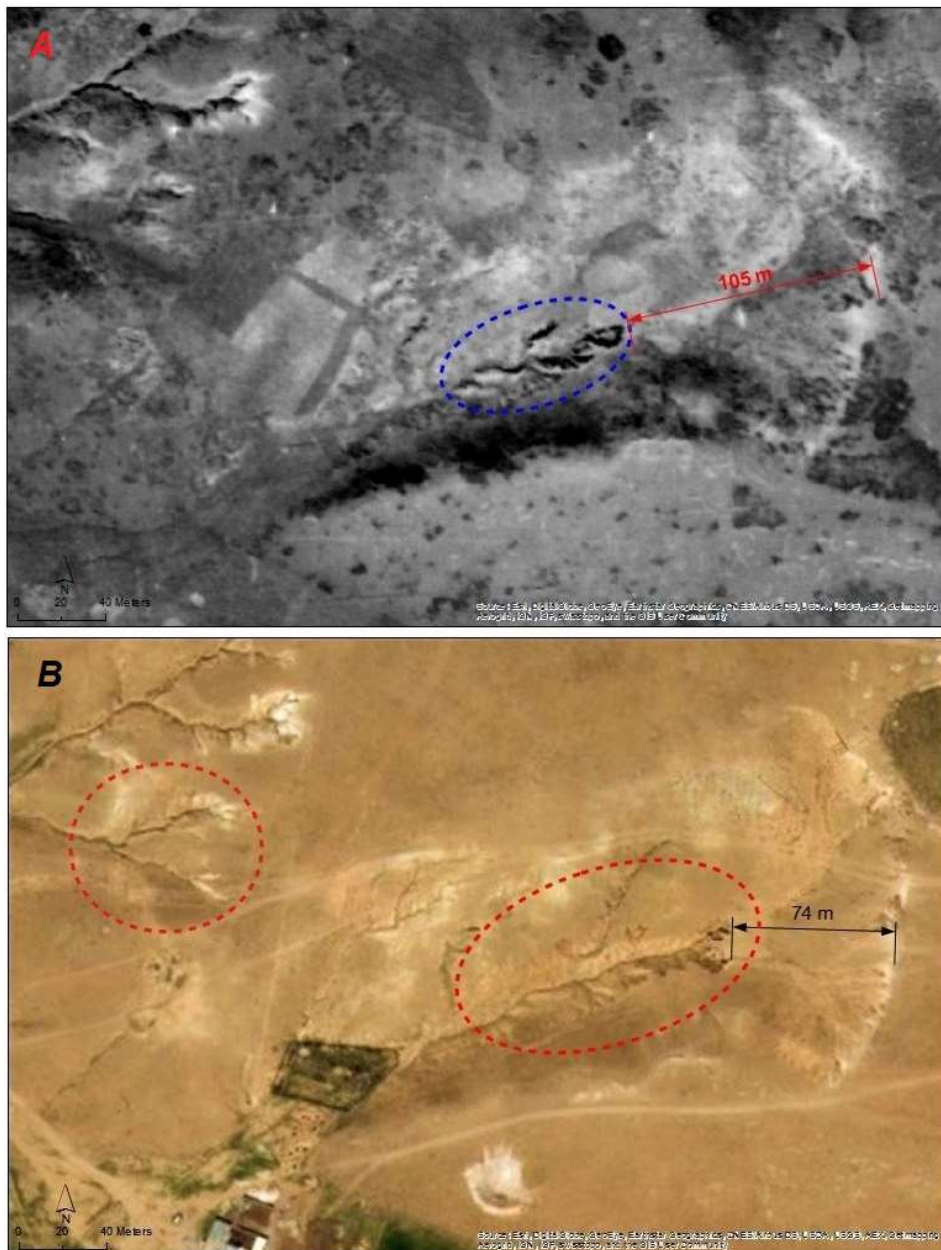


Figure 96 : Site 3, des ravins manifestent une forte activité d'érosion progressive. Creusement constaté en 1957 et amplifié actuellement. (A. photo AV53 du 2/2/57, cliché N° 273, SHDS. Image (B), Image GeoEye 13/02/2017)

Par ailleurs, l'examen des anciennes photos aériennes montre la prépondérance des nappes alluviales, ainsi que le rôle joué par l'eau dans ce processus d'accumulation et d'épandage des

sédiments fins. Le site 4 (Figure 97) illustre bien ces caractéristiques, à savoir la présence de nappes de dépôts alluviaux. Ils se présentent, sous forme de cônes de déjections d'épandage liés aux cours d'eau, dont le sens d'écoulement est indiqué par les flèches.

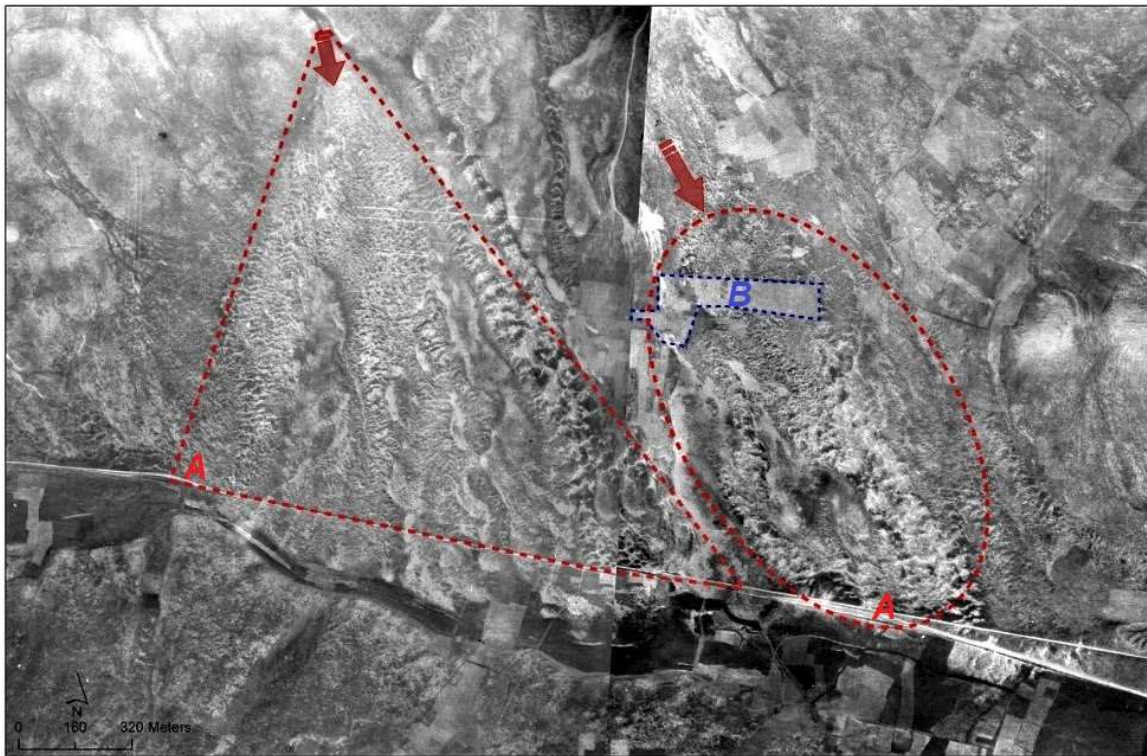


Figure 97 : Site 4, cônes d'épandage liés aux cours d'eau. Les flèches caractérisent le sens d'écoulement(A). Présence de quelques parcelles de mises en culture (B).
(Photo AV53 du 2/2/57, cliché N° 273 SHD)

Sur cette photo (Figure 97), l'oued draine les écoulements issus des hauteurs du Djebel Chekedoua (1283 m) situé entre Ras Touil et Djebel Tlila. L'altitude baisse rapidement pour atteindre 1150 m. La pente se stabilise au contact des plaines donnant naissance à un cône de déjection.

Lors d'un événement orageux, l'oued dévale les fortes pentes, chargé d'apports sédimentaires constitués principalement d'éléments fins ramassés sur les versants. Lorsque la pente s'annule à la rencontre des terres planes, l'oued perd sa capacité de transport en abandonnant sa charge et forme le cône de déjections observé sur la Figure 100.

Aujourd'hui, ces épandages sont mis en culture. Annuellement, la charrue mélange le limon avec le sol et efface ainsi la délimitation visuelle. Les traces de cet apport ne sont guère visibles depuis l'imagerie satellitaire récente. L'autre forme d'érosion hydrique observable sur le terrain, mais qui reste peu visible sur l'imagerie satellitaire est de petites ravines dans les champs. Elles trouvent naissance lors d'un orage sur un sol récemment labouré sans protection végétale. Ces ravines sont généralement effacées à chaque passage de la charrue.

7.5. Synthèse

Les indicateurs morpho-métriques utilisés (le coefficient de compacité; la courbe hypso-métrique, les pentes, mesure de réseau hydrographique et la densité de drainage) ont apporté des connaissances sur la forme, le volume et caractérisé la densité et le drainage du bassin-versant de Daïet Chouiouia. Il s'agit d'un bassin positionné en hauteur par rapport aux bassins qui l'entourent. La topographie dominante est sous forme de plaines qui entourent la dépression de daïa et des djebels donnant naissance à des amonts pentus. Il apparaît, que l'érosion hydrique reste fortement liée au ravinement des cours d'eau.

Les anciennes photos aériennes de 1957 ont relevé la présence d'une érosion hydrique très active à cette époque. Cette activité se manifestait par ravinements. En lien avec l'écoulement, l'analyse diachronique fait ressortir la forte capacité de creusement de certains cours d'eau, ainsi que le rôle prépondérant de l'eau dans le ramassage, le transport et l'épandage des sédiments. Ces images anciennes montrent la présence de grands cônes d'épandage riches en éléments sédimentaires.

L'ampleur de ces formes évoque la présence d'un processus de désagrégation mécanique naturel de la roche du relief. La désagrégation décompose les roches et libère de la matière. La force d'eau ruisselante assure par la suite le transfert de cette matière vers l'aval.

Aujourd'hui, l'action hydrique est renforcée par la formation de ravines, elles se développent sur des terres labourées pour la mise en culture, résultat d'extension d'anthropisation des terres. L'érosion se manifeste également sur des terrains argilo-limono-sableux riches en gypse les plus érodables. Ces terrains dénudés de leur végétation subissent un fort ravinement à l'image des bordures de la daïa.

Ces observations suggèrent que l'alimentation sédimentaire de la dépression de la daïa Chouiouia continue d'être assurée par les cours d'eau. De même, le relief qui entoure la dépression, participe positivement à l'apport sédimentaire pour alimenter la daïa. Les masses de matériel alluvionnaire, les accumulations sédimentaires des cônes d'épandage, quand les conditions sont favorables, peuvent fournir des éléments fins à l'action éolienne aussi bien qu'alimenter la daïa.

Chapitre 8 : La dynamique du couvert végétal

La région est couverte par une cartographie fragmentaire de la végétation réalisée avant 1980. On trouve la carte réalisée par P.Ozenda et J.Keraudren en 1960 (1/200 000), et d'autres cartes couvrent que de petites zones, plus quelques indications qui se trouvent sur des cartes topographiques. Il n'existe donc pas un inventaire spatialisé mis à jour et actualisé dans le temps.

Les études portant sur la dynamique du couvert végétal dans les zones steppiques s'accordent sur l'existence d'un processus régressif conduisant à un changement de la physionomie des espèces végétales. Il est dû au phénomène de surpâturage excessif. (Wael *et al.*, 2009) constate que l'armoise blanche est la plus exposée à cette dynamique régressive, elle perd du terrain face à d'autres espèces indicatrices la dégradation de terrain des parcours, telles que : *Atractylis serratuloides*, *Noaea mucronata* et *Peganum harmala*.

Dans ce chapitre, nous analyserons le recul effectif de la végétation d'un point de vue spatial, imputé généralement à l'empiétement des terrains de culture sur les zones de végétation naturelle. Dans l'optique de cartographier spatialement et temporellement le couvert végétal, les photos aériennes et l'imagerie satellitaire seront utilisées. Bien que nous utilisions des indices normalisés tels que le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), par souci de cohérence, nous avons pris soin d'utiliser des images qui présentent des résolutions spatiales et spectrales les plus proches possibles. Pour cette partie, nous avons retenu quatre images : un premier couple est issu de Sentinel-2 année 2016, un deuxième de Landsat 8 années 2015 et 2017.

Afin de déceler et caractériser les changements de végétation, nous orientons nos travaux vers trois échelles de temporalité :

- Une analyse intra-annuelle : entre d'un côté une saison de forte activité végétale représentée par une image Sentinel-2 du 25 d'avril 2016, et de l'autre une saison de faible activité végétale, après la moisson des céréales pluviales, nous avons retenu l'image Sentinel-2 du 24 juillet de la même année. Pour ces deux images, nous avons opté pour l'utilisation de canaux à haute résolution de 10 mètres/pixel.
- Une analyse interannuelle : approche comparative de deux images d'une période identique entre une année humide et une année sèche. Naturellement, nous avons retenu la période dont l'activité végétale s'exprime le mieux et devient plus perceptible par les satellites, c'est-à-dire le printemps. Nous utilisons les images acquises aux mêmes périodes de l'année, afin de minimiser l'impact des changements phénologiques de la végétation et les différences d'humidité des sols. Nous avons retenu un couple d'images Landsat 8 du 23 mars 2015 et 28 mars 2017.
- Une analyse diachronique sur une longue période (1957 à 2017) afin de déceler les mutations intervenues sur l'occupation du sol et le couvert végétal de la région.

L'examen de la plus ancienne image satellitaire Landsat TM à moyenne résolution du 18 avril 1984 évoque déjà un défrichement généralisé. De ce fait, l'analyse diachronique des images postérieures au défrichement n'apporte pas de nouvelles connaissances sur la présence possible de phases de transition intermédiaire. Nous aurons recours aux photographies aériennes en noir et blanc et aux images GeoEye de haute résolution.

L'ensemble de ces analyses est résumé et présenté dans la (Figure 98), avec les deux axes : temporalité et résolution spatiale.

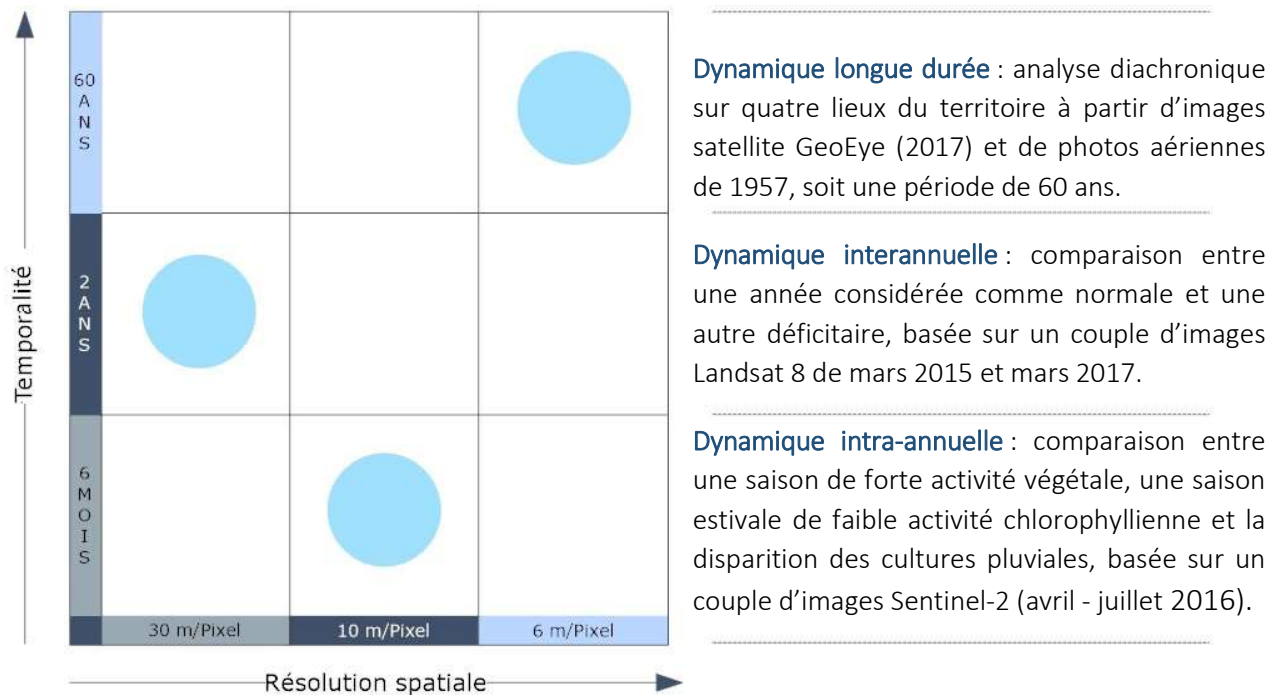


Figure 98 : Echelle spatiale et temporelle pour étudier la dynamique végétale sur le site d'étude

Le traitement appliqué aux images est le calcul de l'indicateur SAVI, l'extraction des métriques (mesures des surfaces) est rendue possible par l'utilisation d'un seuillage sur l'image SAVI. Au préalable, sur la base de la photo-interprétation et des connaissances du site, une matrice de seuillage a été définie par fourchettes de valeurs (Tableau 19). Par la suite, sur chaque image issue du traitement SAVI, la matrice de seuillage affecte les pixels en fonction de leur valeur numérique à des classes de catégorie.

Tableau 19 : la matrice de seuillage d'images SAVI de la région d'étude

Classes	Valeur SAVI
Activité végétale forte	0,25 et plus
Activité végétale moyenne	0,18 – 0,25
Activité végétale faible	0,15 – 0,18
Activité végétale très réduite et terrains nus	Inférieure à 0,15

8.1. La valeur indicatrice du changement et de dynamique végétale

Pour la détection du changement opéré sur le couvert végétal, les logiciels actuels comme ENVI 5.1, fournissent des workflows de détection automatique qui vont jusqu'à la vectorisation des parcelles ayant enregistrées un changement spectral. Cependant, nous avons opté pour une méthode pas à pas pour en maîtriser tout le paramétrage. La méthode retenue est de calculer un SAVI différentiel, c'est-à-dire calculer l'écart pour chaque pixel d'image entre le couple d'indicateur SAVI résultant du traitement d'image à des dates différentes : Exemple entre les images Sentinel-2 d'avril et de juillet.

$$\Delta SAVI (i) = [SAVI (juillet-2016) - SAVI (avril - 2016)]$$

Ce calcul produit une nouvelle image d'évolution entre les deux dates : les pixels qui portent des valeurs négatives expriment la diminution du couvert végétal sur la période. Tandis que ceux de valeurs positives indiquent un gain d'activité chlorophyllienne et une amélioration du taux de couverture végétale. La catégorisation de la nouvelle image, indicatrice du changement, est faite par seuillage des valeurs numériques en trois classes. L'intervalle de -0,1 à 0,1, indique qu'il n'y a pas eu de changement. Supérieure à 0,1, cette valeur retranscrit un gain d'activité, et inférieure à -0,1 elle traduit une perte d'activité végétale.

8.1.1. Analyse des résultats du traitement d'image

Image d'avril 2016 : Les résultats du traitement d'image Sentinel-2 du 25 avril 2016 par l'indicateur SAVI sont présentés dans la carte suivante (Figure 99). Pendant cette période de fin de printemps, l'activité végétale, que ce soit sous forme d'agriculture ou naturelle, est très forte. Elle se trouve cette année-là soutenue par des précipitations tardives, qui se manifestent par le remplissage d'eau de la cuvette de Daïet Tisselouine dans le nord-ouest de la carte.

Sur cette carte, le rouge représente une forte activité chlorophyllienne et le vert une très faible activité végétale se traduisant par un sol nu. La répartition spatiale de l'activité végétale est hétérogène : elle se concentre autour de Daïet Tisselouine au Nord-Ouest pour se prolonger jusqu'au bassin de Daïet Chouiouia. D'autres points d'intense activité réapparaissent sur les cours d'eau et vers le Sud-Est, dans le bas-bassin de l'Oued Erriche. Les mesures des classes de couverture végétale sont données dans le Tableau 20 qui suit.

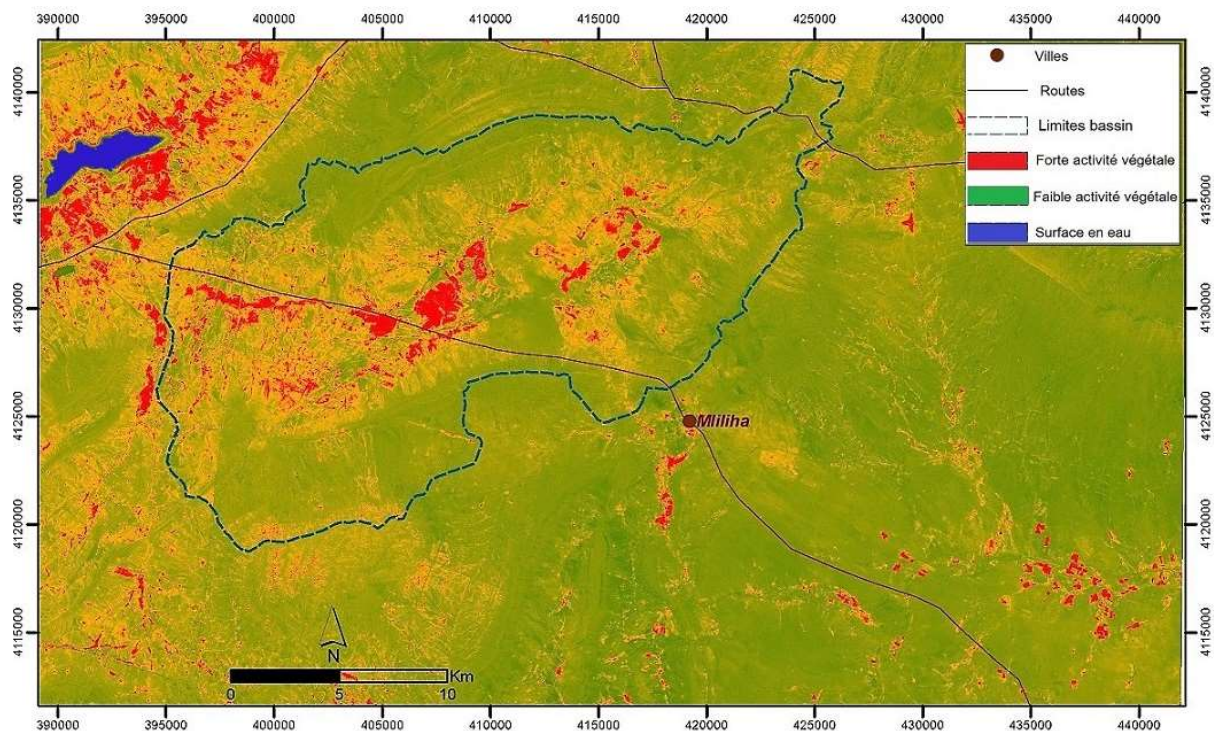


Figure 99 : Carte d'activité végétale exprimée par l'indice SAVI en fausse couleur
Image Sentinel-2 du 25 avril 2016

Ces chiffres indiquent la présence d'une part importante des surfaces avec un couvert végétal très réduit à faible. Cette part avoisine 57 % de la superficie totale du site. Celle-ci se décompose par des terres nues dépassant les 17% et par une importante part des terres à végétation faible (40%) qui correspond à des parcours clairsemés. La classe de végétation moyenne occupe 40% de la surface. Elle caractérise la végétation naturelle sur les reliefs, les parcelles d'agriculture sur les plaines des daïas, ainsi que la bande d'arbre du Barrage Vert située sur les bords de la route reliant Djelfa à Boussaâda. Les espaces avec une forte activité de l'ordre de 9%, représentent principalement l'activité agricole et les arbres de Tamarix dans les daïas. Au-delà des dépressions des daïas, la forte activité végétale suit le tracé des cours d'eau.

Tableau 20 : Répartition des classes de couverture végétale d'avril 2016

Classes	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Activité végétale forte	104.30	9.3
Activité végétale moyenne	380.25	33.9
Activité végétale faible	446.4	39.8
Activité végétale très réduite et terrains nus	186.7	17.2
Autres (mares d'eau de la daïa)	4	0.35

Image de juillet 2016 : Le résultat de traitement de cette image d'été est affiché Figure 100. Nous pouvons constater le net repli de l'activité végétale : il ne reste que quelques petites

zones discontinues et des points éparpillés. Une partie des zones se situe sur les bordures de la Daïet Tisselouine (Nord-Ouest), et l'autre plus petite au centre de la Daïet Chouiouia.

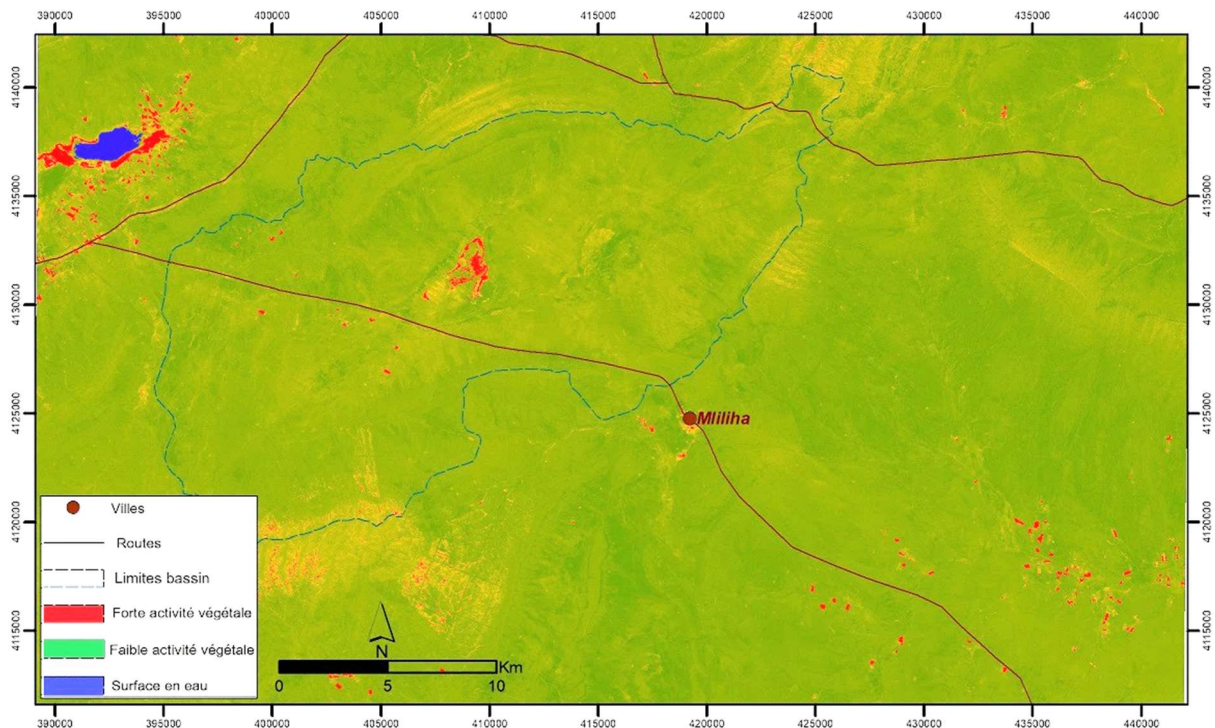


Figure 100 : Carte d'activité végétale exprimée par l'indice SAVI en fausse couleur
Image Sentinel-2 du 24 juillet 2016

Les résultats obtenus (Tableau 21) confirment le net recul des espaces végétalisés et attestent du repli de l'activité végétale, qui reste très liée à la saison pluviale. Ces résultats indiquent aussi l'émergence d'une nouvelle forme d'irrigation pendant l'été. Certes, ce mode de culture est présent pendant la saison pluviale pour compenser le manque de précipitations, mais il n'est pas identifiable en tant que tel dans l'image du printemps. En effet, il est rendu visible grâce à l'utilisation de l'image d'été. Ce nouveau modèle, peu répandu se concentre sur les bordures de Daïet Tisselouine. Encouragé à la fois par la présence de plusieurs forages et par un pompage direct des eaux depuis la cuvette, exceptionnellement pleine ce début d'été. Mais les autres années, l'agriculture s'installe dans la cuvette de la daïa pour gagner en surface.

Tableau 21 : Les surfaces de couverture végétale juillet 2016

Classes	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Activité végétale forte	7.85	0.7
Activité végétale moyenne	19	1.7
Activité végétale faible	85.25	7.6
Activité végétale très réduite et terrains nus	1009.5	90

Les zones de forte activité de Daïet Chouiouia sont en réalité des arbustes de Tamarix plantés par les « Services des Forêts » dans le cadre de la lutte contre l'ensablement. Les pluies tardives sont emmagasinées dans la cuvette ce qui permet de conserver une humidité tardive

favorisant cette forte activité végétale lors de l'été. Par ailleurs, dans le Sud-Est, une agriculture se développe le long de l'Oued Erriche. Elle est très visible pendant le printemps et le demeure toujours en partie pendant l'été sous forme de parcelles irriguées.

L'activité moyenne concerne la végétation non irriguée, les garrigues peu denses vers le Djebel Guedid et les plantations en bordures de route. Leurs activités restent inchangées entre les deux images de printemps et d'été.

8.2. Évaluation de la dynamique de la couverture végétale intra-annuelle

Le calcul d'écart entre l'indice SAVI de juillet et d'avril 2016, traduit la variation saisonnière de la couverture végétale entre la saison humide et la saison sèche. Le résultat de ce calcul est restitué dans la Figure 101. La couleur rouge représente des valeurs négatives et le vert des valeurs positives. Nous avons appliqué un masque spatial pour écarter la surface en eau stagnante de Daïet Tisselouine.

Nous savons qu'une forte relation existe entre l'activité végétale et les précipitations, ces résultats non seulement le confirment mais également indiquent l'étendue surfacique et renseignent sur l'emplacement géographique des changements opérés.

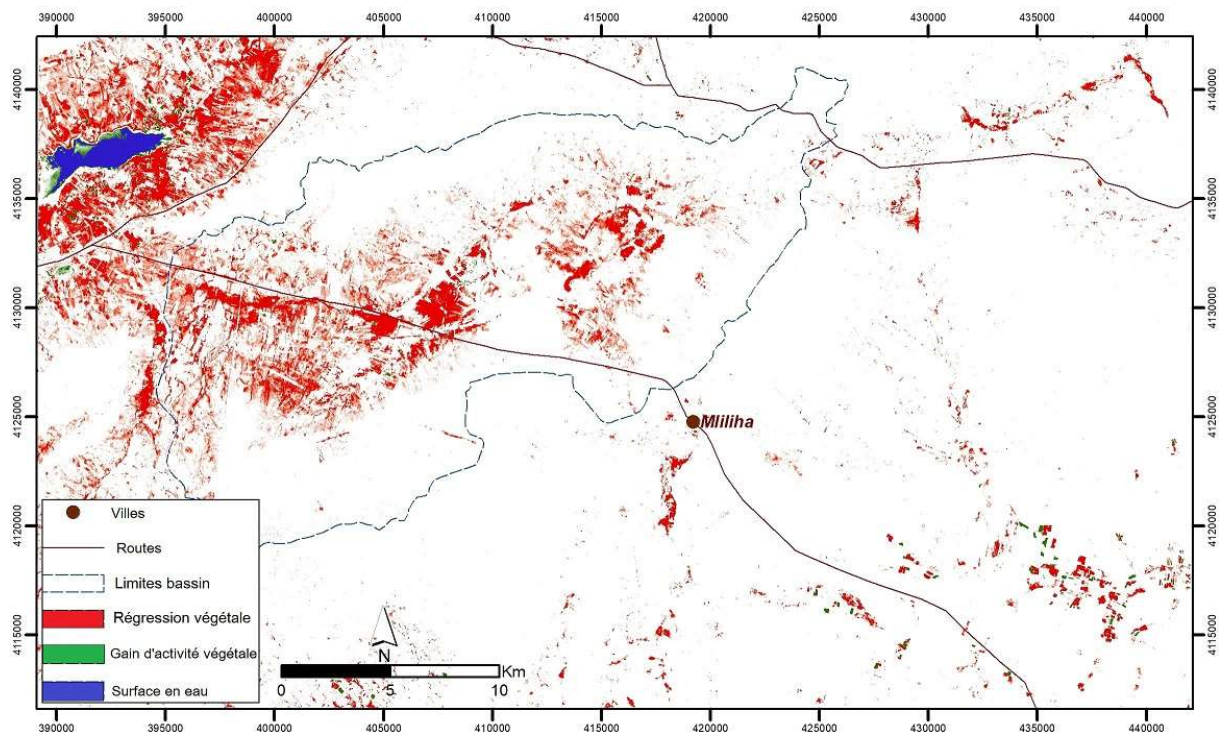


Tableau 22: Résultats surfaciques de la dynamique végétale saisonnière avril – juillet

Classes	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Recul d'activité végétale	143	12
Sans modification végétale	971.5	86,6
Gain d'activité végétale	2,4	0,14
Mares d'eau de la daïa	4,6	0,41

La couleur rouge sur la Figure 101, indique une forte dynamique régressive de la végétation. Cela représente 12% de la surface totale (Tableau 22). Il y a en effet un net recul de la couverture végétale dans les plaines des bassins des deux daïas (Tisselouine et Chouiouia), ainsi que sur les cours d'eaux (naturellement là où l'activité est plus forte pendant la saison humide). Toutefois, il existe quelques points verts éparpillés (NO et SE) traduisant ainsi une augmentation de verdure due à l'agriculture irriguée (0,14% de la surface totale). La majorité des surfaces restantes enregistre une dynamique stable (86,6%). Celle-ci correspond principalement à des sols nus ou à de faibles couvertures végétales non perceptibles depuis l'imagerie (SAVI).

8.3. Évaluation de la dynamique végétale : année sèche-année pluvieuse

L'un des objectifs ici est d'examiner les conséquences d'une année déficitaire en précipitation sur la couverture végétale en la comparant à une année ordinaire. Pour que la comparaison ait un sens, nous avons retenu deux images qui correspondent à la même période de l'année et coïncident avec une forte activité floristique. Nous avons retenu :

- L'image Landsat 8 du 23 mars 2015 : son acquisition intervient juste avant le retour des précipitations et l'amélioration du tapis végétal. L'image retranscrit l'état de la végétation dans une période de déficit pluviométrique, en effet les pluies baissent sensiblement dès le mois de novembre.
- L'image Landsat 8 du 28 mars 2017 est marquée par un automne où les précipitations se situent dans la moyenne et un hiver plutôt pluvieux ce qui a permis le développement végétal jugé à un niveau normal.

Le résultat du traitement de SAVI différentiel (SAVI Mars 2017 – SAVI Mars 2015) est rendu dans la carte suivante (Figure 102). La couleur verte traduit des valeurs positives qui expriment un gain de végétation en 2017 par rapport à l'année de référence 2015. La couleur rouge, pour l'écart négatif, signifie une perte en végétation entre 2015 et 2017. Il n'y a pas eu de modification avérée pour le reste.

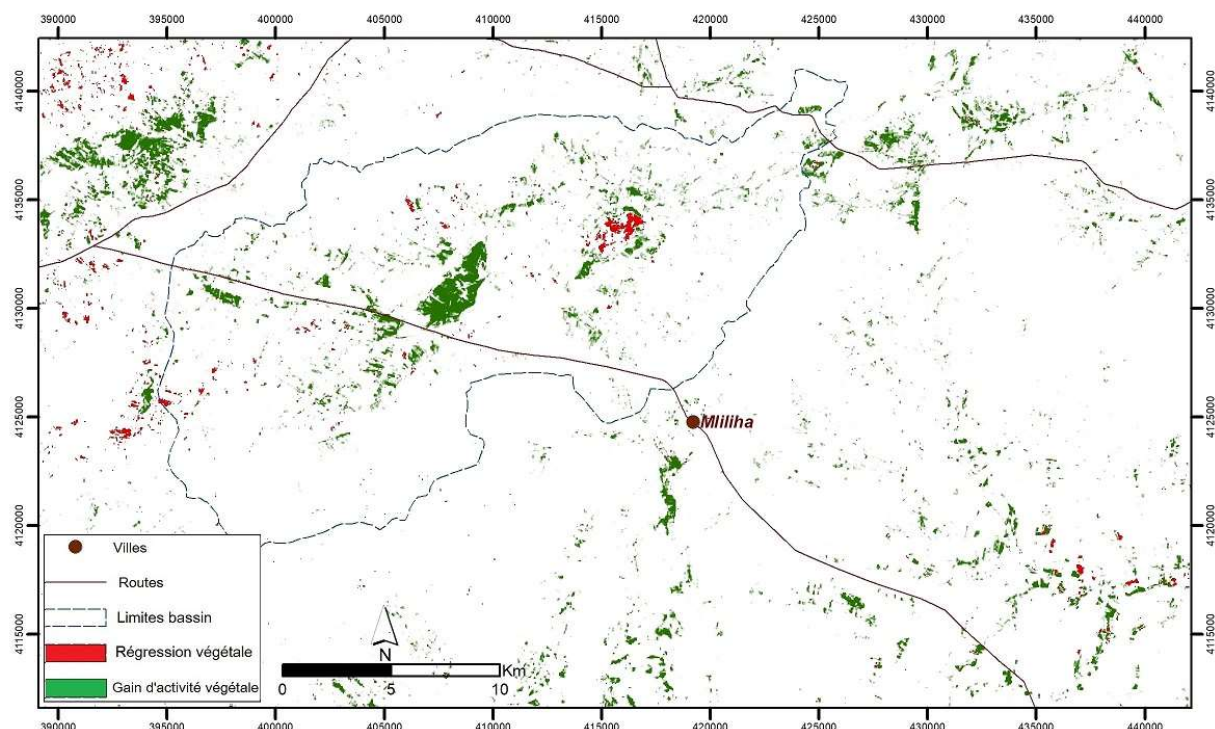


Figure 102 : Carte de la dynamique de la couverture végétale entre année sèche et humide, calculée par le SAVI différentiel entre les images Landsat-8 de : 23 mars 2015 et 28 mars 2017.

Le gain en végétation se concentre principalement dans les zones identifiées auparavant (Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia), des lieux de concentration d'activité végétale printanière. Ce gain est de 57 km² (Tableau 23). L'apport de 94.4% de la surface sans modification est très influencé par le poids des terrains nus et la faible végétation. Par ailleurs, le gain d'activité végétale se localise principalement dans Daïet Chouiouia, dans les terres entourant Daïet Tisselouine et quelques parcelles disparates. Ce gain de verdure est le résultat des terres mises en culture, manifestant ainsi une activité chlorophyllienne plus forte en 2017 que celle constatée en 2015. Quelques surfaces herbacées se développant le long des cours d'eau participent dans une moindre mesure à ce gain d'activité.

Tableau 23: Résultats surfaciques de la dynamique végétale interannuelle 2015-2017

Classes	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Recul d'activité végétale	5,2	0,46
Sans modification d'activité	1063	94,4
Gain d'activité	57	5

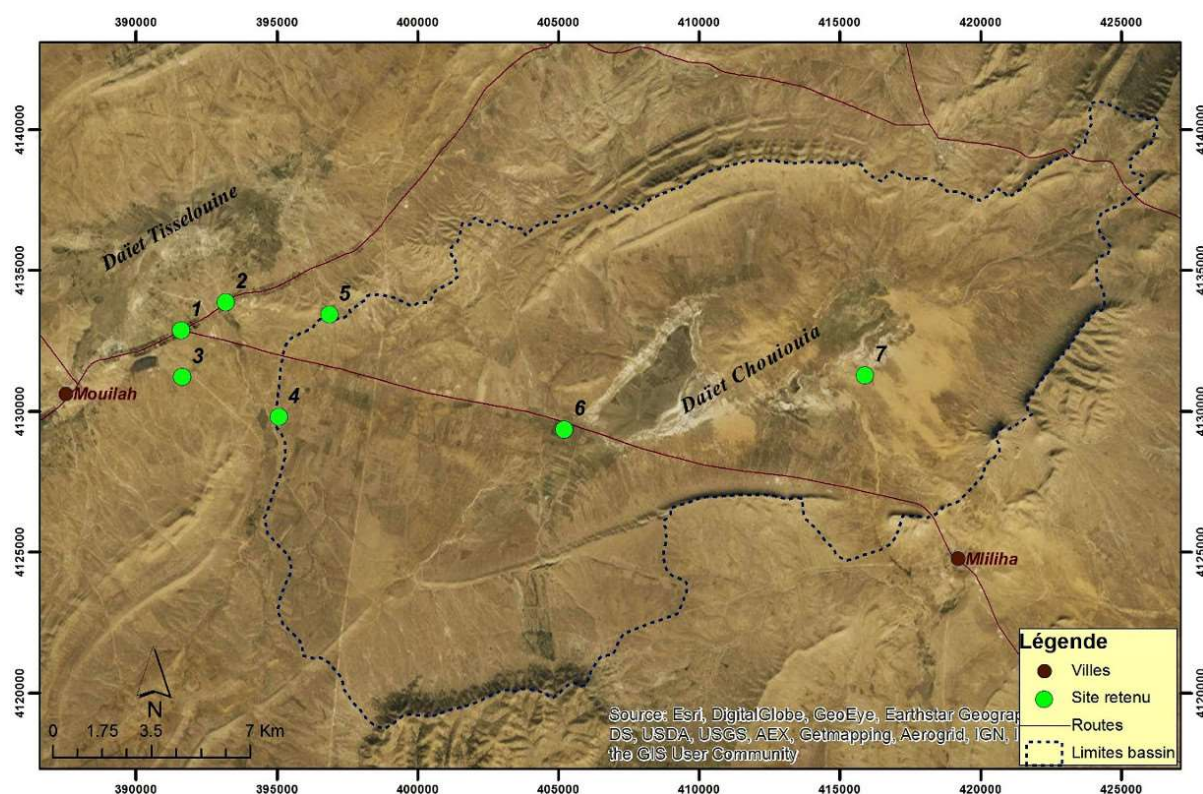
Les changements des valeurs SAVI ont permis de détecter la dynamique de la végétation inter-saisonnière (printemps - été), et interannuelle (année sèche et année pluvieuse). Toutefois, nous avons identifié quelques limites à cette méthode. Le suivi de la variation de la valeur SAVI sur le même objet, exemple de la végétation pérenne, est lui aussi variable dans le temps en fonction de plusieurs paramètres (pluviométrie, végétation en dormance...). Des valeurs plus fortes ont été constatées pendant le printemps sur les strates arborées le long des routes et sur la végétation naturelle de Djebel Guedid. Ce changement temporel des valeurs

pose des difficultés non seulement lors d'identification du changement surfacique, mais également lors du seuillage des images multi-dates pour produire des métriques. En effet, si l'écart pour le même objet est important, il peut être interprété comme une dynamique qui résulte d'un changement d'occupation. Alors, qu'en réalité, il reflète une dynamique temporelle, liée aux variations spectrales du même objet.

Lors de la production des mesures saisonnières, nous avons privilégié de garder le même intervalle de seuillage entre le même couple d'images. Cette harmonisation autorise une lecture comparative dans le temps, d'une saison à l'autre. Mais, il semble qu'elle introduit un biais dans l'image de juillet. Une partie de la végétation se trouve comptabilisée dans la classe inférieure du fait de la baisse de l'activité chlorophyllienne.

8.4. Caractéristiques de la dynamique végétale à long terme

Après avoir examiné la totalité du territoire couvert par les anciennes images aériennes (1957), nous avons retenu sept sites pour illustrer les caractéristiques de la dynamique végétale à long terme. Le choix des sites se trouve en priorité justifié par la diversité des cas du changement observé. Cette diversité, permet d'éviter d'orienter l'analyse sur un seul sens de changement. Un second critère est appliqué, celui de la présence de repères spatiaux facilement identifiables sur l'image (route, oued, relief), ce qui facilitera l'appréciation visuelle des changements. Les sites retenus sont affichés sur la carte suivante (Figure 103).



Pour interpréter correctement les anciennes photographies aériennes, nous avons examiné la carte de la végétation élaborée par P.Ozenda et J.Keraudren en 1960. Elle signale la présence de steppe à sparte et d'armoise champêtre dans les plaines autour des daïas. En revanche, sur les petits reliefs, il s'agit principalement d'arbustes de Genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*). La végétation du relief se trouve confirmée également par deux cartes topographiques : la plus ancienne de 1892 (1/200 000) et la carte la plus proche de la date de prise d'image, celle de 1959 avec une échelle de 1/50 000.

Site 1 (Figure 104) :

Situé sur les bordures sud de Daïet Tisselouine. Il couvre le carrefour qui relie le chemin menant à Mliha vers le Sud-Est à la route reliant Djelfa à Boussaâda.



Figure 104 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 1.
(Photo N° 271 du 2 février 1957, SHD. Image GeoEye 13/02/2017-Esri, 34°46'16"N - 3°31'4"E)

Sur le site N° 1, l'image de 1957 (Figure 104a) nous pouvons remarquer :

- La végétation naturelle est dominante. Visuellement, elle couvre la majeure partie de la surface. Les arbustes sont plus denses vers le Nord en s'approchant de la daïa et plus espacés vers le Sud.
- A l'Ouest sur les bordures les plus fertiles de Daïet Tisselouine, l'agriculture s'est installée. Elle se structure en parcelles géométriquement bien alignées. Notons aussi, la présence d'autres parcelles défrichées qui ont tendance à se regrouper et à gagner en extension.

Sur l'image de 2017 (Figure 104b) nous pouvons constater :

- La seule végétation permanente est constituée de plantations de chênes verts au bord de la route, réalisées lors du Barrage Vert. Comme nous pouvons l'apercevoir sur l'image, la réussite de cette opération est très variable entre des zones densément végétalisées et d'autres avec une végétation très éparse (arbustes dont la taille avoisine un mètre). Toutefois, depuis la route, l'image donne l'illusion trompeuse d'une forêt immense.
- L'agriculture a gagné tous les espaces et remplacé ainsi la végétation naturelle excepté le long de la route. Désormais, elle domine l'espace, la majeure partie de la surface de ce site. Le constat que nous pouvons faire aujourd'hui, est que les parcelles défrichées observées sur l'image de 1957 continuent d'être cultivées 60 ans plus tard.

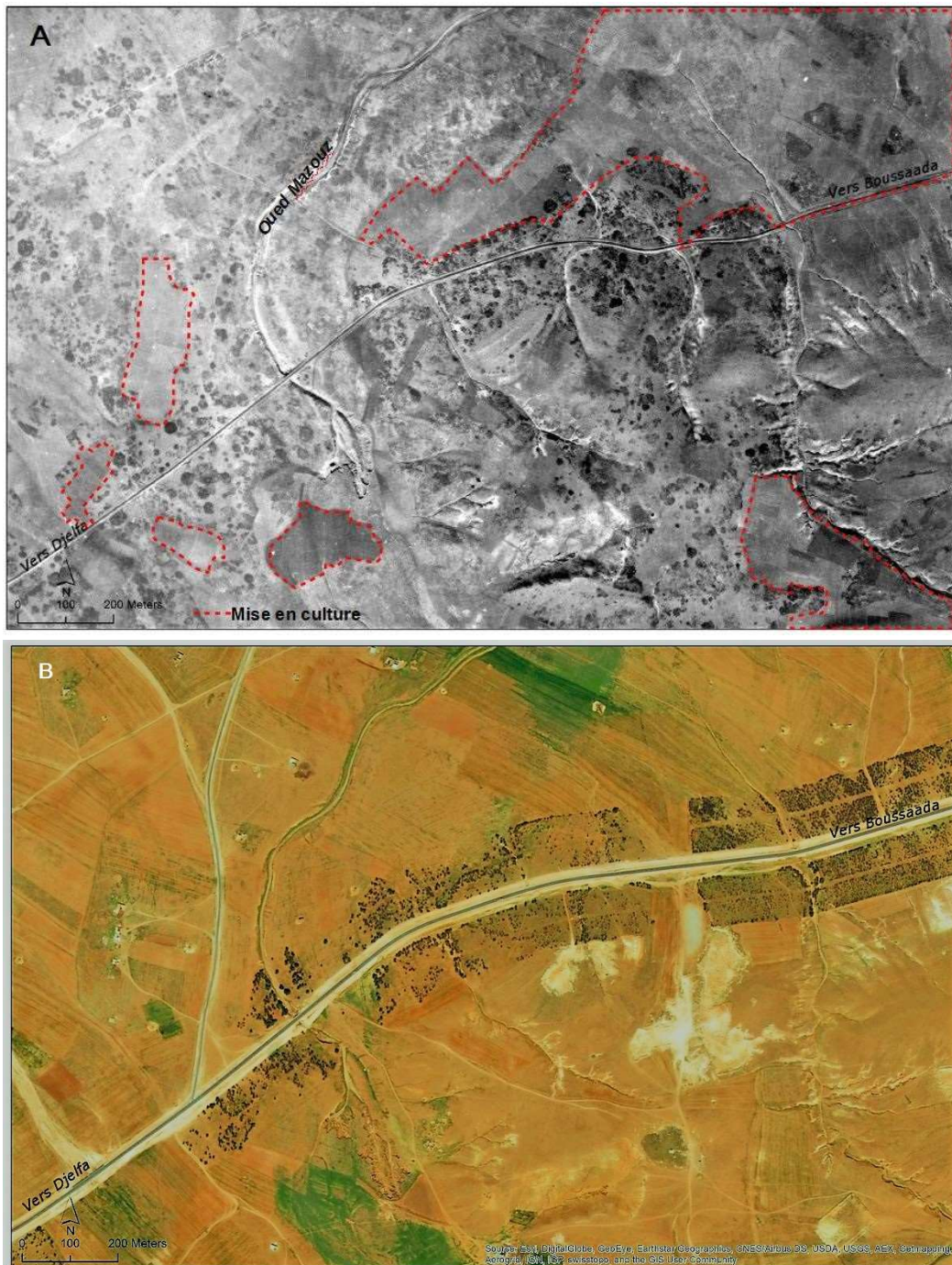
Site 2 (Figure 105) :

Situé sur la route Djelfa – Boussaâda, ce site est traversé du Sud au Nord par Oued Mazouz. Il couvre au Nord des terrains plats, juste avant que l'Oued commence à livrer les sédiments. Au Sud, il couvre les ondulations du relief.

- A. Image 1957 :** La mise en culture des terres par défrichement est également présente, dans la partie Nord-Est, elle semble liée à la présence de terrains plats constitués d'un sol plus évolué qui capte les ruissellements. La végétation naturelle ne semble pas très dense, mais en bonne état. L'occupation du sol est marquée également, par la présence des parcelles mises en culture dispersées sur le site. Au sud-est, on note la présence d'une activité de ravinement liée à une érosion hydrique active.
- B. Image 2017 :** La tendance vers la mise en culture observée sur l'image de 1957 est confirmée. L'emprise de l'agriculture se confirme, le défrichement généralisé en est le témoignage. Les parcelles agricoles ont gagné tout l'espace en remplaçant la végétation

endémique par une végétation saisonnière et pluviale. Comme pour le cas du premier site, on retrouve l'implantation de chênes verts le long des routes.

L'érosion hydrique engendrée par les cours d'eau semble déjà active sur la photo de 1957. A l'Est on ne constate pas de progression, par contre l'Oued Mazouz présente une incision qui se développe et avance. Cette partie a été présentée dans la dynamique d'érosion hydrique.



Site 3 (Figure 106 a et b) :

Il couvre une partie de la plaine qui s'étale entre Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia. Les points de repère sur ces cartes sont : la Sebkha et le chemin reliant Mlilha Sud-Est à la route Djelfa. Dans les années 50 (Figure 106 a), la végétation naturelle occupe la majeure partie du site. Les plaines qui s'étalent entre Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia semblent favorables au développement d'Alfa. Toutefois, nous pouvons remarquer une forte densification de celle-ci à l'Ouest par rapport à l'Est. Les plantes affichent des couleurs plus intenses, avec une meilleure couverture du sol. En s'approchant de la Sebkha, le sol est naturellement plus fertile et la présence de quelques parcelles agricoles préfigure l'intensification de l'activité agricole qui peut être observée 60 ans plus tard (Figure 106 b).

Il s'agit d'un autre site, théâtre de cette transformation. On assiste au remplacement complet de l'Alfa par la mise en place d'une culture saisonnière et pluviale. Ce changement atteste une forte emprise humaine grandissante. En effet, l'engouement et le recours à l'agriculture ont eu raison de cette transformation par la charrue.

Site 4 (Figure 106 c et d) :

Site situé dans le prolongement de la plaine entre Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia. Au sud du site 3, oued Mazouz qui draine le versant occidental de Djebel Guedid traverse le site, l'eau coule du sud vers le nord-ouest (Figure 37).

Ce site couvre une partie des plaines, des terrains favorables à la végétation. En effet, dans les années 50 (Figure 106c), la couverture végétale apparaît moyennement dense. Elle est constituée essentiellement de plantes naturelles, d'Alfa et de buissons. Toutefois, des parcelles labourées sont visibles et se concentrent sur le côté occidental du cours d'eau, avant l'inflexion du tracé. Les autres parcelles, plus au moins grandes, sont dispersées sur le site.

L'évolution de l'érosion des bordures du cours d'eau entre deux images, n'indique pas de signes de progression, sur cette durée de 60 années. En revanche, la végétation naturelle est complètement remplacée. Le changement s'inscrit dans le constat observé sur les sites précédents : mise en culture des terres qui remplace progressivement la végétation naturelle à feuilles permanentes par une agriculture pluviale saisonnière. La trajectoire de la dynamique du couvert végétal confirme la tendance de transformation dans l'usage des terres, des terrains de parcours transformés en parcelles de labour.

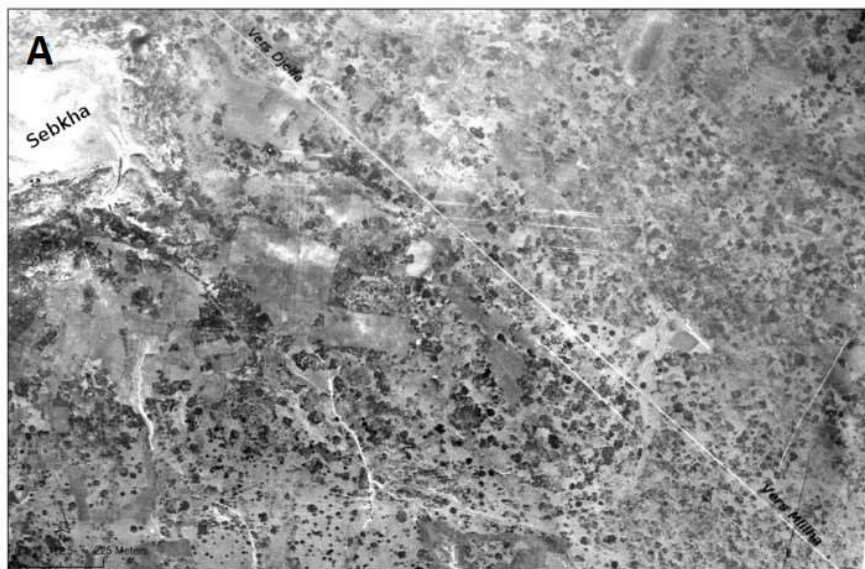


Figure 106 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans du site 3 et 4. (Photo N° 175 et 178 du 2 février 1957, SHD. Image GeoEye 13/02/2017 Esri)

Site 5 (Figure 107 A et B) : Ce site présente des caractéristiques différentes, en fort contraste avec les quatre sites présentés auparavant. Ce site n'appartient pas aux plaines, il est situé sur les dernières ondulations méridionales au niveau de Ras Touil qui est le prolongement occidental du Djebel Tlila (Figure 37). Il fait partie des terrains ondulés, situé sur la ligne de partage des eaux et demeure moins favorable à la végétation.

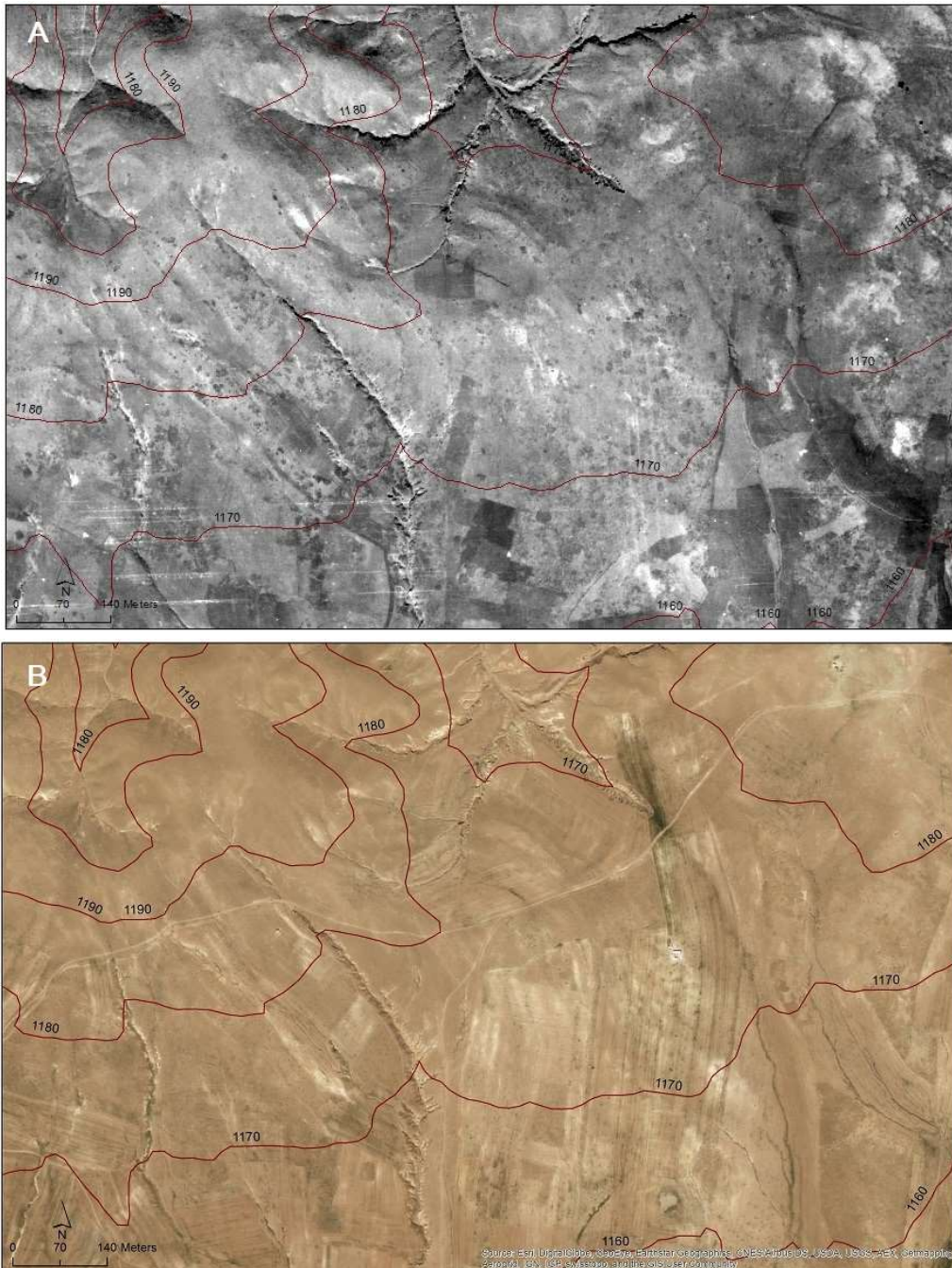


Figure 107 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 5.

(Photo N° 271 du 2 février 1957, SHD. Image GeoEye 13/02/2017-Esri, 34°46'28"N-3°34'9"E)

L'état de surface observé en 1957 (Figure 107a) est très différent voire à l'opposé des autres sites. Le relief forme des ondulations et c'est désormais dans la couverture végétale et la présence de formes d'érosion que le contraste spatial avec les autres sites est le plus visible.

Avant 1957, le site était déjà dénudé de végétation (sans preuve qu'il y en ait déjà eu). Plusieurs hypothèses peuvent être formulées quant aux causes de son absence, parmi elles, la coupe pour se chauffer. Ce site se trouve de l'autre côté des plaines qui le sépare du village de Mouilah, lieu de regroupement de la population la plus proche. Si les habitants pratiquaient la coupe, raisonnablement, ils commenceraient par les lieux qui leurs sont proches comme les plaines ou Daïet Tisselouine. L'autre hypothèse est le défrichement pour une mise en culture précoce (bien avant cette date). Là aussi, cette argumentation ne respecte pas la logique de la dynamique spatiale d'agriculture, car la mise en culture commence par les terres préférentielles des plaines, puis gagne peu à peu les terrains moins propices au plateau et au glacis du relief. En plus de la topographie et de la végétation, l'autre singularité de ce site est la dégradation du sol par l'érosion hydrique. On observe de fortes incisions hydriques très actives sur la vue aérienne de 1957. Ce constat suggère que le ravinement est relativement ancien et qu'il y a eu des conditions favorables à son développement.

Nous ouvrons une parenthèse d'explication pour tenter d'éclairer ce constat qui prend l'air d'une incohérence. Pour démontrer le caractère moins favorable du sol à la végétation, nous utilisons l'imagerie. Il s'agit de la photo aérienne ancienne et de l'image récente en haute résolution.

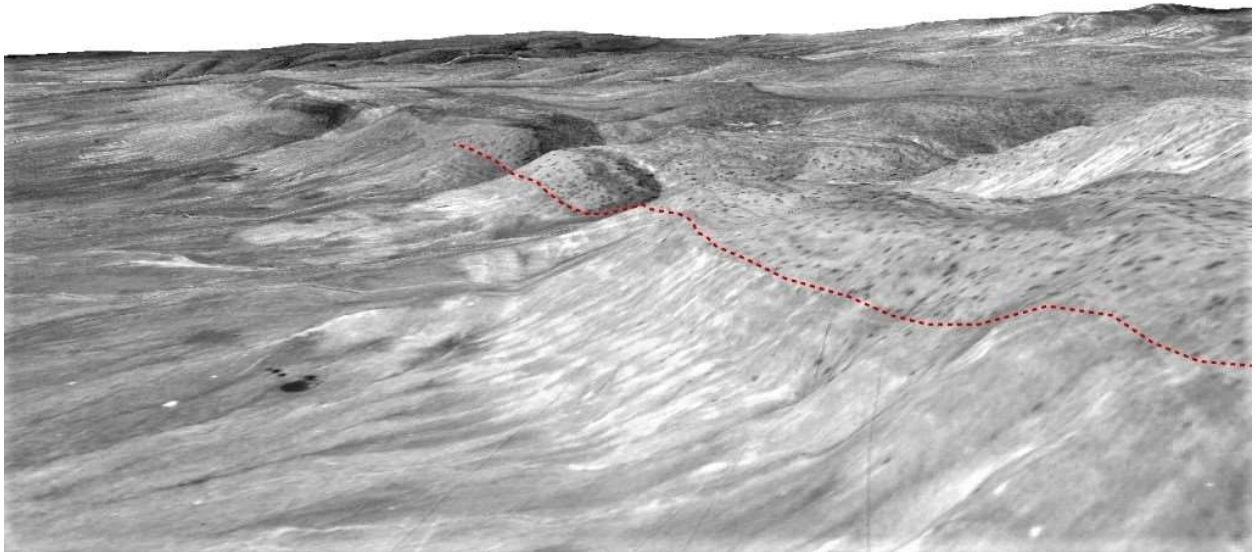


Figure 108 : Délimitation de la végétation sur les hauteurs du versant occidental de Djebel Tlilla, ligne en pointillés rouges (Photo aérienne du 2 février 1957, N° 267, SHD drapée sur le MNT STRM)



Figure 109 : Délimitation de la végétation sur les hauteurs de Djebel Tilla côté central (ligne en pointillés rouges, image GeoEye 13/02/2017 drapée sur le MNT STRM, 34°48'27"N-3°40'E)

Le long de Djebel Tilla, la photo aérienne (Figure 108) et l'image à haute résolution (Figure 109) nous permettent de visualiser une ligne de démarcation de la végétation. D'un côté, le Genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*) prospère, c'est un arbrisseau (1 à 1,2 mètre de hauteur) de la région méditerranéenne. Le terrain rocailleux calcaire lui semble favorable. Cependant, de l'autre côté, la végétation s'arrête brutalement. La carte géologique qui indique les caractéristiques du sol, bien que l'échelle soit insuffisante (1/200 000), mentionne un changement de faciès du crétacé Toronien sur le versant nord du relief, suivi par une bande faciès de crétacé continental ou lagunaire (Cic), séparant la partie favorable à la végétation de celle moins favorable. Sur l'image récente (Figure 107), le labour de certaines parcelles semble interrompu, sans avoir la preuve d'abandon ou d'un procédé de mise en repos. Le sol demeure sans aucune végétation protectrice, laissé libre à la déflation éolienne ou à l'érosion hydrique.

Site 6 (Figure 110) :

Le site se localise sur la route menant à Mililha, dans le prolongement de la plaine entre Daïet Tisselouine et juste avant les bordures nord-ouest de Daïet Chouiouia. Sur la photo aérienne (Figure 110a), deux formes se distinguent clairement. Il s'agit d'un ensemble de parcelles mises en culture qui se regroupent pour former une seule unité. Elle prend un aspect allongé coincée au milieu des terrasses alluviales. Par le nord, cette dernière respecte une délimitation plus nette que par le sud, il suit et se borne au tracé de la route. Des sédiments alluviaux transportés par les crues des ravins sont abandonnés lorsque la pente diminue et que la vitesse d'écoulement se réduit. Elles forment alors des terrasses alluviales qui occupent la partie nord et sud de ce site.

Des eaux d'écoulement prennent la direction Sud-Est pour se déverser dans la daïa. Ces terrains représentaient par le passé la même continuité de surface que les dépôts alluvionnaires, avant que les parcelles d'agriculture ne soient aménagées progressivement sur ces terrasses.

L'ancienne photo manifeste un morcellement des parcelles mises en culture en petite taille. Elles se distinguent les unes des autres. Il s'agit donc de petites cultures, ce qui nous laisse déduire que le labour se pratiquait par la force animale. Toutefois, à cette période, nous ne savons pas si ces parcelles étaient cultivées de façon continue, ou par alternance, avec le procédé de rotation pour entretenir la fertilité des sols.

Les prémices d'aménagements des terres incultes, rocailleuses, caillouteuses sur les dépôts alluvionnaires étaient constatés dans les années 50. Les images récentes confirment que ces pratiques se poursuivent actuellement, afin d'inscrire durablement cette rénovation. Au-delà, des limites des parcelles cultivées constatées auparavant, l'aménagement gagne l'ensemble du site.

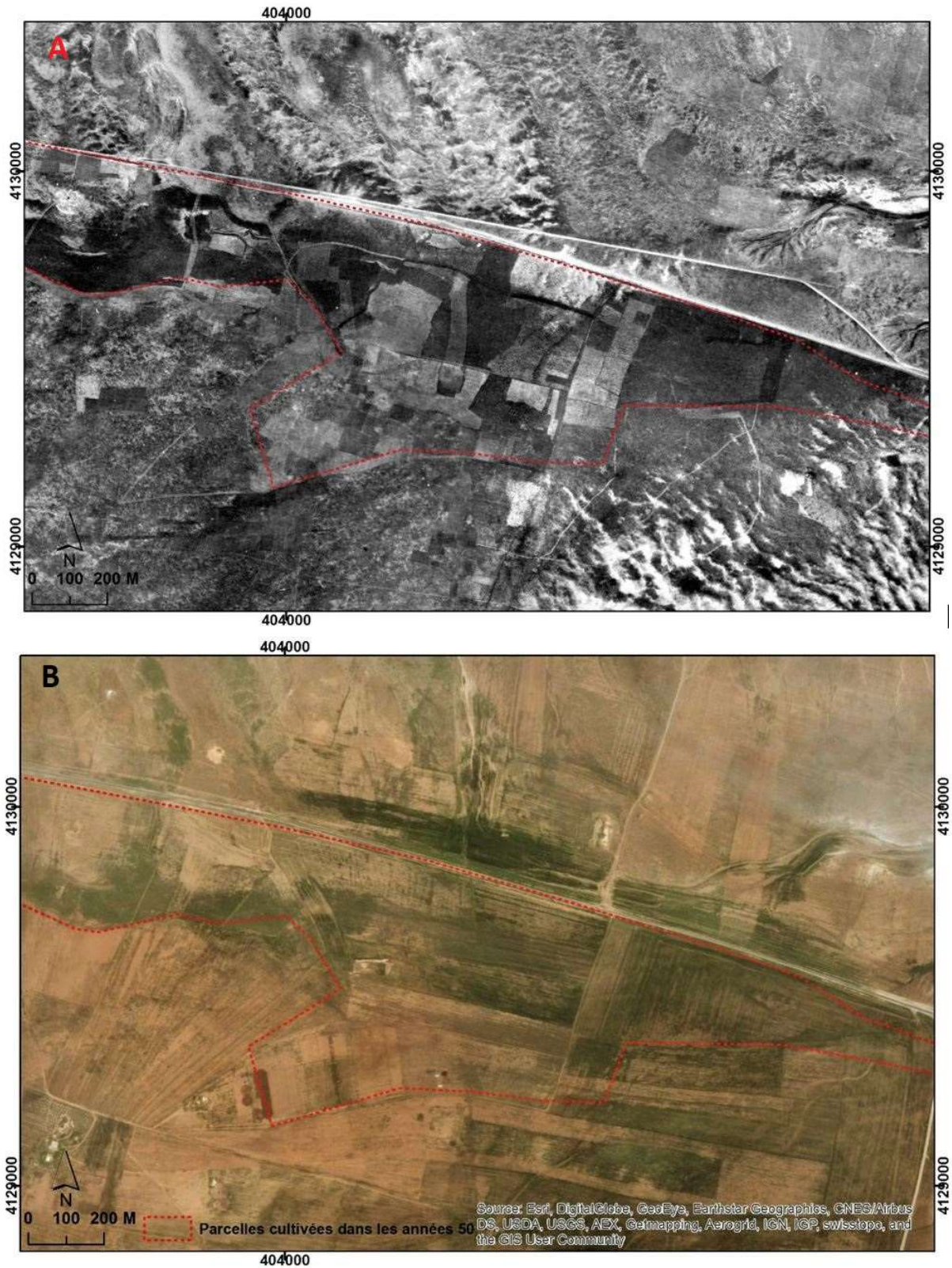


Figure 110 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 6.
 (A : Photo N° 184 - SHD du 2 février 1957. B : Image GeoEye 13/02/2017-Esri, 3°39'59"E-3°37'55"E)

Site 7 (Figure 111) :

Ce site est situé sur les bordures sud-est de Daïet Chouiouia du côté oriental. A partir de la photo de 1957 (Figure 111a), on constate également l'incursion des petites parcelles labourées probablement à la force animale ou par la force des bras. Ces parcelles présentent une tendance au regroupement, elles indiquent une appartenance au même acteur (propriétaire), leur tracé suit la présence des sols fertiles. En outre, au nord-ouest, on note la présence de sol en calcaire blanchâtre peu végétalisé. Cette bande de calcaire fait partie des bordures de la daïa.

Des images satellitaires récentes (Figure 111b) laissent découvrir un paysage méconnaissable : la petite végétation, toutes les parcelles cultivées ont cédé la place au sable. En effet, on constate l'abandon de toute forme de culture, qu'il s'agisse des parcelles observées dans les années 50, ou d'autres, aménagées ultérieurement laissant encore des traces visibles. Sur ces terrains, les tentatives d'installation d'agriculture se sont soldées par un échec et un renoncement. Signalons que dans les années 2000, ce site a bénéficié d'un plan de réhabilitation par la plantation d'*Atriplex Canescens*, cette partie sera développée ultérieurement.

Le constat à long terme dans ce site va à l'encontre du site précédent. Incontestablement, les changements observés ici s'inscrivent dans un constat d'évolution orienté vers la dégradation. Elle se manifeste, non seulement dans la prédominance du produit sableux sur les terres, mais également dans la dégradation et la disparition de la mince couche du sol qui couvrait l'assise de la bande de calcaire. Cette couche autorisait un certain niveau de végétation et sa disparition laisse apparaître une plateforme décapée.

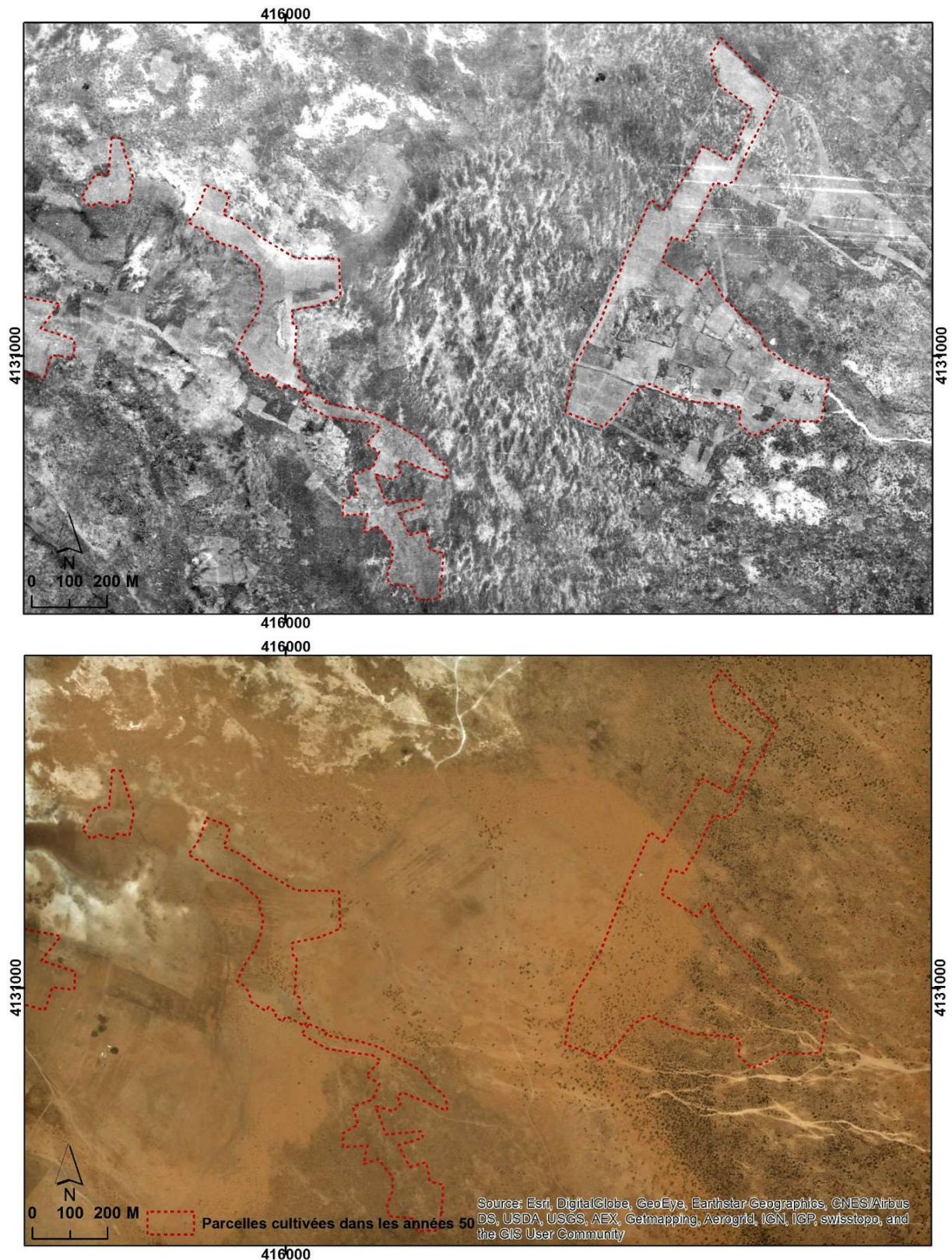


Figure 111 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 7.
 (Photo N° 192 - SHD du 2 février 1957, image GeoEye 13/02/2017-Esri, 34°45'42"N-3°44'17"E)

8.5. Synthèse

L'analyse diachronique sur une période longue de 60 années, laisse apparaître une région qui a subi de grands changements. Les traces visibles sur l'évolution des surfaces indiquent une transformation généralisée, aboutissant ainsi à une métamorphose complète de cette région perceptible dans les modes d'occupation du sol et le changement du couvert végétal. Mais à l'intérieur de cette même région, des sous-ensembles s'activent et s'animent de manière différente. Marquée par tant d'exemples de réussites et d'échecs, la transformation de ces lieux est fortement imprégnée par la mise en culture des terres. L'empreinte de cette « œuvre » est visible dans l'aménagement des sols incultes des terrasses alluviales, dans la transformation de l'utilisation des sols des plaines autour des daïas et enfin dans les échecs de mises en culture observées sur le plateau méridional.

Les quatre premiers sites présentés ont été choisis de façon intentionnelle pour faire écho à la forte dynamique du changement de la végétation. Ces sites ne représentent donc que les plaines autour des daïas, de ce fait leurs résultats ne peuvent pas être extrapolés. Sur les 60 dernières années, le constat qui peut être dressé de la dynamique végétale est plutôt contrasté entre les plaines, les reliefs (Djebels) et les plateaux. Dans les plaines, autour des daïas, il ne s'agit pas d'un simple changement régressif de la couverture végétale, mais nous avons assisté à une transformation complète dans le mode d'occupation du sol. Cette métamorphose a pris un seul sens, celui de la disparition des plantes naturelles et endémiques au profit d'une agriculture pluviale, exceptée la bande reprise pour le Barrage Vert.

Par ailleurs, l'aménagement des terrasses alluviales est spectaculaire. Pendant cette période, nous avons pu observer la reprise des terres incultes et de leur mise en valeur pour l'agriculture. En outre, une bonne partie des Djebels Tlilla et Guedid semble encore conserver l'étagement méditerranéen de la végétation naturelle qui est essentiellement constituée de Génévrier Phénicie (*Juniperus phoenicea*) et localement de Pin d'Alep. Donc, les hauts reliefs, ne présentent pas de changements majeurs décelables depuis l'imagerie. Les terrains actuellement dépourvus de végétation, l'étaient déjà dans l'image de 1957. L'explication de ce manque de couvert végétal est liée à la pédologie, et non pas à une forme de dégradation liée à l'activité anthropique.

Sur le plateau méridional de la Daïet Chouiouia, la végétation était déjà éparse en 1957, les tentatives de mise en culture se sont soldées par des échecs. Effectivement, les changements postérieurs s'inscrivent beaucoup plus dans l'alternance avec l'ensablement. Ces lieux sont investis dans les années 2000 par des travaux de réhabilitation, partie développée plus loin.

L'analyse diachronique à long terme permet de constater que l'amorce de la mise en culture est antérieure aux années 50. Elle se manifeste par l'apparition de petites parcelles qui tendent à se regrouper. Cette forme de petite culture est liée à l'utilisation de la force animale. L'agriculture apparaît premièrement dans les terrains fertiles, par la suite, elle gagne des

terrains moins propices. Dans les plaines, elle s'étale généralement au détriment du couvert végétal naturel.

Dans les plaines, le constat d'une emprise totale de l'agriculture était perceptible dans les années 1980. Ce constat est confirmé par l'analyse d'images Landsat TM de 1984. Toutefois en termes de fréquence d'utilisation, les terres mises en culture dans les plaines continuent d'être labourées régulièrement. En revanche, pour les parcelles mises en culture sur des terres peu fertiles, le labour n'est plus maintenu de façon permanente. Ces dernières années, nous avons constaté de nouvelles « inscriptions » dans le paysage qui accentuent cette métamorphose et confirment l'emprise humaine grandissante sur ces lieux. On assiste à la construction de maisons d'habitation ; à la mise en culture irriguée ; à la réalisation de retenues des eaux pluviales ; à l'émergence de la culture arbustive ainsi qu'à l'organisation d'un marché de bétail.

L'examen du terrain suggèrent que l'exposition aux risques d'érosion est très forte après le labour des terres. Les sols retournés par la charrue deviennent rapidement secs. D'un côté, l'arrivée des pluies torrentielles forment des ravines et emportent les éléments fins. De l'autre, le vent est capable d'emporter cette matière disponible dans les champs par déflation et saltation. C'est dans cette optique, que nous allons examiner la dynamique spatio-temporelle d'ensablement dans le chapitre suivant.

TROISIEME PARTIE : DYNAMIQUE D'ENSABLEMENT ET PERSPECTIVES D'ACTION

Chapitre 9 : Analyse diachronique à long terme.....	198
Chapitre 10 : Suivi - monitoring de la dynamique d'ensablement.....	209
Chapitre 11 : Les facteurs de la dynamique d'ensablement.....	226
Chapitre 12 : Interaction entre l'action éolienne et l'action hydrique.....	235
Chapitre 13 : Analyse spatio-temporelle régionale de l'ensablement.....	251
Chapitre 14 : Prospective de la désertification.....	273

Introduction

Les régions steppiques algériennes, dont celle de Djelfa, sont le siège d'une dynamique d'érosion éolienne intense. Elle se manifeste surtout lors des séquences d'années sèches, marquées par le recul persistant des précipitations. Durant ces années, on constate le développement d'aires de déflation et d'accumulation. L'action éolienne provoque la mise en mouvement des sédiments pour former des voiles sableux, des dunes de sable et des zones complètement ensablées. Ainsi, le vent devient un agent morphodynamique prédominant.

Toutefois, dans ces régions, nous ne sommes pas en présence de regs et de dunes comme il a été étudié par Callot (1987) ou par (Mainguet *et al.*, 2008). Même s'il existe dans la steppe de grands espaces soumis à l'érosion et à l'action éolienne, néanmoins, ils ne prennent pas l'ampleur qu'ils ont dans le Sahara, comme le Grand Erg occidental qui présente une couverture sableuse quasi continue. En effet, c'est au-dessous de 100 mm de précipitations, que les processus géomorphologiques éoliens deviennent dominants (Figure 2, page 9).

Une des caractéristiques de la mise en place du flux éolien est l'apparition de zones de transit préférentiel (Callot, 1987; Benazzouz, 1994, 2000; Bensaid, 2006), comme le couloir de matériel sédimentaire du «fleuve de sable» du Cap Juby (Tarfaya, Maroc) observé par Callot & Oulehri (1996) au nord du Sahara atlantique. La seule formation sableuse permanente de cette région est le cordon dunaire situé au sud des deux Zahrez qui s'étale sur 150 km. Toutefois cette forme ne résulte pas d'un couloir de transit mais est plutôt liée à des conditions orographiques particulières de l'Atlas Saharien. Il serait donc moins opportun d'appliquer pour cette région, les mêmes méthodes utilisées dans les grands déserts où le sable est omniprésent.

Cette partie examine les transformations de l'état de surface de la couverture sableuse, afin de caractériser la dynamique d'ensablement dans la steppe sur diverses échelles spatio-temporelles. Lors des successions des années sèches, elle progresse. Mais, elle tend à reculer et disparaître du paysage avec le retour des précipitations durant les années pluvieuses, ce qui fait prédominer l'érosion hydrique. En plus des caractéristiques, il est question de déceler les facteurs de la dynamique d'ensablement. L'autre point qui nous intéresse dans cette partie est la juxtaposition de formes d'érosion, du fait de l'alternance entre l'activité éolienne et hydrique. Nous analysons l'interaction et l'échange sédimentaire entre l'érosion hydrique et éolienne. Dans l'optique de généralisation, les résultats de la dynamique d'ensablement obtenus sur le site d'étude seront comparés et rapprochés aux données de trois autres sites distants.

La démarche quantitative apparaît bien adaptée pour l'analyse de l'ensablement afin de mettre en lumière la particularité de cette dynamique. Donc, au cours de cette analyse, il est question de produire des mesures des surfaces ensablées sur chaque série. Ce qui permet, de croiser les résultats obtenus avec les données chroniques du climat des périodes concernées (Figure 112).

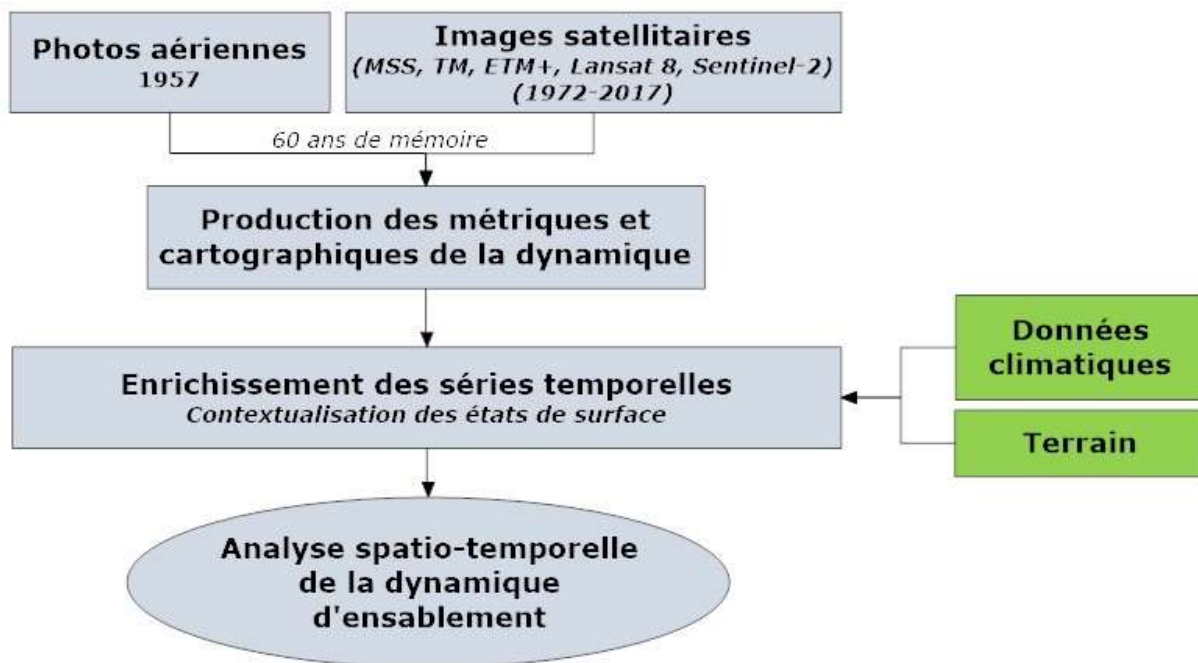


Figure 112 : Organigramme de l'analyse spatio-temporelle de la dynamique d'ensablement

Chapitre 9 : Analyse diachronique à long terme

Le but de cette analyse à grande échelle historique est de questionner l'état des surfaces sur une période de 60 ans et de décrypter les caractéristiques d'évolution de l'ensablement afin de déterminer les trajectoires des changements dans le temps et dans l'espace.

Nous avons sélectionné sept images satellitaires correspondant à des dates différentes. Le choix de ces dates est en partie imposé par la disponibilité des données. Toutefois, nous avons veillé à ce qu'elles traduisent une diversité (variété) climatique interannuelle et ne coïncident pas toujours avec les mêmes tendances climatiques, notamment en termes de pluviométrie. Les dates retenues alternent entre périodes sèches et humides. Cela permet d'enrichir l'analyse et capter l'impact des séquences climatiques différentes sur l'ensablement. Quand le choix d'images était possible, nous avons plutôt privilégié la fin de séquence climatique afin d'intercepter l'impact de la séquence entière sur l'ensablement.

9.1. Le choix des images et des dates

De manière à éviter l'écart d'influence induit par les saisons, nous avons retenu les images prises durant la saison du printemps, entre les mois de mars et mai. Ce choix offre un double avantage. D'un côté, il harmonise les dates pour que les mesures soient véritablement comparables, sans introduire d'éventuels biais liés à la saison. De l'autre, la période est la plus propice au développement de la végétation, ce qui offre, depuis l'image satellitaire, un contraste de réflectance avec le sable. L'utilisation d'images prises l'été aurait engendrée des confusions d'interprétation entre le sable et le sol nu. Les images du printemps sont propices à la discrimination de la couverture sableuse, les limites de celle-ci deviennent plus nettes grâce aux ruissellements qui emportent la fine pellicule du sable. La délimitation de la surface ensablée est faite par digitalisation manuelle sur des photos aériennes, et par classification supervisée sur des images satellitaires.

Les images retenues sont les suivantes :

- 1957 : support le plus ancien en photographies aériennes disponibles sur le site
- 1972 : première image satellitaire couvrant la région.
- 1984 : dernière année d'une séquence sèche qui s'est étalée sur trois ans.
- 1995 : période plutôt humide comparée à la précédente.
- 2003 : dernière année d'une séquence sèche qui a débuté en 1997,
- 2011 : dernière année d'une période humide qui s'est étalée sur une plage de 4 ans.
- 2016 : état le plus récent avec un climat mitigé.

9.2. L'ensablement dans les années 50

Les photos aériennes acquises couvrent les lieux concernés par l'ensablement. L'étude de ces couvertures a permis de découvrir quelques nappes de sable, localisées sur le plateau méridional de la daïa. Le sable se manifeste dans des endroits préférentiels de dépôt, sur le chemin du courant éolien. Le sable s'observe également sur les images des épisodes ultérieurs.

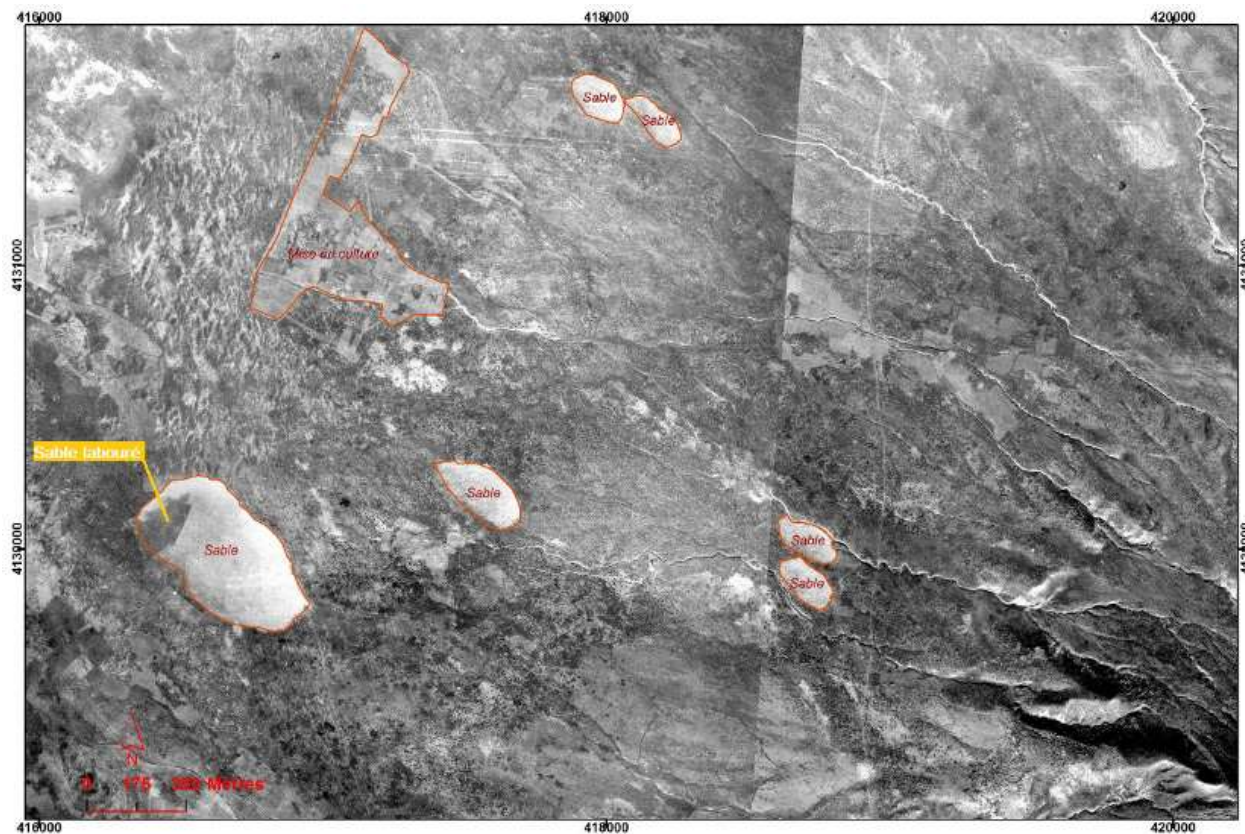


Figure 113 : Petites zones de voile sableux sur le plateau septentrional de Daïet Chouiouia. Parcelles de sables digitalisées manuellement (SHD AV53 du 2 février 1957, clichés 192 et 194)

On observe des petites surfaces de voile sableux discontinues de forme allongée. Ces dernières mesurent autour de 100 mètres de large. La plus importante formation ensablée mesure autour de 350 mètres de large et 650 mètres de long. Dans le site d'étude, la surface globale de ces voiles sableux est quasiment nulle, elle évolue autour de 0.35 km². La mise en culture et le labour d'une partie de ce dépôt sableux sont indiqués sur la photo aérienne (Figure 113), attestant que la couche de sable est mince puisqu'elle est cultivable. Des formations de dépôts sableux semblent évoluer à certaines distances des oueds, ce qui laisse penser que le phénomène est un produit éolien et non hydrique. Ces photos permettent de constater que :

- La dynamique éolienne existait déjà en 1957, elle se manifestait par des petites surfaces de placage de sable. Elle résulte probablement de la grande séquence de sécheresse qui a secoué la région entre 1942 et 1949, avec une récédive en 1953 et 1956.

- La végétation naturelle peu dense couvre le plateau parsemé par des parcelles en défrichage, ce qui traduit un phénomène d'ensablement modéré.

9.3. L'ensablement dans les années 70

La cartographie des zones ensablées depuis l'image MSS d'octobre 1972, met en évidence une première amorce du processus d'ensablement. Les dépôts sableux tendent à se regrouper. Sur le plateau, on dénombre des dépôts plus nombreux et plus importants en surface que ceux constatés en 1957. La carte suivante (Figure 114) affiche cet état d'ensablement.

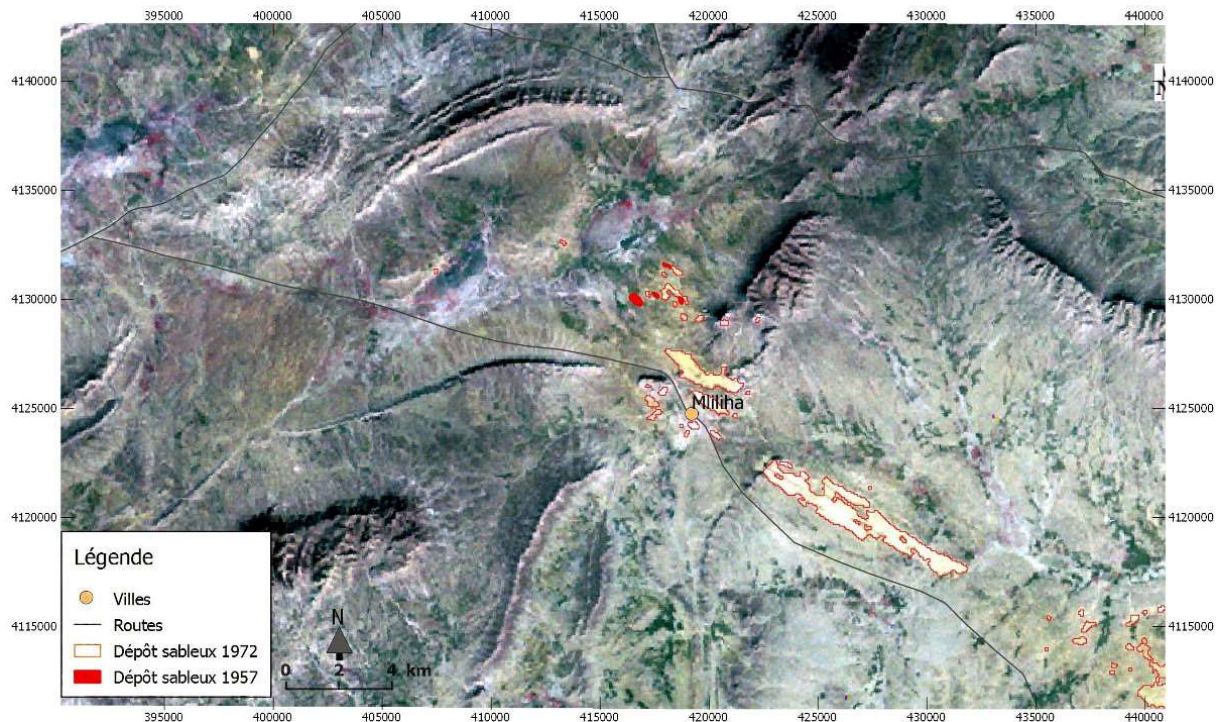


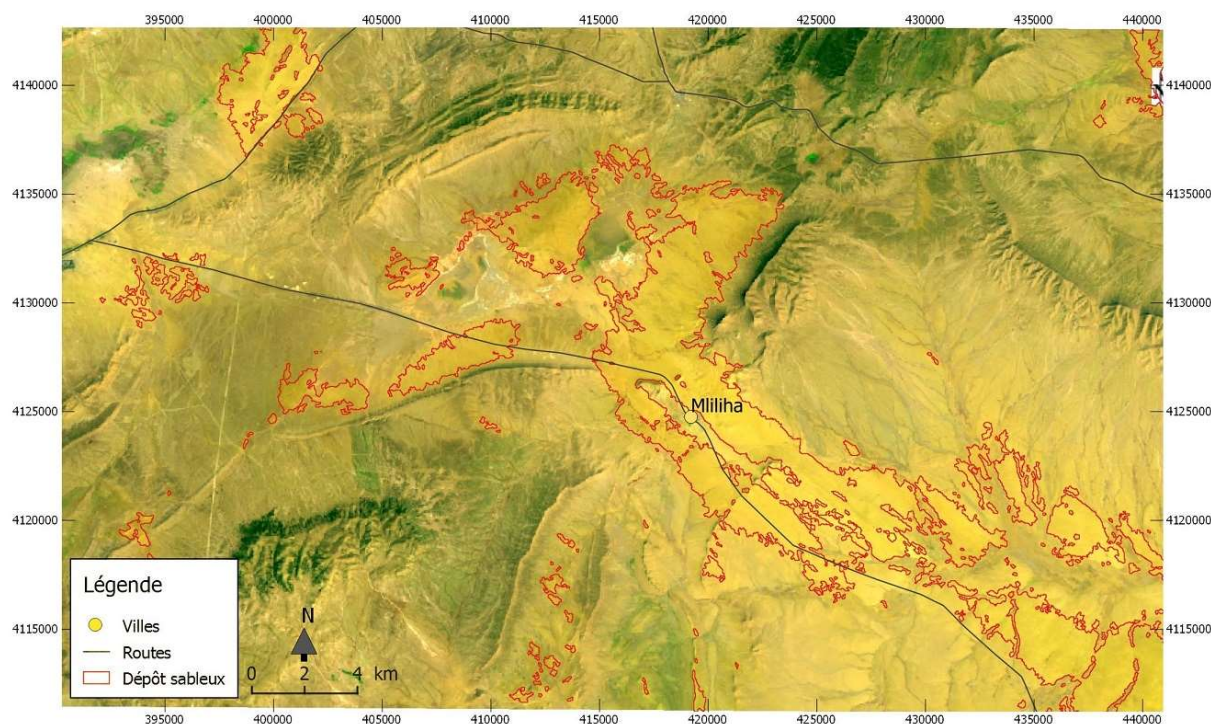
Figure 114 : Carte d'état de surface d'ensablement en octobre 1972, délimitation du sable sur l'image en composition colorée 6-5-4 (image MSS, indice de Kappa=0.99, surface du sable :12 km²)

Au nord de la ville de Miliha, dans l'ouverture entre le Djebel Sbaa à l'Est et le Djebel Kenouir à l'Ouest, les dépôts sableux ont des formes plus allongées. Celles-ci s'expliquent par la présence d'un couloir topographique qui canalise et oriente les flux éoliens. Le sable réapparaît un peu plus au Sud-Est à la rencontre du relief de Rouissat-el-Mehara. Il forme un dépôt allongé de 10 km dont la trajectoire est facilement décelable, il prend la même direction que le premier dépôt sableux formé en amont au nord de Miliha. L'orientation du transit sédimentaire prend la direction du vent dominant NW-SE.

9.4. L'ensablement dans les années 80

L'année 1984 correspond à la fin d'une sécheresse (voir chapitre : Variabilités spatio-temporelles des précipitations) ayant favorisé une crise d'ensablement généralisé : le sable domine partout. Des parcelles ensablées se rejoignent pour former une seule unité sableuse qui s'étend sur 35 km. À l'opposé, la végétation est fortement contractée dans la daïa, bien que l'image soit prise au printemps, saison la plus favorable.

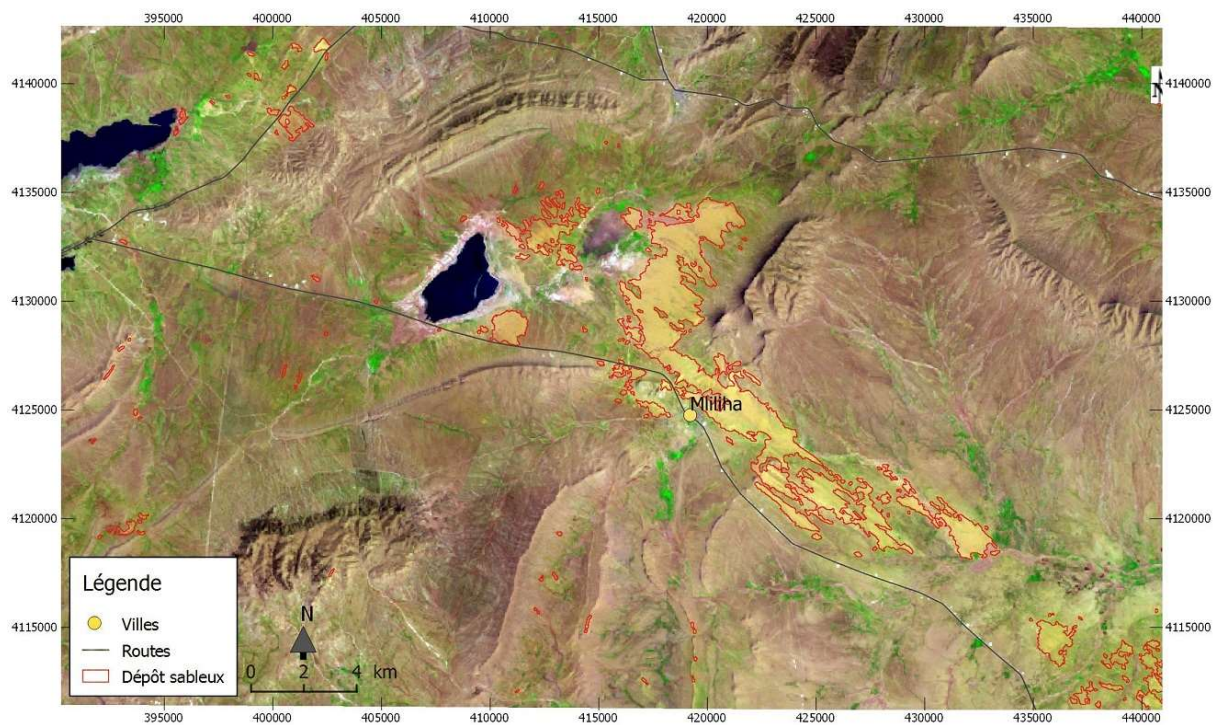
La carte Figure 115 indique qu'au moment de cette crise, l'ensablement affecte non seulement Daïet Chouiouia, mais également, Daïet Tisselouine dans le Nord-Ouest. Le sable se trouve piégé contre le relief du Djebel Kenouir au sud de Daïet Chouiouia. On observe également une déviation de flux éolien sur le flan oriental, le long de la barrière topographique dessinée par le Djebel Sbaa qui développe une base NE-SW sur 6 km, dans une direction divergente au vent dominant. Il bloque et fait dériver le flux éolien vers l'ouverture orographique au nord de Mliliha.



Le long du transit NW-SE, on constate le renforcement du couloir sableux sur plus d'une trentaine de kilomètres, ainsi que son élargissement, en moyenne 4 km. Mais, en termes de délimitation, le sable présente des limites diffuses et moins nettes. L'image est probablement prise après un événement éolien générant un saupoudrage du sable à la surface du sol.

9.5. L'ensablement dans les années 90

L'analyse de l'image de 1995 (Figure 116) contraste avec celle de 1984. En effet, les limites du sable deviennent plus nettes, ce qui indique la disparition des couches fines emportées principalement par le ruissellement, ou par la conquête de la végétation. La surface sableuse diminue de 70% entre 1984 et 1995.



Cette année propice aux précipitations s'est manifestée aussi par le remplissage des deux daïas de Chouiouia et de Tisselouine. Sur d'autres images examinées, le remplissage des daïas a persisté jusqu'à fin juillet en dépit de la forte évaporation pendant la saison estivale.

9.6. L'ensablement en 2003

Le retour massif du sable évoque un état de crise semblable à celle constatée 20 ans auparavant en 1984. On observe de nouveau une extension des zones ensablées, signe d'accélération de l'activité éolienne. Le sable a triplé sa surface en comparaison avec 1995. Il gagne les plateaux, les bordures des daïas et les versants du relief. Le couloir de transit éolien reprend de l'ampleur et devient plus large (Figure 117). La couverture sableuse forme une unité sédimentaire continue.

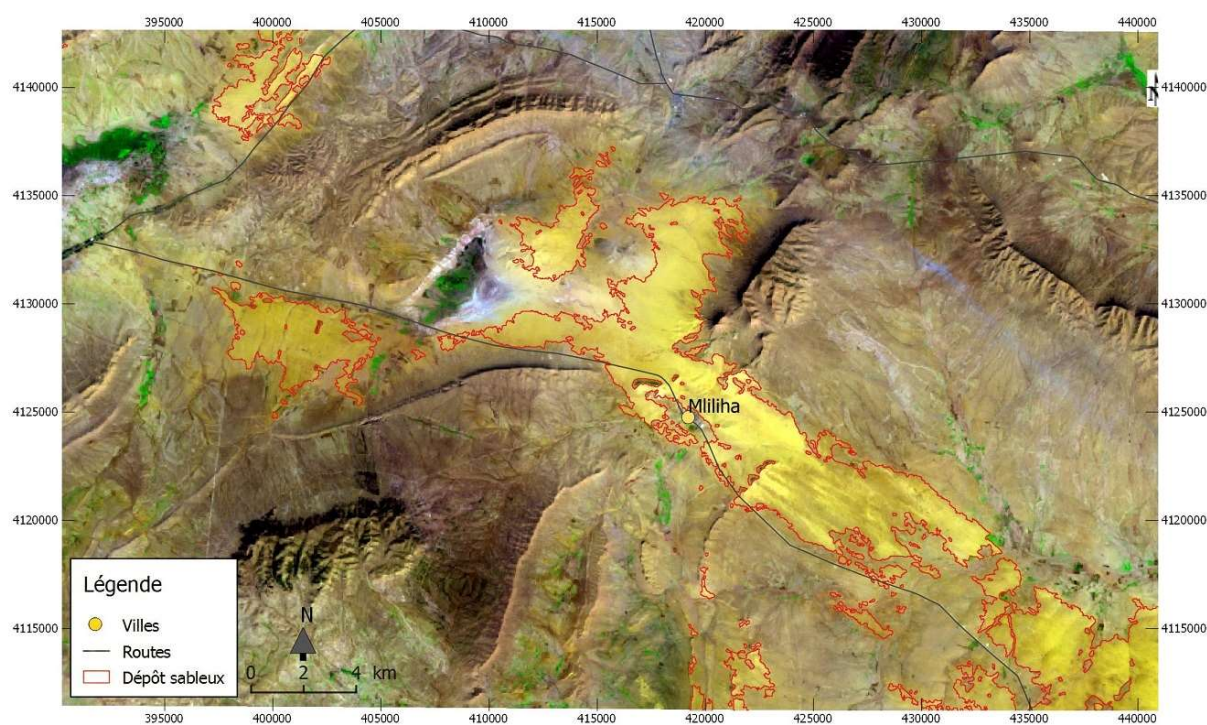


Figure 117 : Carte état de la surface d'ensablement en mars 2003, délimitation du sable sur l'image en composition colorée 5-4-1 (image ETM+, indice de Kappa= 0.61, surface ensablée= 128 km²).

9.7. L'ensablement en 2011

Le sable disparaît presque complètement du paysage, le phénomène semble ainsi presque complètement résorbé. Une baisse sensible de surface (86%) depuis l'image de 2003 traduit l'importance de cette dynamique. En termes de répartition spatiale (Figure 118), il reste quelques résidus et reliquats formés par des couches sableuses très épaisses dépassant parfois les deux mètres. Dans la partie sud, le sable est caché à l'abri du vent dominant. Témoin supplémentaire de cette amélioration, la prolifération de la végétation, qui dans les daïas et les plaines, affiche un retour en nette amélioration.

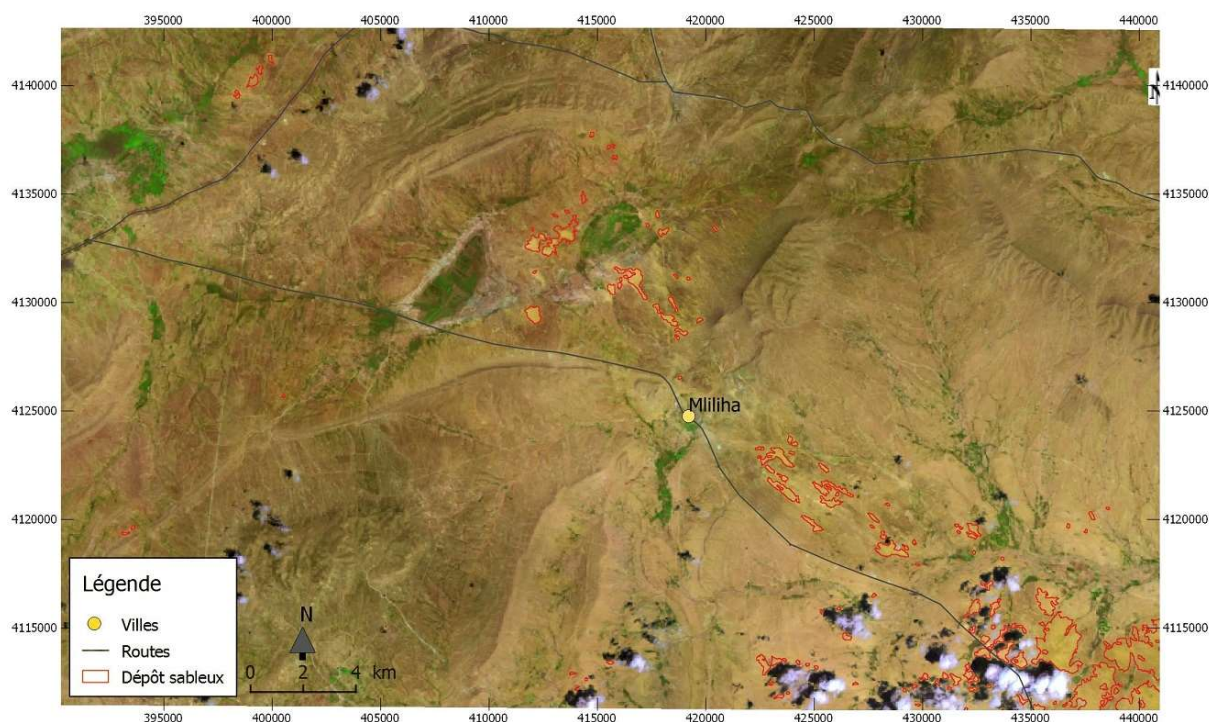
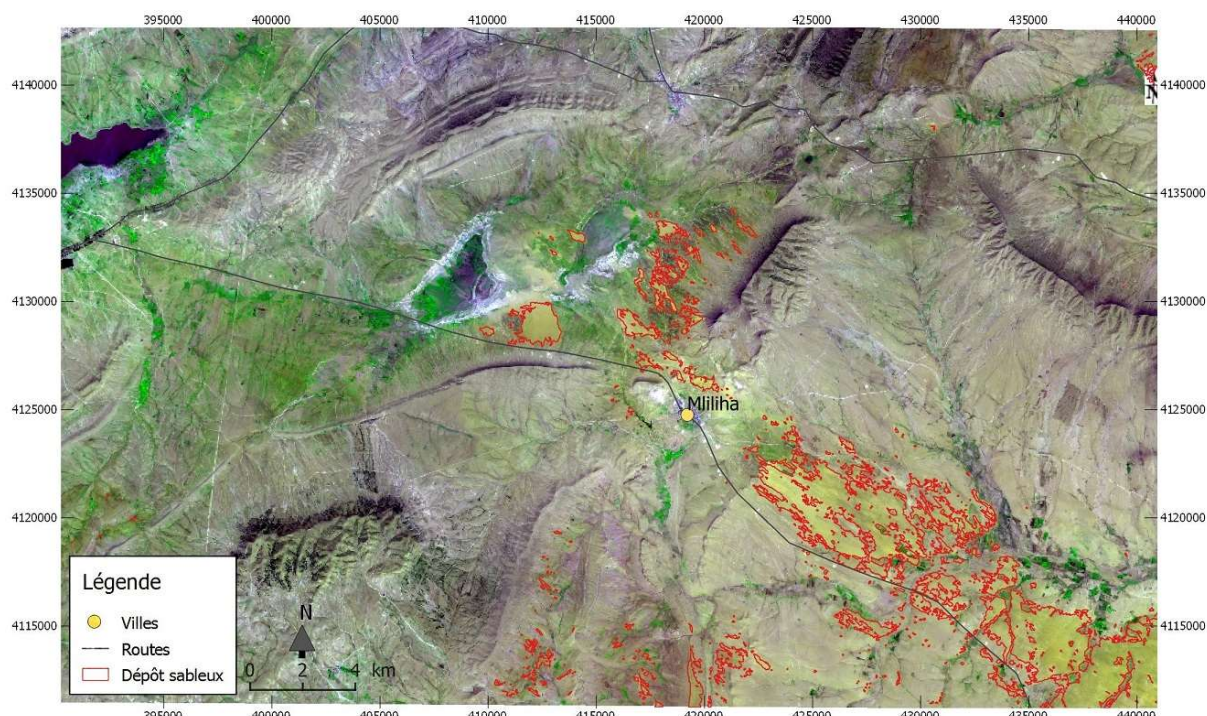


Figure 118 : Carte d'état de la surface d'ensablement en avril 2011, délimitation du sable sur l'image en composition colorée 5-4-1 (image ETM+, indice de Kappa=0.92, surface ensablée = 17 km²). Présence de quelques nuages sur les bordures sud-est, qui ont impacté les mesures à la baisse.

Nos constatations de terrain de 2013 confirment la tendance observée sur l'imagerie de 2011, à savoir le recul du sable. Il n'en reste que dans quelques endroits sous la forme de petites parcelles. Le terrain révèle ainsi qu'une partie non visible (détectée) par satellite existe sous forme de mottes de sable épaisses conquises par la végétation. Ces formes se trouvent tout au long du couloir de dépôt sableux. D'autres sites ont été végétalisés dans le cadre d'un projet de fixation du sable.

9.8. L'ensablement en 2016

Le retour du sable est observé avec des étendues plus conséquentes dans la partie sud. Il s'agit d'un saupoudrage sableux de nouvelles pellicules fines de sable. Le terrain aussi nous a permis de confirmer ce diagnostic d'un sable piégé par la végétation et la surface irrégulière formée par des mottes végétalisées.



Dans le prolongement d'une année 2015 déficitaire, l'année 2016 débute avec un hiver sec. Cette déficience pluviométrique dure jusqu'au début du printemps. Le retour des précipitations, avec des quantités habituelles, n'est enregistré qu'en février. Cela donne lieu au remplissage en eau de la daïa de Tisselouine visible sur la Figure 119. Ce retard de précipitation n'a pas permis le développement à temps d'un tapis végétal protégeant le sol. Dans ces conditions d'assèchement, les terrains labourés dans la daïa et les plaines se trouvent sans protection contre l'action éolienne.

9.9. Analyse de la dynamique temporelle d'ensablement

Pour mieux apprécier l'analyse de la dynamique oscillante entre extension et contraction du sable en lien avec les variations climatiques, nous avons réalisé un graphique de jalons « Timeline » (Figure 120) couvrant la période 1972-2016. Les surfaces de sable sont sur l'axe des ordonnées, les abscisses indiquent le niveau de sécheresse annuelle, la couleur exprime le degré de sévérité calculé par l'indicateur SPI-12. La durée qui sépare les deux états de surface (images) est restituée également, elle aide le lecteur à apprécier les temporalités du changement. Par ailleurs, la couleur des flèches indique la tendance d'ensablement (positive, négative).

L'amorce est constatée en 1972, identifiée par la multiplication des zones d'accumulation. En effet, elles deviennent plus nombreuses, plus importantes et forment une unité sableuse conséquente dans les aires de dépôt et de transit. Preuve que l'action éolienne prend de l'importance, c'est sa capacité à mobiliser le matériel en formant un couloir sableux sur 10 km.

Après la grande sécheresse régionale des années 80 (détectée par la station de Djelfa sur une seule année, 1984, comme étant de grande sévérité de sécheresse, point : 0), on assiste désormais à la généralisation de l'ensablement. L'image de 1984 met en évidence l'abondance et l'ampleur de celui-ci. La couverture sableuse recouvre la majeure partie du plateau méridional de la daïa et le couloir sableux. Elle forme une seule unité sableuse sur une distance de 35 km. Signe d'amplification, la remobilisation des sables augmente et affecte désormais une superficie plus étendue (136 km²) soit 11 fois la surface enregistrée en 1972.

Sur la première série, constituée de trois dates (57, 72 et 84), on constate que l'évolution de la surface sableuse progresse. Cette tendance se renverse en 1995. En effet, le sable recule de 70 % pour ne couvrir que 41 km². La sévère sécheresse enregistrée entre 1999 et 2002 a stoppé ce recul pour revenir vers une crise d'ensablement. Une nouvelle fois, le secteur se trouve balayé par une forte déflation. En surface, le vent déplace le matériel mobilisable. Les surfaces ensablées ont triplé en 2003. Les formes et les caractéristiques de cet épisode sont semblables à ceux constatés en 1984. Ils traduisent également la progression de la dégradation environnementale.

Le retour de précipitations abondantes dès 2009 a induit un rétrécissement des zones sableuses, confirmé sur l'image de 2011. Le sable ne couvre désormais que 17 km², niveau proche de celui enregistré en 1972. Signalons ici, que durant cette période (2005-2010), le plateau septentrional de la daïa a bénéficié des travaux de mise en valeur pour la fixation de sable par l'implantation d'une plante spécialisée « *Atriplex Canescens* ». Nous évoquerons ce point plus loin.

L'examen des variations présentées dans la Figure 120, ainsi que les cartes, font ressortir les principales caractéristiques de la dynamique des sables dans les régions steppiques à la fois dans le temps et dans l'espace :

- La variation de l'ensablement exprimée par la surface sableuse n'évolue pas dans un seul sens, elle est oscillante. La surface sableuse fluctue entre des périodes de pics d'ensablement et des périodes de régressions traduites par un recul de l'étendue de la surface sableuse.
- Les variations d'extension ou de rétractation ne se font pas à vitesse régulière. Les données dont nous disposons, suggèrent l'absence d'un rythme séquentiel et chronologique d'ensablement.
- Pendant les années de crises, une couche fine de sable a recouvert le relief environnant, toutefois, on peut observer une direction préférentielle de migration du sable. Ce dernier emprunte le trajet du vent dominant du Nord-Ouest vers le Sud-Est.
- La disposition du relief oriente le flux éolien déposant ainsi sa charge tout au long de la trajectoire sous forme d'un couloir sableux.
- Les épisodes de crises et de stabilité de l'ensablement entrent logiquement en résonance avec les variations pluviométriques. Pendant la succession d'années humides, la surface ensablée s'estompe puis régresse, conduisant presque à sa disparition du paysage. Les séquences d'années sèches réactivent le processus d'ensablement pour provoquer un important remaniement éolien.

Cependant, il convient de remarquer que ces mesures ne donnent pas d'indications précises sur une possible variation de l'ensablement, voire une inversion à l'intérieur de la même période. En effet, la surface mesurée indique simplement l'état d'ensablement à la date de prise d'images. Une longue période peut comporter de courtes séquences inverses. C'est pourquoi nous allons développer une analyse de suivi sur une période décennale avec une temporalité annuelle.

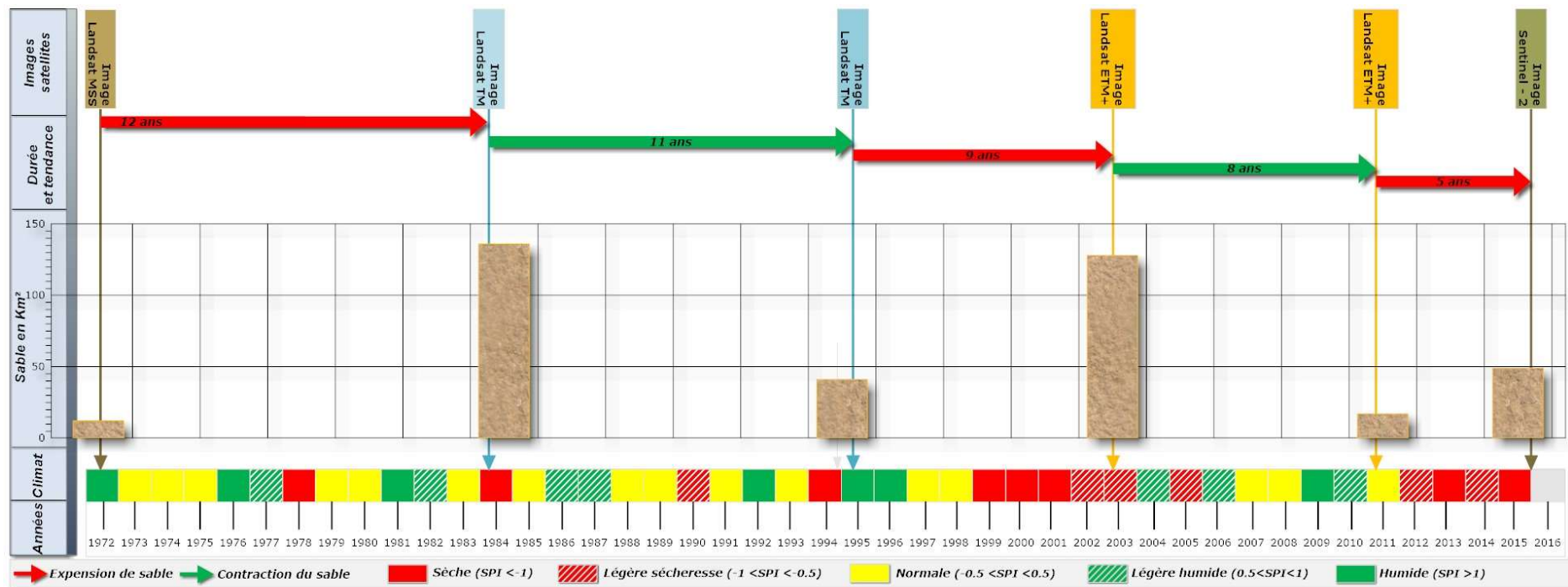


Figure 120 : Tendances à l'ensablement entre 1972 et 2016 et liens avec la pluviométrie d'une année agricole, région de Djelfa (Algérie).

Chapitre 10 : Suivi- monitoring de la dynamique d'ensablement

10.1. Suivi- monitoring d'ensablement sur une temporalité annuelle

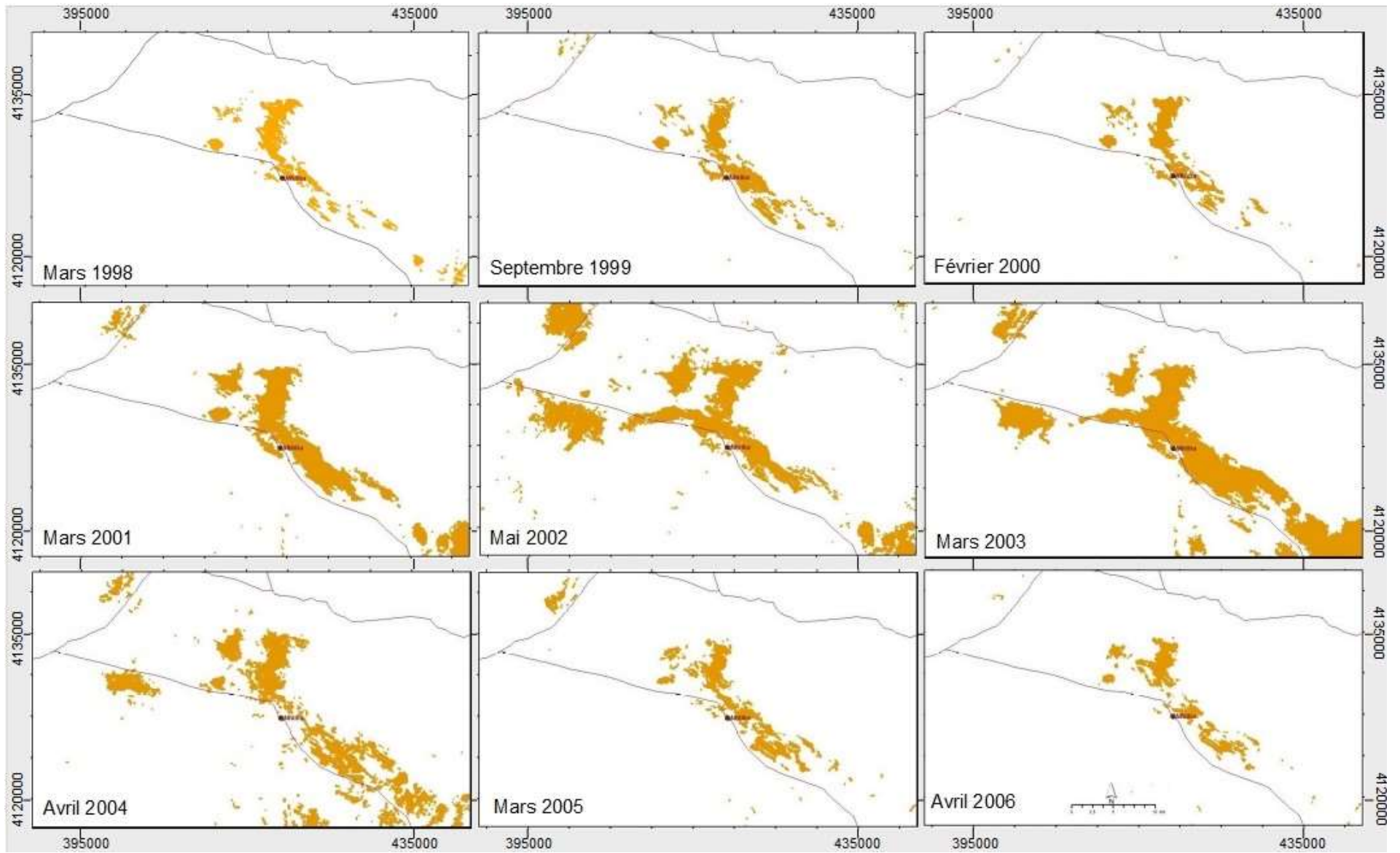
L'objectif de cette partie est d'analyser le suivi de la dynamique d'ensablement avec des pas de temps plus fins que dans les chapitres précédents. Le choix de la période à étudier est un élément essentiel dans le diagnostic de cette dynamique. En effet, une décennie stable ne permet pas de mettre en exergue la vitesse, l'ampleur de ses variations qui peuvent caractériser ce changement. Raison pour laquelle nous avons souhaité examiner une série d'images couvrant à la fois une séquence climatique sèche et une autre humide, afin de capter au plus près la genèse d'ensablement, ainsi que les conséquences de la fluctuation des précipitations sur la remobilisation du matériel par l'action éolienne. L'autre condition est la disponibilité d'images satellitaires adéquates et de bonne qualité couvrant la plage choisie. Nous avons également maintenu notre choix de privilégier la période du printemps dans les prises d'images. Après un dépouillement grâce à l'outil développé pour la gestion des images (point 3.4.2.1), la période retenue a été de 1998 à 2010. La série d'images sélectionnées se compose de 13 images satellitaires Landsat. Deux images sont de type TM et les 11 restantes sont issues de Landsat 7 ETM+. Le Tableau 24 liste le détail de ces images.

Tableau 24 : série d'images utilisée pour le suivi annuel de l'ensablement

Image	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Type	TM	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+
Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Précipitations		X									X		
Ensemble			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

L'intérêt de cette série est de couvrir la séquence climatique sèche de 5 années entre 1998 et 2003 et la séquence de retour d'humidité à la normale dès 2004. De cette façon, cette plage de dates nous offre la possibilité de capter l'état d'ensablement au début de la sécheresse, pendant la crise et d'assister à la fin de cette crise avec le retour des précipitations à la normale.

En termes de méthodologie, l'exploitation des images de cette série est identique à la partie précédente (Chapitre 11). Elle repose sur les étapes préparatoires de prétraitement ainsi que la correction des défauts liés aux miroirs puis la classification supervisée des surfaces ensablées sur chaque image. La précision de la classification est calculée par l'indice de Kappa, les résultats sont restitués dans le tableau suivant (Tableau 25).



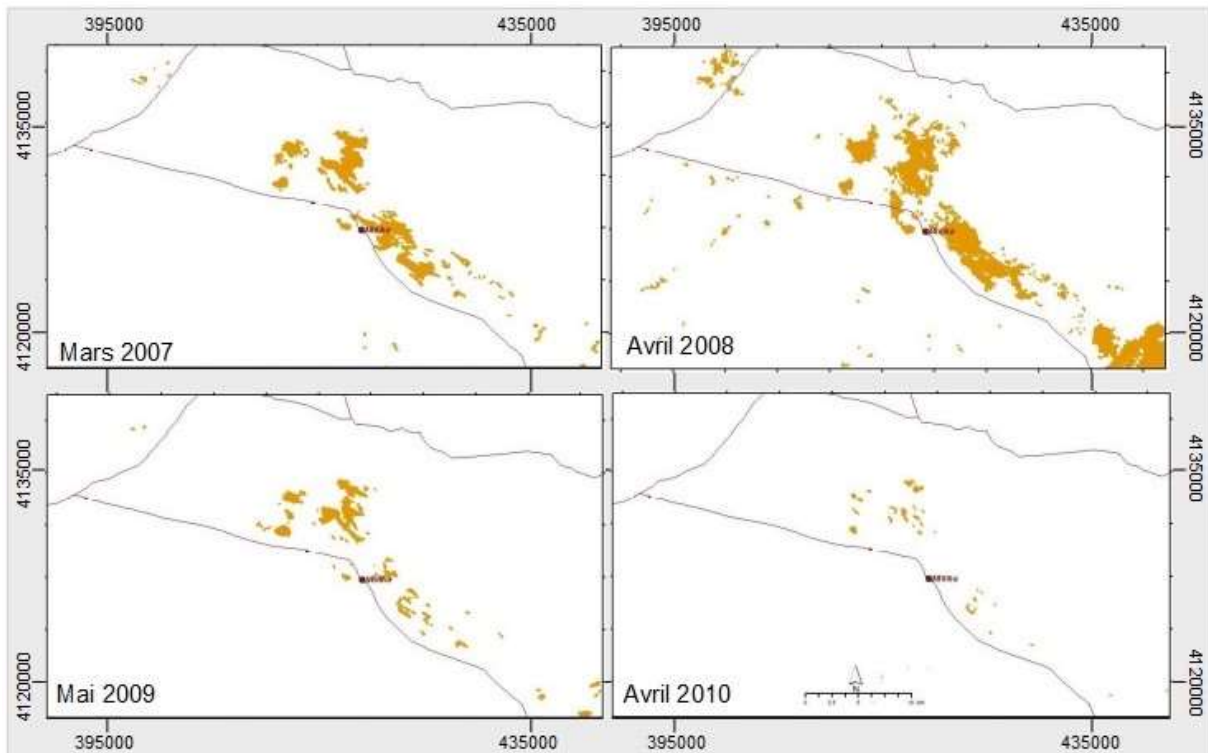


Figure 121 : Dynamique spatiale d'ensablement entre 1998 et 2010 extraite depuis les images satellitaires

Tableau 25 : l'indice de Kappa calculé sur la série temporelle

	08/03/1998	11/09/1999	02/02/2000	24/03/2001	14/05/2002	14/03/2003	17/04/2004	06/05/2005	23/04/2006	01/03/2007	28/04/2008	17/05/2009	02/04/2010
Kappa	0,68	0,79	0,81	0,73	0,91	0,76	0,78	0,97	0,92	0,86	0,88	0,78	0,89

Les valeurs de l'indice évoluent entre 0,7 et 0,9, elles traduisent ainsi une bonne classification relative, par conséquent, nous pouvons exploiter ces résultats. La question de la dynamique spatiale est traitée à travers deux axes, à savoir : durant la phase de progression et lors de la phase de régression. Les résultats du traitement cartographique sont restitués dans la Figure 121.

La surface ensablée affiche des variations d'une année à l'autre. Le profil de ces changements est très varié. Pour simplifier, nous les classons dans trois catégories :

- 1- Tendence stable, avec de légères variations à la hausse comme à la baisse, par exemple, les trois premières années de 1998 jusqu'à 2000.
- 2- Tendence annuelle à forte expansion de la zone sableuse. Elle reflète une forte dynamique d'ensablement s'accroissant d'une année à l'autre. La période de 2000 à 2003 reflète bien cette phase progressive.

3- Tendence annuelle à forte rétraction où les zones ensablées se recroquevillent assez rapidement. Cette tendance incarne une dynamique d'ensablement négative dont la couverture sableuse recule d'une année à l'autre. La série d'années de 2003 à 2006 reflète bien cette contraction. On observe qu'il y a eu une recrudescence d'ensablement sur une seule année, en 2008.

L'aspect le plus spectaculaire des variations du phénomène d'ensablement est leur rapidité. En l'espace de trois ans, la surface ensablée a quintuplé, ce qui indique une crise d'ensablement. La même rapidité s'observe également pendant la phase régressive. En effet, comme nous pouvons le lire dans le diagramme (Figure 122), entre 2000 et 2003, la surface ensablée a quintuplé en passant de 23,6 km² à 123,6 km². Le même aspect est conservé pendant la phase de recul, entre 2003 et 2005, la surface sableuse se contracte pour atteindre 27,7 km².

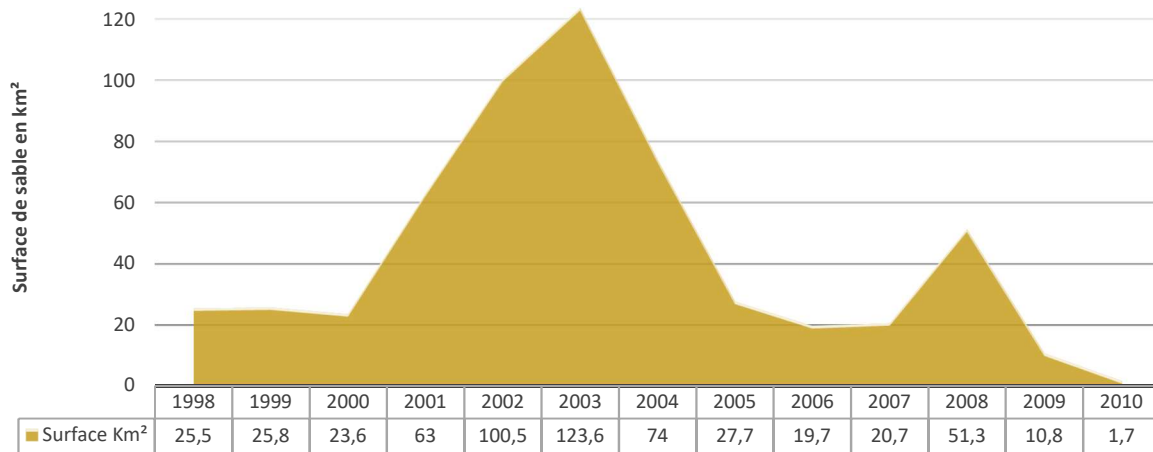


Figure 122 : Évolution de la surface sableuse entre 1998 et 2010

En 2006 et 2007, la surface sableuse retrouve le niveau d'avant la crise enregistrée en 1998. Un autre pic d'ensablement est observé en 2008, avant de baisser significativement en 2009 pour s'approcher de la valeur nulle en 2010, ce qui traduit la quasi disparition des surfaces sableuses.

Ces résultats nous permettent d'apprécier la forte dynamique d'ensablement. Une extension rapide de la couverture sableuse se produit durant les années sèches A l'opposé, une rétraction spectaculaire du sable est constatée pendant les années humides. Cette capacité de changement rapide souligne la vélocité du phénomène d'ensablement. Mais une question subsiste : celle des caractéristiques spatiales de cette dynamique. Existe-t-il des zones préférentielles dans lesquelles le sable exprime une première manifestation ?

10.1.1. Caractéristiques spatiales de la dynamique d'ensablement

Afin de déceler les caractéristiques spatiales d'ensablement il est judicieux de séparer la phase de progression de celle du repli. Nous allons présenter les résultats cartographiques séparément.

10.1.1.1. La phase d'expansion de 2000 à 2003

L'analyse comparative des images et des cartes produites sur cette période montre que l'augmentation de la surface ensablée apparaît d'abord dans l'est du bassin de la daïa. Le sable est ensuite repris par le vent pour être redéposé progressivement et pour former les prémices d'un couloir d'ensablement d'orientation NW-SE, visible sur l'image de 1998 (Figure 123).

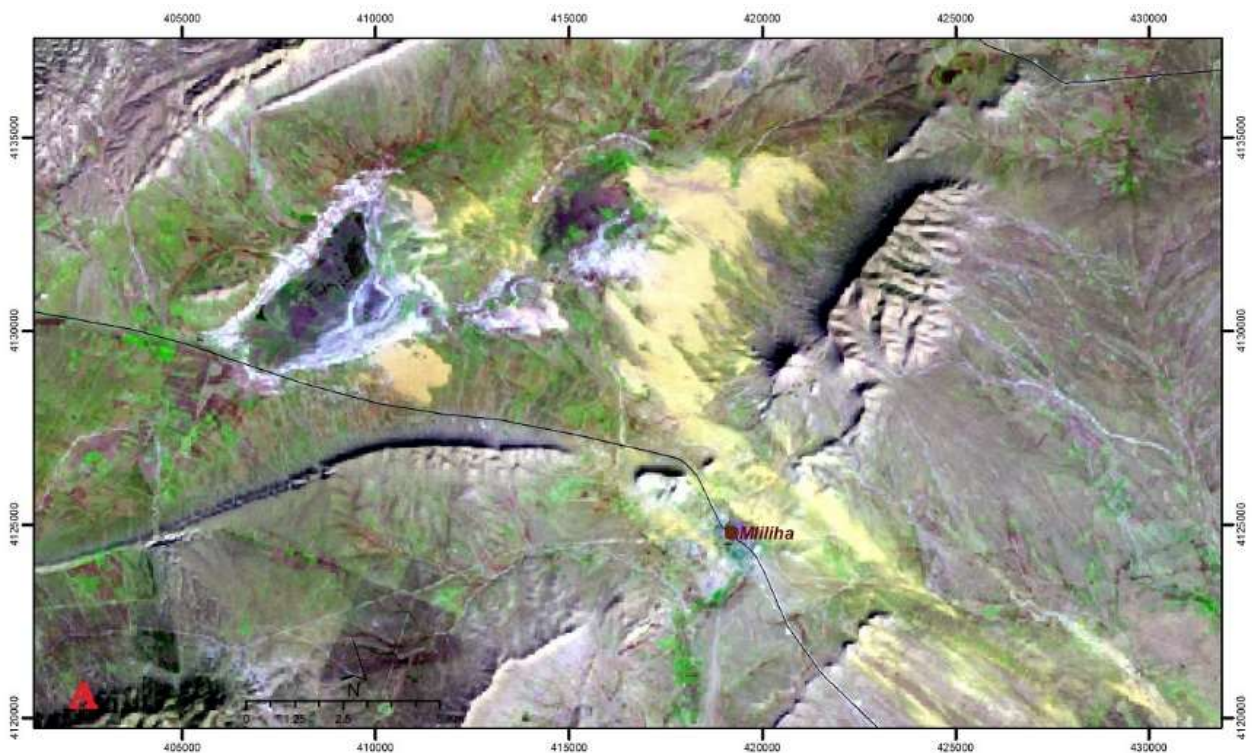


Figure 123 : État de l'ensablement en mars 1998, Daïet Chouiouia
(Composition colorée d'image Landsat 5 TM)

Dans l'étape suivante, non seulement, l'ensablement se renforce dans la zone de dépôt antérieur, mais il se déploie davantage pour couvrir de nouveaux espaces sur le plateau autour de la daïa ou sur le couloir de transit. L'unité sableuse est assurée par un dépôt en continu sur un trajet de plus de 30 km. L'image qui suit de 2001 (Figure 124) illustre cette dynamique.

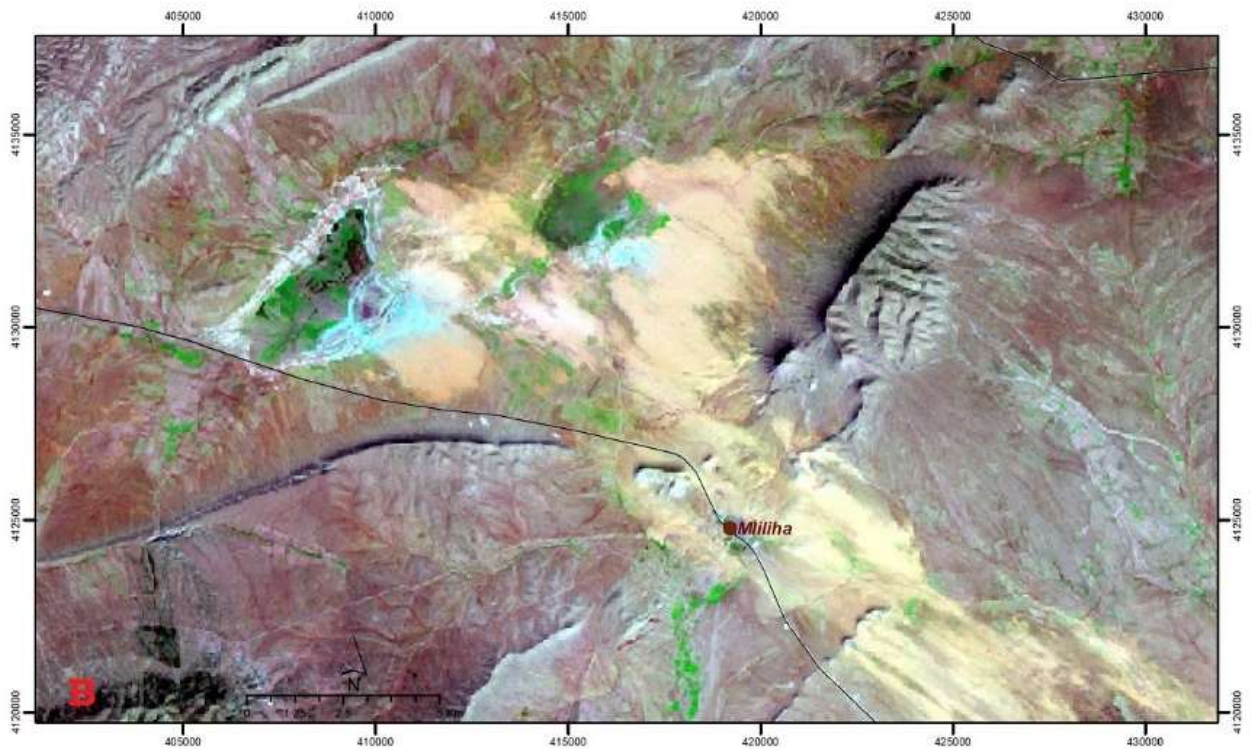


Figure 124 : État de l'ensablement en mars 2001, Daïet Chouiouia
(Composition colorée 5-4-1, images Landsat 7 ETM+)

En phase ultime, l'ensablement s'aggrave pour atteindre les plaines orientales de la daïa épargnées jusque-là. L'étalement des placages et des dépôts sableux est renforcé dans la dépression de la daïa et sur l'ensemble du plateau du flan septentrional du Djebel Sbaa. Le dépôt sableux est marqué par des limites moins nettes, plus diffuses, résultat d'un saupoudrage sableux généralisé. L'image prise en 2003 (Figure 125) exprime cette crise d'ensablement.

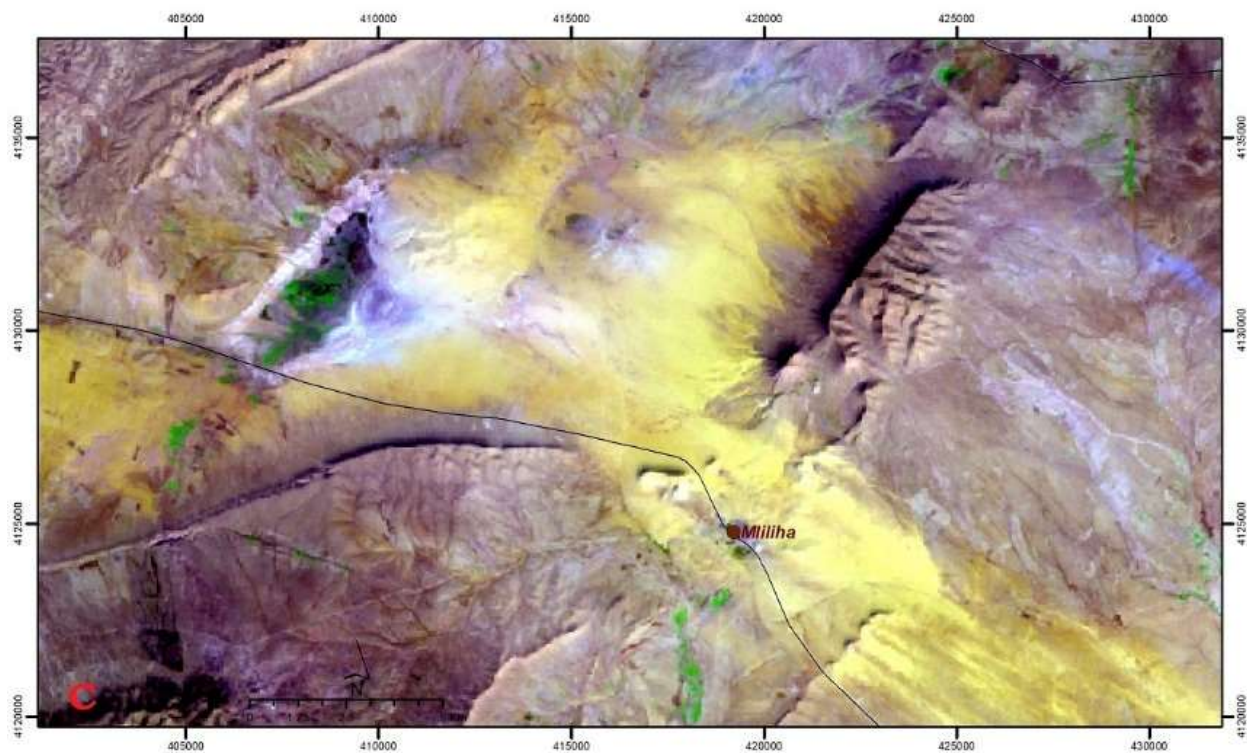


Figure 125 : État de l'ensablement en mars 2003, Daiet Chouiouia
(Composition colorée5-4-1, image ETM+)

La Figure 126 correspond à une carte de la dynamique de progression d'ensablement entre 2000 et 2003. Elle récapitule les différentes phases de cette période et donne un aperçu de l'ampleur que peut avoir ce phénomène pendant une séquence de crise d'ensablement.

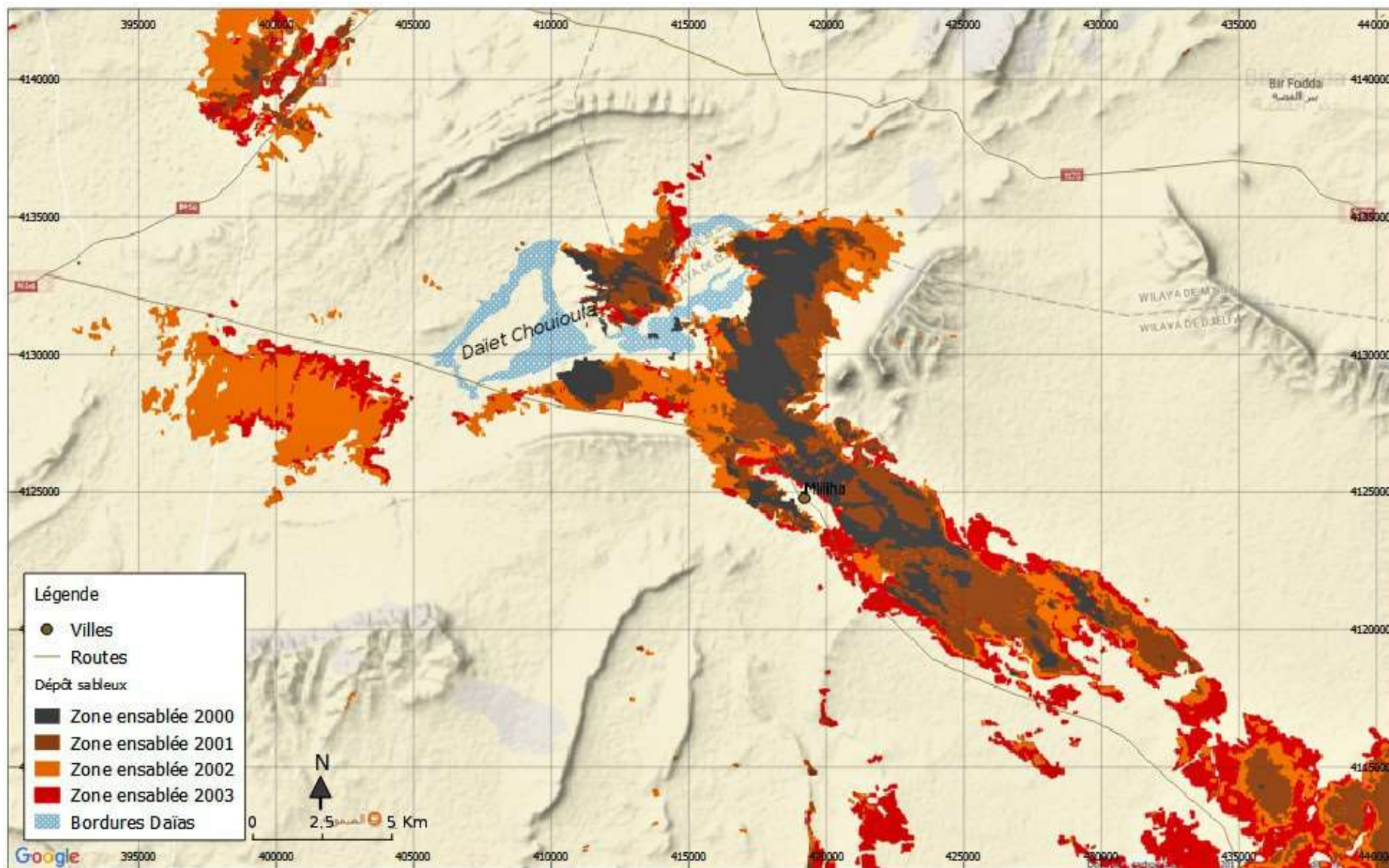


Figure 126 : Dynamique d'ensablement annuelle de 2000 à 2003 en période d'expansion, fond cartographique Google

10.1.1.2. La phase de régression de 2003 à 2006

Le recul de la surface ensablée est entamé dès 2004, dans le sillage du retour d'une pluviométrie favorable qui dépasse les moyennes, annonçant la fin de la séquence sèche. En effet, l'espace ensablé a la baisse la plus spectaculaire en 2004 : il recule de 52,6 km² soit 42% de la surface (Figure 127). Cette contraction s'opère sur l'ensemble de la couverture sableuse.

La tendance enclenchée en 2004 continue en 2005, avec un repli de 46,3 km² représentant ainsi 37% de la surface originelle constatée en 2003. En fait, c'est durant les deux premières années qu'il semble y avoir l'essentiel du retrait soit 79% de la surface. L'aspect surfacique de ce produit sableux ne représente plus une seule unité, il est plus espacé et parcellaire. L'année suivante 2006, avec un apport pluviométrique positif, s'inscrit également dans cette dynamique. La surface sableuse passe de 27,7 km² à 19,7 km². Sur la carte (Figure 127), on constate que l'espace s'est fortement réduit pour se recroqueviller dans des endroits qui étaient auparavant des lieux de dépôts privilégiés lors de la phase de progression. Cela suggère de fortes épaisseurs de dépôts sableux. Cette déduction a été confirmée sur le terrain, où nous avons constaté des épaisseurs sableuses dépassant les 2 mètres (Figure 139).

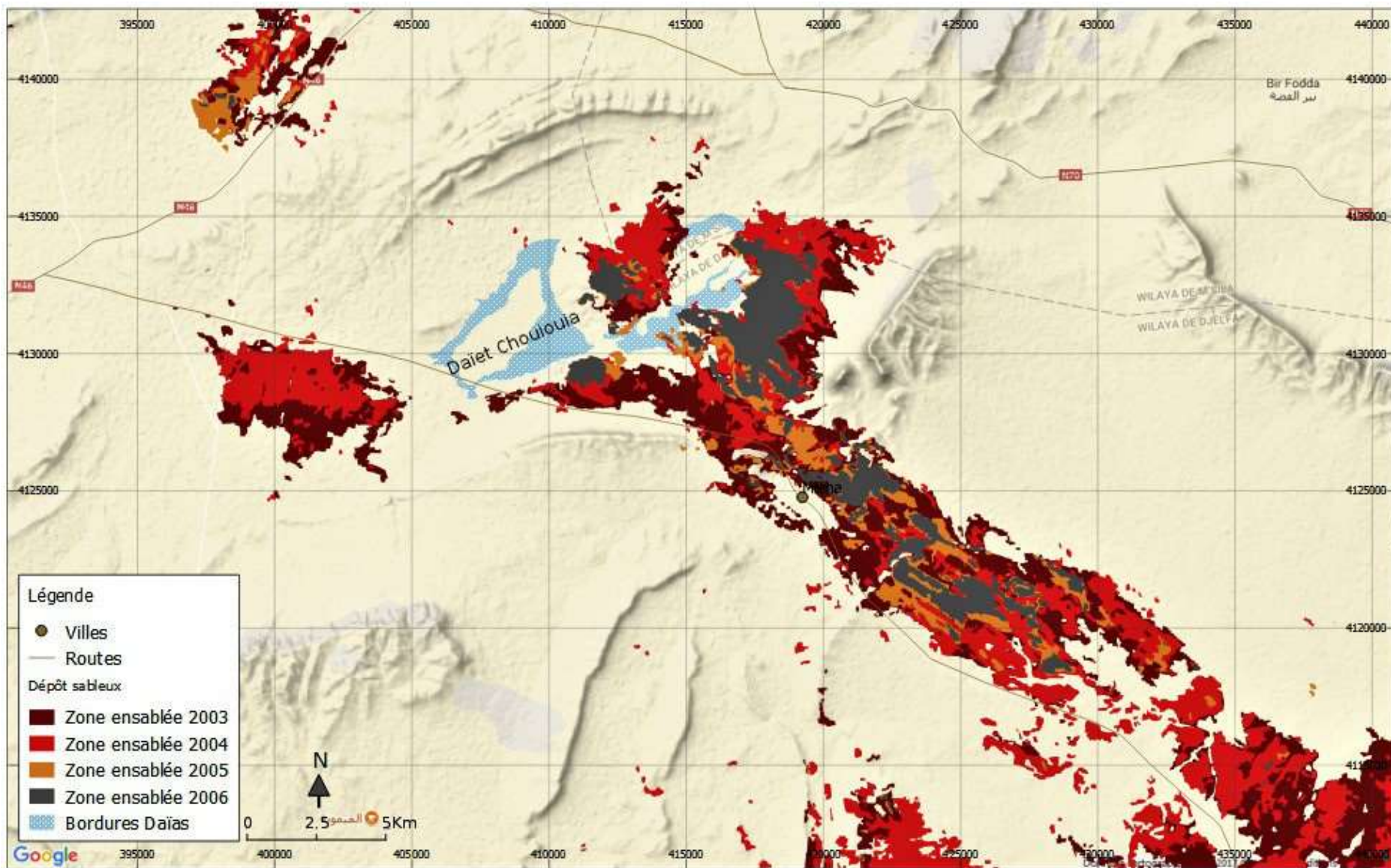


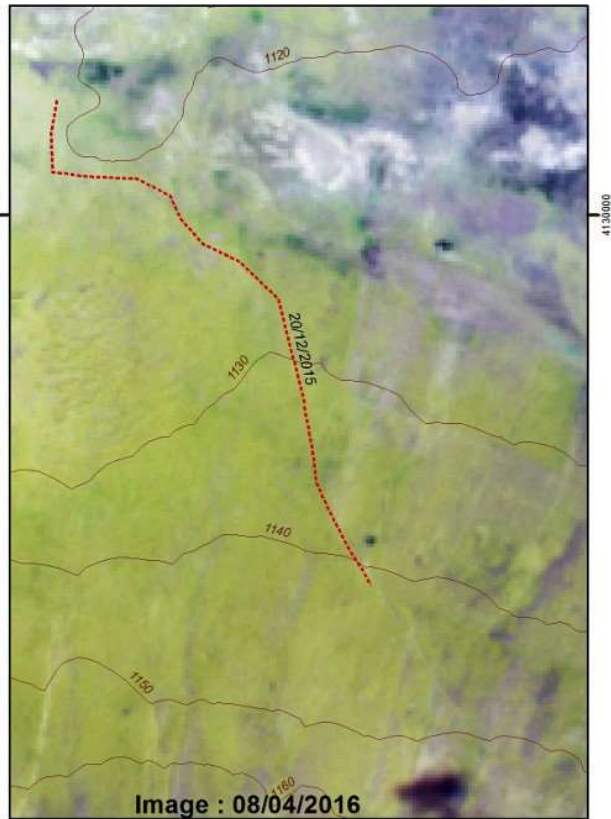
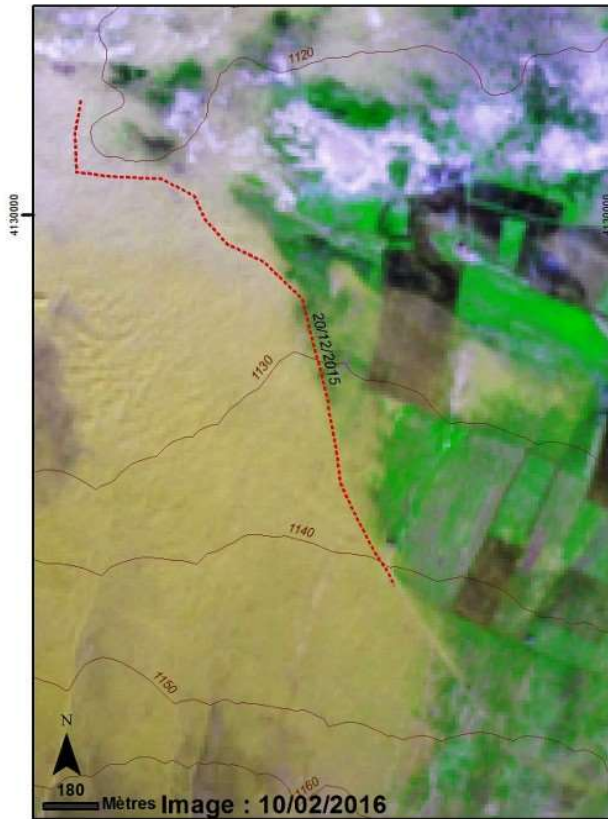
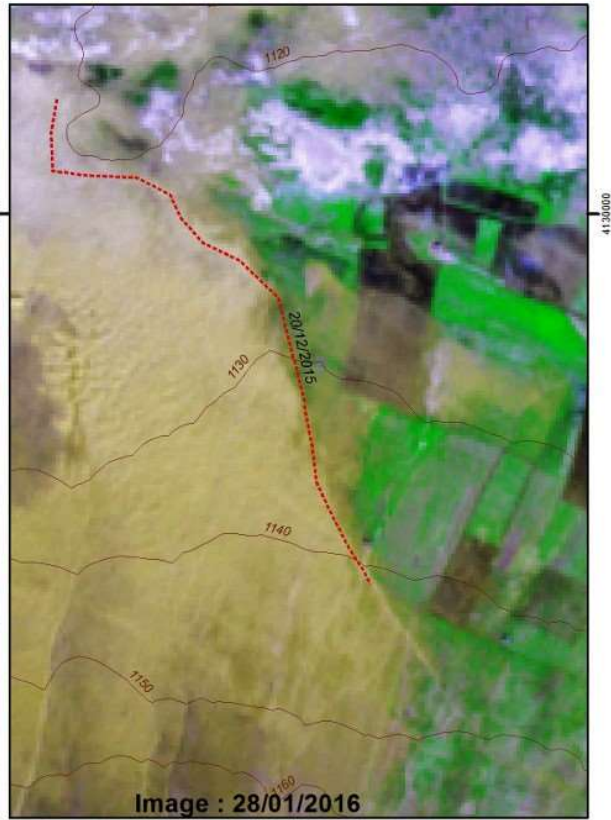
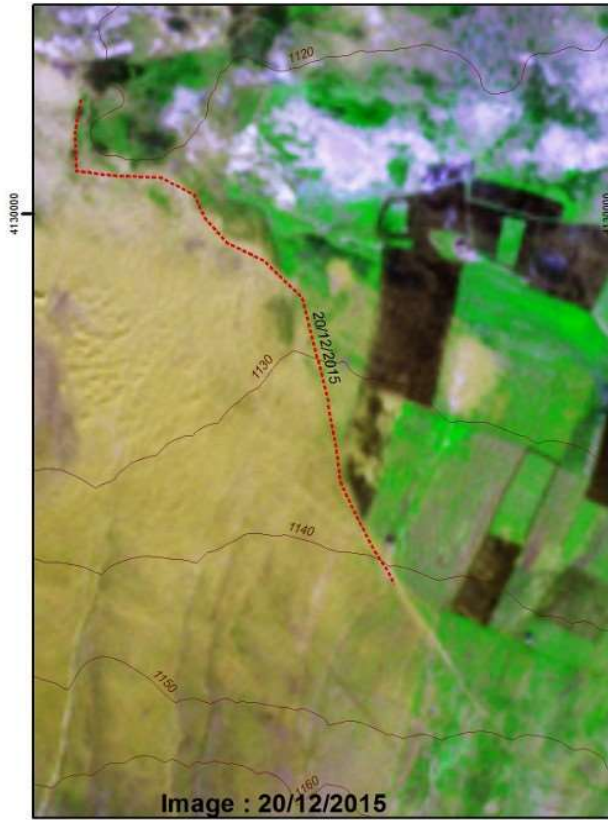
Figure 127 : Dynamique d'ensablement annuelle de 2003 à 2006 en période de régression, fond cartographique Google

10.2. Suivi- monitoring d'ensablement sur une échelle spatio-temporelle fine

Dans cette analyse, des images de Sentinel-2 ont été utilisées. Elles ont une meilleure résolution spatiale (10 mètres/pixel) et une meilleure fréquence de couverture (10 jours). Sur la liste des images annuelles 2015-2016, une série constituée de 8 images a été retenue. Elle couvre la période de la fin de l'automne 2015 correspondant à la période de labour des terres, jusqu'au milieu de juillet 2016 et la fin des récoltes. Trois sites propices afin de suivre les variations des états de surface ont été choisis :

1. Le premier, sur la bordure méridionale de la daïa contient à la fois des placages sableux et des terrains mis en culture. Il est considéré comme un lieu de contact entre ces deux modes d'occupation du sol.
2. Le deuxième, sur la limite nord de la daïa, contient également une petite parcelle ensablée qui semble isolée. La topographie est un peu bombée par un relief nommé Draa Naam.
3. Le troisième est situé dans les plaines occidentales, au contact avec le Djebel Kenouir, au niveau d'une cluse, lieu de passage d'un cours d'eau qui draine le versant nord du Djebel Guedid. Sa particularité est qu'il est en dehors du couloir sableux identifié précédemment. Il sert de témoin pour comparer la dynamique d'ensablement avec les deux premiers sites.

Les résultats des traitements en composition colorée des images temporelles de ces trois sites sont restitués dans les figures suivantes : Figure 128 pour le premier site ; Figure 129 pour le deuxième site et Figure 130 pour le troisième site.



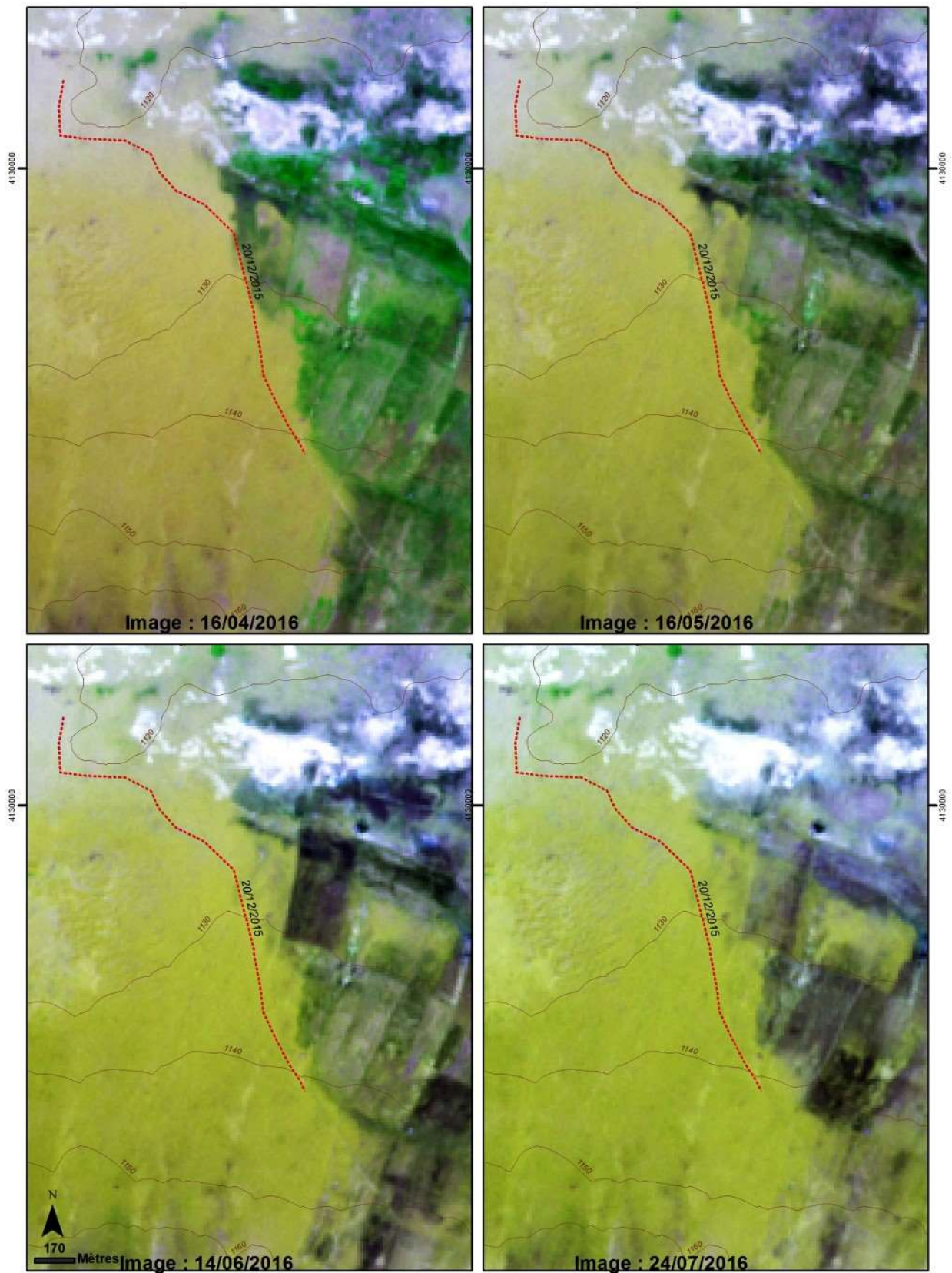


Figure 128 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine (10 jours site 1). Composition colorée 4-8-2 images Sentinel-2

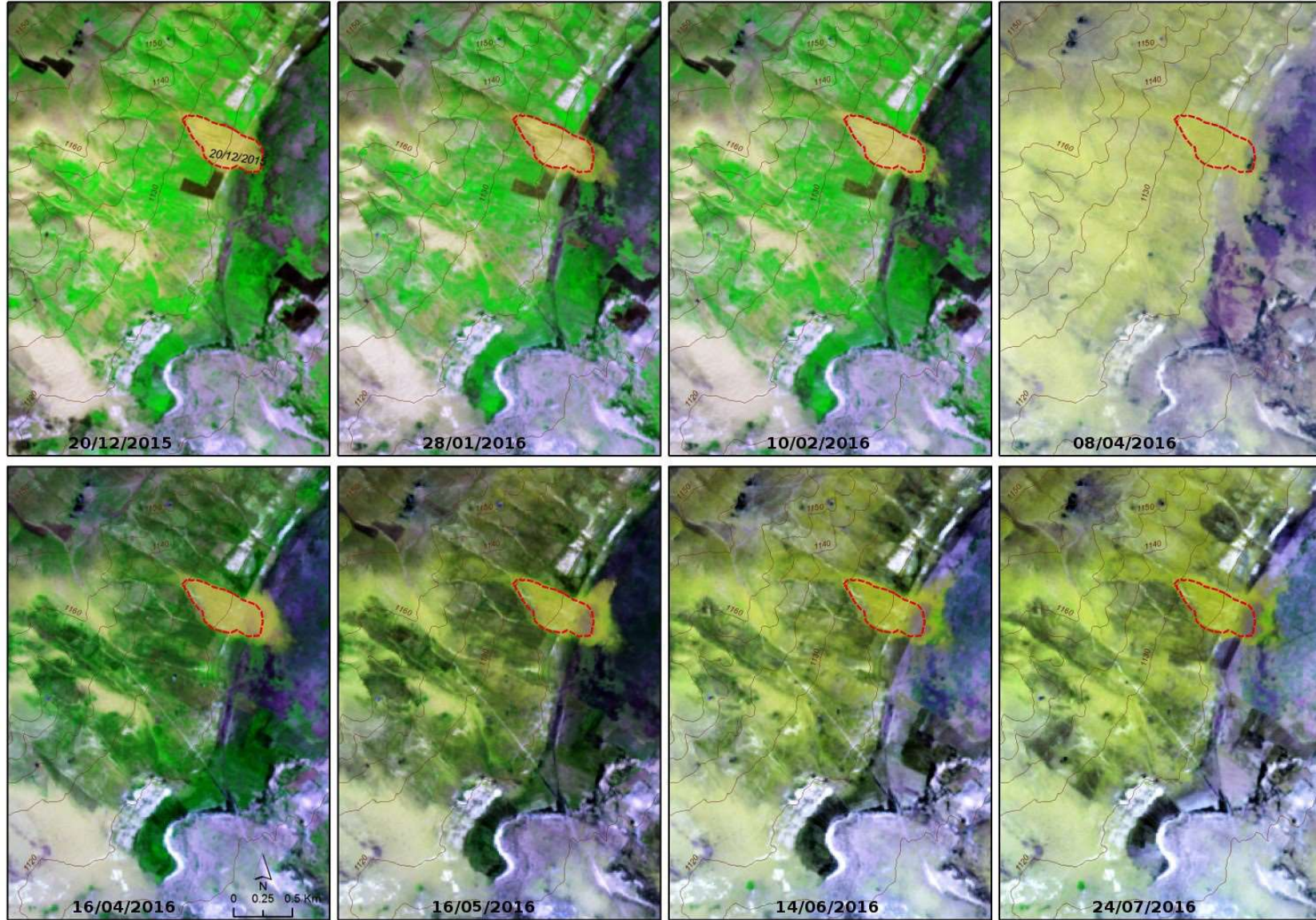


Figure 129 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine (site 2). Composition colorée 4-8-2 images Sentinel-2.

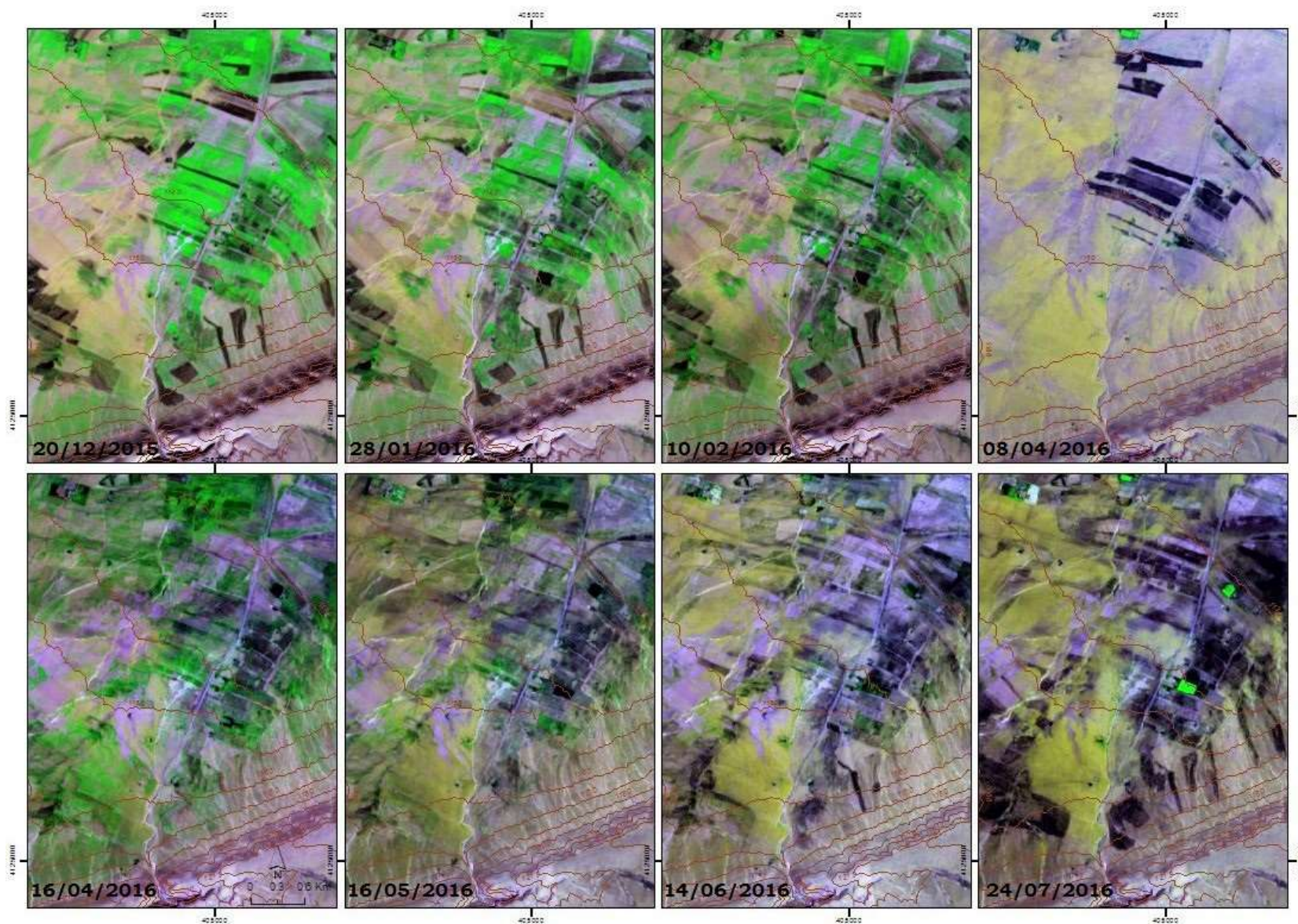


Figure 130 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine (site 3). Composition colorée 4-8-2 images Sentinel-2

La forte précision spatiale révèle non seulement une forte hétérogénéité des formes sableuses mais également, des questionnements liés aux métriques. Sur le site N°2, on observe un îlot de sable très actif. Dans sa dynamique, il ne change pas beaucoup de superficie mais uniquement de place. La mesure de la surface se trouve ici en difficulté pour caractériser cette dynamique. Dans ce cas précis, nous évoquons la mesure de cette dynamique par le déplacement des contours. L'examen des images met en lumière les éléments suivants, discutés par date.

- 20/12/2015 : sert d'image de référence. Sur les deux premiers sites, on observe des zones ensablées. Sur le troisième site, une pellicule de poussière. Sur l'ensemble des sites, on observe un tapis végétal verdâtre, de jeunes pousses sur des parcelles semées pendant l'automne. Il existe d'autres parcelles en brun noir labourées récemment qui ne présentent pas encore de signes de levée des grains semés plus tardivement.
- 28/01/2016 : Sur le site 1 (Figure 128), au contact de la zone ensablée, des parcelles labourées sont désormais couvertes par le sable. La même tendance est constatée sur le site 2 (Figure 129) avec l'arrivée de sable dans la daïa, par étalement du placage, les bordures ont avancé de 130 mètres. En revanche, sur le troisième site (Figure 130), il n'y a pas de modification majeure.
- 10/02/2016 : sur les trois sites, il n'y a pas de changement visible par rapport à l'image précédente du 28 janvier. Mais le constat le plus troublant, à cette saison, à partir de ces trois images de décembre, janvier et février, est l'état des parcelles labourées tardivement, qui visiblement sont restées identiques sans germination et l'apparition de jeunes pousses. L'ensemble des images examinées du mois de mars présentent trop de défauts liés à la couverture nuageuse. Le peu de parcelles visibles n'indiquent pas de changement notable.
- 08/04/2016 : un changement majeur visible sur les trois sites (Figure 128, Figure 129, Figure 130) est intervenu. Le paysage est fortement contrasté par rapport à l'image précédente du 10 février. Le produit sableux ne présente pas de contours nets. Les causes de ce changement si rapide seront fournies ultérieurement.
- 16/04/2016 : le paysage retrouve ses caractéristiques antérieures à l'image du 08 avril, en éliminant la couche de sable fine, probablement par ruissellement. Toutefois, certaines limites de sable, sites 1 et 2 (Figure 128, Figure 129), ont enregistré une légère progression. On constate également, le reverdissement des zones cultivées tardivement, effaçant ainsi les contours et unifiant les parcelles existantes.
- Les images suivantes (mai, juin et juillet) s'inscrivent dans l'assèchement progressif du climat, avec la fin du printemps et le début de la saison estivale. Sur les deux dernières images, nous remarquons une présence plus marquée du sable sur les trois sites.

Pour expliquer les changements observés, nous avons examiné deux facteurs : les précipitations mensuelles et les vents quotidiens. Les données de l'OMM indiquent une abondance de pluies pendant l'automne assurant le reverdissement du tapis végétal. Elles permettent ainsi d'entamer les travaux de labour des terres. L'hiver a été particulièrement marqué par le manque de pluie. En effet, les mois de décembre et janvier n'enregistrent que 5 mm cumulés. La succession de ces deux mois, après le labour de la terre, explique le retard constaté sur les parcelles restées sans germination et sans levée de semis. Le retour à la normale n'intervient qu'au mois de février avec 24 mm, dont 8 mm sont tombés en fin de mois entre le 28 et le 29 février, sous forme de neige suivie par 29 mm en mars.

Par ailleurs, l'examen des « données éoliennes » de la période antérieure à la date de prise d'images du 8 avril indique un vent actif durant 15 jours. L'épisode a débuté le 19 mars et s'étale sur trois jours avec des vents venant du Sud variant entre 21 et 33 km/h, suivis par une série de 7 jours de vent, du 22 au 29 mars, alternant entre le Nord et le Nord-Ouest et variant entre 19 et 37 km/h. Le 30 et 31 mars le vent de sud reprend avec une vitesse moyenne comprise entre 33 et 37 km. Quant à la période du 01 au 04 avril, elle est marquée par un vent du Nord-Ouest avec une vitesse moyenne entre 26 et 37 km.

La mince pellicule de poussière constatée sur l'image du 8 avril, découle de la réactivation de l'activité éolienne et du fort saupoudrage qui en résulte. Il est probable aussi que les pluies tombées ce jour-là aient impacté le remodelage du produit sableux, ou alors, la forte humidité a influencé les valeurs spectrales de cette image. Cette analyse met en lumière quelques caractéristiques de la dynamique d'ensablement :

- Le processus d'ensablement peut s'activer à n'importe quelle saison (hiver comme été) si toutes les conditions sont réunies. L'ingrédient clé de sa mise en place est la persistance de la sécheresse. Non seulement, le pouvoir du vent se confirme dans l'image du 08 avril (dispersion et remaniement du produit sédimentaire), mais également dans le rôle joué par les pluies (transport par ruissellement du sable fin).
- Une dynamique plus active sur les bordures de la daïa que dans le site situé sur le plateau méridional, indique la présence d'une source de déflation préférentielle, la cuvette.
- La cartographie de l'ensablement dans ce site est très sensible aux dates choisies. En effet, en l'espace de 10 jours, séparant les deux images du mois d'avril, l'ensablement et le tapis végétal ont sensiblement changé.
- Certaines manifestations sableuses sont de nature extrêmement dynamique, voire éphémère. Elles peuvent changer de forme, de limites, voire disparaître et réapparaître. Elles peuvent donc échapper au diagnostic et à sa restitution cartographique.

Chapitre 11 : Les facteurs de la dynamique d'ensablement

L'une des singularités de cette région est sa double prédisposition, du fait des fortes variations climatiques, à l'action éolienne et hydrique. Dans un premier temps, la dynamique d'ensablement sera examinée au regard de la fluctuation de la pluviométrie. Dans un second temps, nous évoquerons le lien entre l'évolution des dépôts sableux et le relief. Enfin, nous aborderons, l'interaction entre les deux actions éolienne et hydrique et les formes qui en résultent.

11.1. Le facteur climatique

La relation entre la dynamique d'ensablement et la sécheresse est exprimée par le facteur le plus déterminant à savoir la pluviométrie. Le diagramme présenté précédemment (Figure 122), illustre l'évolution de la surface ensablée d'une année à l'autre, information extraite depuis l'imagerie satellitaire. Mais, la mise en relation directe entre les surfaces constatées et les précipitations, peut conduire à des interprétations hasardeuses.

En effet, la surface ensablée d'une année masque l'effet cumulatif de l'année précédente et elle ne présente pas l'extension nette produite cette année-là. Prenons l'exemple de 2003, la surface était de 123 km² alors que l'année précédente elle était de 100 km², donc, l'apport de cette année est de seulement 23 km². Cela explique pourquoi nous avons introduit dans cette analyse la variable indicatrice du changement surfacique d'ensablement entre deux périodes.

11.1.1. La variable indicatrice du changement temporel de la surface ensablée

Cette variable est introduite afin de mesurer la surface de progression ou contraction constatée entre deux images successives de la série d'images décennales (1998-2011). Ainsi, elle indique le changement temporel opéré durant une année. L'écart de surface est calculé selon la formule suivante :

$$\Delta Surf (i) = [Surf (année N) - Surf (année N-1)]$$

Les résultats des calculs sur la période produisent de nouvelles valeurs dont les chiffres sont présentés dans le diagramme (Figure 131). Le graphique facilite la lecture des variations d'ensablement d'une année à l'autre, Il permet également d'identifier des années de variations positives et d'autres négatives (zone verte sur le diagramme) correspondant à un recul de la surface sableuse. On constate que la progression la plus spectaculaire est celle constatée en 2001 et le recul le plus marquant est celui enregistré pour les deux années successives 2004 et 2005. On remarque également la présence d'une période stable entre 1999 et 2000.

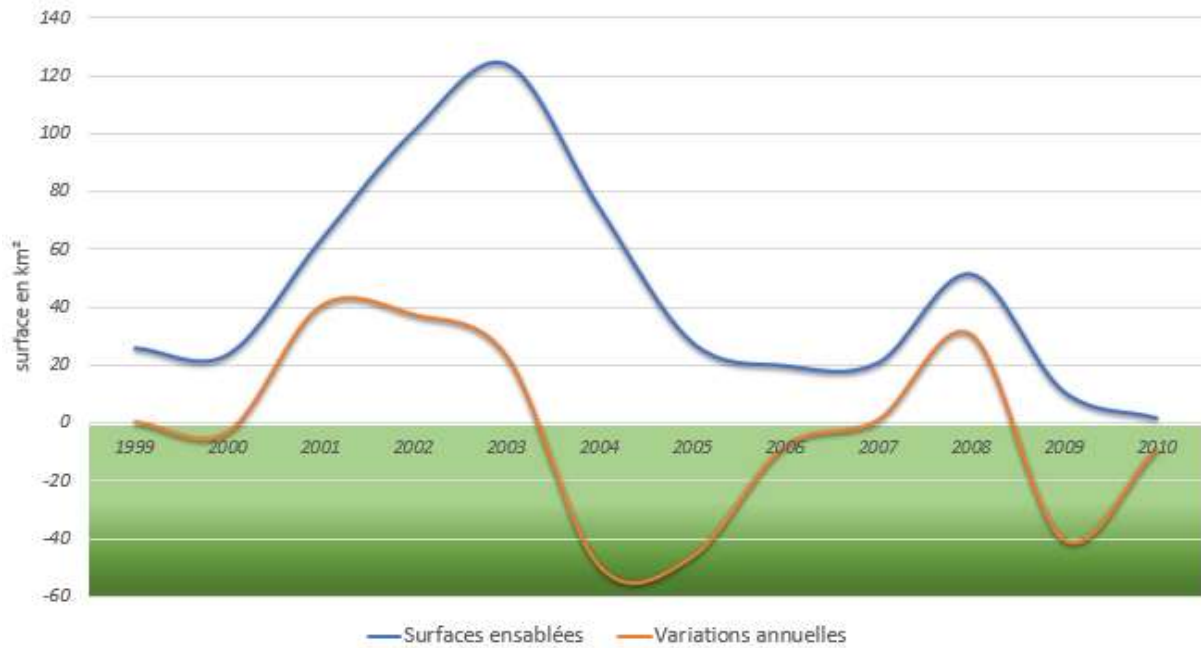


Figure 131 : Courbes d'évolution des surfaces ensablées avec la courbe de variations (apport net) annuelles dans les surfaces d'ensablement. La zone verte traduit la contraction d'ensablement.

Cette nouvelle variable donne des indications précises sur l'écart entre des mesures globales extraites depuis des images. Nous l'utiliserons dans l'étude de la relation entre l'ensablement et les précipitations. Par ailleurs, cette variable manque d'information spatiale car elle n'indique pas le lieu où s'est opéré le changement. Mais, à cette échelle spatiale fine, elle ne réduit pas la subtilité d'analyse.

11.1.2. Lien entre l'évolution d'ensablement et les fluctuations climatiques

Les données de précipitations sont exprimées par l'indicateur (SPI) présenté dans le point (3.1. Caractériser la sécheresse). Plus précisément, nous avons retenu le SPI-12 calculé sur 12 mois couvrant l'année agricole de septembre à août. Les données ont été analysées pour rechercher la présence de corrélation statistique entre les deux variables (apport annuel et précipitations).

Le traitement statistique des données est illustré dans le diagramme (Figure 132). Les modifications des surfaces ensablées représentent la variable dépendante et les précipitations (SPI-12) la variable indépendante.

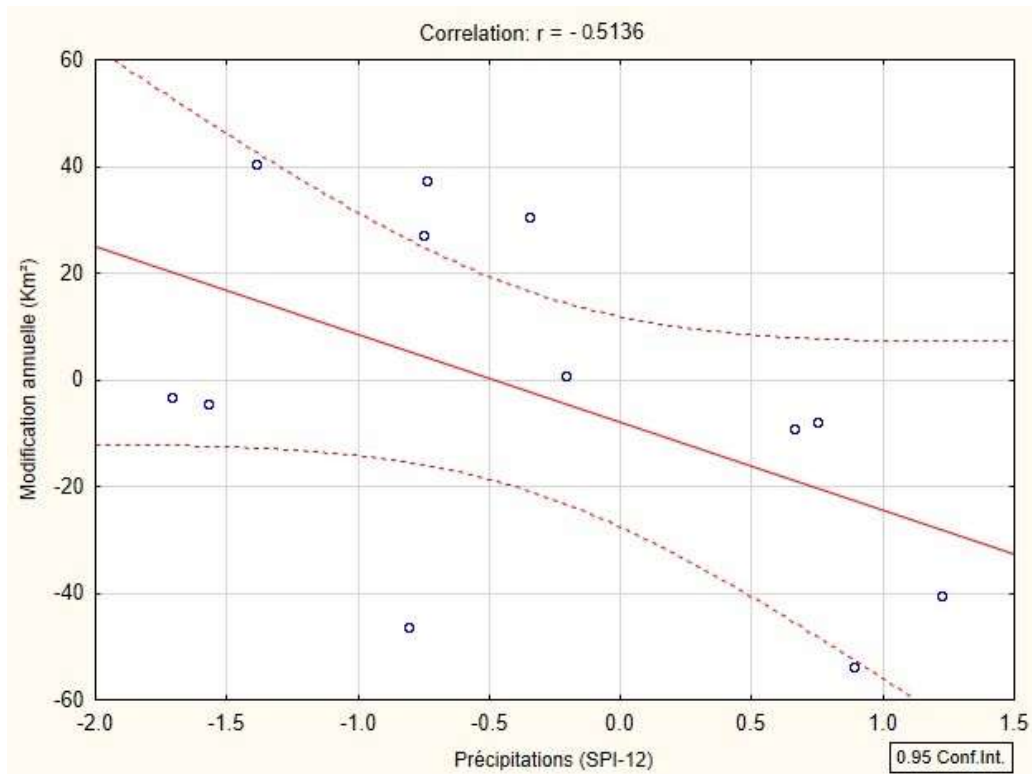


Figure 132 : Diagramme de corrélation entre la variation de surface ensablée et la pluviométrie

Depuis le diagramme, on constate que la disposition du nuage de points est de forme allongée, étirée en haut à gauche et vers le bas à droite. L'intensité de la relation est modérée, monotone et négative. En effet, quand les précipitations reculent, l'ensablement augmente. Quant à l'indice de corrélation, il affiche la valeur -0,51, ce qui indique une relation moyenne.

Les connaissances sur le déroulement du processus d'ensablement suggèrent qu'en plus de la forte relation entretenue avec la sécheresse, il existe également une relation supplémentaire, celle de la chronologie de la qualité climatique des années. En effet, une année sèche qui intervient à la suite d'années sèches aura plus d'impact sur l'ensablement (effet cumulé) qu'une année sèche qui intervient après une séquence d'années humides.

Ce postulat suggère déjà la présence d'un effet cumulé croissant avec la succession des années sèches et un effet cumulé décroissant dans la suite d'années humides. Ce principe réfute en théorie la présence d'une relation linéaire entre la sécheresse climatique et l'ensablement. Donc, l'outil statistique utilisé pour décrire cette relation est moins adapté à cette configuration non linéaire. Nous développons dans ce qui suit, cette relation dans un diagramme combiné (sable -précipitations).

11.1.3. Le diagramme temporel combiné sable – précipitations

Les surfaces ensablées sont présentées conjointement avec les variations des précipitations exprimées par SPI-12, le diagramme (Figure 133) couvre la période de 1999 jusqu'à 2010.

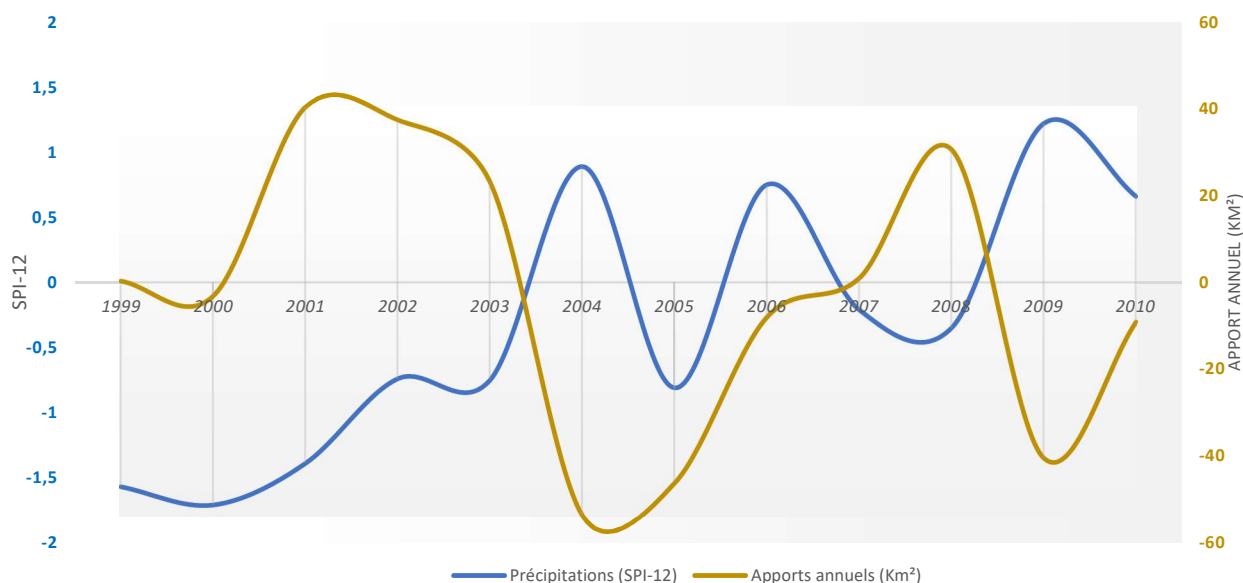


Figure 133 : Apports annuels en surface ensablée et des précipitations exprimées par SPI12

À la lecture du diagramme on constate que :

- Les fluctuations des superficies ensablées entrent en résonance avec les variations climatiques : les deux courbes affichent une allure opposée. La baisse des précipitations sur l'année entraîne une augmentation d'ensablement, l'inverse est aussi valable. La persistance de la sécheresse réactive l'action éolienne qui entretient et maintient la dynamique d'ensablement. Une suite d'années humides fait reculer significativement la surface ensablée.
- La courbe de l'ensablement présente un aspect plus lisse, offre moins d'ondulations que celle des précipitations.
- La courbe de l'ensablement baisse presque instantanément lors d'une augmentation des précipitations. Par contre, un effet retard d'un à deux ans apparaît lors du recul des précipitations. En effet, le début de séquences sèches livre une lecture intéressante. Le recul de pluviométrie, constaté dès 1999, persiste l'année suivante en 2000, mais l'ensablement n'augmente qu'en 2001 pour enregistrer sa plus forte progression, signe d'un début de la crise d'ensablement.

- Le niveau de réponse de l'ensablement n'est pas cohérent entre 2005 et 2008. En effet, l'année 2005 est plus sèche que 2008 alors que la courbe du sable réagit de façon contraire. Cette incohérence trouve son explication dans l'inversion du régime pluviométrique en 2008. Ce point a été développé dans la partie climat avec un zoom spécifique sur cette année d'inversion du régime pluviométrique. Pour rappel, de fortes précipitations enregistrées pendant l'été alors que l'hiver et le printemps étaient secs, venant nuancer la signification du volume de l'année. La preuve en est fournie par le SPI-6 qui opère sur 6 mois de septembre à mars. Il classe cette année dans la catégorie la plus extrême et la plus sèche sur une série de 40 ans.
- En termes d'ensablement, l'année 2008 livre un enseignement intéressant en comparaison avec les années de début de séquence sèche 1997 – 2003. Il n'a fallu qu'un automne suivi d'un hiver sec pour que l'ensablement progresse, alors qu'en 2001, nous avons remarqué qu'une période de temporisation de deux ans était nécessaire avant le déclenchement de l'ensablement. Ces constats montrent que, logiquement, l'ensablement réapparaît moins rapidement pendant une année sèche quand elle intervient à la suite d'une période d'années humides. Cependant, lors d'une année sèche intercalée dans une période d'instabilité climatique, le processus se met en place plus rapidement.
- Le début de repli présente un caractère spectaculaire. La plus forte variation de la dynamique d'ensablement est généralement constatée lors de la phase de recul. Cette rapidité du changement suggère la présence d'agents actifs (transport hydro-éolien, végétation) qui œuvrent à réduire la surface ensablée dès le retour des précipitations.

La difficulté méthodologique de cette partie vient du fait que nous manipulons des séries de 12 couples. Ce nombre d'observations paraît relativement limité pour étudier la relation et les causalités entre deux phénomènes naturels : les précipitations et l'ensablement qui entretiennent une relation complexe. L'autre difficulté est la présence des biais :

- La date de prise d'images choisie intervient pendant le printemps, elle ne permet pas de capter l'effet complet d'une séquence climatique annuelle.
- La mesure d'ensablement est faite en valeur surfacique, de fait il manque le volume. Cette limite est d'autant plus ressentie dans une topographie fermée. Elle limite l'extension horizontale. Au-delà d'une certaine croissance de l'ensablement, elle force le remaniement vers l'épaisseur. Donc, les années sèches ne sont pas égales pour exprimer leur étalement horizontal. Les mesures surfaciques d'ensablement se trouvent impactées.
- La réduction des surfaces ensablées pendant des années humides n'est pas non plus un phénomène linéaire. Deux années de suite qui présentent les mêmes caractéristiques

pluviométriques n'entraînent pas le même niveau de contraction. Lors de la première année l'action s'exerce sur la totalité de l'espace ensablé, éliminant en priorité les fines couches de sable. Alors que la seconde année, elle œuvre uniquement sur l'espace restant. De ce fait, elle aura un impact apparemment amoindri.

11.2. Le facteur topographique - relief

Un caractère remarquable de la dynamique éolienne est la forte interaction relief-transit éolien. La manifestation de cette relation est inscrite à la fois dans le bassin de la daïa et dans la présence d'un couloir ensablé. Cette relation s'observe, non seulement pendant les phases d'extension, mais également pendant celles de rétraction.

Dans le bassin, les plaines septentrionales labourées contrastent avec le sable déposé sur le côté méridional. Ce dernier, surélevé d'une quinzaine de mètres au-dessus de la cuvette de la daïa reçoit des apports sableux transportés en suspension ou par saltation. Les premières pentes au sud obligent le courant éolien à livrer une partie de sa charge.

Au cours de son trajet, le vent traverse une surface qui présente des rugosités importantes. La présence de petits monticules, abrités par la végétation, exerce une forme d'obstacle au vent. En effet, ces formes permettent le piégeage du sable en diminuant la compétence du vent à déplacer le matériel par saltation, ainsi, elles favorisent le dépôt. Sur cette partie méridionale, l'ensablement domine pendant les phases de progression. C'est également dans cette partie que la couverture sableuse demeure le plus longtemps.

Le relief entourant la dépression hydro-éolienne présente un volume suffisant pour bloquer et dériver le flux sédimentaire éolien (Figure 134 et Figure 135). La convergence des reliefs vers le Sud-Est crée un lieu de concentration du sable en mouvement. Le sable qui dépasse et franchit cette ouverture topographique se trouve transporté sur une trentaine de kilomètres. La vélocité du vent, probablement accentuée par l'effet « Venturi » au niveau de cette ouverture topographique, procure à l'action éolienne la capacité de former un couloir ensablé de 30 km. Son orientation indique la direction dominante du transport sédimentaire.

La vaste ouverture topographique au Nord-Ouest, au niveau des plaines occidentales favorise la déflation en direction de la dépression. L'ensablement, dans cette partie, est invisible du fait du manque d'obstacles (absence du relief) pour s'opposer au vent. Elle assure ainsi un échange sédimentaire interbassins (topographique) permettant la continuité du système morphologique éolien.

Des auteurs ayant étudié la dynamique du sable dans ces régions font le même constat : une migration de sable est assujettie aux contraintes du relief. Dans l'Atlas Saharien oriental, Benazzouz (2000) évoque la notion de passage préférentiel dans la Wilaya de Naâma, région

steppique de l'Ouest algérien. Bensaid (2006) quant à lui évoque le passage de sable par des Foug (= « cluse »). A une échelle plus vaste, Callot (1987) évoque la perméabilité des Monts des Ksour (Atlas saharien occidental) au déplacement du sable des Hautes Plaines sud oranaises vers le Sahara. En plus de son influence directe sur l'action éolienne, le relief conditionne également l'intensité du processus hydrique. Au vu des échanges qui se développent entre l'action éolienne et hydrique, il est intéressant d'étudier leur interaction.

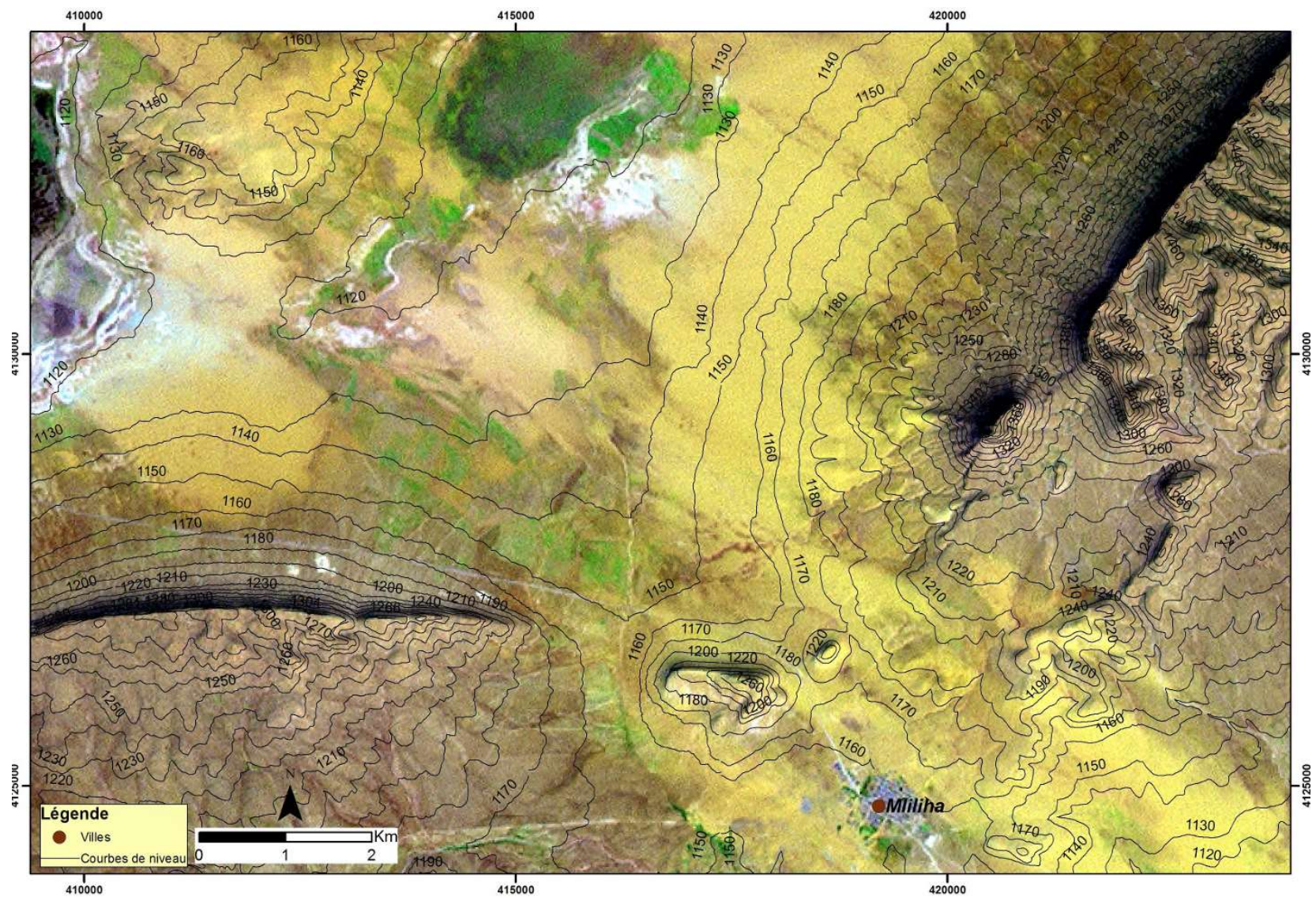


Figure 134 : Lien entre le relief et l'ensablement dans la dépression de Daiet Chouiouia (composition colorée, fusionnée avec la bande panchromatique de la même image Landsat 7 ETM⁺ de mars 2001, et courbes de niveau). Le sable est en jaune.

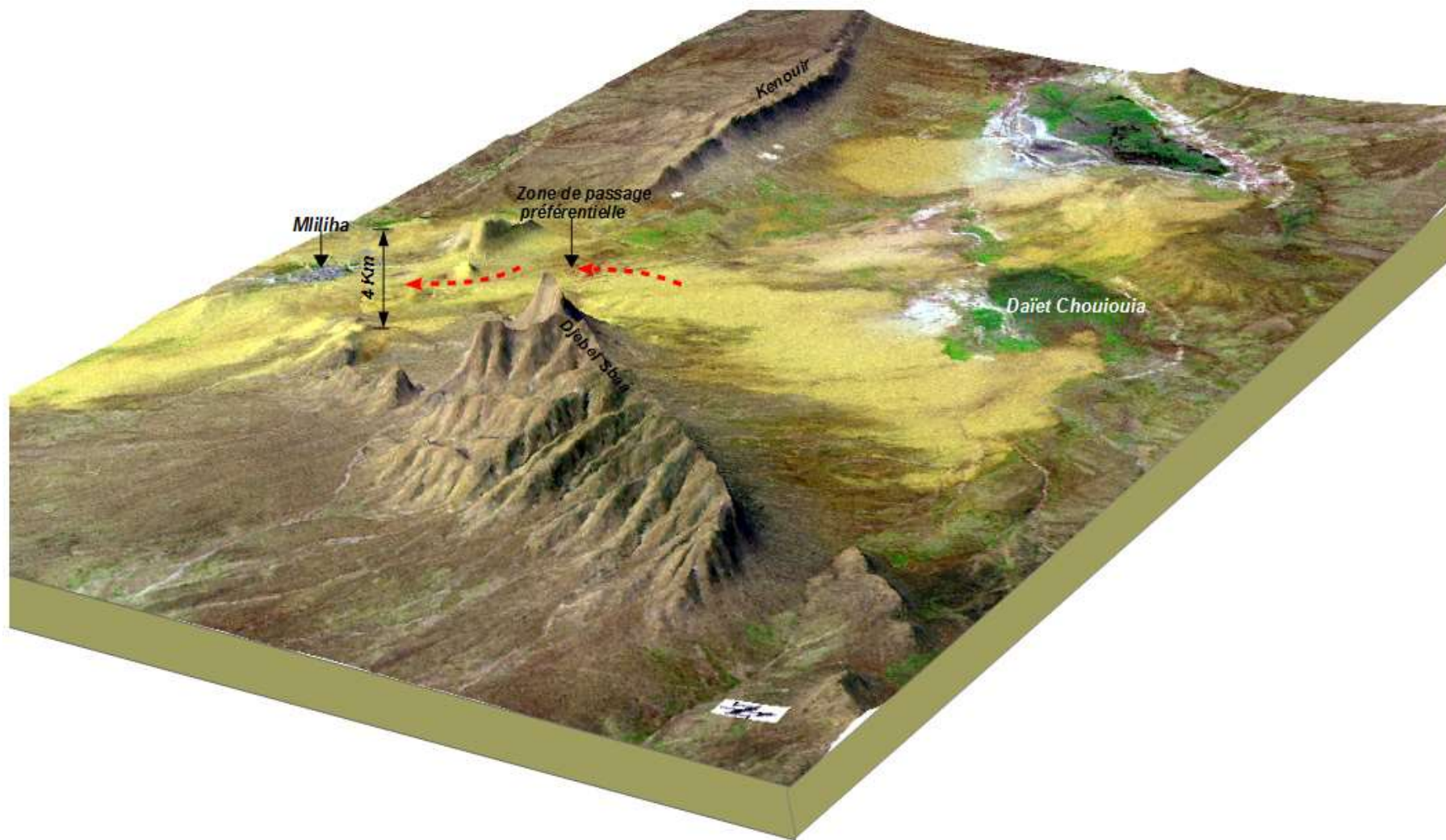


Figure 135 : Vue en perspective (MNT) de la disposition du relief et son influence sur l'action éolienne (sable en jaune) dans Daïet Chouiouia.
 (Précision altimétrique du MNT : 10 m, l'échelle d'altitude est exagérée de 3 fois, Image en composition colorée 5-4-1 fusionnée avec la bande panchromatique pour une résolution spatiale de 15 mètres/Pixel, image Landsat 7 ETM+ de mars 2001)

Chapitre 12 : Interaction entre l'action éolienne et l'action hydrique

La région est, nous l'avons déjà dit, le siège de deux processus géomorphologiques actifs : le vent et l'eau. Dans les précédentes parties, nous les avons évoqués séparément : d'un côté, la partie hydro-morphologique, avec les principales caractéristiques du bassin, le réseau de drainage et les caractéristiques des précipitations ; de l'autre la dynamique éolienne et sa relation avec les fluctuations de la pluviométrie. Toutefois, l'analyse de la dynamique d'ensablement a suggéré la participation de l'agent hydrique dans le remaniement, action visible notamment pendant la phase de recul d'ensablement.

Nos observations sur le terrain ont permis de noter qu'à l'échelle locale, il existe une interaction entre le dépôt sableux et le réseau de drainage. Nous pouvons classer les formes d'interactions en trois catégories, en fonction de l'impact occasionné sur le matériel éolien : la redistribution de matériel sur le plateau, le réaménagement des formes éoliennes et enfin, la réinjection sédimentaire dans la cuvette. Nous développons davantage la dernière forme, car les deux premières sont généralement évoquées dans les études couvrant les régions ensablées.

12.1. Redistribution du matériel

En raison de la disponibilité de matériel érodable sur les pentes mal végétalisées, les cours d'eau transportent des sédiments. Pendant les intempéries, ces cours d'eau produisent des crues flashs se terminant parfois par un débordement. À la rencontre des faibles pentes, le ruissellement libère les matériaux fins en forme de dépôts sableux (Figure 136). Ces dépôts peuvent contraindre le cours d'eau et l'obliger à changer sa trajectoire. Ici, il agit sur la redistribution du matériel sableux en surface.

A cette échelle géographique, nous ne pouvons pas proprement parler au sein de la couverture sableuse, de présence d'aires contributives qui perdent du sable aux dépens d'autres aires qui le recueillent. La présence de petits sites bénéficiaires par redistribution hydrique du matériel reste éphémère. Le changement de fine couche du sable est presque permanent, la dynamique est très forte. Les petits sites alternent les rôles (émission – recueil), et peuvent disparaître, ou réapparaître. La rapidité du changement n'offre pas une stabilité suffisamment longue aux édifices sableux, ce qui permet de différencier depuis l'imagerie actuelle, des sites déficitaires de ceux bénéficiaires et de dissocier l'apport éolien de l'apport hydrique sur la couverture sableuse.



Figure 136 : Accumulation sableuse déposée par les cours d'eau au point d'inflexion de la pente, située à l'est de Daïet Chouiouia ($34^{\circ}46'31''N - 3^{\circ}46'35''E$).

Sur une échelle géographique régionale, celle qui couvre par exemple l'Atlas saharien et le Nord du Sahara, l'examen peut livrer des pistes intéressantes à la compréhension du rôle joué par les cours d'eau dans l'échange sédimentaire. En effet, les Oueds qui drainent l'Atlas Saharien pour se diriger vers le Nord du Sahara constituent l'agent de pénétration pour traverser le relief. L'oued décharge le produit sédimentaire fin quand il en trouve l'opportunité : à la rencontre d'obstacle, après le redressement de la pente ou au changement de direction. Dans ces lieux, le vent trouve la matière à emporter pour édifier des formes sableuses.

12.2. Remodelage des formes sableuses

Le site d'étude présente une diversité des formes de réaménagement du produit sableux. L'une d'elles est le ruissellement du matériel libre (sable et élément fin) en surface. Il semble qu'elle soit la forme la plus importante en termes d'étendue spatiale. Mais la forme la plus spectaculaire est celle qui concerne la création des buttes de sable, où la végétation joue un rôle prépondérant. Quant à la question : « Est-ce que c'est le dépôt de sable qui permet l'installation d'une plante ou la plante déjà présente qui fixe le sable ? ». Il est probable que sur le même site, on rencontre les deux aspects en fonction de la topographie et des caractéristiques des plantes. Quel que soit l'ordre d'installation (sable/plante ou plante/sable), le résultat est une intime relation entre la végétation et le sable fixe.

Les accumulations sableuses, si les conditions climatiques sont favorables, offrent les conditions pour la préservation d'une humidité suffisante (éponge). Attirées par l'humidité, la végétation ou de plantes psammophiles (adaptées aux milieux sableux) s'installent sur le sable. Elles lui fournissent l'adhérence et le protège contre l'érosion. Sur le terrain, nous avons pu reconnaître des plantes fixatrices de sable, notamment le Drinn (*Aristida pungens*) ; le D'guouft

(*Artemisia Campestris*). Par ailleurs, à chaque épisode d'ensablement, la végétation déjà installée favorise le piégeage du sable pour surélever encore l'édifice et agrandir la butte sableuse. Si la stabilité demeure, un processus de fixation peut se mettre en place.

Nous avons pu identifier deux types :

- Celles de plaine, des buttes avec une forme tendant vers l'arrondie ;
- Celles sur des pentes qui n'ont pas de forme régulière. Sur celles-ci, (Figure 137) on observe un arrachement de pans et de parties complètes de l'édifice, car elles sont plus exposées au ruissellement dont l'angle d'attaque est conditionné par la forme du support-relief.



Figure 137: Dépôt sableux sans forme particulière entreposé contre le versant septentrional de Rouissat el Mehara, dans le couloir de sable. La forme rongée par l'érosion témoigne de l'activité du processus d'érosion (Hauteur : 1 m env, 34°41'38"N - 3°47'42"E).

Les buttes de sable les plus rencontrées sont arrondies. Elles se trouvent sur des kilomètres carrés pratiquement dans tous les espaces plats ensablés (Figure 138), dans le bassin comme dans le couloir du flux sédimentaire. Leur hauteur, entre 50 cm et deux mètres, dépassent souvent 1 mètre (Figure 139). Nous avons rencontré quelques édifices témoins, qui ont perdu leur végétation, bien entamés par l'érosion. L'ensemble de ces formes est la preuve d'une interaction encore bien active.



Figure 138 : Champs des buttes de sable fixées par la végétation. Avec cet apport sédimentaire, il devient un endroit privilégié pour la végétation mais aussi par la mise en culture (34°41'52"N - 3°47'56"E)

Actuellement, ces nouvelles formes se trouvent consolidées partiellement par la végétation, elles résistent à la double action érosive éolienne et hydrique. Le maintien de la végétalisation et des conditions d'humidité favorables assurent sa cohérence, favorisent le processus de fixation sans atteindre pour autant la résistance constatée sur les formations sableuses de « Komo » au Nord du Mali signalées par Venard (2012).



Figure 139 : Butte de sable fixée par la végétation, située au nord de Rouissat el Mehara. (La hauteur dépasse 2 m, 34°41'42"N - 3°47'47"E)

Une autre forme d'interaction, qui va probablement rester longtemps inscrite dans le paysage, est la sédimentation alternée. Cette formation est associée généralement aux cours d'eau. Lorsque le dépôt sableux se trouve sur le chemin d'un petit ravin et si le canal est suffisamment rempli de sable, il empêche l'écoulement d'eau à l'occasion d'une averse généralement sporadique. On observe alors, une dérivation du cours d'eau. Ce dernier

décharge les sédiments et ajoute une couche de matériel détritique sur le sable (Figure 140). Ce matériel plus caillouteux et grossier, ramassé sur les pentes, est aisément décelable. Cette nouvelle couche participe efficacement au maintien et à la protection de la couche de sable inférieure.

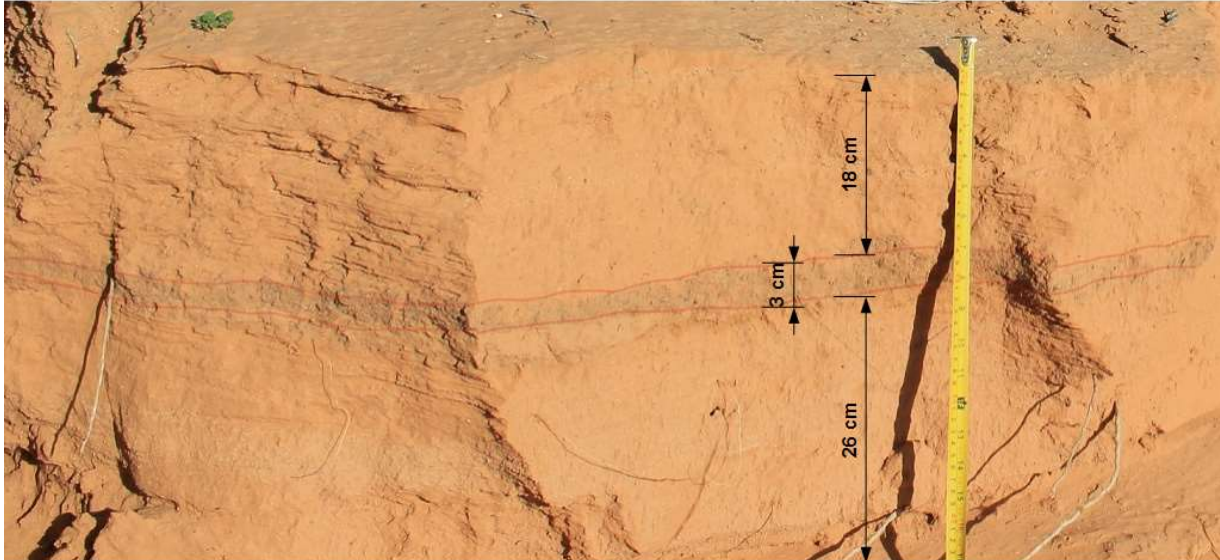


Figure 140 : Sédimentation alternée (éolienne – hydrique – éolienne), les contours rouges délimitent la couche composée des éléments et matériaux plus grossiers d'origine alluviale (34°43'16"N- 3°46'30"E).

12.3. Réinjection de matériels sédimentaires

Pendant la saison venteuse, le sable éolien est soufflé sur les pentes et les plateaux, conduisant au comblement partiel ou complet des cours d'eau. Lorsque des précipitations violentes (orageuses) ont lieu, des crues brusques transportent le sable éolien vers la cuvette.

Particulièrement visibles sur les pentes abruptes bordant les plateaux, les chenaux éphémères deviennent des torrents, de plus le ruissellement apparaît à la suite de fortes pluies (Figure 141 ; Figure 142). Les cours d'eau se transforment alors en véritables coulées boueuses pour se décharger dans la dépression de la daïa, bassin de réception endoréique des oueds. Les fines couches de placage sableux déposées sur le relief dénudé de végétation disparaissent en premier lieu, par ruissellement sous l'effet des précipitations. Les couches plus épaisses persistent et résistent plus longtemps.

Plus le dépôt sableux est important, plus le potentiel de réinjection sédimentaire vers la cuvette est grand. Par conséquent, la nature et l'intensité de ces interactions varient en fonction du versant de la daïa et de la quantité de sable disponible. L'essentiel de cette interaction se concentre donc sur le plateau méridional. En effet, c'est sur cette partie que se dépose principalement la couverture sableuse.



Figure 141 : Oued ayant emporté la couche de sable (34°43'13"N - 3°46'24"E)



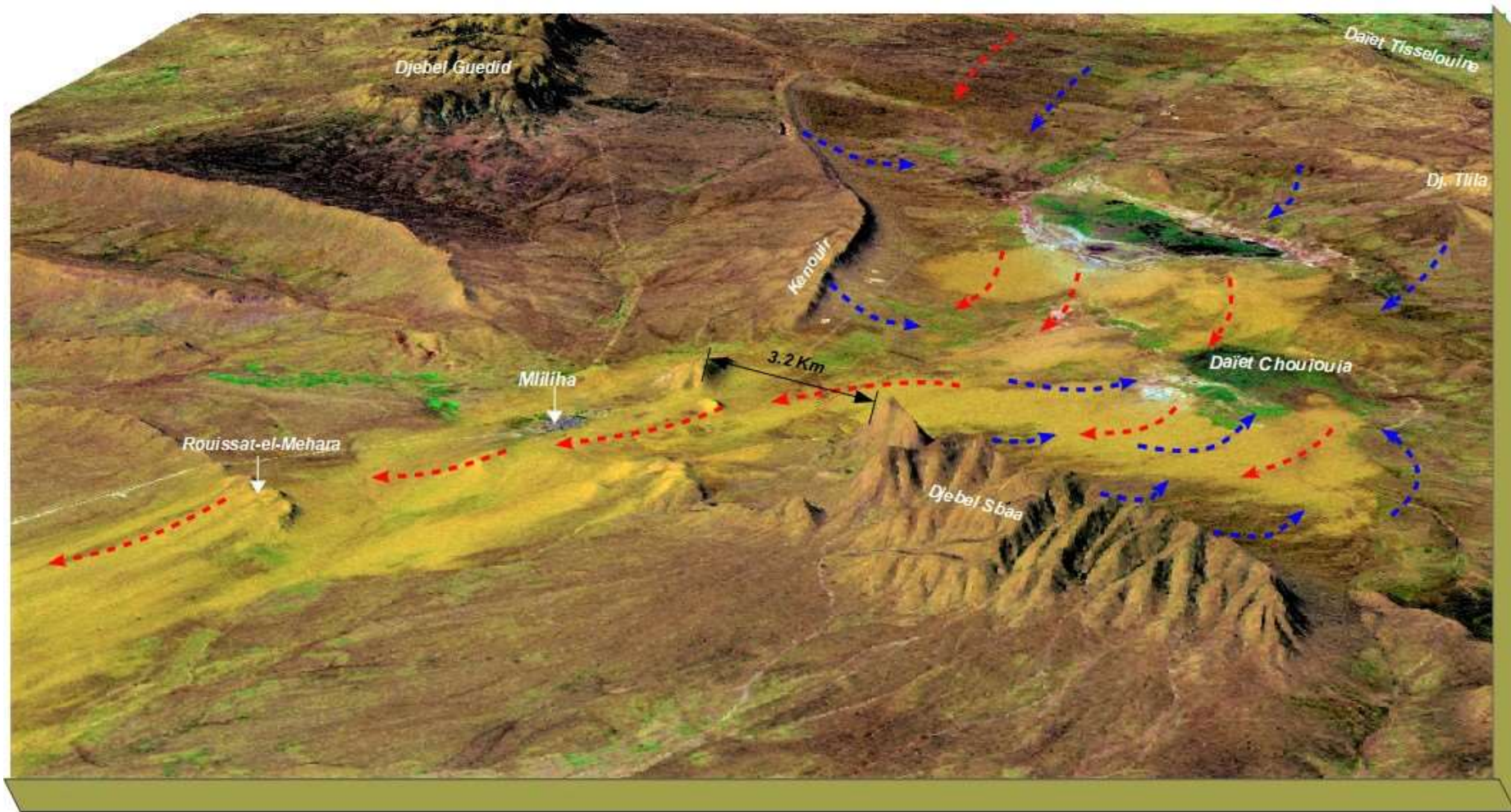
Figure 142 : Chenaux d'eau rejoignant l'oued sur une épaisse couche de sable, illustrant la violence des orages et des précipitations instantanées (34°43'19"N - 3°46'33"E).

Il est judicieux d'accompagner cette partie d'étude par des figures en perspective 3D réalisées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Il a été réalisé sur la base des courbes d'altitude d'une précision altimétrique de 10 mètres. Pour que le MNT prenne la valeur d'un support d'interprétation et d'analyse, nous avons choisi de superposer des images multi-dates.

Nous avons retenu deux images satellitaires à différentes dates qui traduisent un état de surface fortement contrasté. L'image la plus récente date du 28 décembre 2016 prise par le satellite Sentinelle-2. Elle correspond à une phase plutôt stable. Quant à l'image la plus ancienne, elle a été prise à partir du satellite Landsat 7 ETM+ le 24 mars 2001. Elle se situe dans la phase de progression de la couverture sableuse durant la crise d'ensablement constatée entre 2000 et 2003.

Les deux images sont le résultat d'un traitement en composition colorée RVB (canaux 4,8,2 pour Sentinel-2 et 5,4,1 pour ETM+). Les contrastes ont été rehaussés pour améliorer leur qualité visuelle. Pour éliminer le caractère pixélisé de l'image Landsat, du fait de sa faible résolution, nous avons eu recours au processus de fusion d'images.

Sur la base du modèle numérique, nous avons produit deux perspectives avec un angle de vue différent, presque opposé. La Figure 143 offre une vision latérale qui permet d'apprécier le dépôt sableux et l'étalement du couloir ensablé. La deuxième vue en perspective (Figure 144) offre une meilleure visibilité sur les plaines occidentales régulièrement cultivées. Cette dernière est enrichie par la délimitation du bassin hydrographique de Daïet Chouiouia. Les deux figures sont utilisées comme des supports de présentation, pour illustrer l'interaction entre l'action hydrique et éolienne.



-----> Transport sédimentaire éolien

-----> Transport sédimentaire hydrique

Figure 143 : Processus de transfert et d'interaction des flux sédimentaires éoliens, hydriques et de réinjection dans le bassin de Daïet Chouiouia, présentés sur une vue perspective 3D, MNT précision altimétrique 10 mètres drapée d'une image en composition colorée (canaux 5,4,1) fusionnée avec la bande panchromatique pour augmenter la résolution spatiale à 15 mètres. (Image Landsat 7 ETM+ mars 2001. Echelle d'altitude exagérée de 2,5).

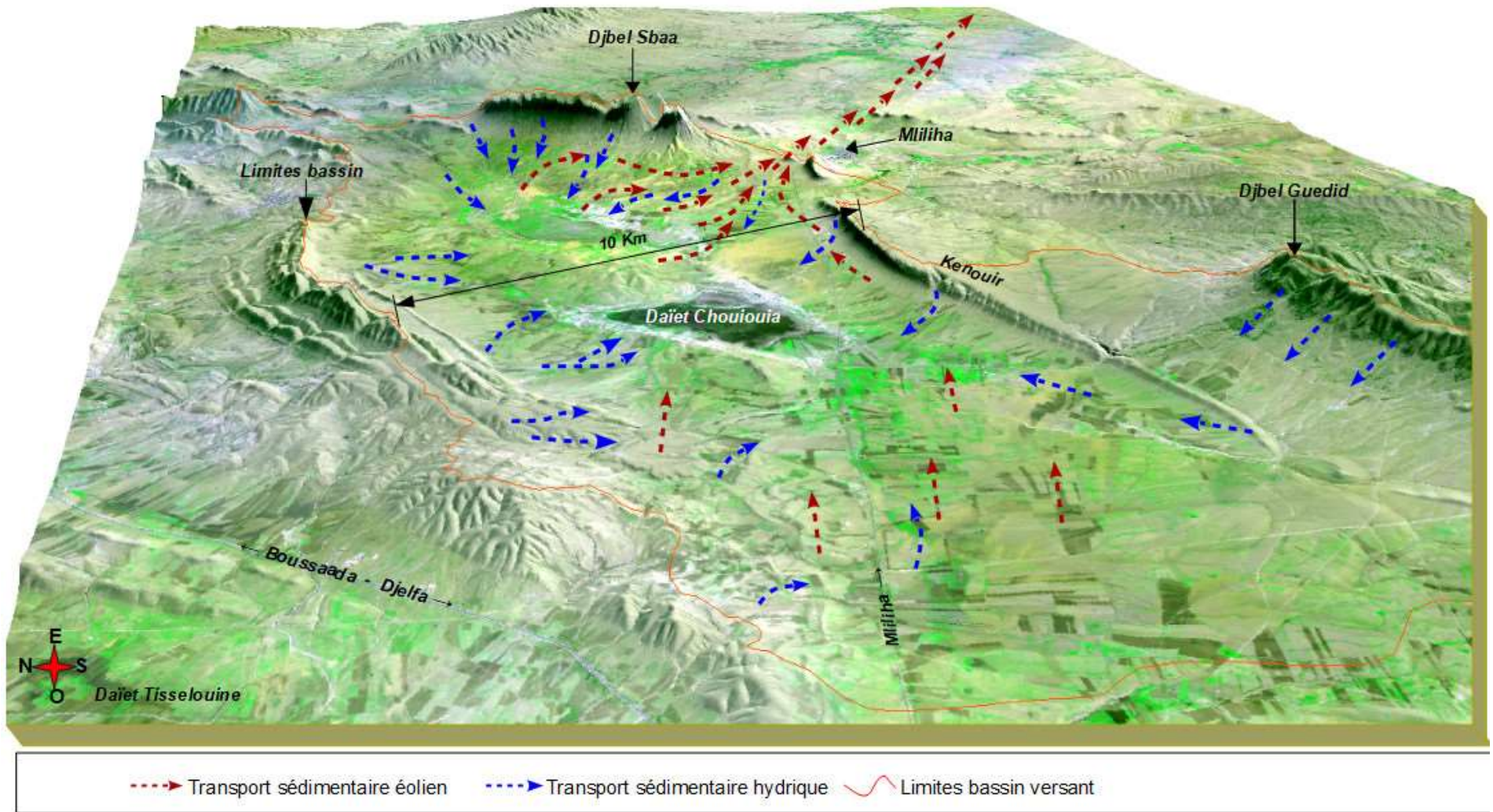


Figure 144 : Processus de transfert et d'interaction des flux sédimentaires éoliens, hydriques et de recyclage dans le bassin de Daïet Chouiouia, présentés sur une vue perspective 3D. MNT de précision 10 mètres et composition colorée (canaux 4,8,2) d'image Sentinel-2 du 28 décembre 2016.

C'est sur le plateau méridional de la daïa que cette interaction trouve pleinement son sens. Dans ces lieux, les deux acteurs de transport agissent en sens opposé. En effet, sur les premières pentes en sortant de la dépression vers le sud-est, le vent libère sur sa trajectoire la charge sédimentaire freinée par la pente. Les formes sableuses déposées montrent que ce lieu constitue un terrain privilégié pour l'ensablement (Figure 143, Figure 144). Mais, il se trouve également que les caractéristiques topographiques font aussi de ce lieu un terrain de choix pour l'action hydrique. L'eau trouve sa force dans les pentes des hauteurs du Djebel Sbaa surplombant la daïa et exposé au vent porteur de pluies. Les ravins emportent le sable entassé dans leur lit pour le réinjecter dans la dépression. L'interaction entre l'action hydrique et éolienne présente des traits concurrentiels et complémentaires. Concurrentiel, dans le sens que chaque agent remanie et emporte les accumulations de l'autre. En effet, l'eau renvoie les sédiments vers la dépression, alors que le vent les emporte par déflation. En revanche, sur les plaines occidentales et septentrionales de la daïa, les deux agents de transport actifs sont complémentaires : ils entraînent les sédiments dans la même direction vers la cuvette de la daïa.

Une originalité de ce site est la présence d'une importante couverture sableuse piégée à l'intérieur du bassin hydrographique de la daïa. L'addition des facteurs, des précipitations sous forme d'averses, d'une pente favorable et de couverture végétale éparse favorise le ruissellement. La disponibilité du matériel assurée par la couverture sableuse offre un terrain privilégié pour transporter le sable vers la cuvette de la daïa. Par ailleurs, la cuvette est le lieu privilégié de déflation, quand les conditions le permettent, l'action éolienne renvoie le produit sableux sur le plateau, ce qui alimente à nouveau le processus hydrique par du produit meuble. Alors, une boucle cyclique s'installe et s'auto-entretient. Ce processus de retour sédimentaire « cuvette-plateau-cuvette », nous l'avons appelé « réinjection ». Dans la Figure 145, nous avons conceptualisé ce processus, mais il manque des données appropriées, de mesures de terrain pour enrichir cette hypothèse. Toutefois, des images satellitaires viennent soutenir cette démonstration.

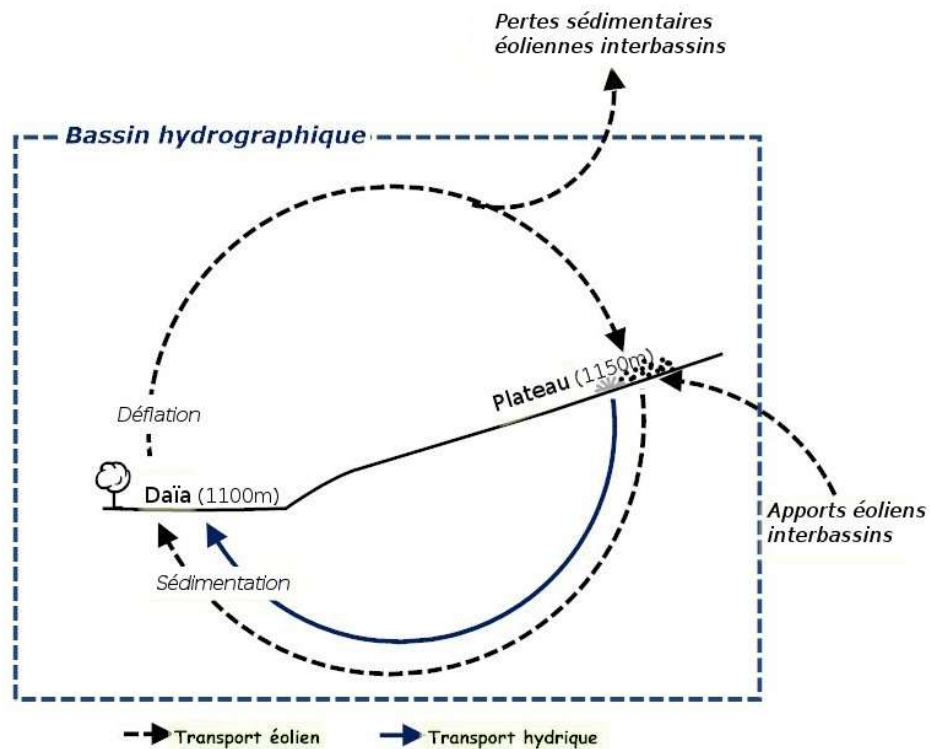


Figure 145 : Boucle d'équilibre sédimentaire d'une dépression hydro-éolienne fermée

Le transport de produit sédimentaire à contre-pente de la daïa vers le plateau est assuré par le seul agent capable de défier les pentes et reliefs, le vent. En effet, le vent est responsable de l'alimentation sédimentaire des plateaux depuis la dépression. Il est également le seul capable de franchir les limites du bassin hydrographique pour opérer des échanges sédimentaires interbassins dans un processus d'interactivité entre bassins.

Quant au transport sédimentaire, dans le sens du plateau vers la cuvette, il peut être assuré par le couple hydrique et éolien. L'action hydrique s'exerce et influence les sédiments dans l'unité du bassin hydrographique, son transport se fait dans le sens de la pente. Les ruisseaux et oueds assurent l'alimentation de la dépression par des sédiments. Lors des événements pluvieux, ils emportent des éléments détritiques issus de la désagrégation de la roche, ou de produits sableux arrachés à la couverture sableuse, aux voiles et placage sableux sur les reliefs. De son côté, l'action éolienne joue également un rôle d'alimentation de la cuvette quand la configuration du site et des directions des vents sont favorables.

Pour soutenir et argumenter l'idée d'un retour du sable depuis les plateaux et les plaines vers la cuvette, la Figure 146 montre le retour du sable dans la cuvette sur les deux côtés. Sur les bordures occidentales, il s'agit d'une action commune de transport : les chenaux d'eau et l'action du vent poussent une fine couche de sable vers le centre de la cuvette. La taille de cet îlot est d'environ 1 km de long sur 500 mètres de large. Sur le côté oriental, le cours d'eau, après un événement pluvieux, apporte les sédiments et dépose sa charge dans la dépression. Sur ce côté, l'action hydrique exerce le transport dans la direction opposée du vent dominant. Cette image nous semble fournir la preuve visuelle de ce retour et de la réinjection sédimentaire.

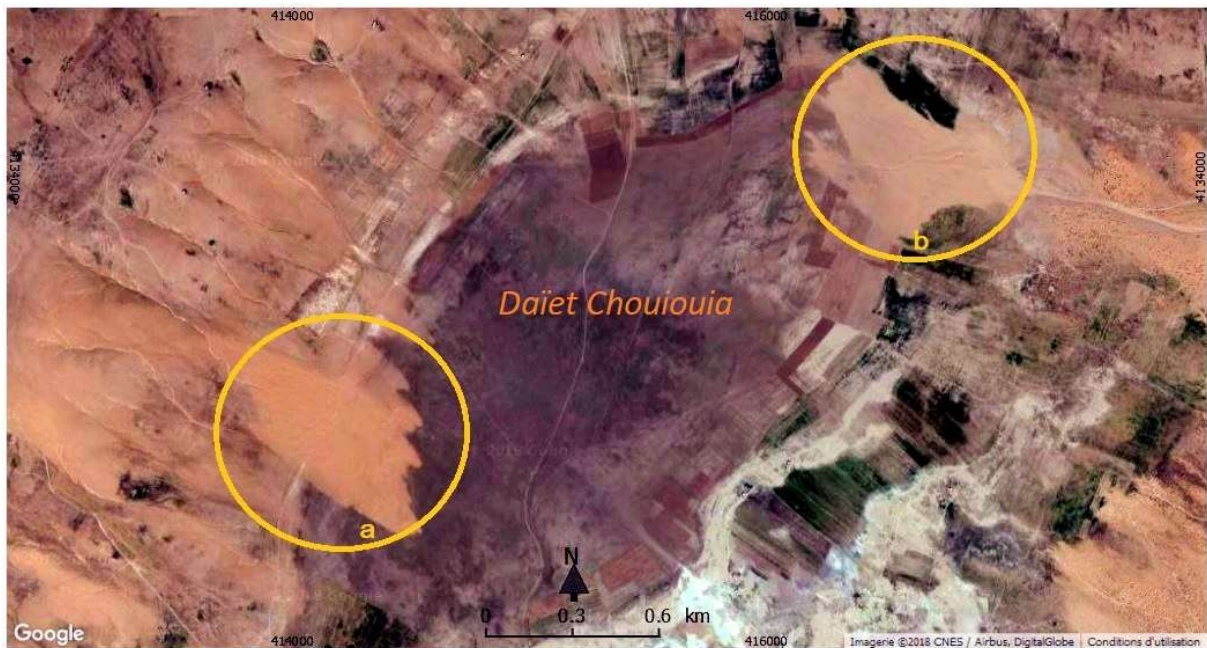


Figure 146 : Réinjection sédimentaire du plateau vers Daïet Chouiouia. L'ellipse a : incursion sur la rive occidentale d'environ 1 km de long et 500 mètres de large. L'ellipse b : diffus (Image Digital Globe du 13 février 2017, Google Earth)

Il devient plus clair que la forme des apports sableux est fortement conditionnée par la topographie qui joue un double rôle de concentration (convergence). Elle ne concerne pas seulement l'influence et l'orientation du flux sédimentaire éolien à travers des zones de passage préférentiel, mais également la concentration sédimentaire dans des zones de déflation ; zones source de sable à l'action éolienne. En effet, l'action hydrique, par ruissellement, arrache les sédiments disponibles dans son bassin vers des sites topographiquement bas (daïa, sebkha). Par cette réalisation de concentration sédimentaire, l'action hydrique concentre également le potentiel de déflation dans ces lieux. Lors d'une conjoncture climatique favorable, ils se transforment en champs de déflation et de remobilisation sédimentaire pour les vents. L'examen des autres daïas, lors d'un événement de sécheresse nous a permis de confirmer ces déductions, exemple du sable visible déposé sur les plaines méridionales de Daïet Tisselouine lors de la séquence sèche de 1984 (Figure 115) et en 2003 (Figure 126, Figure 127).

12.4. Quelques indices d'ancienneté des formes sableuses

Examiner l'ancienneté de l'ensablement est une approche difficile car le site change rapidement et ne laisse pas trop de traces sur le paysage. Nous présentons deux indices qui plaident pour un phénomène récent, du moins dans son ampleur et son intensité lors des crises de sécheresse. Il faut préciser que le manque de traces ne constitue pas la preuve d'absence d'une activité d'ensablement ancienne. Il n'exclut pas non plus le scénario d'une construction rapide des édifices sableux, aussitôt détruits par l'action hydrique, sans laisser de buttes comme à l'état actuel. Les deux marqueurs examinés concernent les traces de l'activité éolienne et l'examen du vestige sédimentaire sableux sur site.

12.4.1. Examen du marquage de l'activité éolienne

Il est connu que pendant la migration sédimentaire, l'action éolienne marque les zones de transit par son action de polissage (Callot, 2008). Dans ces lieux, l'action mécanique des particules de sable a laissé des traces très discrètes voire invisibles sur le rocher. En effet, sur les roches délimitant les petits cols de Rouissat el Mehara, au niveau du tombeau du « Sidi bel Mellal » situé dans la zone de transit du sable, les roches ne présentent pas de signes d'un polissage visible. Le même constat est établi sur le Djebel Kenouir et le Djebel Sbaa : dans la zone de passage préférentiel, située entre les reliefs, les traces de cette action mécanique sont également indiscernables.

Dans le même sens, le site ne présente pas de galets polis au sol, signe de la présence d'une action de polissage. De même, nous n'avons pas observé la présence de dépôts sableux fossiles, encroûtés et durcis. Ces faits indiquent que cette remobilisation sédimentaire n'a pas encore eu le temps nécessaire pour marquer le paysage par son œuvre de polissage.

12.4.2. Examen de vestiges sédimentaires

Sur la zone de dépôts éoliens du plateau situé au sud du Djebel Sbaa, nous avons relevé la présence de dizaines d'endroits (lieux) où le dépôt sableux contient des objets anthropiques ou de la végétation qui ont pu être conservés enfouis dans les sédiments des dépôts sableux.

Les vestiges anthropiques sont des objets issus de la consommation, des morceaux de plastique emportés depuis la décharge à ciel ouvert de la ville de Mlilha située au Nord-Ouest, dans la direction des vents dominants. En termes de distribution spatiale, ces débris sont absents dans les dépôts sableux situés au nord de la ville de Mlilha.



Figure 147 : Sous l'effet de l'érosion hydrique, les dunes exhibent les indices de vestiges anthropiques, et végétaux (D) (octobre 2013, 34°41'40"N - 3°47'42"E)

L'identification de ces objets indique : des fragments de plastique de bouteilles d'eau ; un morceau de film de radiographie médicale ; un reste d'emballage en aluminium d'un sachet de lait de poudre « Lahda » (image B- 2). Ce dernier était un produit très répandu en Algérie dans les années 80 - 90. Si ces objets n'ont pas permis de dater avec exactitude leur âge, néanmoins ils nous indiquent que la construction de ces formes est récente, postérieure aux années 1980.



Figure 148 : Vestiges anthropiques piégés dans des buttes de sable
(Octobre 2013, 34°41'40"N - 3°47'42"E)

La dernière image (D) montre une plante ensevelie sous 70 cm de sable. Cela illustre la rapidité avec laquelle l'ensablement s'installe. Il n'a pas laissé le temps nécessaire à la plante pour développer de nouvelles tiges dans sa quête de lumière en dessous des couches de sable. Toutefois, cette déduction est sujette à incertitude, au manque de preuves que la plante n'était pas déjà morte, ou en dormance estivale lors de l'accumulation du sable. L'autre incertitude est liée à la rapidité du changement : si on est dans un environnement où les buttes sont construites rapidement, mais détruites aussitôt par l'érosion hydrique, rien n'indique qu'il n'y a pas eu depuis longtemps plusieurs générations de ces nebkas qui ont grandi et ont été détruites.

12.5. Synthèse

En guise de conclusion de cette partie, l'analyse a permis de révéler la présence d'un système éolien. Dans ses maximas, il montre une grande étendue de couverture sableuse en forme d'entonnoir (Y) en étroite relation avec le relief et le vent dominant. La partie large, zone amont du dépôt sédimentaire, se forme sur le plateau méridional qui surplombe la cuvette de la daïa.

Cette pré-configuration exerce une action directe sur le sable mis en mouvement depuis la dépression pour former un large dépôt sableux. La suite du dépôt sableux est chenalisée par le relief : le vent concentre son action vers l'ouverture topographique méridionale pour déposer des sédiments sur une traînée sableuse longue de 35 km. Cette partie est la plus étroite (4 km en moyenne) et la plus longue. La forme de ce dépôt est le résultat de la conjugaison de la topographie du site et de la direction du vent dominant.

L'analyse temporelle montre que l'existence du manteau sableux n'est pas pérenne, mais fluctuante. La rapidité avec laquelle s'opère ces changements laisse penser que nous sommes en présence d'un phénomène éphémère mais qui récidive. Les fluctuations de la pluviométrie sont le premier facteur influençant ses caractéristiques. En effet, le sable semble rentrer en résonance avec les variations des précipitations.

Ce lien entre l'ensablement et la pluviométrie a pu être examiné grâce à l'introduction de la mesure de la surface ensablée. La mise en place d'une méthode pour produire une mesure cohérente était un préalable à cette analyse. La difficulté réside à la fois dans les caractéristiques d'une couche fine de sable très changeante, et de l'autre dans la diversité d'images (MSS, TM, ETM+, Landsat 8 et Sentinel-2).

Par ailleurs, le climat semi-aride non désertique, permet le développement d'une part d'une très forte interaction entre l'action éolienne et l'action hydrique et d'autre part d'une reconquête végétale plus marquée pendant les années humides. L'interaction entre l'action éolienne et hydrique est observée dans l'évolution des formes sableuses, mais aussi dans l'alimentation de la dépression par le produit sédimentaire par la présence d'un processus de réalimentation sédimentaire, attesté par le retour du sable à la cuvette. Ce processus participe à l'équilibre sédimentaire de la dépression pendant les saisons à pluviométrie favorable, mais il entretient l'ensablement pendant les périodes de crise.

Chapitre 13 : Analyse spatio-temporelle régionale de l'ensablement

La question se pose de la capacité et de la représentativité du site de Daïet Chouiouia à exprimer l'ensablement dans la région. En effet, la dépression hydro-éolienne a des caractéristiques topographiques et hydrographiques qui l'exposent particulièrement aux deux processus d'érosion hydrique et éolienne. L'interaction entre ces deux processus peut aboutir à une amplification de l'ensablement. Donc, dans quelle mesure l'ensablement constaté dans Daïet Chouiouia évolue-t-il par rapport à l'ensablement d'autres sites de la région de Djelfa ?

La corrélation d'ensablement au niveau régional laisse entrevoir également la spécificité de ce site de Daïet Chouiouia : ensablement en mode précurseur ou en mode retardateur. Pour répondre à cette question, trois sites (Figure 149) ont été retenus, situés respectivement dans l'Atlas, dans la dépression des chotts et le dernier dans les hautes plaines. Ce qui représente une étendue de 160 km de diagonale SE-NW.

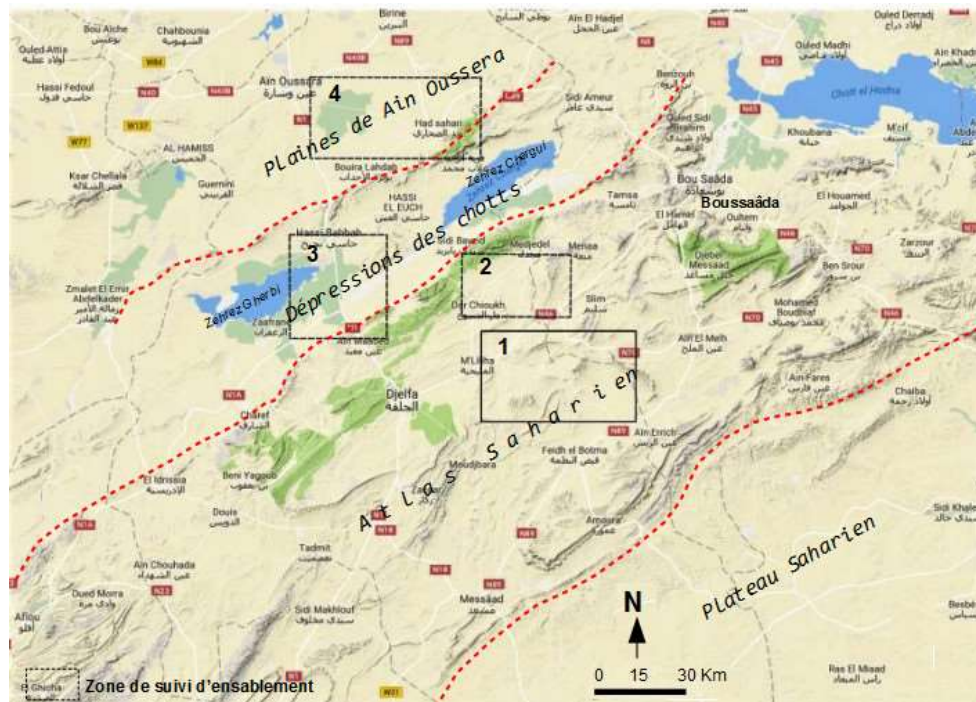


Figure 149 : Carte de localisation des sites de suivi d'ensablement (1 - Daïet Chouiouia, 2 - Dar Chioukh, 3 - Zahrez Gharbi et 4 - Had Sahary, fond cartographie Google).

- Celui de Dar Chioukh (2), dans la partie nord de l'Atlas saharien présente des caractères topographiques et hydromorphiques très différents du site des daïas., ce qui suggère un changement dans l'action éolienne et hydrique.
- L'autre site (3), est situé dans la dépression des chotts. Nous avons retenu le côté occidental au niveau du Zahrez Gharbi. Il couvre une partie du cordon dunaire jusqu'à la ville de Hassi Bahbah au nord.
- Le dernier site (4), plus au Nord, couvre les plaines entre Ain Oussera et Had Sahary.

Pour l'approche diachronique, nous avons retenu six dates qui correspondent à des phases variées en termes climatique et d'ensablement, afin de capter la présence de fluctuations de l'ensablement dans différents sites. A cet effet, nous utilisons les images satellitaires utilisées auparavant dans le site de Daïet Chouiouia.

- 1984 : année de référence, reflète l'impact de la grande sécheresse climatique des années 80 dans toute la région.
- 1987 : début d'une période d'accalmie, se manifestant par des reculs de la surface sableuse. L'intérêt de ce court laps de temps de trois ans est de nous permettre de mesurer et d'apprécier la vitesse et la rapidité de réaction de l'ensablement à l'amélioration des conditions climatiques.
- 1995 s'inscrit dans une séquence à pluviométrie moyenne. Le sable est moins présent. Il recule mais reste dans des sites où le piégeage favorise l'accumulation des couches épaisses.
- 2001 : c'est l'année d'amorce d'ensablement dans le site des daïas. Elle permet d'observer et d'examiner cette dimension de la réactivité du processus d'ensablement face à l'assèchement climatique. Sur le plan spatial, elle permet de vérifier la spécificité ou la généralité des observations observées dans le site des daïas.
- 2003 : En plein dans la séquence de sécheresse, à l'apogée de l'ensablement de Daïet Chouiouia,
- 2011 : effacement presque complet du sable sur tous les sites

On reprend la même méthode de traitement d'images, la cartographie d'ensablement est réalisée par une classification supervisée. Nous exposons les résultats de traitement temporel, site par site, puis nous analysons la cohérence d'évolution temporelle au niveau global.

13.1. La dynamique d'ensablement dans le site de Dar Chioukh

Ce site est situé sur les bordures nord des contreforts de l'Atlas saharien. C'est un plateau qui évolue entre 1000 et 1100 m d'altitude. Protégé au nord par une chaîne de montagnes qui forme une barrière topographique, le site s'élève jusqu'à 450 m au-dessus du Zahrez Chergui (Figure 150). On trouve aussi Djebel Senebria, haut de 1400 m et le Djebel Chebeibita, revêtus par une forêt d'étage méditerranéen se compose principalement de pins d'Alep, de garrigues arborées, de genévriers et de broussailles. Les cours d'eau de ce secteur convergent vers l'Oued Medjdel qui traverse le site du Sud-Ouest vers le Nord-Est. A l'approche du point exutoire, l'eau de l'oued est bloquée par les formations sableuses qui l'empêchent d'atteindre le Zahrez Chergui. Il inonde ainsi la plaine d'épandage, ce qui lui permet d'alimenter la nappe phréatique et favorise le développement de l'agriculture. Au centre nord, la topographie baisse d'une centaine de mètres au niveau de Daïet Ben Sahouane. Cette topographie suggère que cet endroit est protégé des assauts du vent dominant par les reliefs du Nord mais également du côté Sud.

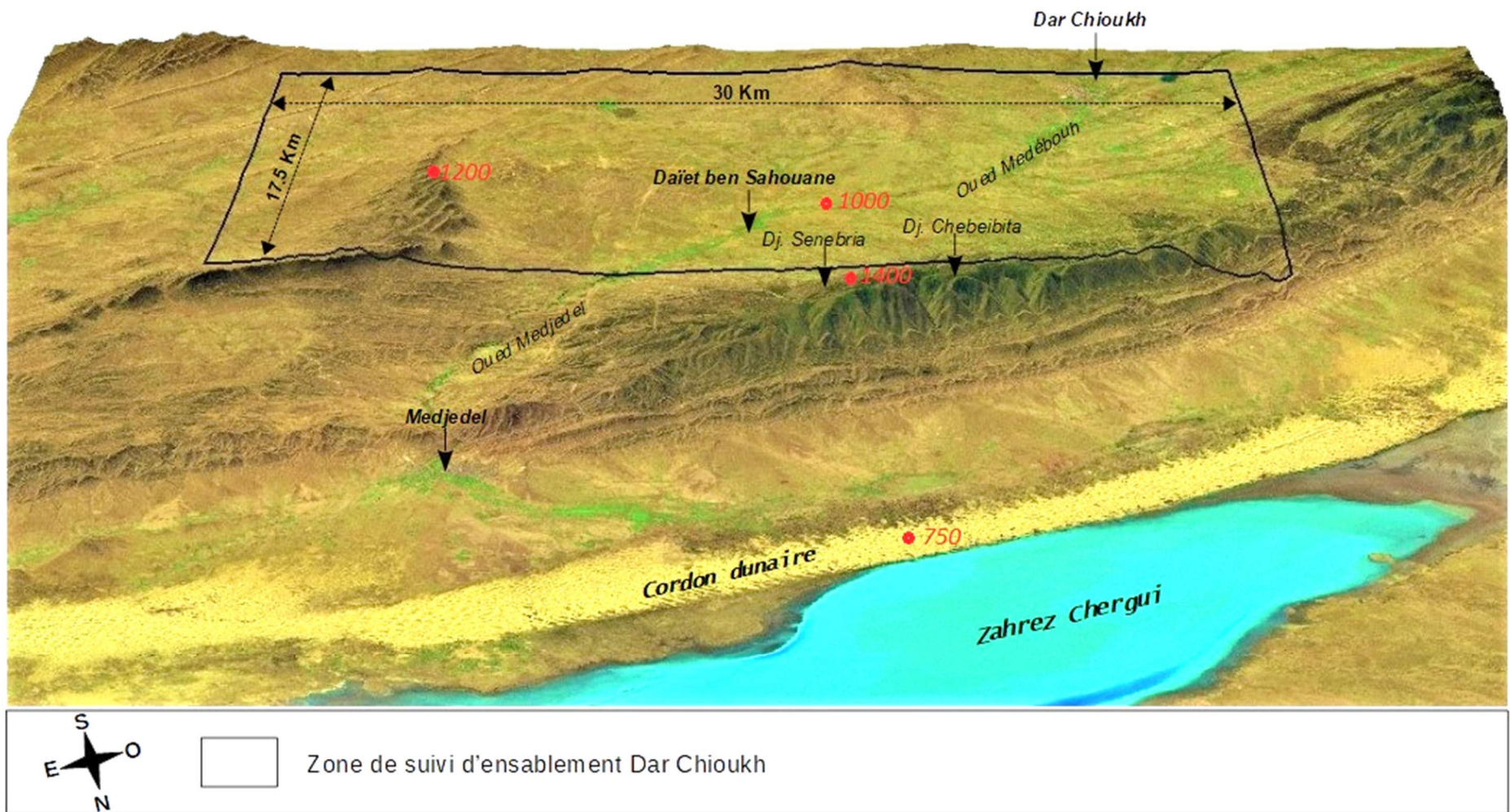


Figure 150 : Site pour le suivi d'ensablement Dar Chioukh
 (MNT SRTM Void Filled – USGS, composition colorée de l'image Landsat 7 ETM mars 2001)

L'analyse de l'image Landsat TM d'avril 1984 révèle que le site est ensablé. La surface ensablée se répartit sur les deux côtés de l'Oued Medébouh. Toutefois, une petite tendance se dégage à la concentration vers des zones préférentielles localisées, au sud de Daïet Ben Sahouane, le long de l'oued, avec des parcelles déchiquetées vers Dar Chioukh et à l'Est.

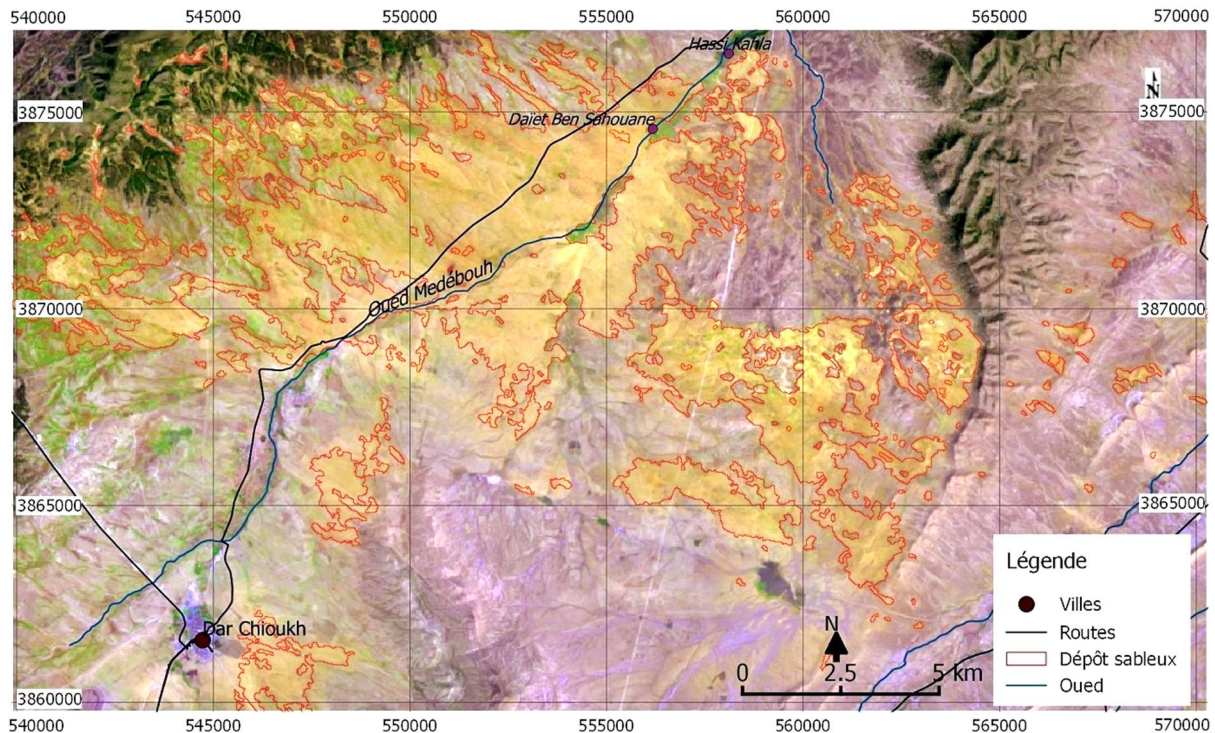


Figure 151 : Carte d'état de la surface d'ensablement en 1984 délimitation de sable sur l'image en composition colorée 5-4-1, site Dar Chioukh (image TM avril 1984, surface ensablée : 107 km²)

L'image TM d'avril 1987 montre le recul du sable : la surface ensablée enregistre une baisse spectaculaire de 68% par rapport à 1984. Toutes les images suivantes s'inscrivent dans la même tendance, celle du recul du produit sableux jusqu'à sa disparition presque complète du paysage. En effet, l'image TM de mai 1995 confirme une baisse substantielle de 16% supplémentaires, confirmée par l'année 2001 (image ETM, mars) avec un recul de 11%. Cette année-là, il ne reste que 4.9 km², soit 4 % de la surface ensablée par rapport à 1984.

La forte variation temporelle est perceptible dans la spectaculaire baisse de la surface ensablée de 68% sur une courte période de 3 ans (84 – 87). Cette rapidité suggère que nous sommes en présence de fines couches de sable. Le changement spatial observé sur la couverture sableuse indique la présence d'endroits préférentiels de rétraction du sable. Ils se localisent principalement dans des zones en amont des cours d'eau. Mais, dans l'image de 87, les dépôts sableux se regroupent à l'endroit le moins exposé au vent, vers Daïet Ben Sahouane dans une zone à faible pente. Cette apparence évoque une participation active de l'action hydrique dans la concentration puis l'évacuation du produit éolien.

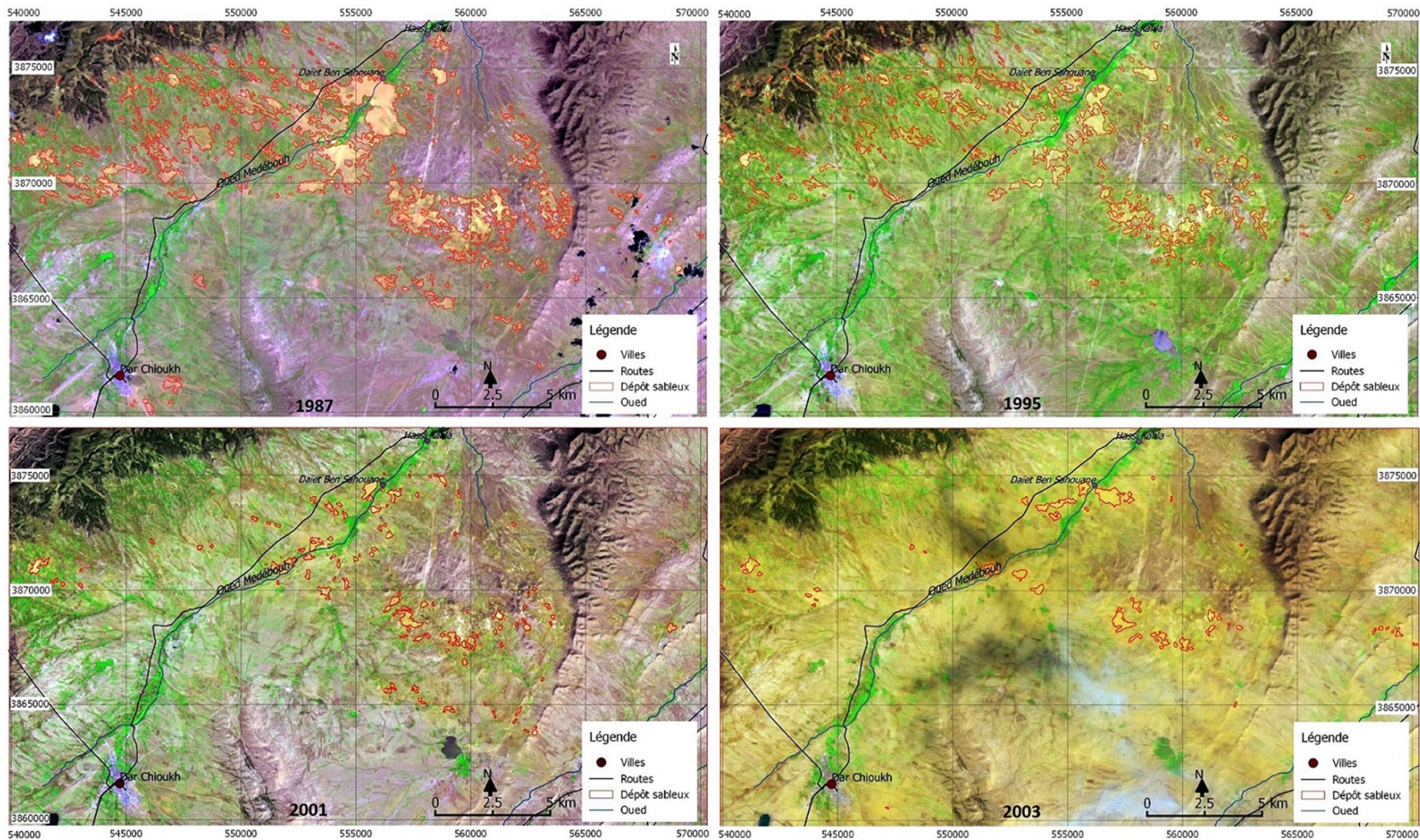


Figure 152 : Cartes d'états de la surface d'ensablement, délimitation du sable sur l'image en composition colorée 5-4-1, site Dar Chioukh
 (Surface ensablée (SE) 1987= 34,2 km² ; SE 1995 = 17 km² ; SE 2001 = 4,9 km² ; SE 2003 = 3,7 km²)

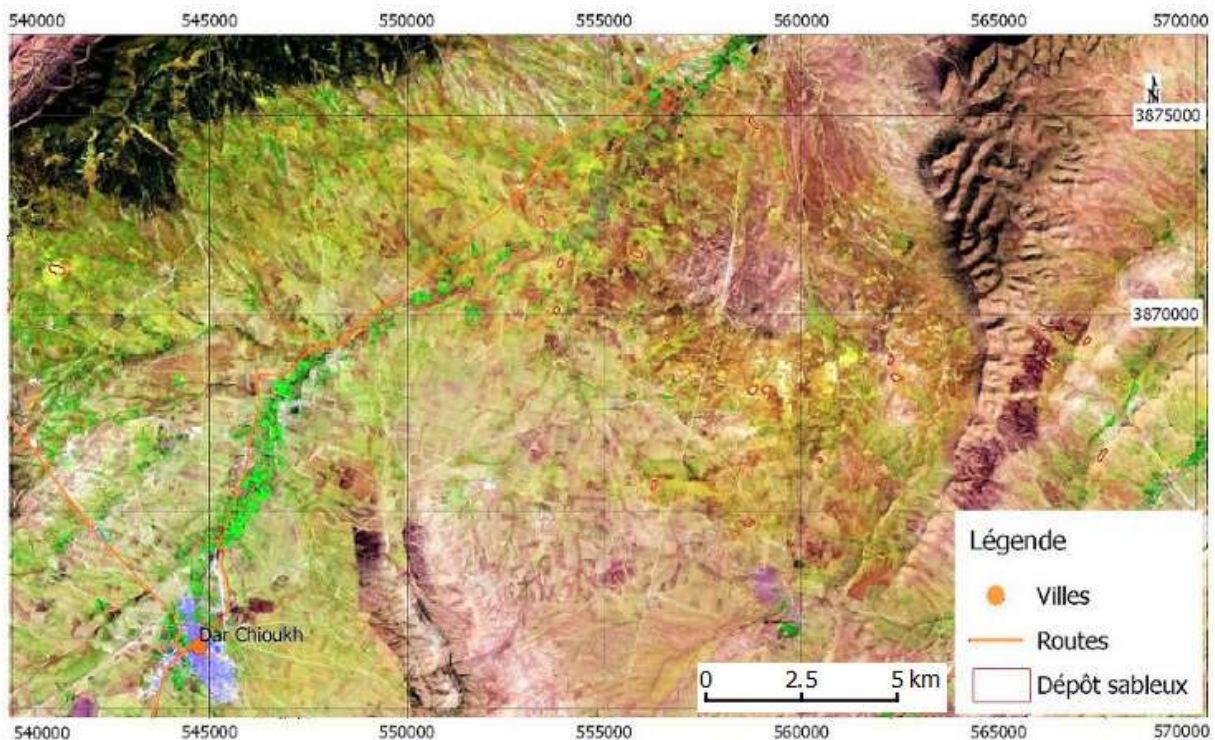


Figure 153 : Cartes d'état de la surface d'ensablement, délimitation du sable sur la composition colorée 5-4-1, site Dar Chioukh, image Landsat 7 ETM d'avril 2011, surface ensablée = 0.5 km².

L'image de 2011 vient confirmer l'évolution observée depuis mars 2003, celle d'un recul de sable bien perceptible. En effet, la surface mesurée est très faible, s'approchant de l'absence totale.

13.2. La dynamique d'ensablement dans le site du Zahrez Gharbi

Ce site, situé dans la dépression des chotts, s'étale du sud au nord sur une distance avoisinant 29 km pour envelopper une bonne partie du synclinal de la dépression des Chotts. Dans sa partie méridionale, il couvre une partie du relief de l'ossature de l'Atlas saharien et le diapir du rochet de sel dit « de Djelfa », un peu au nord de la ville de Ain Mabed. Le site couvre également une partie du cordon dunaire, du Zahrez Gharbi jusqu'au nord de la ville de Hassi Bahbah et les plis de relief au niveau de Guelt es Tel et du Djebel Sbaa Rous (sept têtes) (Figure 155).

Cette dépression étant comblée par les dépôts continentaux, ses sols sont formés essentiellement d'argile sableuse rouge. Les eaux de ruissellement convergent du Nord comme du Sud vers le Zahrez. Récemment de nombreux petits barrages et des retenues collinaires ont été construits sur les Oueds de l'Atlas saharien. Celui de l'Oued Karirech irrigue la plaine d'épandage sur les bordures sud du cordon dunaire, visible sur la Figure 155. D'autres oueds et chenaux, venant de l'Atlas, sont bloqués par des formations sableuses pour alimenter les nappes phréatiques. On observe également le développement d'une agriculture d'irrigation sur certaines plaines d'épandage avec la mise en place de systèmes de dérivation des eaux.

Le sable du cordon dunaire des bordures sud du Zahrez Gharbi, principalement gypseux (40 à 80% de gypse), se mélange avec un sable quartzueux d'origine alluviale (Pouget, 1980). Makhlouf (1993) a étudié 70 échantillons, le long du cordon dunaire, espacés entre 500 et 800 mètres. L'analyse granulométrique de ces échantillons confirme l'absence de produits fins, inférieurs à 40 μ m. Le sable du cordon est faiblement éolisé et moins dynamique, il ne convient donc pas dans cette comparaison. Nous ne nous sommes intéressés qu'au sable jaunâtre plus libre qui se cumule à la rencontre des obstacles sur les pieds du relief. En effet, les deux sables présentent des caractéristiques différentes en termes d'origine, de granulométrie, de couleur et en signature spectrale (Figure 154).

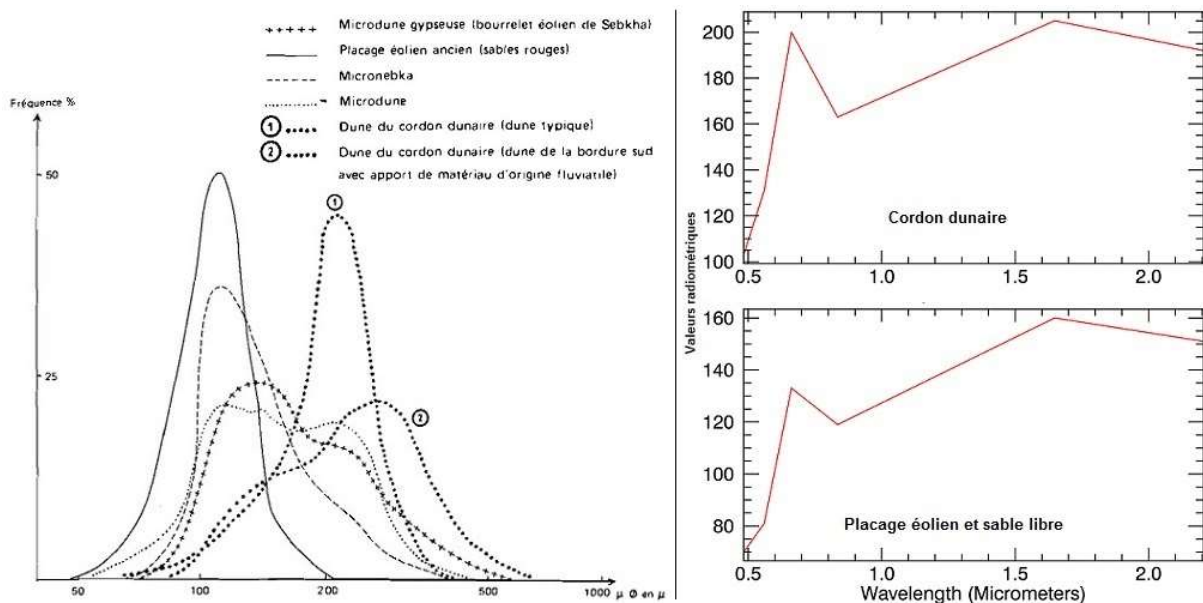


Figure 154 : Profil granulométrique et spectral du sable dans le Zahrez Gharbi (Source profil granulométrique (Pouget, 1980), profil spectral images Landsat 7 ETM mars 2001).

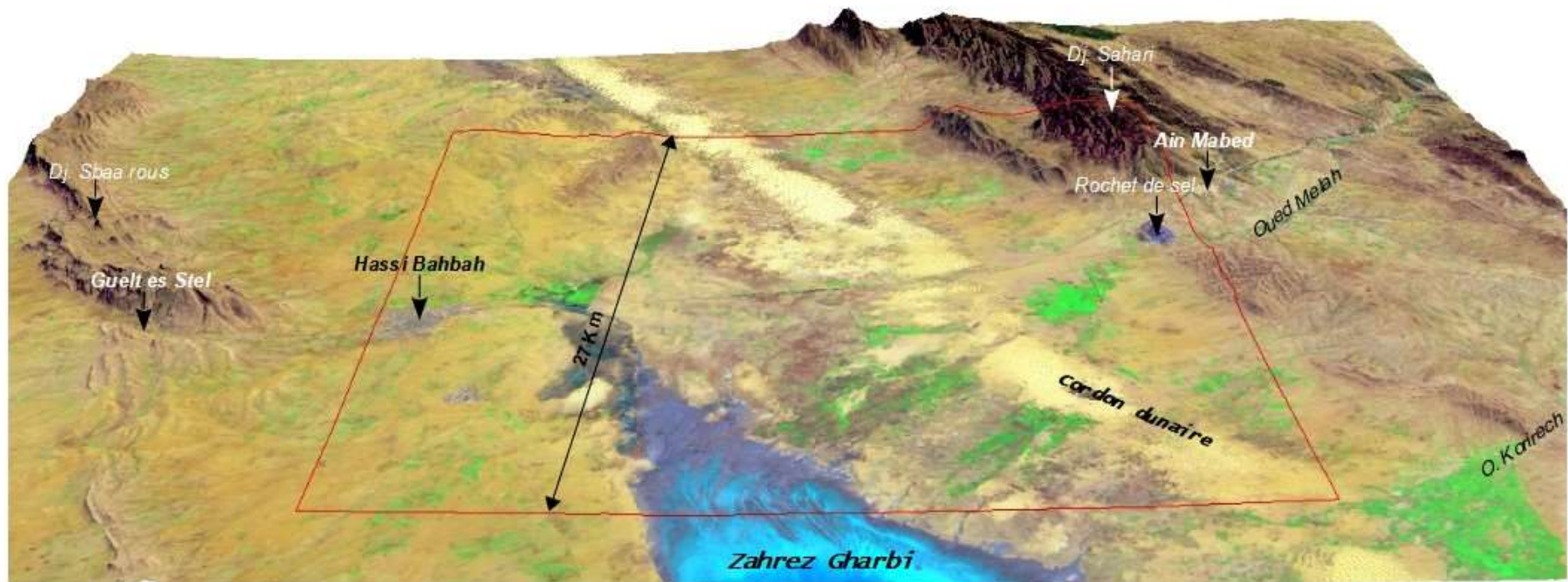


Figure 155 : Site de suivi d'ensablement Zahrez Gharbi
 (MNT SRTM Void Filled – USGS, composition colorée 5-4-1, image Landsat 7 ETM de mars 2003)

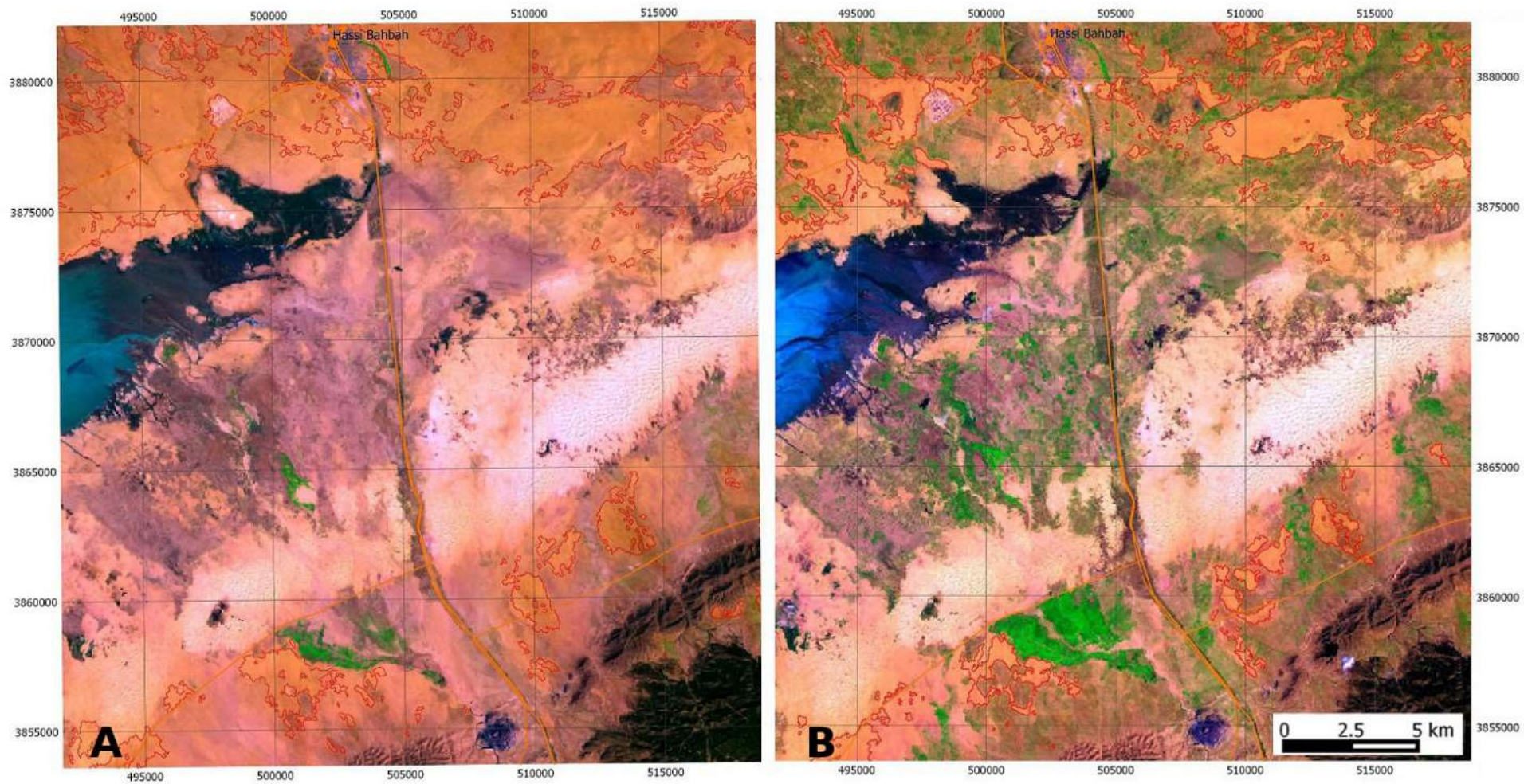


Figure 156 : Etat de la surface d'ensablement (sable vif et voiles sableux délimités par les contours rouges) sur l'image en composition colorée 5-4-1, site Zahrez Gharbi. Images Landsat (A : avril 1984, surface ensablée = 254 km² ; B : avril 1987, surface ensablée = 65 km²).



Figure 157 : Etat de la surface d'ensablement (sable vif et voiles sableux délimités par les contours rouges) sur l'image en composition colorée 5-4-1, site du Zahrez Gharbi. Images Landsat (C : 1995, SE = 32 km² ; D : 2001, surface ensablée = 38 km²)

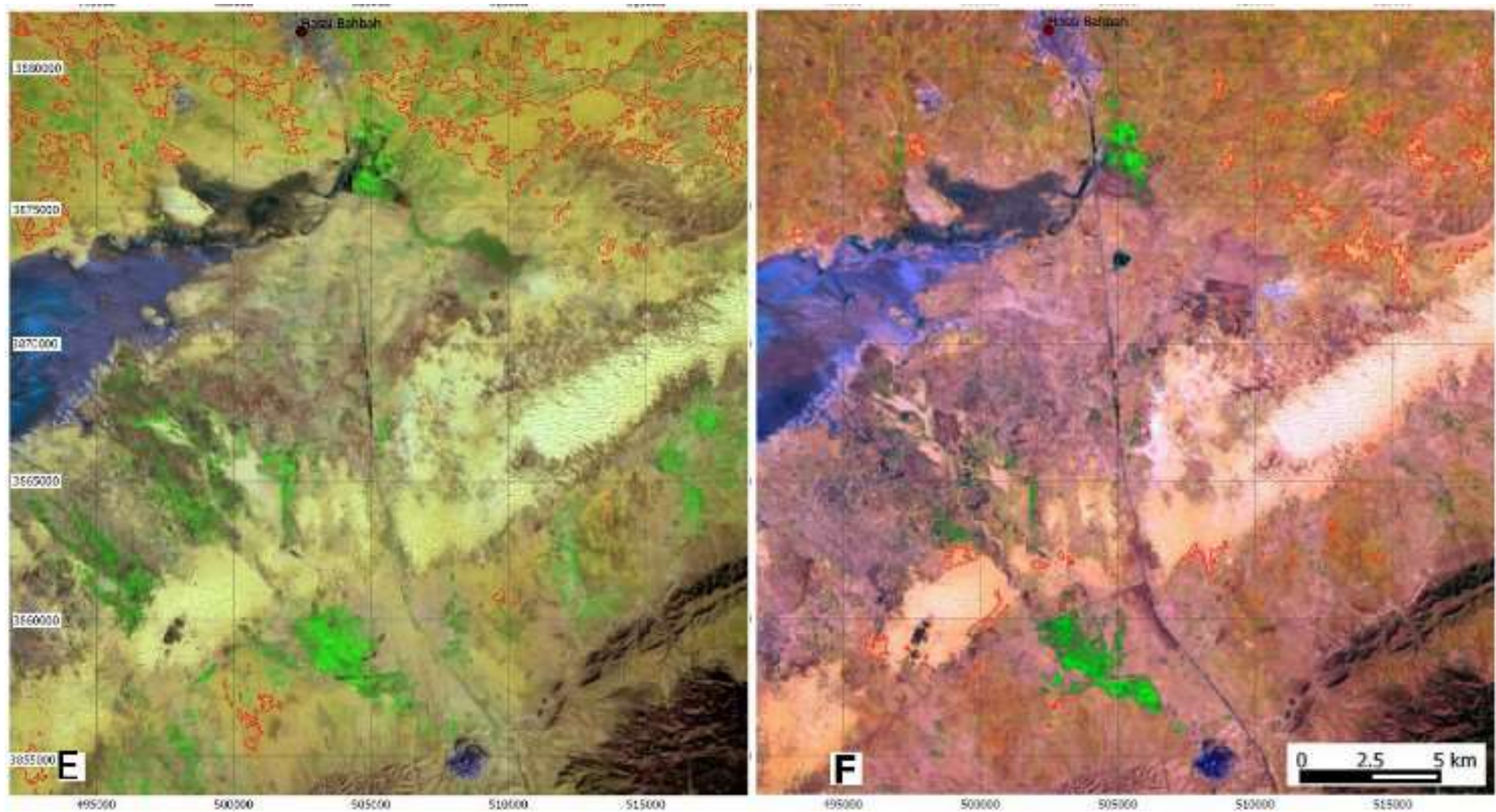


Figure 158 : Etat de la surface d'ensablement (sable vif et voiles sableux délimités par les contours rouges) sur l'image en composition colorée 5-4-1, site du Zahrez Gharbi. Images Landsat (E : 2003, SE = 49 km² ; F : 2011, surface ensablée = 10 km²)

Pendant les années de crise d'ensablement (1984), le sable s'étend essentiellement dans la partie nord de ce site aux rencontres des plis du relief. Lors de ces épisodes, le sable réapparaît également au sud du cordon dunaire au soulèvement topographique de l'Atlas. Apporté par le vent dominant, le sable libre jaunâtre se dépose sur le sable du cordon dunaire. Cette juxtaposition des deux processus complique l'analyse de la dynamique du cordon dunaire. Elle se manifeste essentiellement pendant les périodes de sécheresse climatique.

L'image de l'année 84 enregistre le niveau d'ensablement le plus élevé, les années suivantes n'ont jamais pu atteindre ce niveau. En synchronisme avec les trois autres sites, le recul de sable est remarquable sur une période de 3 ans entre 1984 et 1987 : 75% perdus, essentiellement les couches les plus fines de placage et sable libre. Le site réagit faiblement à la séquence de sécheresse observée entre 1997 et 2003. En effet, le sable augmente légèrement en 2001 soit 2% rapportés à 1984, une faible progression poursuivie en 2003 avec 4%. L'impermanence de ce produit sableux peut être observée également par l'imagerie à haute résolution. L'image du village de Farzoule situé à 15 km à l'est de la ville de Hassi Bahbah montre la rapidité du changement (Figure 159).

En 2006, à l'est du village, du placage sableux couvre la surface sans laisser apparaître la végétation bien que la saison du printemps soit une période propice à la croissance végétale. En 2007, le sable se rétracte, les parcelles de labour refont surface sur la zone auparavant ensablée. Les changements suivants s'inscrivent également dans l'alternance d'ensablement. Dans l'image d'octobre 2010, le sable est plus diffus encore et présent sur les quatre côtés du village. On observe, l'apparition de certains arbres, l'absence de parcelles labourées en pleine saison de labour. L'année 2013 sonne la disparition complète du sable. On constate que le site est en perpétuel changement.



Figure 159 : Suivi temporel d'ensablement par des images à haute résolution, village de Farzoule. En 2006 le sable se concentre sur le côté Est ; En 2007, le labour reprend sur une partie de la zone ensablée, signe que la couche de sable est fine. En 2010, la couche sableuse entoure le village, mais a disparu complètement en 2013 (35° 4'31.56"N - 3°12'18.72"E ; Google Earth).

L'étude de terrain ainsi que l'imagerie haute définition montrent que la région est parsemée par quelques arbres principalement le pin d'Alep et le Tamarix en s'approchant du Zahrez. Plus récemment, au SW de la ville de Hassi Bahbah, de magnifiques plantations arbustives ont été réalisées. Elles couvrent une bonne partie des zones qui étaient impactées par le passage du sable.

13.3. La dynamique d'ensablement dans le site de Had Sahary

Le site de Had Sahary se situe dans la partie sud-est des plaines de Aïn Oussera, sur une largeur ouest-est de 45 km (Figure 160). Dans la partie extrême Sud-Est, on trouve la ville de Had Sahary bordée au sud par des reliefs, dont le Djebel Fegnouna (1350m). Les eaux ruissellent de manière générale du sud vers le nord. Les terrains sont essentiellement utilisés en agriculture céréalière ou en aires de parcours.

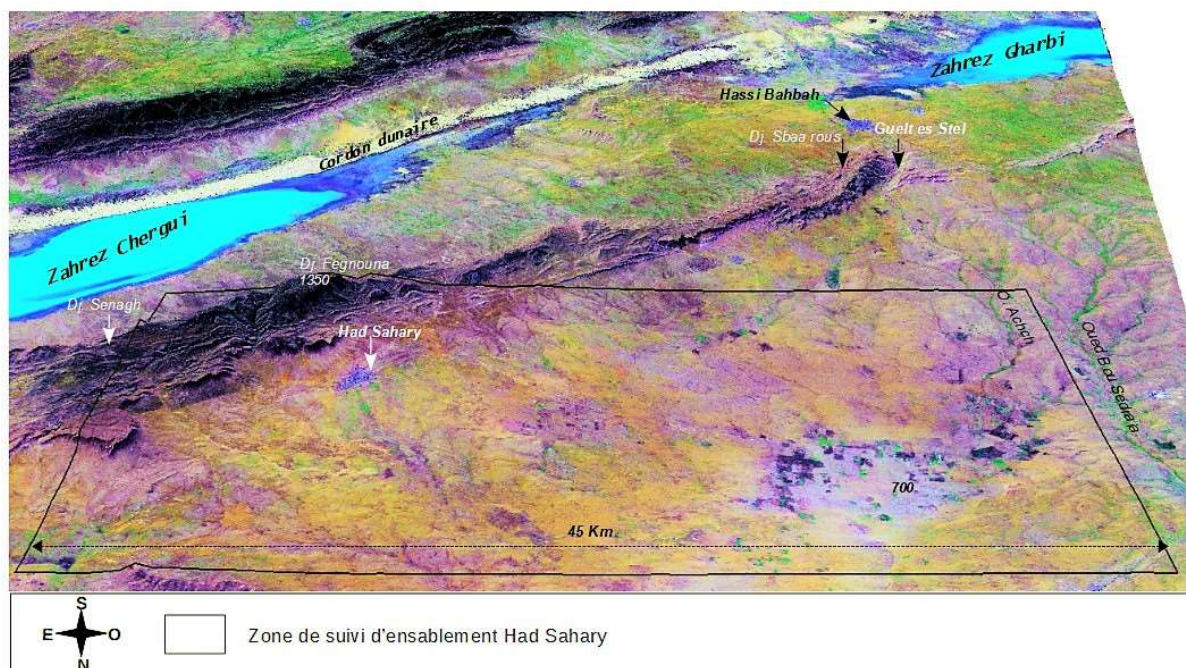


Figure 160 : Site pour le suivi de l'ensablement de Had Sahary
(MNT SRTM Void Filled – USGS, composition colorée 5-4-1, image Landsat 7 ETM mars 2001)

L'analyse des images confirme que ce site enregistre un début d'ensablement en cohérence avec l'ensemble de la région. Pendant les années 80, le site affiche un ensablement généralisé attesté par l'image Landsat de 1984 (Figure 161). Les deux images suivantes de la série de 87 et 95 s'inscrivent dans le recul de l'ensablement, avec respectivement 63% et 20%. De nouveau, le sable inverse la tendance en 2001, suivi par l'année 2003, toutefois cette progression n'atteint pas le niveau de 1984, elle reste plafonnée à seulement 37%. Les résultats de traitement d'images sont restitués dans les figures suivantes (Figure 161 et Figure 162).

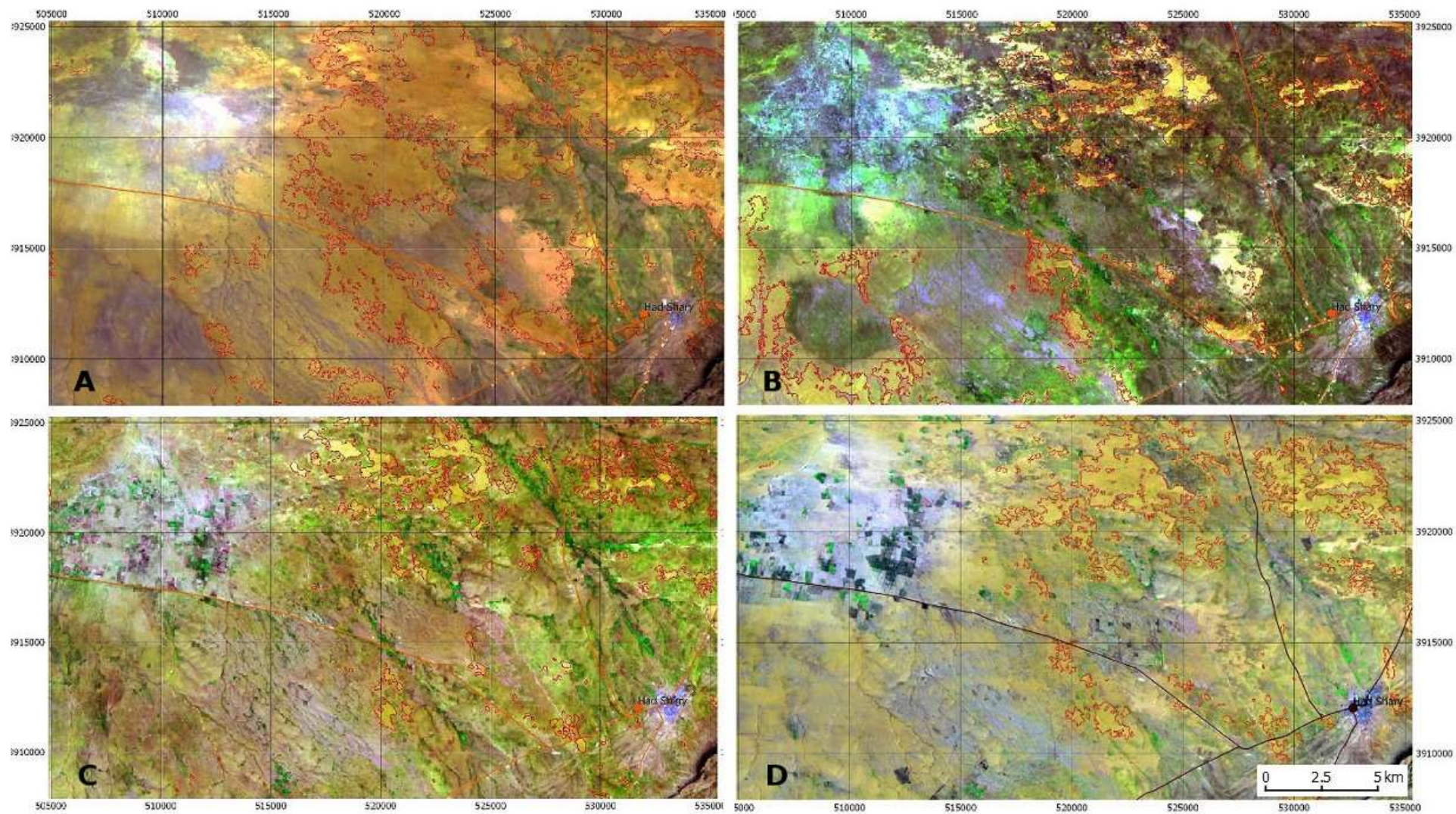


Figure 161 : Délimitation de la surface ensablée (le contour du sable correspond à un figuré surfacique délimité en rouge) sur l'image en composition colorée 5-4-1, Had Sahary. Images Landsat (A : avril 1984, surface ensablée =206.6km² ; B : avril 1987, SE = 76.5 km² C : 1995, SE = 36.4 km² ; D : 2001, SE = 52.4 km²)

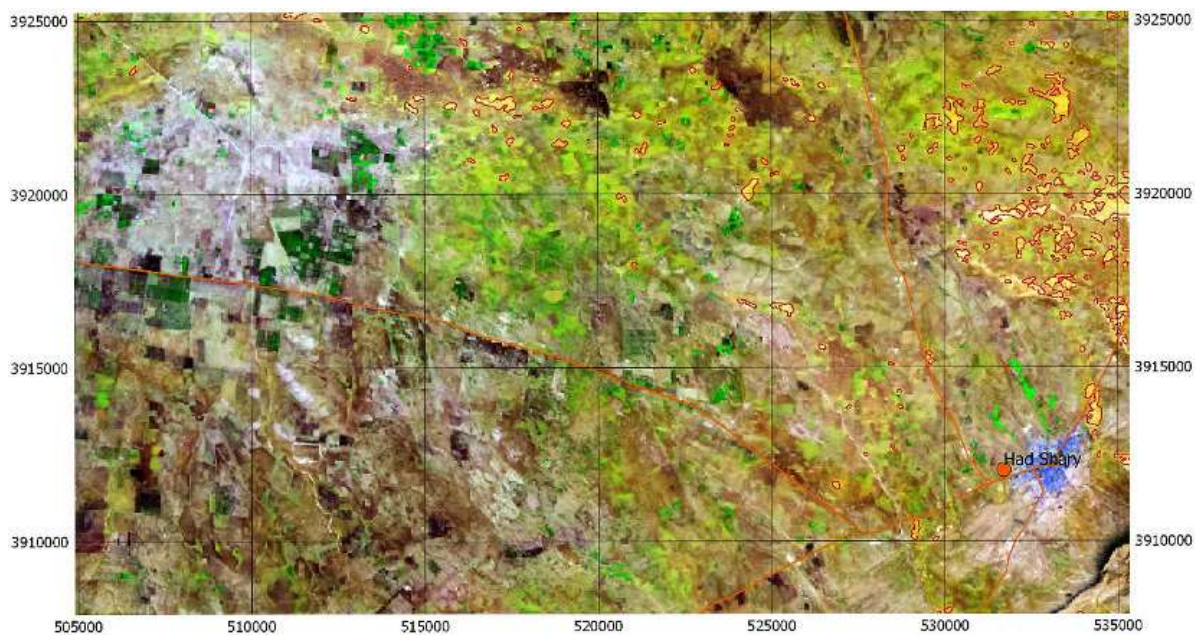


Figure 162 : Surface ensablée sur l'image en composition colorée 5-4-1, site de Had Sahary, 2003
Surface ensablée=77 km²

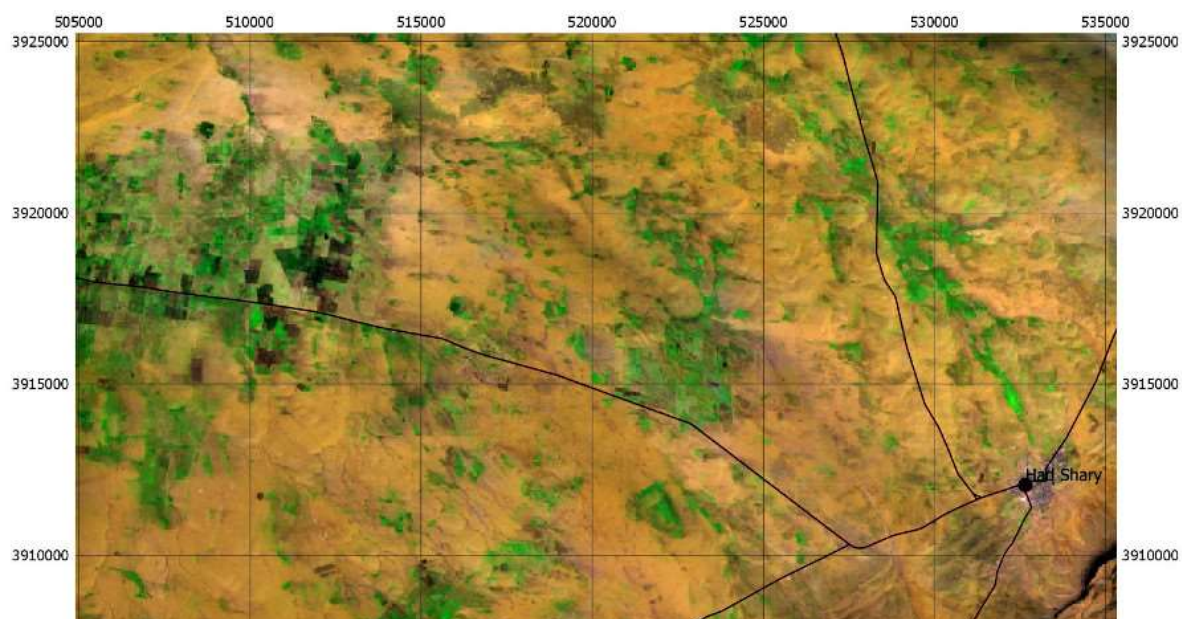


Figure 163 : Surface ensablée sur l'image en composition colorée 5-4-1, site de Had Sahary 2011
Image Landsat 7 ETM d'avril 2011 SE= 10.6 km²

Dans ces régions, en plus de l'action éolienne responsable du saupoudrage de couche fine du sable, la dynamique d'ensablement est également liée à l'action hydrique. L'eau provenant des averses emporte le sable fin dans les ruisseaux et dans les oueds. Quand la pente se redresse, le cours d'eau abandonne sa charge sous forme d'accumulations qui donnent un nouveau point de départ pour l'action éolienne. De ce fait, pendant les années d'ensablement, les cours d'eau jouent un rôle de redistributeur du produit sableux de l'amont vers l'aval, créant d'innombrables formes d'interactions avec l'action éolienne. Pour soutenir ces propos, nous

avons retenu un site localisé à 5 km au nord de Had Sahary. Il illustre non seulement le rôle joué par les cours d'eau dans la remodelisation du produit sableux, mais également les changements temporels du voile sableux. Les trois images à haute résolution laissent lire les changements survenus sur une période de 15 ans (Figure 164, Figure 165 et Figure 166).



Figure 164 : Abandon du matériel par les cours d'eau (N° 1 et 2) et constitution du voile sableux (3)
(Image GeoEye mars 2001, 35°24'60"N - 3°21'31"E)

Entre les deux cours d'eau, nous observons la présence de quelques voiles de sable mobile (Figure 164 -3) en pleine saison de végétation du printemps 2001. Neuf années plus tard, sur la Figure 165, le voile sableux s'efface, il ne reste que le sable lié aux cours d'eau avec des surfaces moins importantes. En 2016, on constate l'absence de produit lié aux cours d'eau et la disparition du voile sableux (Figure 166). L'état de surface de ce site est imprimé par le changement d'ensablement. La manifestation du sable évolue en cohérence avec l'ensemble de la région de Had Shary, elle confirme la tendance constatée sur la série d'images Landsat. Par ailleurs, l'évolution des espaces steppiques est marquée également par une action publique active pour la lutte contre l'ensablement. Les travaux de reboisement restent inscrits dans le paysage, visibles depuis l'imagerie (Figure 166 - 4).



Figure 165 : Régression du matériel lié aux cours d'eau (N° 1 et 2) et disparition du voile sableux
 (Image GeoEye juin 2010, 35°24'60"N - 3°21'31"E)



Figure 166 : Disparition du produit sableux mobile, reboisement contre l'ensablement (4)
 (Image GeoEye juillet 2016, 35°24'60"N - 3°21'31"E)

13.4. L'analyse spatio-temporelle combinée des quatre sites

La mesure de surface concernée par l'ensablement de la série temporelle pour chaque site est restituée dans le tableau suivant. Les résultats sont issus de la classification supervisée de la série d'images. Dans le tableau et le diagramme suivant, la surface ensablée n'est pas rapportée à la surface globale du site, car ce pourcentage est fortement dépendant de la délimitation du site : la présence des espaces en eau (Zahrez) ou forestière (massif et reboisement) réduit sensiblement ce rapport. En revanche, un agrandissement sur un site ensablé fait augmenter le pourcentage.

Tableau 26 : Évolution temporelle de la surface ensablée sur les sites de suivi de la région de Djelfa (km²)

	1984	1987	1995	2001	2003	2011
<i>Had Shary</i>	206,6	76,5	36,4	52,4	77	10,6
<i>Zahrez Gharbi</i>	254,6	65,6	31,9	38	48,7	10,2
<i>Dar Chioukh</i>	107	34,2	17	4,9	3,7	0,5
<i>Daïet Chouiouia</i>	135,9	104	41	63	123,6	17,4

Pour faciliter la comparaison d'évolution spatio-temporelle dans le même diagramme, les surfaces sont traduites en pourcentage rapporté à l'état d'ensablement de l'année de référence 1984. Afin de permettre une mise en comparaison avec le premier site, les données de Daïet Chouiouia ont été intégrées dans le diagramme (Figure 167).

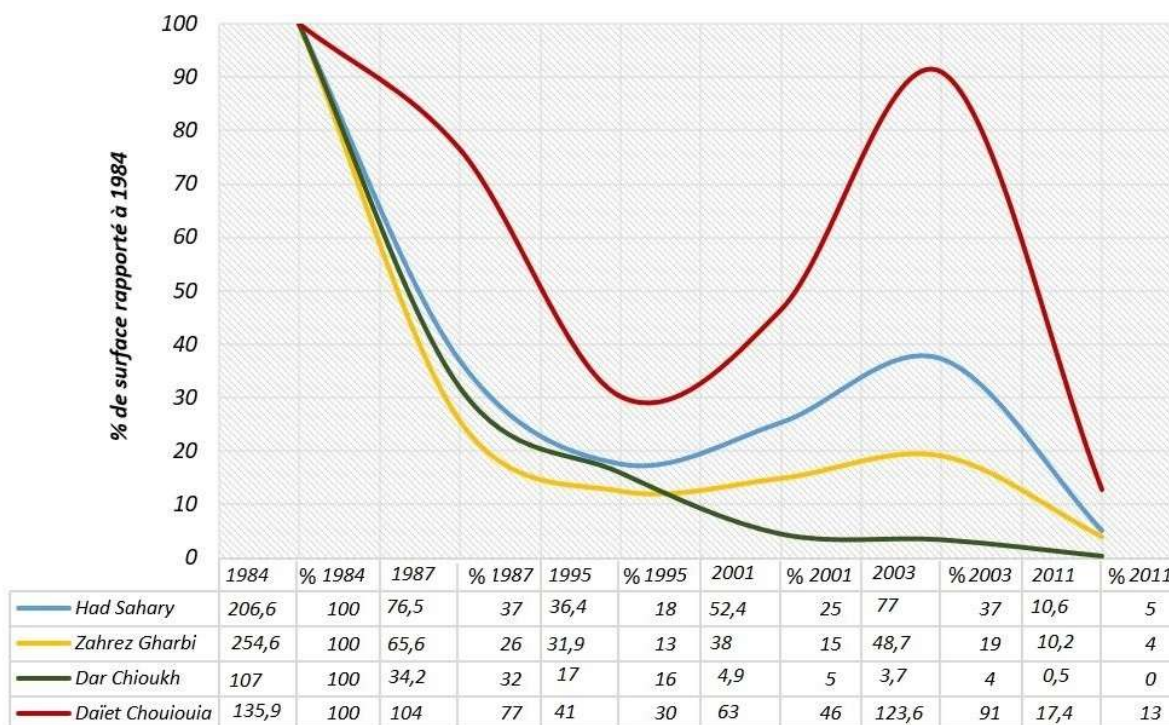


Figure 167 : L'évolution spatio-temporelle de la surface ensablée exprimée en km² et en pourcentage rapporté à l'état de référence de 1984, quatre sites région de Djelfa

Sur le long terme, nous pouvons constater que l'ensemble des sites converge vers une réduction spectaculaire de la surface ensablée. En effet, la séquence climatique favorable des années 2010 annonce la réduction presque totale du sable sur les quatre sites. L'état constaté en 2011 est meilleur que toutes les autres situations observées depuis 1984, la surface ensablée atteint des niveaux très bas. Le sable, dans ces lieux, ne demeure pas un produit permanent, il est fortement lié aux séquences de sécheresse climatique.

On note la présence de trois modalités différentes d'évolution temporelle d'ensablement.

- Le site de Daïet Chouiouia se distingue par une baisse moins rapide en 1987 de seulement 14%, ainsi que par la présence d'une oscillation en 2003 presque équivalente à celle de 1984.
- Les deux sites de Had Sahary et Zahrez Gharbi enregistrent un recul spectaculaire en 1987. Ils réagissent à la séquence de sécheresse de 2003, sans pour autant atteindre le niveau équivalent de 1984. Le premier Had Sahary ne dépasse pas 40% et le second évolue autour de 20%.
- Sur le troisième site, celui de Dar Chioukh, la courbe n'est marquée que par la descente et le recul de la surface sableuse. À l'inverse des autres sites, le sable recule aussi pendant la séquence de sécheresse de 2003 pour disparaître en 2011.

Au regard des résultats (Figure 167), l'évolution temporelle tri-modale non synchrone exprime la diversité des situations et la difficulté à considérer l'ensemble des sites comme une seule unité. En effet à l'intérieur de la zone steppique, des sites distants réagissent de manière distincte à l'arrivée de la sécheresse. De plus, il reste à comprendre la résonance uniforme des sites observés lors de la sécheresse des années 80, car on n'est pas certain que l'état de départ fût le même. Pour comprendre ces phénomènes jusque-là méconnus, il faut mener des études comparatives qui prennent en charge l'ensemble des paramètres agissant sur le processus d'ensablement, intégrant l'apport des travaux de reboisement. Ce point nécessiterait une étude entière, mais nous ne développons ici que quelques points pour avancer des pistes d'explication.

Dans les années 70, ces espaces ont vécu une phase intense de mise en culture, résultat de la mécanisation des labours des terres et de la généralisation des tracteurs. La sécheresse climatique des années 80 a créé une crise environnementale majeure qui s'est traduite par un ensablement généralisé. Pour y faire face, les travaux du Barrage Vert ont été intensifiés pour lutter contre l'ensablement par le reboisement, travaux touchant les terres défrichées, les zones d'accumulation sableuse, les zones de transits. L'action publique de reboisement demeure fortement marquée dans le paysage. Par contre, le site de Daïet Chouiouia n'a profité des travaux de réhabilitation que dans les années 2000, ce qui explique la baisse du sable sur les trois sites sauf celui de Daïet Chouiouia.

Une deuxième grande campagne de reboisement a été lancée dans les années 2000. L'impact sur l'ensablement de ces réalisations sera connu lors de futures séquences sèches.

Des moyens colossaux ont été engagés pour la préservation, la restauration et la réhabilitation de ces espaces. Mais il n'existe pas ou très peu de bilans d'évaluation de ces politiques. Ces projets ont-ils réellement atteint les objectifs visés ? Comment capitaliser sur ces réalisations ? Un suivi de ces réalisations dans le temps est important pour livrer un éclairage sur leur devenir, capitaliser, aider le pilotage et peser dans les choix, etc. Le site de Dar Chioukh, dont les travaux de restauration et de reboisement semblent aboutir à contenir l'ensablement, reste méconnu alors qu'il devrait être un site pilote, exposé et expliqué aux gestionnaires et aux chercheurs, une vitrine dont on affiche les extraordinaires résultats ainsi que les moyens consacrés.

Avec toutes les précautions qui s'imposent, nous signalons la présence d'incertitudes inhérentes à la méthode de mesure du sable. En plus, il s'agit des surfaces au lieu des volumes ; d'une couche fine qui traduit plutôt un état éphémère. Un facteur supplémentaire de doute, la station météorologique de Djelfa, comme nous l'avons vu précédemment, ne détecte pas assez l'amplitude de la sécheresse des années 80. Par conséquent l'analyse objective de la première cause d'ensablement, celle qui se base sur la sévérité des deux séquences de sécheresse (84 et 2003), ne peut être faite. Toutefois, l'évolution du paysage imprimé par de remarquables réalisations, laisse croire que dans certains sites l'action réparatrice de l'homme (reboisement) est sur le point de renverser le cours de l'ensablement.

À partir de l'image haute résolution de 2010 (Figure 168) du site de Dar Chioukh, on observe dans la partie nord de superbes garrigues qui s'étalent sur une vingtaine de kilomètres. Elles présentent des formes géométriques, attestant d'un bon niveau d'entretien.

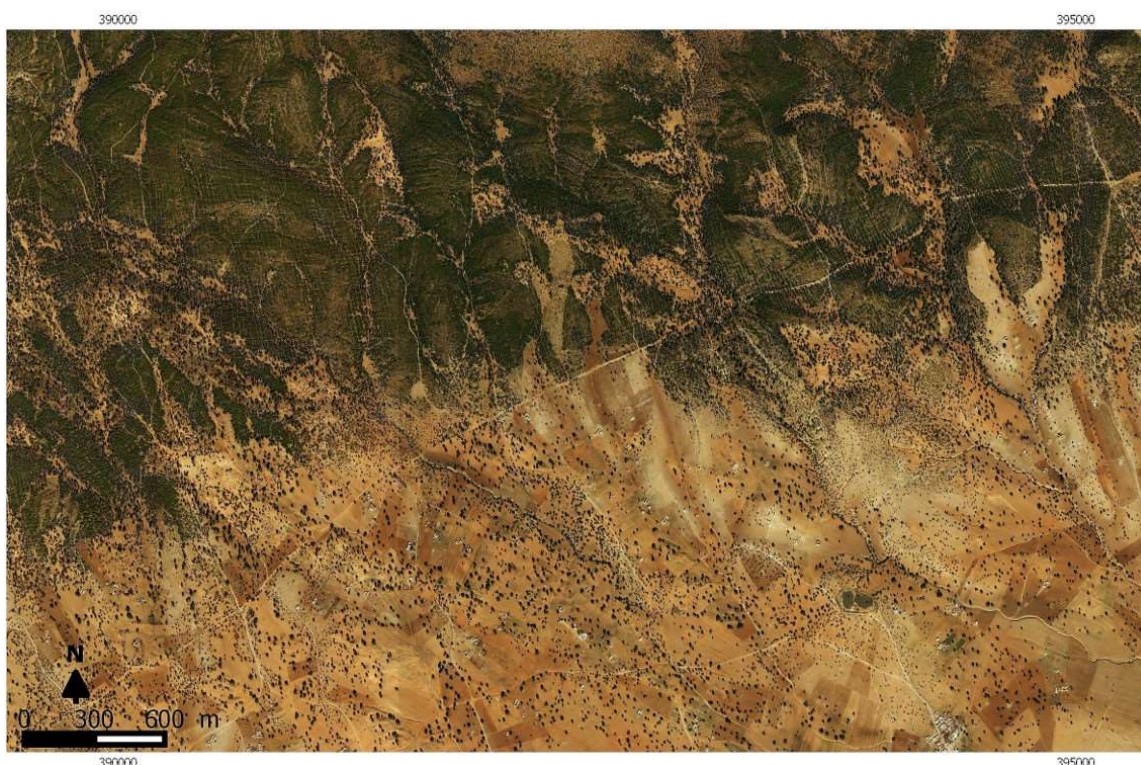


Figure 168 : Reboisement pour la fixation du sable : la partie nord des garrigues entretenues, et dans la partie sud des arbres de chênes Kermès cohabitent avec la mise en culture. Site situé à 13 km NE de la ville de Dar Chioukh (Image GeoEye novembre 2010, 35° 0'60"N - 3°30'E).

Dans la partie sud de la Figure 168, il s'agit de nouvelles réalisations de reboisement. À première vue, nous observons la présence de deux forces antagonistes, l'agriculture d'un côté et le reboisement de l'autre. Mais, il s'agit plutôt de deux forces qui semblent œuvrer en harmonie et l'une laisse place à l'autre. L'agriculture continue à se pratiquer, le tracteur laboure la terre en contournant et évitant les plants et les arbres, qui sont protégés par la population. Le reboisement est fait avec des Chênes Kermès (*Quercus coccifera*), espèce très adaptée à la sécheresse. Nous ne savons pas si les glands sont utilisés comme complément alimentaire pour le bétail. La densité de reboisement apparaît comme un équilibre délicat entre la nécessité de protection et le besoin d'autoriser la pratique culturale. Cette pratique soulève la question de savoir si le sable est réellement fixe ou dynamique au pied des arbres, mais l'imagerie satellitaire n'est pas l'outil le plus approprié pour mettre en évidence cette dynamique temporelle. Pour s'en assurer, nous avons examiné le lieu habituel de la concentration du sable, vers Daïet Ben Sahouane, celui-ci reste accessible par l'imagerie. Cet examen révèle la présence de petites accumulations qui semblent être le résultat d'une érosion hydrique et non pas le produit d'une action éolienne généralisée.

Chapitre 14 : Prospective de la désertification

La désertification demeure un phénomène extrêmement complexe et difficile à prévoir, du fait de ses liens de causalité avec la sécheresse climatique. L'action humaine peut favoriser et augmenter la dégradation, mais à contrario, elle peut aussi participer favorablement à l'atténuation des effets, voire inverser le cours de la dégradation. C'est cette dernière qui nous intéresse ici, l'action humaine positive se base entre autres sur :

- La gestion durable du capital naturel,
- Le savoir-faire traditionnel qui s'est adapté aux contraintes au fil du temps,
- Les approches techniques innovantes ou le changement d'utilisation des terres engendrant la restauration des écosystèmes.

Nous développons trois approches, la première est la restauration des espaces les deux autres sont de type technologique.

14.1. Prémunir la dégradation par la restauration

Substitué dans les années 80 par de petits travaux de reboisement, le projet Barrage Vert, lancé dans les années 70 dans sa conception et par son étendue constitue probablement le projet le plus ambitieux pour lutter contre la désertification. Mais, actuellement ses régions jouissent également d'autres types de travaux que le reboisement. Ils couvrent la protection, la valorisation des ressources, la réhabilitation et la restauration des parcours. Le site d'étude de Daïet Chouiouia a bénéficié de ces travaux.

Pour lutter contre l'ensablement, de nombreux travaux de protection et de mise en défense ont été entrepris dès 2005 sur le site. Sur le plateau méridional de Daïet Chouiouia et au nord de Mliliha, on trouve des travaux de réhabilitation par la fixation de sable piloté par le HCDS (Haut-Commissariat pour le Développement de la Steppe). D'autres travaux de reboisement de Tamarix dans les endroits les plus marécageux de la daïa sont conduits par le service des Forêts.

Les conditions climatiques favorables qui ont suivi ces réalisations ont assuré une réussite remarquable. Nos observations de terrain le confirment Figure 169. Durant plus d'une décennie, on leur doit la fixation du sable dans le site. Un projet réussi également par l'introduction de nouvelles espèces végétales et par l'amélioration de la qualité nutritionnelle. Il semble que la vie revienne et reprenne sur cet espace abîmé par l'ensablement. Au contact des acteurs, nous avons pu partager le soulagement des habitants et la fierté des dirigeants, c'est l'option gagnante. Ce mode de gestion des terres offre une meilleure durabilité aux ressources.



Figure 169 : Site réhabilité à Mililiha, pendant les années de pluviométrie favorable. Plantation d'*Atriplex Canescens*, plante d'origine Nord-Américaine introduite en Afrique du Nord pour la fixation des dunes.

(Octobre 2013, 34°43'29"N- 3°45'45"E)

Une plante (*Atriplex Canescens*) donne de bons résultats en période climatique humide, mais on connaît peu de sa résistance à la succession des années sèches. En 2016, sur le plateau, à certains endroits, elle a montré des signes de souffrance, dans d'autres, on ne garde que des traces de son éphémère passage. Une période de quelques mois de manque de précipitations en 2015 et le retard hivernal des pluies constatées en 2016, ont été suffisants pour révéler les prémisses de la réactivation du processus d'ensablement. La première démonstration est une couche fine de sable « drap sableux » couvrant le site. Des images satellites plus récentes de haute résolution (Figure 170-B), permettent de vérifier comment le recul des précipitations (assèchement) du climat pouvait réactiver les processus de dégradation pour fragiliser les projets de réhabilitation.



Figure 170 : Projet de mise en défense et fixation du sable, situé sur la zone de passage sédimentaire. L'Image (A) indique l'état des plantes avant la réactivation du processus d'ensablement. Sur l'image (B), on observe une fine pellicule de sable couvrant les plantes en souffrance (Image GeoEye, 34°43'29"N- 3°45'45"E). L'ellipse rouge indique le lieu de la photo précédente Figure 169.

14.2. Prémices d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel

Autrefois rares et difficilement accessibles, les données sont devenues abondantes, disponibles en temps réel et cela grâce à Internet et la multiplication des bases de données, des images en accès libre (Open Data). En effet, les images satellitaires sont devenues disponibles moins de 24 heures après leur acquisition (Landsat-8 et Sentinel-2). Au même niveau, les données météorologiques enregistrées dans les stations sont accessibles presque en temps réel dans le système NCEI (National Centers for Environmental Information). De plus, en note l'émergence d'un réseau communautaire des stations météorologiques reliées et partageant les données, d'autres applications proposent des prévisions météorologiques sur des lieux dont il suffit d'introduire la localisation GPS.

Devant cette abondance de données, le géographe est invité à adapter ces outils, à inventer de nouveaux concepts afin de profiter pleinement de ces extraordinaires « gisements » d'information. Cette abondance lui permet de rêver, d'inscrire de nouvelles applications et d'étude de prospective ou de gestion thématique en temps réel. Nous avons vu que le simple fait de pouvoir planifier la sortie de terrain pour que celle-ci coïncide avec le jour de la prise d'image par le satellite constitue un avantage dans des environnements très changeant, en améliorant la connaissance des profils spectraux des objets des sites étudiés.

Par ailleurs, disposer de l'information en temps réel sur la désertification, ainsi que d'alertes sur l'avènement d'un processus d'ensablement constitue le socle d'une démarche prospective que nous avons entreprise. Elle est basée sur la collecte, l'analyse et l'interprétation de données. La suite prévue est d'introduire les résultats dans un tableau de bord qui synthétise les risques. Ce tableau de bord indiquera les zones en souffrance, les tendances et la trajectoire constituant ainsi, un outil d'aide à la décision auquel le pilotage et les acteurs des régions steppiques algériennes aspirent. Enfin, ce tableau de bord permettra de prioriser, de légitimer des décisions et d'apporter des solutions à des situations d'urgence ou de crises socio-environnementales.

Dans cette démarche, nous avons exploré trois méthodes : La première s'articule sur les données de prévisions météorologiques ; la deuxième exploite les données de relevés météorologiques dans les stations (temps réel) et la dernière est basée sur la télédétection et la réponse spectrale. Le facteur recherché dans les deux premières méthodes est la sécheresse climatique. Identifiable par la présence de longues périodes de déficit pluviométrique, c'est une information indicatrice sur l'avènement des crises environnementales, dont le degré dépend de la durée et de la sévérité de la sécheresse. Alors que, dans la troisième méthode, nous avons œuvré à l'identification des signes précurseurs décelables par télédétection sur la couverture sableuse qui sont dans notre site, la manifestation d'une fine couche de sable qui couvrait le plateau, la réactivation des îlots de sable et le début de la formation d'un manteau sableux.

14.2.1. Système basé sur les données de prévisions météorologiques

L'objectif est de réaliser un système qui s'articule autour de trois dimensions : données de prévisions météorologiques quotidiennes, base de connaissances et images satellitaires acquises régulièrement. La chaîne de traitement envisage d'interroger une base de connaissances thématiques qui sera constituée des connaissances actuelles. Ce cycle profite de l'acquisition des images satellitaires ouvertes de Sentinel-2 et Landsat 8. C'est durant cette étape que les informations produites sur la base des données de prévisions seront examinées, validées ou rejetées, pour produire de nouvelles connaissances.

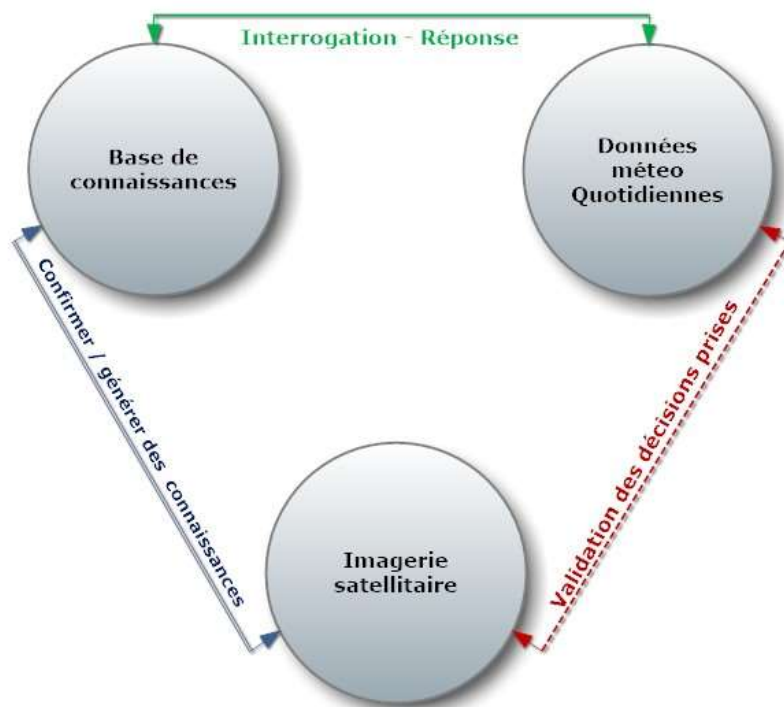


Figure 171 : Schéma conceptuel pour la réalisation d'un système de surveillance

Pour les données de prévisions météorologiques, nous avons utilisé l'API (Application Programming Interface) gratuite de « World Weather Online¹⁵ » accessible après inscription. C'est une API qui communique des informations météorologiques actualisées trois fois par jour (7, 13 et 18h).

Nous nous positionnons comme un client final, toutes les opérations d'interpolation spatiale sont assurées par le serveur du fournisseur. La demande est formulée avec deux critères : les données souhaitées et la géolocalisation des lieux (point GPS). Pour cela, une matrice de points couvrant la région d'étude a été élaborée. Elle s'étale sur 175 km de large et 205 km du Sud au Nord avec une densité de 7 km entre deux points. La matrice totalise 575 points. La demande

¹⁵ <https://developer.worldweatheronline.com>

est faite par un programme (script) développé à cet effet, la fréquence d'interrogation entre deux points est maximisée à deux secondes entre chaque requête.

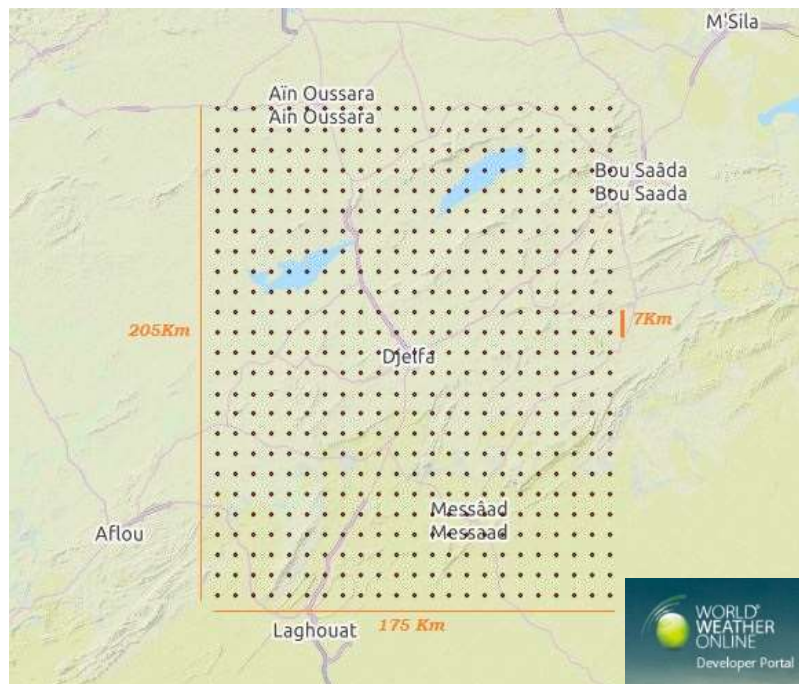


Figure 172 : La matrice des points pour interroger l'API des prévisions météorologiques

Sur une période de 6 mois, les informations ont été collectées en plusieurs fichiers au format XML (Extensible Markup Language), stockés dans un répertoire. L'objectif envisagé après la première étape de validation de qualité des données, était d'enchaîner l'interrogation, le traitement de mise en format et l'intégration dans une base de données. Pendant cette période de collecte, un suivi ponctuel est assuré pour vérifier la bonne exécution des opérations. Pour ce faire, une application d'affichage des prévisions météorologiques à temps réel (Figure 173) a été développée, elle restitue le flux de données disponibles depuis cette plate-forme.



Figure 173 : Application de restitution de flux de données récupérées sur les prévisions météorologiques (Températures en min et max, vents : direction et vitesse, et précipitations)

L'analyse de ces données a mis en lumière les éléments suivants :

- Les données récupérées pour le même jour, à 7h, 13h et 18h varient à la hausse comme à la baisse à la suite du réajustement des prévisions.
- Les données diffèrent de celles récupérées auprès de l'ONM, pour l'automne 2013 et hiver 2014.
- Un test de prise en compte de la topographie s'est avéré non concluant. Dans une journée de vent actif, nous avons vérifié les prévisions d'orientation du vent sur deux points situés de chaque côté d'un versant. Le résultat n'indique pas de variation dans l'orientation des vents. Donc, les données aérologiques n'intègrent pas l'influence de la topographie.
- Problème d'interprétation, par analyse de ressemblance des données, nous avons révélé qu'il existe une sorte de matrice de résolution. C'est-à-dire à l'intérieur d'une distance de 50 km, les données ne varient pas. Cette information n'était pas connue au préalable, elle n'est pas communiquée. Donc, la densité de 7 km ne traduit que de la redondance et non pas une richesse d'information et de précision supplémentaire souhaitée.

Au vu des incertitudes sur la fiabilité de ces données nous avons décidé de ne pas trop nous investir dans cette source de données. Par ailleurs, la disponibilité des données météorologiques mondiales diffusées quotidiennement dans des systèmes spécialisés, régulés par l'OMM (Office Mondiale de Météorologie), nous a incité à orienter la démarche prospective vers ce fournisseur de données.

14.2.2. Système basé sur les données météorologiques quotidiennes

Ce système est basé sur l'exploitation des données de la base locale, constituée par les données (OMM) qui proviennent du NCEI (National Centers for Environmental Information). Pour ce qui concerne l'Algérie, les données du NCEI proviennent de l'Office National de Météo d'Algérie (ONM). Toutefois, la comparaison des données issues du système NCEI avec celles récupérées directement au siège de l'ONM a révélé la présence d'écarts. Dans un premier temps, nous avons corrigé les aberrations d'enregistrement. Pour ce faire, chaque donnée dont les précipitations mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle est considérée comme anomalie, les valeurs ont été remplacées par la moyenne mensuelle issue de fichiers de référence ONM. Malgré ces corrections, des écarts subsistent entre les deux fichiers parfois avec des valeurs conséquentes dépassant facilement les 10 % et parfois même au-delà de la moitié de l'apport mensuel. Pour mettre en lumière cet écart avec une requête, les sommes annuelles de précipitation OMM sont extraites, puis on calcule les écarts avec les données de référence (ONM-OMM), les résultats sont restitués dans le diagramme suivant (Figure 174).

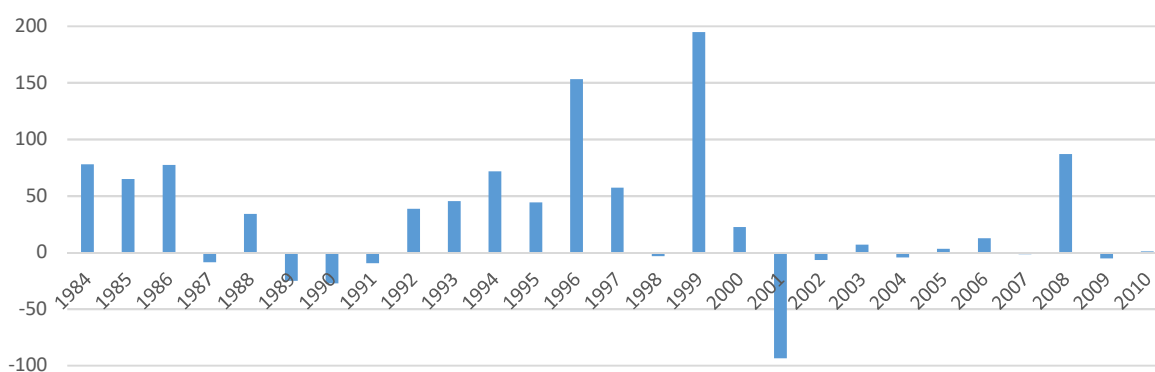


Figure 174 : Les écarts entre les données de précipitations annuelles ONM-OMM, station de Djelfa

A la lecture du diagramme, la majorité des valeurs est positive, ce qui traduit que certaines données enregistrées localement sont manquantes et non prises en compte. Des bugs de transmission des données de relevés sont parfois rencontrés, problème identifié sur certaines stations. En parallèle, les valeurs négatives peu nombreuses après correction reflètent un dépassement par aberration. Dans l'exemple affiché sur le site d'Info-Climat (Figure 175) qui exploite les données OMM, les mêmes que pour notre base, nous pouvons visualiser que la station de Djelfa, enregistre la présence de neige en plein été, le 1 juillet 2002.

« 30 juin 2002 »		Relevés du 01 juillet 2002				2 juillet 2002 » Aujourd'hui »	
Afficher les relevés intermédiaires (METAR) »							
Heure	Temps	Température	Pluie	Humidité	Pt. de rosée	Vent moyen (raf.)	Visibilité
20h		24.0 °C		69%	18 °C	26 km/h	10 km
17h		29.0 °C	39 mm/h 11cm	53%	18.4 °C	30 km/h	10 km
14h		29.0 °C		51%	17.7 °C	15 km/h	15 km
11h		23.3 °C		70%	17.5 °C	15 km/h	10 km
08h		19.0 °C		89%	17.1 °C	15 km/h	10 km

Figure 175 : Les données météorologiques du 1 juillet 2002. (Info-Climat : <http://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/1er/juillet/2002/djelfa/60535.html>)

Le détail des événements météorologiques de la journée indique la présence de rafales de vent sur toute la journée atteignant un maximum de 30 km/h à 17h00. C'est à cette heure-là que l'indicateur signale 39 mm de neige/h. Avec des températures de 29 °C !

Par ailleurs, le suivi comparatif de la visibilité de cette journée « 1 juillet » sur une période de dix ans, indique que la visibilité se trouve réduite à 10 km en 2002, contre 20 km en moyenne. Toutefois, cette donnée se trouve corrigée dans le fichier correspondant aux données quotidiennes.

Sans avancer d'hypothèse d'explication de cette anomalie, cela rappelle les difficultés des stations météo automatiques éparpillées dans le désert, acquises dans le cadre de la surveillance du criquet pèlerin où de la poussière de sable incrustée et entassée dans le réservoir a été pesée par l'automate, puis convertie et restituée comme pluviométrie. En effet, la consultation du dictionnaire de données OMM révèle que les données de précipitations solides sont enregistrées automatiquement. Ces données acquises automatiquement subissent habituellement des opérations de vérification, des travaux de correction et d'harmonisation par l'ONM.

Le système d'alerte envisagé ne peut se baser que sur des données météorologiques exactes et fiables. Ces données sont entachées par des lacunes dues parfois au manque de transmission des relevés. De ce fait, nous avons décidé de ne pas nous investir davantage dans cet outil. Mais toutefois, cette base a servi à vérifier et confirmer certains événements précis, une précision temporelle allant jusqu'à 3 heures.

14.2.3. Identifier la réactivation d'ensablement par la signature spectrale

Cette partie est construite en partant d'un constat d'ordre spatial, pour glisser vers une interrogation d'ordre temporel. Le constat de départ est celui développé dans la partie profil spectral du sable, nous le reprenons en peu de mots : le sable vif a une réponse spectrale plus forte que le reste de la masse sableuse. À chaque état d'évolution de la couverture sableuse correspond une modification texturale de la couche superficielle, c'est pourquoi, chaque phase peut disposer d'une identité spectrale spécifique. Par ailleurs, la chronologie du processus d'ensablement indique que le sable vif se manifeste en premier comme indicateur d'amorce d'ensablement. Il disparaît également en premier lors de la phase de stabilisation ou de perte du sable. De là, nous pouvons en déduire que le dépôt sableux présente des caractéristiques spectrales typiques en phase de progression, différentes de celles de la phase de régression et de replis.

L'exercice consiste à trouver depuis une série d'images temporelles, un déterminant spectral, une identité pour caractériser chaque phase du changement que subit la couverture sableuse de façon à élaborer une matrice qui sert à décoder de nouvelles images qui n'ont pas servi dans le processus d'apprentissage.

Le bénéfice attendu est la capacité d'analyser de nouvelles images et déduire à quelle phase du changement elle appartient pour la positionner dans une trajectoire d'ensablement, sans avoir forcément recours à la série chronologique pour se référer à un état antérieur comme c'est le cas actuellement. La capacité de classer l'image et reconnaître la phase d'ensablement procure un double avantage. D'un côté prospectif, lors de la surveillance continue du changement d'ensablement, il indique l'amorce ou la stabilisation du processus. De l'autre, dans l'analyse diachronique et historique, dont l'accès à la série chronologique d'images n'est pas souvent possible pour reconnaître la phase du changement dans laquelle s'inscrit l'image.

L'analyse de l'évolution de la réflectance dans le temps a été faite sur une série temporelle de 7 images ETM+ de Landsat prises entre de 2000 à 2006. Elles couvrent la dynamique progressive et régressive d'ensablement. Plusieurs points de mesure ont été retenus, avec des critères de choix : situés dans la zone de dépôt ; à l'abri du relief, sur des lieux avec présence de fortes couches de sable et sur des fines couches sableuses. Nous affichons les résultats de deux relevés représentatifs des points retenus. Ils concernent une série temporelle composée de 7 images Landsat ETM+. La série est classée en fonction de la trajectoire de progression de l'ensablement (Figure 176).

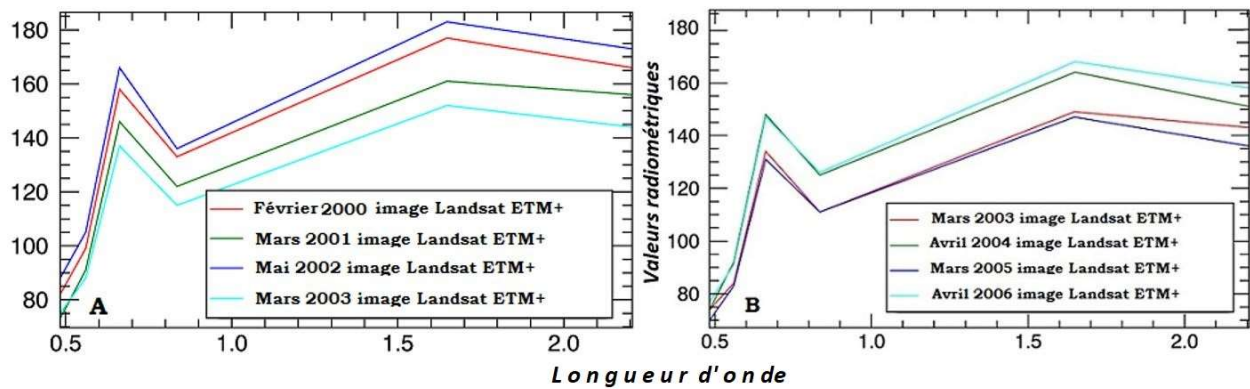


Figure 176 : Evolution de la réponse spectrale des zones ensablées sur une série temporelle.
 A : phase de progression d'ensablement ; B : pendant la phase de rétraction.

Les formations sableuses affichent des caractéristiques spectrales similaires sur l'ensemble de la série temporelle. Dans chaque série, les valeurs semblent ne pas respecter la chronologie d'ensablement. Il est probable qu'il existe une signification difficile à déterminer et qui nous échappe. A ce stade, la présence de règle ou de relation entre l'intensité de la réponse spectrale et la chronologie indicatrice de la dynamique d'ensablement n'a pas pu être démontrée. Ceci est probablement lié à divers critères de la prise d'images au traitement ou au processus d'ensablement lui-même. Les conditions de prise d'images influencent la réflectance (ensoleillement, humidité résiduelle dans le sol...) plus que la variation recherchée. Des recherches supplémentaires permettant de surmonter cette première difficulté rendent cette méthode prometteuse à la détection de l'amorce d'ensablement.

14.3. Synthèse

Les maigres résultats obtenus sur les outils de prospective, et la mise en place d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel ne prouvent certainement pas l'invalidité des concepts. Mais ils attestent l'insuffisance de l'approche individuelle et unitaire dans ce domaine complexe. Le simple exemple de collectionner les données de prévisions météorologiques a nécessité de garder l'ordinateur allumé et connecté à internet pendant toute la période de récolte de données, soit 6 mois.

En effet, la démarche coûteuse et multidisciplinaire, doit être entreprise dans le cadre d'un projet global, outillé et financé. Nous sommes persuadés que l'avenir d'une partie de la recherche dans ces régions s'inscrit dans ces démarches de prospective.

Bien que les résultats n'aient pas permis d'atteindre les objectifs, nous avons choisi de partager ces expériences. Elles pourront éventuellement servir d'autres chercheurs, à économiser leur temps et à revoir leur cheminement pour améliorer ces démarches.

Conclusion générale

Par sa position, sur les marges nord du Sahara et pas trop éloignée de la surface maritime méditerranéenne, la région de Djelfa dispose d'un climat semi-aride qui affiche des caractéristiques marquées par une forte variabilité spatiale et une fluctuation temporelle des précipitations. Ces facteurs conditionnent la disponibilité des ressources végétales et engendrent leur variabilité dans l'espace et dans le temps. Les variations des ressources ont rythmé la vie de la population durant des milliers d'années. L'une des formes d'adaptation à ces contraintes est le nomadisme. Actuellement, les années humides autorisent la mise en place d'une agriculture pluviale. Mais lors de la persistance des années sèches, la végétation régresse et un ensablement se manifeste dans des endroits préférentiels.

L'analyse détaillée des caractéristiques pluviométriques par un indicateur spécialisé (SPI-Standardized Precipitation Index) révèle que sur une série temporelle moyenne de 30 années, une légère tendance vers l'assèchement est observée sans pour autant qu'elle puisse être évaluée comme une rupture climatique. En revanche, l'interrogation de la mémoire longue des séries pluviométriques, sur une période d'un siècle, ne conclut pas à l'assèchement mais plutôt à la présence de plusieurs séquences sèches, longues et sévères. L'histoire, jonchée d'épisodes de famine, le confirme.

Dans l'Atlas Saharien et la steppe algérienne, l'ancrage d'une présence humaine ancienne a conduit, au gré de milliers d'années d'adaptation, à l'émergence d'un système d'élevage basé sur la transhumance. Il a permis de juguler la contrainte de la variabilité des ressources végétales. La transhumance a assuré pendant des siècles un équilibre et le maintien de l'élevage. Cette activité est basée essentiellement sur le déplacement, afin de gérer la disponibilité aléatoire des ressources végétales des parcours. Au cours de cette période, l'agriculture semble être restée reléguée dans des lieux préférentiels, principalement autour de certains centres anciens, comme les villes de Messaad et de Laghouat, dans lesquelles on trouve la signature d'un vrai savoir-faire adapté aux contraintes du milieu.

Territoire du changement, la steppe algérienne, dont celle de la région de Djelfa, a subi de profondes mutations socio-environnementales. Le paysage d'aujourd'hui est bien loin du récit d'autrefois (1887) d'une mer d'alfa, d'une faune riche composée de gazelles et de hyènes, ainsi que du déplacement massif de caravanes pour la transhumance. L'emprise humaine sur ces lieux a été grandissante et s'est manifestée dans le paysage par l'extension de l'agriculture, qui dans sa forme contemporaine, a été introduite par les colons. Elle remonte au début du 20^{ème} siècle, avec la mise en culture des plaines de Sersou et de Ain Oussera. En parallèle, les nomades ont subi une sédentarisation massive et forcée pendant la guerre (1954-1962) qui s'est poursuivie après l'indépendance sous d'autres formes, comme des lois restreignant le déplacement. La sédentarisation des éleveurs signe la fin progressive du mode d'élevage traditionnel fondé sur la transhumance. Mais, elle annonce l'émergence d'une nouvelle phase dans la relation avec les ressources.

Le constat dressé aujourd'hui à Djelfa, de surpâturage, d'éradication des espèces ligneuses et d'extension des terres mises en culture au détriment des parcours, s'inscrit dans la métamorphose du paysage de la steppe algérienne. Elle est également marquée par la transformation des éleveurs en agro-pasteurs, la mécanisation effrénée et la concurrence pour l'accès aux ressources. L'ensemble de ces facteurs, accentués par les aléas climatiques, conduit à l'amorce de la dégradation des terres et des ressources. Cependant, comme l'a évoqué Pélissier (1951) « la dégradation des sols et de la végétation (...) n'est-elle pas, en effet, en dernière analyse, la traduction dans le paysage de la crise d'une société paysanne ? ».

Dans ce travail, en plus de l'examen des données du milieu physique et de l'imagerie satellitaire, notre intérêt s'est également porté sur l'homme en tant qu'acteur. En effet, « collaborer avec les personnes qu'on étudie consiste à ne pas les prendre comme simple objet de recherche, mais comme des partenaires, de considérer leurs problèmes et tenter de les aider à les résoudre » Wiessner (2014)¹⁶.

Plus fort que les statistiques et métriques, un contact avec des éleveurs révèle que l'engouement pour la céréaliculture est une réponse incertaine pour faire face à un milieu à l'équilibre instable marqué par le manque d'herbe offerte par les parcours. Durant les meilleures années, le rendement de l'agriculture augmente l'apport nutritionnel qui permet de constituer un complément alimentaire au bétail. Cette pratique est vue par certains comme complémentaire, mais vitale dans un environnement dont la disponibilité des ressources est aléatoire et encline à forte incertitude. Lors des périodes de déficit en précipitations, l'incertitude se transforme en inquiétude, elle est accentuée par la baisse sensible du prix de vente du bétail (moutons). De plus, le risque se transforme en problème, alimenté par l'installation de la spéculation autour des compléments alimentaires (disponibilité, prix et qualité).

Dans les moments les plus fragiles, lors de la sécheresse, les petits éleveurs se retrouvent dépossédés des moyens d'agir, perdant ainsi le contrôle de leur destin. Avec la libéralisation du marché et le retrait de l'Etat d'assurer la disponibilité de compléments alimentaires, l'avenir des petits éleveurs ainsi que le futur d'une part de l'activité d'élevage se négocie entre importateurs. Le reste se joue entre les mains des revendeurs des compléments alimentaires. Avec des moyens rudimentaires, l'exercice de l'élevage par les petits exploitants apparaît comme une aventure qui n'autorise pas le retour. Les revenants, ruinés se trouvent dans la périphérie des villes à la recherche d'un emploi.

Pour suivre ces changements, l'utilisation d'anciennes photos aériennes et d'un lot important d'images satellitaires, nous a permis de remonter le temps, de retracer les mutations ayant marqué la région, d'en extraire leur lien possible avec les facteurs qui pilotent et influencent ces changements. En effet, la diversité d'images a été exploitée pour examiner la

¹⁶ Une série d'articles identifiés par le comité de rédaction (PNAS) comme présentant des résultats d'importance exceptionnelle. PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences - USA).

dynamique de la surface sur plusieurs axes (érosion hydrique, dynamique de la végétation, dynamique d'ensablement), à diverses échelles temporelles et spatiales. Pour cela, une méthode quantitative a été appliquée, s'appuyant sur la télédétection et les SIG. Elle a rendu possible la cartographie des états de surface à différentes dates, afin de produire des indicateurs et des mesures de changement spatio-temporels.

Comme nous l'avons développé dans le deuxième chapitre, les critiques et reproches formulés aux différentes méthodes de cartographie de la dégradation des terres, s'articulent souvent autour des techniques de mesure. En effet, produire de la métrique sur un environnement versatile, a été l'un des éléments les plus difficiles à maîtriser dans ce travail. Les incertitudes liées à nos approches et méthodes de mesures ont été discutées au fur et à mesure.

Au terme de cette étude, le site prospecté couvrant Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia, situé à l'est de la ville de Djelfa, montre des changements dans l'occupation du sol sur une période de 60 ans, surtout dans les plaines. Elles sont marquées par l'emprise d'une agriculture grandissante, où la végétation naturelle est remplacée par une agriculture saisonnière et pluviale. Notre étude montre que l'ébauche de cette tendance est antérieure aux années 50, mais son achèvement signe un changement majeur de mode d'exploitation des ressources. Sur les plateaux et reliefs, ce changement est plus nuancé. A certains endroits, la végétation dense était et demeure absente. Dans d'autres, sur les versants du relief, une couverture forestière demeure sans grandes modifications perceptibles. Ces évolutions ne restent pas sans impact sur la dégradation du sol, sur la relation qui lie l'homme à la terre et enfin sur les autres activités comme l'élevage jusque-là activité principale.

Au niveau des plaines qui s'étendent entre Daïet Tisselouine et Daïet Chouiouia, le remplacement du tapis végétal des plantes pérennes en culture saisonnière augmente non seulement le contraste interannuel (année sèche – année humide) et l'intersaison (printemps – été), mais il prive également les terrains de la couche protectrice. Après le labour de la terre, cela facilite l'action érosive hydrique et éolienne. La transformation morphologique, ainsi que la dynamique environnementale, sont non seulement les résultats d'un double processus, marqué par l'alternance du rôle joué par l'action éolienne et hydrique, mais également par l'interaction entre ces deux acteurs.

Au niveau régional, les dépressions hydroéoliennes et les plaines de Djelfa ainsi que les Hautes Plaines sont le siège d'une morphogénèse éolienne active qui se manifeste lors de la persistance de séquences sèches. La phase ultime est l'apparition d'une couche fine de sable libre, de voiles sableux, de rides et de micro-Nebkas. Ces actions éoliennes démontrent une réactivation du processus d'ensablement pendant les années sèches. Le vent augmente sa capacité à mobiliser les particules dans les champs dénudés de tout obstacle végétal, rendus sensibles à la déflation par le labour : la topographie est suffisamment ouverte pour permettre au vent de développer son action de déflation sur sol sec et finement émiétté par la charrue à disque. Durant ces périodes, les sols se trouvent dans la phase la plus critique. Cette situation

est aggravée par le retard des précipitations après labour. Le cumul de ces conditions de fragilité fait que le sol devient vulnérable à l'attaque du vent.

Les prémices de ces actions éoliennes sont perceptibles dès 1957 sur le site de Daïet Chouiouia, cantonnés dans de petites parcelles ensablées avec de modestes surfaces. Mais la vraie amorce d'ensablement est visible dans l'image de 1972 après la sécheresse des années 70. A cette période, la couverture sableuse a gagné en volume et forme un couloir ensablé de 10 km. La position et la forme de cette manifestation sableuse indiquent une direction du flux éolien du Nord-Ouest vers le Sud-Est.

La crise d'ensablement suivante coïncide avec l'assèchement lié au recul des précipitations dans les années 80. Elle a inauguré une nouvelle phase marquée par une crise d'ensablement majeure. La manifestation de cette perturbation est perceptible dans l'image TM de 1984. La couverture sableuse forme désormais une seule unité sableuse qui s'étale sur 35 km. Elle déborde sur les plaines et plateaux, des lieux traditionnellement épargnés. Cet épisode atteste d'une grande capacité de mobilisation sédimentaire par déflation éolienne depuis les plaines et les dépressions endoréiques.

Dans cette étude, il est également question d'illustrer le caractère oscillant du processus d'ensablement ainsi que ces liens avec les fluctuations des précipitations. Caractéristique révélée par l'analyse multi-temporelle faite sur une série d'images satellitaires. En effet, la couverture sableuse se contracte lors des périodes humides (1995 et 2011) pour se restreindre dans de petites surfaces. Pendant les séries d'années sèches (1984 et 2003), l'action éolienne prend l'avantage pour élargir la couverture sableuse. Les résultats obtenus sur le site d'étude suggèrent que dans un environnement anthropisé, depuis la sécheresse des années 70, les effets d'une période sèche sont généralement semblables, une crise rapide d'ensablement se met en place (1972, 1984, 2003). Actuellement, les mécanismes pilotant la prépondérance d'ensablement sont largement liés aux changements du rythme des précipitations. Les fluctuations des surfaces ensablées suivent de près les variations climatiques. Une suite de trois années sèches suffit pour que le processus d'ensablement se réactive dans le site de Daïet Chouia. Donc, en termes de durabilité des zones ensablées et de leur capacité à persister dans le temps, le sable semble présenter deux aspects, éphémère et durable à la fois.

- Éphémère : à l'inverse des zones habituellement ensablées dans le Sahara ou même dans le cordon dunaire où le sable est omniprésent, il est très « volatile ». Avec des conditions pluviométriques humides, il peut s'effacer du paysage en l'espace de quelques années seulement. À maintes reprises sur le terrain, comme sur l'imagerie, nous avons relevé des changements de formes et de limites.
- Durable : Il semble être en dormance, toujours-là. Il suffit d'une suite d'années sèches pour le réactiver. Il réapparaît et refait surface au retour des conditions qui lui sont favorables, à l'assèchement du climat, à un mode d'exploitation peu approprié.

À une échelle spatiale plus vaste, la validation au niveau régional d'un lien fort entre le recul des précipitations et la réactivation d'ensablement apporte une autre information intéressante. Trois sites ont été choisis, répartis sur une étendue de 160 km de diagonale SE-NW. L'analyse révèle que les autres sites, après la crise d'ensablement des années 84, réagissent moins aux séquences de sécheresse suivantes. Ils se détachent de l'évolution observée sur le site de Daïet Chouiouia. Deux causes sont avancées :

- Les caractéristiques topographiques et hydrographiques spécifiques à la daïa. Elles entretiennent l'ensablement par une boucle de rétroaction.
- Les travaux de reboisement sur les trois autres sites ont pu contribuer à la réduction de l'ensablement. Les résultats obtenus sur le site de Dar Chioukh suggèrent une maîtrise totale, indiquée par l'absence d'ensablement lors de la séquence sèche des années 2000. Des images plus récentes (2011 et 2016) consolident ce bilan.

Si ces résultats résistent à l'épreuve d'une nouvelle séquence sèche, nous pourrions alors dire que la dégradation est inversée et grâce aux actions de reboisement, l'Homme semble avoir arraché le pouvoir de pilotage de l'ensablement au climat pour le confier à nouveau à la végétation pérenne. Cette dernière est la couche protectrice qui atténue les effets de la sécheresse et ralentit la progression du sable. Avec une densité suffisante, elle bloque et empêche le déclenchement du processus d'ensablement.

Le paysage que révèle Djelfa ces dernières années est en nette amélioration par rapport à l'ensablement presque généralisé de la décennie 80. Dans cette progression, l'État, à travers ses institutions, fournit des efforts considérables pour d'un côté, lutter contre la dégradation des terres et de l'autre, accompagner la population locale et les éleveurs lors de cette phase de transition.

Dans la perspective des années 2020, la région de Djelfa laisse entrevoir un paysage fortement restructuré, tourné vers la réorganisation de l'espace qui tend vers le regroupement d'activités et d'une spécialisation de plus en plus marquée dans le territoire : Massifs forestiers, plaines agricoles-céréaliculture (Maâlba, Ain Mouilah vers la ville de Moudjbara, et Ain-Ouessara) et aires de parcours. De même, on assiste à l'émergence de zones qui se spécialisent en agriculture arrosée (Moudjbara, Messaâd...). L'objectif de cette dernière est, non seulement de pallier le déficit pluviométrique, mais également d'étendre la production aux saisons sèches et produire d'autres variétés de fruits et légumes. Dans cette transformation, émerge une nouvelle forme d'agriculture d'aménagement en terrasse « Tabia » qui semble plus favorable à la végétation que les glacis, car elle piège les éléments fins transportés par l'eau et conserve l'humidité.

Ces conversions sont bien perceptibles dans l'espace. Pour les comprendre il faut les considérer comme l'aboutissement d'un processus et s'interroger sur les forces motrices de ces changements. Sous cet angle de vue, nous pouvons distinguer deux types de mutations.

1. L'adaptation au manque des ressources fournies par les parcours, due à la mise en culture des terres, par l'utilisation de compléments de concentrés alimentaires afin de continuer à exercer l'élevage de moutons. Donc à nos yeux, tous ces changements s'inscrivent dans une même finalité, celui de la continuité d'activité d'élevage, qui est plutôt une forme d'évolution et d'adaptation.
2. Bien qu'elle soit encore discrète, l'introduction ces dernières années de la culture arbustive d'oliviers présente probablement la rupture la plus importante qu'aient vécu ces espaces. Contrairement aux autres modes de culture, cela insuffle un nouveau modèle économique qui évolue indépendamment de l'élevage de moutons.

Ce nouveau mode d'exploitation de la terre ouvre à ces régions de nouvelles perspectives en valorisant les ressources des sols fragiles d'une manière plus efficace que l'agriculture pluviale. L'olivier, bien adapté au climat de la région, est moins exigeant que d'autres arbres fruitiers. Ses caractéristiques concilient l'exigence d'intensification de production et la protection (annuelle) du sol, par le système racinaire puissant et le feuillage persistant. Les constatations faites en Tunisie présaharienne attestent qu'une meilleure protection du sol est rendue possible grâce à l'extension de la culture d'oliviers. Toutefois, il semble que cette culture arbustive ait atteint son extrême limite pluviométrique. Pour assurer des réserves d'eau suffisantes aux arbres, il fallait les espacer de plus en plus et éliminer les herbes au sol qui leur font concurrence à l'eau. Des moyens de désherbage mécanique ont été utilisés. En quelques années, ces pratiques ont provoqué la création de dunes (Bermúdez *et al.*, 1996). Lorsqu'on est en limite pluviométrique de l'olivier, les labours après chaque pluie sont très néfastes pour les sols.

L'ensablement est fortement préjudiciable, en plus de la détérioration de la qualité du sol, par son fort appauvrissement sédimentaire dans les zones source de déflation. Il bouleverse les systèmes écologiques et a de graves conséquences sur l'infrastructure et l'habitat. En effet, la ville de Mliliha est piégée dans ce flux d'ensablement. Nous en avons eu confirmation auprès des habitants. Durant les apogées des épisodes sableux, en 1984 et 2003, le sable couvrait les rues et restait piégé sur les toits des maisons en remplissant les ondulations des toitures.

Dans ces environnements fragiles, le constat d'une amélioration végétale temporaire peut prendre des apparences trompeuses. En effet, la disparition du sable lors des années humides ne traduit pas forcément un recul sans séquelles et indique encore moins la restauration à l'identique des systèmes écologiques dégradés. Elle ne garantit pas plus de retrouver le niveau de production antérieure, notamment dans les zones de déflation. Les travaux de Floret *et al.* (1986) vont dans le même sens : ils concluent « qu'un système écologique dégradé ne retrouve pas, même en une année pluviométriquement favorable, son niveau antérieur de production ».

Par ailleurs, sur le plateau méridional de la daïa, le long du couloir sableux, l'apport sédimentaire déposé sur l'encroûtement calcaire est positif. Durant les années à humidité favorable, les couches sableuses s'épaississent et sont transformées en buttes et en support

exploitable par les plantes. On remarque alors une amélioration de la végétation sur ces espaces ensablés qui contrastent avec le reste du plateau.

D'après les résultats obtenus, il est clair que le sable connaît une très forte dynamique changeante d'une année à l'autre, sensible aux conditions climatiques. De ce fait, réaliser des études, des bilans et des couvertures globales, ne traduit que l'état de surface à la date de ces réalisations et sa cartographie devient vite caduque.

Pour la lutte contre l'ensablement et la désertification dans les régions steppiques, notre expérience nous a convaincu que la prévention de l'ensablement est bien plus efficace que la gestion de ses conséquences. Intervenir sur les zones de déflation, sites sources de sable pour réinventer et introduire un modèle agricole convenable, est bien mieux qu'intervenir sur les sites de transit ou de dépôts pour stabiliser le sable et gérer les situations de crises. Des exemples de projets réussis dans la protection des sols aussi bien à Djelfa que dans le reste des zones steppiques le montrent. Pour que la bataille de lutte contre l'ensablement, contre la dégradation et la désertification soit emportée, il faut intégrer la population en prenant en charge leurs préoccupations. Il faut considérer les habitants comme partenaires pour identifier les enjeux et définir les orientations. Pour que la réussite soit inscrite dans le temps et gagne en durabilité, elle doit intégrer la notion de valeur économique dans ses espaces anthropisés. Ces facteurs permettent d'emporter l'adhésion de la population qui devient partie prenante, ce qui facilite l'introduction de modèle conciliant la protection et l'exploitation raisonnée des ressources. Ainsi, la terre passe d'une ressource à un patrimoine qu'il faut préserver.

Bibliographie

- ABDELLAOUI, A., (2010), Mise en évidence de mouvements de sable à partir d'images satellitales; Application au piémont sud de l'Atlas Saharien (Algérie), *Annals of the University of Bucharest: Geography Series*. 2010;59, Bucharest, Romania.
- ABER, J. S., MARZOLFF, I. & RIES, J., (2012), *Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications*, Elsevier, 266 p.
- AIDOU, A., FLOC'H, É. L. & HOUEROU, H. N. L., (2006), Les steppes arides du nord de l'Afrique, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 17, n°1, p. 19-30.
- AIDOU, A. & TOUFFET, J., (1996), La régression de l'alfa (*Stipa tenacissima* L.), graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 7, n°3, p. 187-193.
- ALVA, J. A. V. & ESTRADA, E. G., (2009), A Generalization of Shapiro–Wilk's Test for Multivariate Normality, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, vol. 38, n°11, p. 1870-1883.
- ALVAREZ, L. J., EPSTEIN, H. E., LI, J. & OKIN, G. S., (2012), Aeolian process effects on vegetation communities in an arid grassland ecosystem, *Ecology and Evolution*, vol. 2, n°4, p. 809-821.
- AMEISEN, J. C., (2013, avril 24), Invention de l'Agriculture, *Sur les épaules de Darwin*, France Inter.
- ANYAMBA, A. & TUCKER, C. J., (2005), Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003, *Journal of Arid Environments*, vol. 63, n°3, p. 596-614.
- AQUASTAT, (2015), AQUASTAT - Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture, *AQUASTAT*. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/dza/indexfra.stm (consulté le 05/03/16)
- ARABI, M., BOURUGAA, L. & KEDAID, O., (2007), Intensification de l'agriculture et réduction des risques érosifs en milieu semi aride algérien, *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, vol. 7, .
- ARTHUS-BERTRAND, Y., (2015), Barrage vert à Hassi Bahbah, Algérie (35°04'N – 3°01'E). http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datsogallery&Itemid=27&func=detail&catid=8&id=2144&p=1&l=1366 (consulté le 20/03/15)
- BAGNOULS, F. & GAUSSEN, H., (1953), *Saison sèche et indice xérothermique*, Faculté des Sciences.
- BAI, Z., DENT, D., OLSSON, L. & SCHAEPMAN, M., (2008), *Global assessment of land degradation and improvement: Identification by remote sensing* (n° GLADA Report 5), ISRIC-World Soil Information, 68 p.
- BALLAIS, J.-L., (1986), Variations du milieu à l'holocene dans les Aures, Algérie, In : *INQUA-ASEQUA International Symposium on Global Change in Africa During Quaternary. Past-Present-Futur*,(Vol. des Résumés), *ORSTOM ed*, p. 19–21.
- BALLAIS, J.-L., (1991), Contraintes géomorphologiques des géosystemes du bas-Sahara Algérien septentrional (Ziban, oued Rhir, Souf).

- BALLAIS, J.-L. & BENZAOUZ, M. T., (1994), Données nouvelles sur la morphogenèse et les paléo-environnements tardiglaciaires et holocènes dans la vallée de l'oued Chéria-Mezeraa (Nemencha, Algérie orientale), *Méditerranée*, vol. 80, n°3, p. 59-71.
- BALLAIS, J.-L., MARRE, A. & ROGNON, P., (1979), Périodes arides du Quaternaire récent et déplacement des sables éoliens dans les Zibans (Algérie), *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique Paris*, vol. 21, n°2, p. 97-108.
- BARADEZ, J., (1949), *Fossatum Africae: Vue-aérienne de l'organisation romaine dans le Sud-Algérien*, Éd. Arts et Métiers Graphiques.
- BARAKAT, F. & HANDOUFE, A., (1998), Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 9, n°3, p. 201-208.
- BEAUDIN, I., (2007), Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen, *Rapport de Maîtrise en sciences géomatiques*.
- BEAUMIER, A., (1860), *Roudh el-Kartas: histoire des souverains du Maghreb (Espagne et Maroc) et annales de la ville de Fès*, Impr. impériale, 299 p.
- BENZAOUZ, M. T., (1994), Étude des interactions relief-migrations éoliennes de sable dans la région de M'Doukal (Algérie), *Méditerranée*, vol. 80, n°3, p. 51-58.
- BENZAOUZ, M. T., (2000), *Morphogenèse éolienne holocène et actuelle dans l'Atlas saharien oriental (Algérie) : conséquences sur la désertification*, Constantine, Algérie.
- BENCHARIF, A., (1996), *La filière blé en Algérie: le blé, la semoule et le pain*, KARTHALA Editions.
- BENCHERIF, S., (2011), *L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne Évolution et possibilités de développement* (Thèse de doctorat), France, France, AgroParis Tech.
- BENIDIR, M., (2015), *Évaluation multicritère de la durabilité des systèmes d'élevage ovin en zone steppique*. (Thèse de doctorat), Alger, Algérie, Ecole Normale Supérieure d'Agronomie ENSA-Alger.
- BENSAID, A., (2006), *SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride: le cas de la Wilaya de Naâma (Alérie)*, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- BENSOUIAH, R., (2004), Pasteurs et agro-pasteurs de la steppe algérienne, *Strates. Matériaux pour la recherche en sciences sociales*, n°11, .
- BENTEKHICI, N., (2006), Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie), *la conférence francophone ESRI 11-12 octobre au Palais des Congrès d'Issy les Moulineaux*. <https://www.esrifrance.fr/sig2006/bentekhici.html> (consulté le 26/03/17)
- BERGAMETTI, G., LABIADH, M. T., BOUET, C., ATTOUI, B., LAURENT, B., MARTICORENA, B. & LOUIS, J., (2015), Quantification de l'érosion éolienne dans le sud tunisien, *Revue des Régions Arides-Numéro Spécial-n*, vol. 36, p. 1.

- BERMUDEZ, F. L., ROGNON, P. & MURCIA, U. DE, (1996), *Érosion hydrique, désertification et aménagement dans l'environnement méditerranéen semi-aride*, EDITUM, 262 p.
- BISSON, J. & CALLOT, Y., (1986), Des monts des Ksour au Grand Erg occidental. Adaptation ou disparition de la vie nomade ?, *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, vol. 41, n°1, p. 357-377.
- BOLOORANI, A. D., ERASMI, S. & KAPPAS, M., (2008), Multi-Source Remotely Sensed Data Combination: Projection Transformation Gap-Fill Procedure, *Sensors*, vol. 8, n°7, p. 4429-4440.
- BONN, F. & CHILLASSE, L., (s. d.), Essai de cartographie des espèces forestières dominantes dans le Moyen Atlas (Maroc) à l'aide des données Aster.
- BOUDET, G., (1972), Désertification de l'Afrique tropicale sèche, *Adansonia. Série 2*, vol. 12, n°4, p. 505–524.
- BOUROUBA, M., (1998), Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'oued Medjerda supérieur (Algérie orientale), *Bulletin Réseau Erosion*, vol. 18, p. 76-97.
- BRABANT, P., (2008), Activités humaines et dégradation des terres.
- BRABANT, P. & AL, (2010), *Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres: proposition de directives normalisées (CSFD n° 8)*, CSFD, 48 p.
- BRUN, J., (2004), *Etude du potentiel des indices de végétation de l'imagerie MODIS pour l'observation de l'évolution intra-et inter-annuelle de la couverture du sol*, Université de Genève, Diplômé en Sciences naturelles de l'environnement, 37 p.
- BRUNET, P. & BERJAUD, L., (1951), *L'ALFA* (Collection de brochures hebdomadaires pour le travail libre des enfants n° 170), Collection de brochures hebdomadaires pour le travail libre des enfants, L'Imprimerie à l'école Cannes (A. -M.), 28 p.
- CALLOT, Y., (1987), *Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental: dynamique éolienne et paléo-lacs holocènes*, Paris 6.
- CALLOT, Y., (1991), Histoire d'un massif de dunes, le Grand Erg Occidental (Algérie), *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 2, n°1, p. 26-39.
- CALLOT, Y., (2008), Formations éoliennes, In : G. BOURRIÉ et Y. DEWOLF (éd.), *Les Formations superficielles: Genèse, typologie, classification, paysages et environnements, ressources et risques*, Ellipses vol. 293–317, p. 830.
- CALLOT, Y. & FONTUGNE, M., (2008), Les sites lacustres d'âge holocène dans l'est du Grand Erg occidental (nord-ouest du Sahara algérien): interprétation géomorphologique et paléoclimatique, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, vol. 14, n°3, p. 187–200.
- CALLOT, Y., MERING, C. & SIMONIN, A., (1993), Quantification et cartographie par télédétection des aires dunaires sur les images SPOT panchromatique à partir des méthodes de la morphologie mathématique.
- CALLOT, Y. & OULEHRI, T., (1996), Géodynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien: relations entre aérologie et géomorphologie, *Geodinamica acta*, vol. 9, n°1, p. 1–12.

CALOZ, R. & COLLET, C., (2001), Précis de télédétection, volume 3: traitement numériques d'image en télédétection, *Agence universitaire de la francophonie (AUF) et Presses de l'université du Québec, Montréal.*

CALOZ, R. & COLLET, C., (2011), *Analyse spatiale de l'information géographique*, PPUR Presses polytechniques, 400 p.

CAMPS, G., (1978), Origines de la domestication en Afrique du Nord et au Sahara, *Revue française d'histoire d'outre-mer*, vol. 65, n°240, p. 363-376.

CAPOT-REY, (1953), *Le Sahara français*.

CARPENTER, S. A. & CANNADY, J., (2004), Tool for Sharing and Assessing Models of Fusion-Based Space Transportation Systems, In : *Proceedings of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, p. 11–14.

CELERIER, J. & CHOLLEY, A., (1931), La production de l'alfa en Afrique du Nord, *Annales de Géographie*, vol. 40, n°225, p. 323-325.

CELERIER, L., (1978), *Six générations en Algérie*, Les Presses universelles.

CENTER FOR EARTH OBSERVATION, (2015), How to fill gaps in Landsat ETM images, *Yale University*. <http://yceo.yale.edu/how-fill-gaps-landsat-etm-images> (consulté le 20/02/17)

CHAILLEY-BERT, J., (1910), *La Quinzaine coloniale : organe de l'Union coloniale française*, A. Challamel, Paris, 503 p.

CHEN, E. H., (1971), The Power of the Shapiro-Wilk W Test for Normality in Samples from Contaminated Normal Distributions, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 66, n°336, p. 760-762.

CHEN, J., ZHU, X., VOGELMANN, J. E., GAO, F. & JIN, S., (2011), A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, n°4, p. 1053-1064.

CLERC, P., (2008), Les formes de la domination: paysages ruraux de l'Afrique du Nord colonisée. http://www.jourlib.org/paper/2232886#.WMpg0H_GCNY (consulté le 16/03/16)

CNTS, (1988), Inventaire national des nappes alfatières. Rapport de la1ère, 2è, 3è et 4è phases.

COOK, B. I., MILLER, R. L. & SEAGER, R., (2009), Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, n°13, p. 4997-5001.

COQUE, R. & JAUZEIN, A., (1965), Le Quaternaire moyen de l'Afrique du Nord, *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol. 2, n°2, p. 117-132.

COTE, M., (2014), *Le Sahara : Barrière ou pont*, 159 p.

DAMNATI, B., (2000), Holocene lake records in the Northern Hemisphere of Africa, *Journal of African Earth Sciences*, vol. 31, n°2, p. 253–262.

- DAVIS, D. K., (2012), *Les mythes environnementaux de la colonisation française au Maghreb*, Editions Champ Vallon, 320 p.
- DELAHAYE, D., (2005), Modélisation d'un système spatial complexe: le bassin versant, *Modélisations en géographie*. Editions Hermès, Lavoisier, Paris, p. 229–254.
- DELANNOY, J.-J., DELINE, P. & LHENAFF, R., (2016), *Géographie physique: aspects et dynamique du géosystème terrestre*, De Boeck Supérieur.
- DEMANGEOT, J., (2001), *Les milieux désertiques*, Armand Colin, 292 p.
- DEMENOCAL, P., ORTIZ, J., GUILDERSON, T., ADKINS, J., SARNTHEIN, M., BAKER, L. & YARUSINSKY, M., (2000), Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing, *Quaternary Science Reviews*, vol. 19, n°1–5, p. 347-361.
- DEROUECHE, H., (2015), *Téledétection et analyse des dépérissements des forêts Naturelles en zone semi-aride (Djelfa)*, 2015.
- DERRADJI, N., (s. d.), Place des oiseaux d'eau dans le fonctionnement de deux zones humides continentales, Zehrez Chergui et Zehrez Gharbi (wilaya de Djelfa) (PDF Download Available), *ResearchGate*.
- DESJARDINS, R., ROGNON, P., BENALLA, M. & OTHERS, (2005), Progrès importants des études sur l'évolution des dunes grâce à l'utilisation combinée des satellites civils et militaires: l'exemple du Tafilalet (Maroc), *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 16, n°3, p. 153–164.
- DORIZE, L. & ROGNON, P., (1979), Mécanismes climatiques et oscillations actuelles du climat sur la bordure méditerranéenne du Sahara, *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 56, n°462, p. 193-203.
- DROMIGNY-BADIN, A., (1998), *Fusion d'images par la théorie de l'évidence en vue d'applications médicales et industrielles* (Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de Lyon).
- DUBIEF, J., (1959), *Le climat du Sahara*, Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes, 370 p.
- DURAND, J. H., (1988), *Arrêter le désert*, Agence de coopération culturelle et technique, 440 p.
- DUSSEUX, P., (2014), *Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole*, Université Rennes 2.
- EBERHARDT, I., (1989), *Écrits sur le sable*, Grasset.
- EBERHARDT, I. & BARRUCAND, V., (1920), *Pages d'islam*, Charpentier et Fasquelle, 220 p.
- EL HAGE HASSAN, H., CHARBEL, L. & TOUCHART, L., (2015), Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban: exemple de la région d'El Aaqôura, *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n° 9, p. 141–156.
- ELMORE, A. J., MUSTARD, J. F., MANNING, S. J. & LOBELL, D. B., (2000), Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index, *Remote sensing of environment*, vol. 73, n°1, p. 87–102.

ESCADAFAL, R., (1989), *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection: applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*.

ESCADAFAL, R., (2012), Observation à long terme des environnements arides par satellites: retour d'expériences et perspectives, *Options méditerranéennes B (68)*, p. 41–69.

FAO, (1995a), *Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche* (n° 54), FAO.

FAO, (1995b), La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 1995. <http://www.fao.org/docrep/v6800f/v6800f00.htm#Contents> (consulté le 08/04/16)

FAO: LAND AND WATER DIVISION, (2015), État des ressources en sols dans le monde. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/b7710883-a9fb-4513-9a90-0134f0da26c9> (consulté le 08/03/16)

FAO/SMIAR, (1997), Cultures et Pénuries alimentaires 1997- Afrique du Nord. <http://www.fao.org/docrep/004/w5747f/pays/afno9705.htm> (consultée le 05/03/16)

FAO/SMIAR, (2000), Cultures et Pénuries alimentaires 2000 - Afrique du Nord. <http://www.fao.org/docrep/004/x3929f/pays/afno9911.htm> (consulté le 05/03/16)

FAOSTAT, (2015), FAOSTAT. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E> (consulté le 21/03/16)

FAYARD, P., (2006), *Le réveil du samouraï: Culture et stratégie japonaise dans la société de la connaissance*, Dunod.

FELICE, P. DE & SCHREMMER, F., (1964), Étude de la variation des précipitations dans quelques stations de France et d'Algérie, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, vol. 13, n°2, p. 173-192.

FLORET, C., FLOC'H, E. L. & PONTANIER, R., (1986), La désertisation en Tunisie présaharienne., *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, vol. 41, n°1, p. 291-326.

FOODY, G. M., (2002), Status of land cover classification accuracy assessment, *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, n°1, p. 185-201.

FRAMPTON, W. J., DASH, J., WATMOUGH, G. & MILTON, E. J., (2013), Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, p. 83-92.

FRISON-ROCHE & ROGER, (2015), Documents : Le Colon du Sersou, *La Dépêche Quotidienne d'Algérie*. <http://kent.cdha.fr:8080/Record.htm?idlist=0&record=19181738124919099109> (consulté le 14/02/16)

GAGNOL, L., (2012), La mobilité: symptôme d'inadaptation des sociétés sahéliennes ou stratégie adaptative?, *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 23, n°3, p. 240–247.

GEORGE, P., (1968), Les progrès de l'agriculture au Kazakhstan par Mme Aymard-Faillebin, *Annales de Géographie*, vol. 77, n°423, p. 624-627.

GHRAM-MESSEDI, A. & DELAITRE, 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), *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 18, n°4, p. 305-313.

GIEC, BATES, B., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S. & PALUTIKOF, J., (2008), Le changement climatique et l'eau, *Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.*

GONZALEZ, F. E., RUIZ, J. M. & ACOSTA, F. M., (2013), *Manuel de télédétection spatiale*, Programme : TELECAN, l'Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), 337 p.

GROUZIS, M., ALBERGEL, J. & CARBONNEL, J.-P., (2014), Période climatique au Burkina-Faso : effets sur les ressources en eau et les productions végétales, In : B. BRET (éd.), *Les Hommes face aux sécheresses : Nordeste brésilien, Sahel africain*, Éditions de l'IHEAL, Paris, p. 165-178.

GUILLET, D., (2007), Planète Terre, Planète Désert.

HAEID, M., (2008), Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes., *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n°Volume 8 Numéro 1, .

HAGOLLE, O., (2013), USGS now delivers atmospherically corrected LANDSAT data.

HAGOLLE, O., HUC, M., VILLA PASCUAL, D. & DEDIEU, G., (2015), A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of formosat-2, Landsat, venus and Sentinel-2 images, *Remote Sensing*, vol. 7, n°3, p. 2668–2691.

HELLDEN, U., (1988), Desertification monitoring: is the desert encroaching?, *Desertification control bulletin*, n°17, p. 8–12.

HELLER-ROAZEN, D., (2014), *Le Cinquième Marteau. Pythagore et la dysharmonie du monde: Pythagore et la dysharmonie du monde*, Le Seuil.

HERRMANN, S. M., ANYAMBA, A. & TUCKER, C. J., (2005), Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate, *Global Environmental Change*, vol. 15, n°4, p. 394-404.

HERRMANN, S. M. & HUTCHINSON, C. F., (2005), The changing contexts of the desertification debate, *Journal of Arid Environments*, vol. 63, n°3, p. 538–555.

HILL, J., STELLMES, M., UDELHOVEN, T., RÖDER, A. & SOMMER, S., (2008), Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations, *Global and Planetary Change*, vol. 64, n°3–4, p. 146-157.

HIRCHE, A., BOUGHANI, A. & SALAMANI, M., (2007), Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 18, n°4, p. 314-320.

HORNBECK, R., (2012), The enduring impact of the American Dust Bowl: Short-and long-run adjustments to environmental catastrophe, *The American Economic Review*, vol. 102, n°4, p. 1477–1507.

HOSTERT, P., RÖDER, A. & HILL, J., (2003), Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands, *Remote sensing of environment*, vol. 87, n°2, p. 183–197.

HOSTERT, P., RÖDER, A., JARMER, T., UDELHOVEN, T. & HILL, J., (2001), The potential of remote sensing and GIS for desertification monitoring and assessment, *Annals of Arid Zone*, vol. 40, n°2, p. 103–140.

HUETE, A. R., (1988), A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, n°3, p. 295-309.

IBN KHALDOUN, (1374), *Al Muqaddima Introduction À L'histoire Universelle Les Prolégomènes D' Ibn Khaldoun Volume 2-3*, Traduits en Français et commentés par M. De Slane en 1863, Paris, 498 p.

ISNARD, H., (1950), LA RÉPARTITION SAISONNIÈRE DES PLUIES EN ALGÉRIE, *Annales de Géographie*, vol. 59, n°317, p. 354-361.

JALUT, G., DEDOUBAT, J. J., FONTUGNE, M. & OTTO, T., (2009), Holocene circum-Mediterranean vegetation changes: climate forcing and human impact, *Quaternary international*, vol. 200, n°1, p. 4–18.

JAUFFRET, S., (2001), *Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long term dans les écosystèmes méditerranéens arides: application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien*, Aix-Marseille 3.

KALAITZIDIS, C., MANAKOS, I. & REUTER, R., (2017), Télédétection et systèmes d'information géographique en agriculture, *Tutoriel : Télédétection et SIG en agriculture*, Mediterranean Agronomic Institute of Chania; European Association of Remote Sensing Laboratories - Strasbourg, France. <http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/agriculture-c09-p01.fr.html> (consulté le 23/05/17)

KEMMOUCHE, A., MERING, C. & SANSAL, B., (2008), Cartographie de la densité du couvert ligneux dans les zones arides et semi-arides à l'aide de l'imagerie satellitaire, *Sécheresse*, vol. 19, n°2, p. 129–135.

KINGUMBI, A., BERGAOUI, Z., BOURGES, J., HUBERT, P. & KALLEL, R., (2000), Étude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale, *Documents Techniques en Hydrologie*, n°51, p. 341–345.

LACOSTE, Y., (1953), Progres - Les prolégomènes d'Ibn Khaldoun, n°2, .

LAHMAR, R., (2003), L'opération terres vierges du Kazakhstan, *Alliance21*. <http://www.alliance21.org/2003/article931.html> (consulté le 17/06/16)

LAPORTERIE, F., (2002), *Représentations hiérarchiques d'images avec des pyramides morphologiques: application à l'analyse et à la fusion spatio-temporelle de données en observation de la Terre*, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace.

LAVAUDEN, L., (1941), Les forêts coloniales de la France. Mémoire couronné par l'Académie des Sciences coloniales., *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, vol. 21, n°239, p. 285–365.

LE FLOC'H, E., (2005), *Indicateurs écologiques ROSELT/OSS*.

LE HOUEROU, ET AL., H. N., (1977), Etude bioclimatique des steppes Algériennes.

- LE HOUEROU, H., (1975), Problèmes et potentialités des terres arides du Nord de l'Afrique, *Options Méditerranéennes*, vol. 28, p. 17–36.
- LE HOUEROU, H. N., (1995a), Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique, *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 6, n°2, p. 167–182.
- LE HOUEROU & HENRY, N., (1997), Climate, flora and fauna changes in the Sahara over the past 500 million years, *Journal of Arid Environments*, vol. 37, n°4, p. 619–647.
- LE HOUEROU, H.-N., (1995b), *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique*, Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes, Institut agronomique méditerranéen de Montpellier; Agence de coopération culturelle et technique, Montpellier, 409 p.
- LEDANT, J., (1986), *Aperçu des zones de grand intérêt pour la conservation des espèces d'oiseaux migrateurs de la Communauté en Afrique*, U/84/129, Rapport final, 216 p.
- LEGROUX, J., (2008), *De l'information à la connaissance*, Editions L'Harmattan, 322 p.
- LI, J., OKIN, G. S., ALVAREZ, L. & EPSTEIN, H., (2007), Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA, *Biogeochemistry*, vol. 85, n°3, p. 317–332.
- LINDQVIST, S., (2018), *Le Voyage saharien*, Les Arènes, 327 p.
- LOPEZ, B. & LEYNET, A., (2011), Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines., *Revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. Rapport BRGM/RP-59515-FR*.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E. & MORAN, E., (2004), Change Detection Techniques, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, .
- MACKENDRICK, P. L., (2000), *The north African stones speak*, Library on Congress Cataloging in Publication Data, Carolina, USA, 439 p.
- MAGRIN, G., DUBRESSON, A. & NINOT, O., (2016), *Atlas de l'Afrique: un continent émergent?*, Autrement.
- MAINGUET, M. & DUMAY, F., (1996), Pourquoi le Réseau Erosion doit-il faire une place à l'érosion éolienne ?, *Bulletin - Réseau Erosion*, n°16, p. 281-292.
- MAINGUET, M., DUMAY, F., LEMINE OULD ELHACEN, M. & GEORGES, J.-C., (2008), Changement de l'état de surface des ergs au nord de Nouakchott (1954 – 2000). Conséquences sur la désertification et l'ensablement de la capitale, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 14, n°3, p. 144-152.
- MAKHLOUF, L., (1993), *Etude sédimentologique des sables du cordon dunaire dans le bassin du Zahrez Gharbi (Djelfa)* (Thèse de doctorat), France.
- MANETSA, V. D., BROU, T., FONTAINE, B. & TSALEFAC, M., (2011), Variabilité intrasaisonnière des précipitations et de leur distribution : impacts sur le développement du couvert végétal dans le Nord du Cameroun (1982-2002), *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 22, n°3, p. 159-170.

- MARIE, J.-J., (2010), *Khrouchtchev: la réforme impossible*, Payot.
- MARTICORENA, B. & BERGAMETTI, G., (1995), Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 100, n°D8, p. 16415–16430.
- MARTONNE, E. DE, (1926), L'indice d'aridité, *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 3, n°9, p. 3-5.
- MCFEETERS, S. K., (1996), The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International journal of remote sensing*, vol. 17, n°7, p. 1425–1432.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., KLEIST, J. & OTHERS, (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales, In : *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society Boston, MA vol. 17, p. 179–183.
- MEDJERAB, A., (2007), Les situations pluviométriques extrêmes dans le nord-ouest de l'Algérie, *Climat, tourisme, environnement*, p. 381–386.
- MEDJERAB, A. & HENIA, L., (2013), Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie Nord-Occidentale, Article. <http://dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/handle/123456789/626> (consulté le 25/02/16)
- MELZI, S., (1993), Évolution de la végétation et du milieu dans la région présaharienne des steppes algériennes, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 4, n°2, p. 113-116.
- MESBAH, M., (1991), Apports des méthodes informatiques à la connaissance Hydrologique au bassin endoréique des Zahrez, versant Nord des Monts des Ouled Nail – Algérie Centrale, Thèse de doctorat.
- METZ, H. C., (1993), *Algeria: a country study*, Federal Research Division Library of Congress. Washington, DC, 392 p.
- MITCHUM, R., (2016, décembre 19), Dust Bowl would devastate today's crops, study finds, *UChicago News*. <https://news.uchicago.edu/article/2016/12/19/dust-bowl-would-devastate-todays-crops-study-finds> (consulté le 16/02/18)
- MONJAUZE, A., (1982), Le pays des dayas et *Pistacia atlantica* Desf. dans le Sahara Algérien.
- MRE & IDOM, (2005), *Gestion intégrée des ressources en eau dans la région des Hauts Plateaux* (rapport institutionnel), rapport institutionnel, Ministère des Ressources en Eau.
- MULDER, M. B., BOWLES, S., HERTZ, T., BELL, A., BEISE, J., CLARK, G., ... OTHERS, (2009), Intergenerational wealth transmission and the dynamics of inequality in small-scale societies, *science*, vol. 326, n°5953, p. 682–688.
- MULLER, F. & DE BETHUNE, S., (2000), La fusion d'images, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, vol. 38, n°1, p. 79–94.

NACHTERGAELE, F., PETRI, M., BIANCALANI, R., VAN LYNDEN, G., VAN VELTHUIZEN, H., BLOISE, M. & OTHERS, (2011), Global land degradation information system (GLADIS), *An Information database for Land Degradation Assessment at Global Level*, vol. 17, p. 110.

NAHAL, I., (1962), Le Pin d'Alep (*Fines halepensis* Mill.). Étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole.

NAIZOT, T., AUDA, Y., DERVIEUX, A., THIOULOUSE, J. & BELLAN, ET M., (2004), Une nouvelle analyse multi-temporelle d'images satellitaires, les résidus de l'Analyse en Composantes Principales. Un cas d'étude: une série d'images Landsat Thematic Mapper de la Camargue, France, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n°10, p. 1925–1938.

NASA, (2016), Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/> (page consultée le 03/06/16)

NEDJRAOUI, D. & BEDRANI, S., (2008), La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n°Volume 8 Numéro 1, .

NICHOLSON, S. E., DAVENPORT, M. L. & MALO, A. R., (1990), A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR, *Climatic Change*, vol. 17, n°2-3, p. 209-241.

OCDE, (1994), *Indicateurs d'environnement*, 159 p.

OLDEMAN, L., HAKKELING, R. & SOMBROEK, W., (1990), World map of the status of human-induced soil degradation (GLASOD), *Nairobi: United Nations Environment Program and International Soil Reference and Information Centre (UNEP/ISRIC)*.

OSWALD, J. & HARRIS, S., (2016), Chapter 11.1 - Desertification A2 - Shroder, John F., In : R. SIVANPILLAI (éd.), *Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters*, Academic Press, Boston, p. 229-256.

OUSSEDIK, A., IFTENE, T. & ZEGRAR, A., (2003), Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 14, n°3, p. 195-201.

OZER, P., BODART, C. & TYCHON, B., (2005), Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux, *Cybergeo : European Journal of Geography*.

PERRY, K. D., CAHILL, T. A., ELDRED, R. A., DUTCHER, D. D. & GILL, T. E., (1997), Long-range transport of North African dust to the eastern United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102, n°D10, p. 11225-11238.

PLIT, F., (1983), La dégradation de la végétation, l'érosion et la lutte pour protéger le milieu naturel en Algérie et au Maroc, *Méditerranée*, vol. 49, n°3, p. 79-88.

PNUE-PLAN BLEU & ANTIPOLIS, S., (2003), Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens méditerranéens.

PONS, A. & QUEZEL, P., (1998), À propos de la mise en place du climat méditerranéen, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, vol. 327, n°11, p. 755-760.

- POUGET, M., (1980), *Les relations sol-végétation dans les steppes Sud-Algéroises*, ORSTOM, 569 p.
- POUGET, M. & LE HOUEROU, H. N., (1971), *Etude agro-pédologique du bassin du Zahrez Gharbi (feuille 1/100.000è Rocher de Sel)*, Direction des Etudes de Milieu et de la Recherche Hydraulique, Alger, 169 p. multigr. p.
- RAMSAR, (2016), Site web de la Convention de Ramsar. <http://www.ramsar.org/fr/a-propos/la-convention-de-ramsar-et-sa-mission> (consulté le 28/03/17)
- REYNOLDS, R., BELNAP, J., REHEIS, M., LAMOTHE, P. & LUISZER, F., (2001), Aeolian dust in Colorado Plateau soils: Nutrient inputs and recent change in source, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 98, n°13, p. 7123-7127.
- RICHARDSON, D., CASTREE, N., GOODCHILD, M. F., KOBAYASHI, A., LIU, W. & MARSTON, R. A., (2017), *International Encyclopedia of Geography, 15 Volume Set: People, the Earth, Environment and Technology*, John Wiley & Sons, 8364 p.
- RISER, J., (2010), *Les espaces du vent*, Editions Quae, 266 p.
- ROGNON, P., (1979), Evolution du relief et paléoclimats depuis 40 000 ans sur la bordure nord du Sahara, *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 56, n°462, p. 205-214.
- ROGNON, P., (1983), Quelques crises climatiques des douze derniers millénaires (Some climatic crisis during the twelve last thousand years), *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 60, n°494, p. 145-155.
- ROGNON, P., (1984), Signification dynamique et climatique des formations et terrasses fluviales en Afrique du Nord et au Proche-Orient. Rapport, *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, vol. 21, n°1, p. 161-169.
- ROGNON, P., (1986), Oscillations actuelles et variations, depuis 30000 ans BP, des limites du Sahara, In : *INQUA-ASEQUA International Symposium on Global Change in Africa During Quaternary. Past-Present-Future, (Vol. des Résumés)*, ORSTOM ed, p. 321–325.
- ROGNON, P., (1991), Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 2, n°3, p. 199-210.
- ROOSE, E., ARABI, M., BRAHAMIA, K., CHEBBANI, R., MAZOUR, M. & MORSLI, B., (1993), Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne, *Cahiers Orstom, série pédologie*, vol. 28, n°2, p. 289–308.
- ROOSE, É., SABIR, M., ARABI, M., MORSLI, B. & MAZOUR, M., (2012), Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb, *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, n°Volume 6, p. 43-69.
- ROUBET, C. & AMARA, I., (2016), From art to context: Holocene roots of an Initial Neolithic Pastoralism (INP) in the Atlas Ouled Naïl, Algeria, *Quaternary International*, vol. 410, Part A, p. 103-122.
- ROYSTON, J. P., (1982), An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples, *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, vol. 31, n°2, p. 115-124.

RUSO, P., (1947), LA MORPHOLOGIE DES HAUTS-PLATEAUX DE L'EST MAROCAIN, *Annales de Géographie*, vol. 56, n°301, p. 36-48.

RUTHVEN, M. & NANJI, A., (2004), *Historical Atlas of Islam*, Harvard University Press, 210 p.

SAHNOUNI, M., HADJOUIS, D., VAN DER MADE, J., CANALS, A., MEDIG, M., BELAHRECH, H., ... OTHERS, (2002), Further research at the Oldowan site of Ain Hanech, North-eastern Algeria, *Journal of Human Evolution*, vol. 43, n°6, p. 925–937.

SAHNOUNI, M., ROSELL, J., VAN DER MADE, J., VERGES, J. M., OLLE, A., KANDI, N., ... MEDIG, M., (2013), The first evidence of cut marks and usewear traces from the Plio-Pleistocene locality of El-Kherba (Ain Hanech), Algeria: implications for early hominin subsistence activities circa 1.8 Ma, *Journal of human evolution*, vol. 64, n°2, p. 137–150.

SARI, D., (1977), *L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis, Algérie*, Société nationale d'édition et de diffusion, 623 p.

SARI, D., (2010), *Le désastre démographique en Algérie: 1867-1868*, ENAG éd., Alger, Algérie, 318 p.

SCHAFFER, R. M. & GLEIZE, S., (1979), *Le paysage sonore*, J.-C. Lattès Paris.

SELTZER, P., LASSERRE, A., GRANDJEAN, A., AUBERTY, R. & FOUREY, A., (1946), *Le climat de l'Algérie*, Impr." La Typo-litho" et J. Carbonel.

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. & CHEN, H. J., (1968), A comparative study of various tests for normality, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 63, n°324, p. 1343–1372.

SIVIGNON, M., (1963), L'évolution du nomadisme dans les hautes plaines de l'Ouest Algérien.

SOUTTOU, K., SEKOUR, M., ABABSA, L., GUEZOU, O., CHOUKRI, K. & DOUMANDJI, S., (2015), Composition avifaunistiques dans un reboisement de Pin d'Alep à Chbika (Ain Maâbed - Djelfa, Algérie).

SRIVASTAVA, M. S. & HUI, T. K., (1987), On assessing multivariate normality based on shapiro-wilk W statistic, *Statistics & Probability Letters*, vol. 5, n°1, p. 15-18.

TAÏBI, A. N., (1997), *Le piemont sud du djebel Amour (Atlas Saharien, Algérie), apport de la teledetection a l'etude d'un milieu en dégradation* (Paris 7).

TAÏBI, A. N., (2015), *Désertification et dégradation. Ré-interrogation des concepts à la lumière d'exemples africains*, Université d'Angers.

TAÏTHE, B., (2010), La famine de 1866-1868 : anatomie d'une catastrophe et construction médiatique d'un événement, *Revue d'histoire du XIXe siècle. Société d'histoire de la révolution de 1848 et des révolutions du XIXe siècle*, n°41, p. 113-127.

TALBI, M., (1997), Action anthropique et dégradation de l'environnement aride : la désertification en Tunisie du Sud-Est, *Méditerranée*, vol. 86, n°1, p. 25-31.

TASSIN, C., (2012), Paysages végétaux du domaine méditerranéen: bassin méditerranéen, Californie, Chili Central, Afrique du Sud, Australie Méridionale.

- TAUBMAN, W., (2003), *Khrushchev: the man and his era*, WW Norton & Company.
- TECSULT INTERNATIONAL, (2008), *Identification des zones humides en Algérie - Ramsar* (Etude), Etude.
- THIRY, J., (1995), *Le Sahara libyen dans l'Afrique du nord médiévale*, Peeters Publishers, 632 p.
- THOMAS, N. & NIGAM, S., (2018), Twentieth-Century Climate Change over Africa: Seasonal Hydroclimate Trends and Sahara Desert Expansion, *Journal of Climate*, vol. 31, n°9, p. 3349-3370.
- THORNTON, C. W., (1948), An approach toward a rational classification of climate, *Geographical review*, vol. 38, n°1, p. 55-94.
- TIMOFEÏTCHEV, A., (2017, août 19), Campagne des Terres vierges : comment l'URSS a tenté de remplir ses greniers. https://fr.rbth.com/multimedia/pictures/2017/08/19/campagne-des-terres-vierges-comment-lurss-a-tente-de-remplir-ses-greniers_825128 (consulté le 15/02/18)
- TOUTAIN, B. & LHOSTE, P., (1978), Essai d'estimation du coefficient d'utilisation de la biomasse herbacée par le bétail dans un périmètre sahélien, *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, vol. 31, n°1, p. 95-101.
- TRAYSSAC, J., (1981), *Étude géomorphologique du bassin-versant de l'oued Djelfa-Melah: versant nord des monts des Ouled Naïl, Algérie*, Centre interuniversitaire d'études méditerranéennes, Poitiers, 241 p.
- TRICART, J., (1967), Le modèle des régions sèches, Fascicule II, Les formes de relief caractéristiques des régions sèches, Cours de l'université de strasbourg.
- TSOAR, H., (1990), The ecological background, deterioration and reclamation of desert dune sand, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 33, n°2, p. 147-170.
- TUCKER, C., NEWCOMB, W., LOS, S. & PRINCE, S., (1991), Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n°6, p. 1133-1135.
- USGS, (2015), Tri-Decadal Global Landsat Orthorectified | The Long Term Archive. https://lta.cr.usgs.gov/Tri_Dec_Single (consulté le 28/03/17)
- VENARD, C., (2012), *La morphodynamique éolienne en régions sèches, Des échelles spatiales et temporelles aux outils* (Université Lumière Lyon 2).
- VICENTE-SERRANO, S. M. & LOPEZ-MORENO, J. I., (2005), Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 9, n°5, p. 523-533.
- VIGNE, J.-D., BALASSE, M., GOURICHON, L., HELMER, D., LESUR, J., MASHKOUR, M., ... VILA, E., (2011), Etat des connaissances archéozoologiques sur les débuts de l'élevage du mouton dans l'ancien monde, *Ethnozootechnie*, vol. 91, p. 11-19.
- WAELE, E. Z., BOUIADJRA, S. E. B., BENSLIMANE, M. & MEDERBAL, K., (2009), L'écosystème steppique face à la désertification : cas de la région d'El Bayadh, Algérie., *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n°Volume 9 Numéro 2, .

WIESSNER, P. W., (2014), Embers of society: Firelight talk among the Ju/'hoansi Bushmen, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n°39, p. 14027-14035.

WMO, (1983), *Meteorological aspects of certain processes affecting soil degradation*, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.

XU, H., (2006), Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International journal of remote sensing*, vol. 27, n°14, p. 3025–3033.

YACOUBI, M., MOURID, M. E., CHBOUKI, N. & STOCKLE, C. O., (1999), Typologie de la sécheresse et recherche d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, vol. 9, n°4, p. 269-276.

YIZHAQ, H. & ASHKENAZY, Y., (2016), Periodic temporal oscillations in biocrust–vegetation dynamics on sand dunes, *Aeolian Research*, vol. 20, p. 35-44.

ZHOU, W., GANG, C., ZHOU, F., LI, J., DONG, X. & ZHAO, C., (2015), Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator, *Ecological Indicators*, vol. 48, p. 560-569.

ZIAD, A., (2006), La steppe algérienne : Un Espace de nomade et d'élevages ovins, *La Buvette des Alpapes*. http://www.buvettedesalpapes.be/2006/03/steppe_algerie.html (consulté le 15/03/17)

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation de la steppes algériennes, et localisation de la région d'étude (rectangle rouge)	7
Figure 2 : Risques d'érosion hydrique et éolienne en fonction de la pluviométrie (WMO, 1983)	9
Figure 3 : Carte des principales unités du paysage de la région de Djelfa (fond cartographie Google).....	13
Figure 4 : Rocher de sel près de Djelfa (octobre 2013, 34°50'5"N - 3° 5'30"E).....	14
Figure 5: Site de gravures Djebel Zakar (2013), rhinocéros	15
Figure 6 : Caravane en marche (Paul Lazerges, 1892).....	18
Figure 7 : Le Sahara des caravanes, une dizaine d'itinéraires se sont développés au cours des siècles.	18
Figure 8 : Labourage d'époque, un dromadaire traîne une charrue en bois	20
Figure 9 : Changement climatique depuis 30 000 ans sur le nord du Sahara (Rognon, 1986)	21
Figure 10. Pénétration des masses nuageuses venant du Nord-Ouest.....	23
Figure 11 : Chronologie du déplacement d'une masse nuageuse du Sud-Ouest vers le Nord-Est.....	24
Figure 12 : Situation bioclimatique de quelques villes méditerranéennes en fonction des bioclimats.	25
Figure 13 : Carte des répartitions des précipitations d'Algérie centrale en période humide	26
Figure 14 : Carte des répartitions des précipitations d'Algérie centrale en période sèche	27
Figure 15 : Diagramme de corrélation des précipitations de Djelfa et de Boussaâda (1950 – 2015)	28
Figure 16 : Répartition mensuelle des températures de la période 1980-2010.....	29
Figure 17 : Les sous-bassins hydrologiques de la région de Djelfa.	30
Figure 18 : La cueillette d'Alfa, transport se fait généralement à dos de chameaux pour la livraison au chantier.	32
Figure 19 : Mise en culture par défrichement sur les bordures méridionales de Daïet Tisselouine.	33
Figure 20 : Reboisement de massif à l'est de la ville de Had Sahary. La partie Sud est réservée exclusivement.	35
Figure 21 : Travaux de plantation par décennie, réalisés dans le cadre du Barrage Vert	36
Figure 22 : Une bande végétalisée (passerelle biologique) de 9 km près de Djelfa	37
Figure 23 : Barrage Vert à Hassi Bahbah, Djelfa (35°01 N – 3°01 E, Arthus-Bertrand, 2015)	38
Figure 24 : Carte de délimitation biogéographique des steppes algériennes.....	39
Figure 25 : Mouvements des pasteurs et de leurs troupeaux dans les systèmes d'élevage traditionnels	40
Figure 26 : Mise en culture des plaines orientales, autour de Daïet Tisselouine à 25 km de la ville de Djelfa.	45
Figure 27 : Défrichement pour une mise en culture pluviale épisodique et aléatoire.).....	47
Figure 28 : Mise en culture arbustive près de la ville de Hassi Bahbah.....	48
Figure 29 : Reboisement des terres anciennement cultivées pour la lutte contre l'ensablement.....	49
Figure 30 : Parcelles d'agriculture de ruissellement sur les versants sud de Djebel Tlila,.....	50
Figure 31 : Boucle de régénération entre la disponibilité des ressources naturelles et leur utilisation	56
Figure 32 : Dynamique du couvert végétal dans le Sahel en 1985 et 1994 (Anyamba & Tucker, 2005).....	59
Figure 33 : Carte de sensibilité à la désertification de la région de Djelfa (Oussedik et al., 2003)	60
Figure 34 : Carte de localisation de site d'étude au niveau régional.....	68
Figure 35 : Carte de localisation du site d'étude	69
Figure 36 : Carte d'altitude en vue planimétrique réalisée depuis un MNT de résolution 10 mètres.	70
Figure 37 : Vue perspective de la région et l'état d'ensablement en 2001. Modèle Numérique de terrain	71
Figure 38 : Image en composition colorée (5-4-1) image Landsat 5 TM mai 1995	77
Figure 39 : Image en composition colorée (5-4-1) image Landsat 7 ETM+ avril 2011.	77
Figure 40 : Scatterogramme des bandes TM1 et TM5 du site d'étude, image TM de Landsat, 1995.....	78
Figure 41 : Courbes des signatures spectrales en valeurs radiométriques.....	81
Figure 42 : Résultat de l'indice EMI sur une image TM mars 1998	83
Figure 43 : La hiérarchie de contenu (selon Carpenter & Cannady, 2004)	87
Figure 44 : Schéma simplifié de la base constituée par les données OMM.....	89
Figure 45 : Comparaison radiométrique des canaux des satellites	92
Figure 46 : Application de gestion des Méta-informations issues d'images satellitaires	94
Figure 47 : Exemple de géoréférencement des vues aériennes de 1957 sur le site d'étude	98
Figure 48 : Composition colorée 5-4-1 après fusion superposée sur MNT, Daïet Chouiouia	101
Figure 49 : Classification non supervisée avec la méthode ISODATA d'image MSS 1972	103
Figure 50 : Classification non supervisée avec la méthode ISODATA d'image ETM mars 2001.....	103

Figure 51 : Résultat d'une classification supervisée sur l'image ETM de mars 2001.....	105
Figure 52 : Carte en niveau de gris calculée à partir de l'indice du sable vif (ISV).....	107
Figure 53 : Les étapes de la production des métriques et des cartes thématiques	109
Figure 54 : Rose du régime des vents efficaces (supérieurs à 6 m/s) sur la période 1980 – 2000.	113
Figure 55 : Rose directionnelle des vents efficaces mensuels sur la période 1980 - 2000, station de Djelfa	115
Figure 56 : Vent de sable sous forme de panaches soulevés par des rafales de vent.....	116
Figure 57 : Soulèvement de matière lors des rafales de vent entrecoupées par des périodes d'accalmies.	116
Figure 58 : Répartition mensuelle et annuelle de la fréquence des vents de sable constatée à Djelfa	117
Figure 59 : Exemple des mesures du vent de la journée du 30 août 2003	118
Figure 60 : Diagramme temporel des événements orageux, région de Djelfa de 1992 à 2010	121
Figure 61 : Inondations dans la ville de Djelfa suite au passage d'un orage le 08 septembre 2015	122
Figure 62 : Evolution annuelle de l'activité orageuse à Djelfa entre 1992 et 2010 (données : ONM)	122
Figure 63 : Carte d'humidité du sol après le passage d'un orage à l'Est de Djelfa	123
Figure 64 : Carte de début d'accumulation d'eau dans les daïas peu après le passage d'orage.....	124
Figure 65 : Diagramme de séquence de SPI-12 Mois doublé par la courbe de tendance.....	127
Figure 66 : Diagramme de séquence de SPI-6 Mois doublé par la courbe de tendance.....	129
Figure 67 : Diagramme de séquence de SPI-4 Mois doublé par la courbe de tendance.....	130
Figure 68 : Courbes des SPI-12 et SPI-6 mois et histogramme des différences entre SPI-6 – SPI-12.....	132
Figure 69 : Courbes des SPI-12 et SPI-4 mois et histogramme des différences entre (SPI-4 – SPI-12).	134
Figure 70 : Diagramme des précipitations mensuelles moyennes période 1975 - 2015	135
Figure 71 : Diagramme de rupture sur les séries SPI-12 Mois et test de significativité à 5%	137
Figure 72 : Diagramme de rupture sur les séries SPI-12 Mois et test de significativité à 13%	138
Figure 73 : Diagramme de rupture climatique sur les séries SPI-6 Mois.....	139
Figure 74 : Schéma de validation par des dimensions spatio-temporelles	141
Figure 75 : Tableau et diagramme du test de Pettitt sur SPI-12 Mois.....	142
Figure 76 : Tableau et diagramme du test de Pettitt sur les précipitations.....	143
Figure 77 : Production d'orge et de blé en Algérie, exprimée en millions de tonnes.	144
Figure 78 : Coefficient de corrélation (R) entre SPI et la production d'orge sur la série (1975 – 2014)	145
Figure 79 : Evolution du SPI annuel et courbe des moyennes mobiles sur une période d'un siècle 1914 – 2015	147
Figure 80 : Diagramme latitude/temps de la moyenne annuelle des anomalies de précipitations.....	149
Figure 81 : Catégorie des indices morphométriques en hydrologie (Delahaye, 2005)	152
Figure 82 : Courbes Hypsométriques des sous bassins versants endoréiques de Zahrez.....	154
Figure 83 : Carte de réseau hydrographique couplée avec les classes de pentes en vue planimétrique	155
Figure 84 : Carte de réseau hydrographique restituée sur les classes d'altitude, bassin de Daïet Chouiouia.....	156
Figure 85 : Au pied du Djebel Kenouir des chenaux.	157
Figure 86 : Cours d'eau occasionnel décape la faible couche du sol malgré la faible pente.	158
Figure 87 : Disparition complète de la couche mince du sol sur la bordure Sud de Daïet Chouiouia.....	159
Figure 88 : composition colorée (dite géologique RVB 12-11-2 résolution 10 mètres	160
Figure 89 : cartographie des bordures de Daïet Chouiouia	160
Figure 90 : Oued traverse la bordure nord de la daïa.	161
Figure 91 : Changements des bordures nord de Daïet Chouiouia sur une période de 60 ans	162
Figure 92 : Evolution de l'état de surface des bordures méridionales de Daïet Chouiouia	164
Figure 93 : Localisation des sites retenus pour l'examen diachronique de l'érosion hydrique	166
Figure 94 : Ravinement très actif sur des versants dégarnis de végétation.....	167
Figure 95 : Site 2, dynamique régressive d'érosion liée à l'écoulement de l'oued Mazouz	167
Figure 96 : Site 3, des ravins manifestent une forte activité d'érosion progressive.....	168
Figure 97 : Site 4, cônes d'épandage liés aux cours d'eau.....	169
Figure 98 : Echelle spatiale et temporelle pour étudier la dynamique végétale sur le site d'étude	172
Figure 99 : Carte d'activité végétale exprimée par l'indice SAVI en fausse couleur	174
Figure 100 : Carte d'activité végétale exprimée par l'indice SAVI en fausse couleur.....	175
Figure 101 : Carte de la dynamique de la couverture végétale entre les mois d'avril et juillet 2016.	176
Figure 102 : Carte de la dynamique de la couverture végétale entre année sèche et humide	178
Figure 103 : Carte des sites retenus pour l'analyse diachronique à long terme.....	180

Figure 104 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 1.....	181
Figure 105 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 2.....	183
Figure 106 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans du site 3 et 4.....	185
Figure 107 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 5.....	186
Figure 108 : Délimitation de la végétation sur les hauteurs du versant occidental de Djebel Tilla.....	187
Figure 109 : Délimitation de la végétation sur les hauteurs de Djebel Tlill.....	188
Figure 110 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 6.....	190
Figure 111 : Analyse diachronique sur une période de 60 ans site N° 7.....	192
Figure 112 : Organigramme de l'analyse spatio-temporelle de la dynamique d'ensablement.....	197
Figure 113 : Petites zones de voile sableux sur le plateau septentrional de Daïet Chouiouia.....	199
Figure 114 : Carte d'état de surface d'ensablement en octobre 1972.....	200
Figure 115 : Carte de l'état des surfaces d'ensablement en avril 1984.....	201
Figure 116 : Carte d'état de la surface d'ensablement en mai 1995.....	202
Figure 117 : Carte état de la surface d'ensablement en mars 2003.....	203
Figure 118 : Carte d'état de la surface d'ensablement en avril 2011.....	204
Figure 119 : Carte d'état de surface d'ensablement en avril 2016.....	205
Figure 120 : Tendances à l'ensablement entre 1972 et 2016.....	208
Figure 121 : Dynamique spatiale d'ensablement entre 1998 et 2010 extraite depuis les images satellitaires.....	211
Figure 122 : Évolution de la surface sableuse entre 1998 et 2010.....	212
Figure 123 : État de l'ensablement en mars 1998, Daïet Chouiouia.....	213
Figure 124 : État de l'ensablement en mars 2001, Daïet Chouiouia.....	214
Figure 125 : État de l'ensablement en mars 2003, Daïet Chouiouia.....	215
Figure 126 : Dynamique d'ensablement annuelle de 2000 à 2003 en période d'expansion.....	216
Figure 127 : Dynamique d'ensablement annuelle de 2003 à 2006 en période de régression.....	218
Figure 128 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine.....	221
Figure 129 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine (site 2).....	222
Figure 130 : Dynamique d'ensablement sur une échelle temporelle fine (site 3).....	223
Figure 131 : Courbes d'évolution des surfaces ensablées.....	227
Figure 132 : Diagramme de corrélation entre la variation de surface ensablée et la pluviométrie.....	228
Figure 133 : Apports annuels en surface ensablée et des précipitations exprimées par SPI12.....	229
Figure 134 : Lien entre le relief et l'ensablement dans la dépression de Daïet Chouiouia.....	233
Figure 135 : Vue en perspective (MNT) de la disposition du relief et son influence sur l'action éolienne.....	234
Figure 136 : Accumulation sableuse déposée par les cours d'eau au point d'inflexion de la pente.....	236
Figure 137 : Dépôt sableux sans forme particulière entreposé contre le versant de Rouissat el Mehara.....	237
Figure 138 : Champs des buttes de sable fixées par la végétation. Avec cet apport sédimentaire.....	238
Figure 139 : Butte de sable fixée par la végétation, située au nord de Rouissat el Mehara.....	238
Figure 140 : Sédimentation alternée (éolienne – hydrique – éolienne).....	239
Figure 141 : Oued ayant emporté la couche de sable (34°43'13"N - 3°46'24"E).....	240
Figure 142 : Chenaux d'eau rejoignant l'oued sur une épaisse couche de sable.....	240
Figure 143 : Processus de transfert et d'interaction des flux sédimentaires éoliens.....	242
Figure 144 : Processus de transfert et d'interaction des flux sédimentaires éoliens.....	243
Figure 145 : Boucle d'équilibre sédimentaire d'une dépression hydro-éolienne fermée.....	245
Figure 146 : Réinjection sédimentaire du plateau vers Daïet Chouiouia.....	246
Figure 147 : Sous l'effet de l'érosion hydrique, les dunes exhibent les indices de vestiges anthropiques.....	248
Figure 148 : Vestiges anthropiques piégés dans des buttes de sable.....	249
Figure 149 : Carte de localisation des sites de suivi d'ensablement.....	251
Figure 150 : Site pour le suivi d'ensablement Dar Chioukh.....	253
Figure 151 : Carte d'état de la surface d'ensablement en 1984.....	254
Figure 152 : Cartes d'états de la surface d'ensablement, site Dar Chioukh.....	255
Figure 153 : Cartes d'état de la surface d'ensablement, d'avril 2011.....	256
Figure 154 : Profil granulométrique et spectral du sable dans le Zahrez Gharbi.....	257
Figure 155 : Site de suivi d'ensablement Zahrez Gharbi.....	258
Figure 156 : Etat de la surface d'ensablement avril 1984.....	259

Figure 157 : Etat de la surface d'ensablement 1995	260
Figure 158 : Etat de la surface d'ensablement 2003	261
Figure 159 : Suivi temporel d'ensablement par des images à haute résolution.....	263
Figure 160 : Site pour le suivi de l'ensablement de Had Sahary	264
Figure 161 : Délimitation de la surface ensablée Had Sahary.....	265
Figure 162 : Surface ensablée sur l'image en composition colorée 5-4-1, site de Had Sahary, 2003	266
Figure 163 : Surface ensablée sur l'image en composition colorée 5-4-1, site de Had Sahary 2011	266
Figure 164 : Abandon du matériel par les cours d'eau (N° 1 et 2) et constitution du voile sableux (3).....	267
Figure 165 : Régression du matériel lié aux cours d'eau (N° 1 et 2) et disparition du voile sableux	268
Figure 166 : Disparition du produit sableux mobile, reboisement contre l'ensablement (4)	268
Figure 167 : L'évolution spatio-temporelle de la surface ensablée 1984, quatre sites région de Djelfa	269
Figure 168 : Reboisement pour la fixation du sable	271
Figure 169 : Site réhabilité à Mililiha, pendant les années de pluviométrie favorable..	274
Figure 170 : Projet de mise en défense et fixation du sable.	274
Figure 171 : Schéma conceptuel pour la réalisation d'un système de surveillance	276
Figure 172 : La matrice des points pour interroger l'API des prévisions météorologiques	277
Figure 173 : Application de restitution de flux de données récupérées sur les prévisions météorologiques	278
Figure 174 : Les écarts entre les données de précipitations annuelles ONM-OMM, station de Djelfa.....	279
Figure 175 : Les données météorologiques du 1 juillet 2002.	280
Figure 176 : Evolution de la réponse spectrale des zones ensablées sur une série temporelle.....	282
Figure 177 : Voiture et matériel agricole ensevelis par le sable lors des tempêtes (Mitchum, 2016)	316
Figure 178 : Campagne des Terres vierges au Kazakhstan.....	317
Figure 179 : Histogramme des fréquences et test de Shapiro sur les séries de SPI-12 et SPI-6.....	324
Figure 180 : Diagramme de fréquence doublé par le test de Shapiro sur la série SPI-4 Mois	324
Figure 181 : Correction des défauts de miroirs	319

Liste des tableaux

Tableau 1: Grille de sévérité du SPI	73
Tableau 2 : Caractéristiques des différents indices de végétation (Brun, 2004)	85
Tableau 3 : Résolutions radiométriques et spatiales des images Sentinel-2	91
Tableau 4 : les principales données utilisées dans ce travail	95
Tableau 5 : description des compositions colorées utilisées	99
Tableau 6: régime des vents calmes et efficaces, par catégorie de vitesse dans la région de Djelfa	113
Tableau 7 : Table de nomenclatures des observations des évènements de poussière et sable	118
Tableau 8 : fréquence (effectifs) et orientation des vents de sable sur le période 1989 – 2000	119
Tableau 9 : répartition d’orientation des vents de sable sur le période 1952 – 2015.....	119
Tableau 10: Classement de la sévérité de la sécheresse des années en fonction de SPI-12.	128
Tableau 11: Classement des années en fonction de la sévérité de la sécheresse de SPI-6.	130
Tableau 12 : Classement des années en fonction de la sévérité de la sécheresse de SPI-4.	131
Tableau 13 : descriptif statistique SPI-12 Mois	136
Tableau 14: Résultats statistiques du test de Pettitt SPI-12 Mois	137
Tableau 15: descriptif statistique SPI-6 Mois	138
Tableau 16: Résultats statistiques du test de Pettitt sur les séries SPI-6 Mois	138
Tableau 17 : Indice de Gravelius des sous bassins versants endoréiques de la région de Djelfa	153
Tableau 18 : classes des pentes avec les superficies occupées dans le bassin de Daïet Chouiouia	156
Tableau 19 : la matrice de seuillage d’images SAVI de la région d’étude	172
Tableau 20 : Répartition des classes de couverture végétale d’avril 2016	174
Tableau 21 : Les surfaces de couverture végétale juillet 2016	175
Tableau 22: Résultats surfaciques de la dynamique végétale saisonnière avril – juillet	177
Tableau 23: Résultats surfaciques de la dynamique végétale interannuelle 2015-2017	178
Tableau 24 : série d’images utilisée pour le suivi annuel de l’ensablement	209
Tableau 25 : l’indice de Kappa calculé sur la série temporelle	211
Tableau 26 : Évolution temporelle de la surface ensablée sur les sites de suivi de la région de Djelfa	269

Table des matières

Liste des sigles et acronymes	
Sommaire	3
Introduction générale.....	6
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET SCIENTIFIQUE	11
Chapitre 1 : Régions steppiques marquées par une forte dynamique	12
1.1. Introduction	12
1.2. Entités du paysage de l'Algérie steppique à Djelfa	13
1.3. Histoire environnementale	15
1.3.1. Néolithique	15
1.3.2. Epoque romaine	16
1.3.3. L'avènement de l'islam	17
1.3.4. Epoque Ottomane	19
1.3.5. Période française	19
1.4. Un climat à forte variabilité dans l'espace et dans le temps	21
1.4.1. Dynamique climatique du Soltanien à notre ère	21
1.4.2. Climat actuel marqué par une forte variabilité	23
1.4.2.1. L'origine des précipitations.....	23
1.4.2.2. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au niveau régional	26
1.4.2.3. Les températures	28
1.5. Hydrologie endoréique	29
1.6. Dynamique du système écologique	31
1.6.1. Une exploitation intensive des ressources végétales : l'exemple de l'alfa	32
1.6.2. Déclin des forêts et espoir suscité par le Barrage Vert	33
1.7. Transformation du mode d'élevage	40
1.7.1. Déclin du nomadisme et mutation vers l'agro-pastoralisme.....	40
1.7.2. Mutation de la complémentarité d'élevage	41
1.8. Agriculture extensive soutenue par une mécanisation effrénée	43
1.8.1. L'agriculture traditionnelle	43
1.8.2. L'agriculture contemporaine	44
1.9. Entre héritage et mutation	51
1.10. Conclusion	54
Chapitre 2 : Evolution des méthodes de diagnostic	55
2.1. La notion d'irréversibilité de la rupture de stabilité.....	55
2.2. La dégradation : un concept en évolution objet d'une attention internationale	56
2.3. Désertification un concept discuté.....	58
2.4. L'évaluation de la dégradation des zones steppiques.....	60
2.5. Des indicateurs biologiques pour caractériser le surpâturage	61
2.6. Le matériel éolien risque et ressource	63
2.7. Discussion des méthodes.....	65
Chapitre 3 : Site d'étude, outils et données.....	68
3.1. Le site d'étude	68
3.2. Caractériser la sécheresse	72
3.2.1. Définition de l'indicateur SPI	72
3.2.2. Généralisation d'utilisation du SPI.....	73
3.2.3. Les avantages de l'indicateur SPI.....	74
3.2.4. Recherche des ruptures climatiques.....	75
3.3. Restitution du paysage semi-aride	76

3.3.1. La télédétection outil de prédilection pour le suivi des espaces steppiques.....	76
3.3.2. Le profil spectral des surfaces semi-arides	78
3.3.3. Les caractéristiques spectrales du produit éolien	80
3.3.4. Cartographie de l'ensablement par imagerie satellitaire.....	82
3.3.5. Les indices radiométriques d'analyse de la végétation.....	85
3.4. Les données	87
3.4.1. Approche conceptuelle des données	87
3.4.2. Les données climatiques.....	88
3.4.1. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT).....	90
3.4.2. Les données satellitaires à moyenne et à haute résolution	90
3.4.2.1. Outil de gestion des images satellitaires et des métadonnées	93
3.4.3. Les photographies aériennes.....	94
3.4.4. Récapitulatif des données utilisées	95
3.5. Synthèse.....	96
Chapitre 4 : Traitement des images aériennes et satellitaires.....	97
4.1. Traitement des photographies aériennes.....	97
4.2. Prétraitement des images satellitaires.....	98
4.2.1. Composition colorée	99
4.2.2. Amélioration du contenu radiométrique et spatial des images	100
4.3. Traitement de l'imagerie pour l'étude des formes semi-arides	101
4.3.1. La classification des images satellitaires	102
4.3.1.1. Classification non supervisée.....	102
4.3.1.2. Classification supervisée des faciès semi-arides	104
4.3.2. Indicateur de délimitation du sable.....	106
4.4. Détection des changements et des dynamiques.....	108
4.5. Validation des changements détectés	109
DEUXIEME PARTIE : LES PROCESSUS DES HAUTES STEPPES	111
Chapitre 5 : Dynamique éolienne	112
5.1. Caractéristiques annuelles.....	112
5.2. Analyse mensuelle des directions des vents.....	114
5.3. Intensité des événements des vents de sable	117
5.4. L'analyse directionnelle du vent de sable	118
Chapitre 6 : Variabilités spatio-temporelles des précipitations	120
6.1. Évolution des perturbations orageuses	120
6.2. Variabilité temporelle des précipitations.....	125
6.2.1. Le choix des temporalités de SPI	125
6.2.1.1. Les critères de temporalité.....	125
6.2.1.2. Les échelles de temporalité	126
6.3. Analyse par temporalité	127
6.3.1. Indice SPI sur 12 mois : sécheresses annuelles	127
6.3.2. Indice SPI sur 6 mois : sécheresse agricole	129
6.3.3. Indice SPI sur 4 mois : sécheresse printanière.....	130
6.4. Analyse par croisement des temporalités.....	131
6.4.1. Comparaison entre SPI-6 et SPI-12 mois.....	132
6.4.2. Comparaison du SPI-4 mois sur le SPI-12 mois.....	133
6.5. Détection des ruptures climatiques	136
6.5.1. Rupture sur des séries pluviométriques annuelles	136
6.5.2. Ruptures sur des séries pluviométriques semestrielles	138
6.6. Le constat de la sécheresse	140
6.6.1. Validation par comparaison avec une région voisine.....	141

6.6.2. Validation par l'approche agro-climatique	143
6.6.3. Validation sur une échelle historique longue	147
6.6.4. Validation à l'échelle du globe.....	148
6.7. Synthèse.....	150
Chapitre 7 : Paramètres hydromorphologiques	151
7.1. Les indices morphologiques - morphométriques retenus	151
7.1.1. Forme des bassins	153
7.1.2. Les volumes	154
7.1.3. Les pentes	155
7.1.4. La densité de drainage	156
7.2. Ruissellement et ravinement.....	157
7.3. Bordures des daïas	158
7.4. Analyse diachronique d'érosion hydrique	166
7.5. Synthèse.....	170
Chapitre 8 : La dynamique du couvert végétal	171
8.1. La valeur indicatrice du changement et de dynamique végétale	173
8.1.1. Analyse des résultats du traitement d'image	173
8.2. Évaluation de la dynamique de la couverture végétale intra-annuelle.....	176
8.3. Évaluation de la dynamique végétale : année sèche-année pluvieuse	177
8.4. Caractéristiques de la dynamique végétale à long terme.....	180
8.5. Synthèse.....	193
TROISIEME PARTIE : DYNAMIQUE D'ENSABLEMENT ET PERSPECTIVES D'ACTION	195
Introduction	196
Chapitre 9 : Analyse diachronique à long terme.....	198
9.1. Le choix des images et des dates.....	198
9.2. L'ensablement dans les années 50.....	199
9.3. L'ensablement dans les années 70.....	200
9.4. L'ensablement dans les années 80.....	201
9.5. L'ensablement dans les années 90.....	202
9.6. L'ensablement en 2003.....	203
9.7. L'ensablement en 2011.....	204
9.8. L'ensablement en 2016.....	205
9.9. Analyse de la dynamique temporelle d'ensablement.....	206
Chapitre 10 : Suivi - monitoring de la dynamique d'ensablement	209
10.1. Suivi- monitoring d'ensablement sur une temporalité annuelle.....	209
10.1.1. Caractéristiques spatiales de la dynamique d'ensablement	213
10.1.1.1. La phase d'expansion de 2000 à 2003	213
10.1.1.2. La phase de régression de 2003 à 2006.....	217
10.2. Suivi- monitoring d'ensablement sur une échelle spatio-temporelle fine.....	219
Chapitre 11 : Les facteurs de la dynamique d'ensablement	226
11.1. Le facteur climatique	226
11.1.1. La variable indicatrice du changement temporel de la surface ensablée.....	226
11.1.2. Lien entre l'évolution d'ensablement et les fluctuations climatiques	227
11.1.3. Le diagramme temporel combiné sable – précipitations	229
11.2. Le facteur topographique - relief	231
Chapitre 12 : Interaction entre l'action éolienne et l'action hydrique	235
12.1. Redistribution du matériel.....	235
12.2. Remodelage des formes sableuses	236
12.3. Réinjection de matériels sédimentaires.....	239

12.4. Quelques indices d'ancienneté des formes sableuses	247
12.4.1. Examen du marquage de l'activité éolienne.....	247
12.4.2. Examen de vestiges sédimentaires	247
12.5. Synthèse.....	250
Chapitre 13 : Analyse spatio-temporelle régionale de l'ensablement	251
13.1. La dynamique d'ensablement dans le site de Dar Chioukh	252
13.2. La dynamique d'ensablement dans le site du Zahrez Gharbi	256
13.3. La dynamique d'ensablement dans le site de Had Sahary.....	264
13.4. L'analyse spatio-temporelle combinée des quatre sites.....	269
Chapitre 14 : Prospective de la désertification	273
14.1. Prémunir la dégradation par la restauration	273
14.2. Prémices d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel	275
14.2.1. Système basé sur les données de prévisions météorologiques	276
14.2.2. Système basé sur les données météorologiques quotidiennes	279
14.2.3. Identifier la réactivation d'ensablement par la signature spectrale	281
14.3. Synthèse.....	283
Conclusion générale	284
Bibliographie	291
Liste des figures	306
Liste des tableaux	310
Table des matières	311
Annexe	315

Annexe

Annexe 1. Dust Bowl aux Etats-Unis : la période du « Dust Bowl » des années 1930, fut celle d'une extrême érosion des sols dans les plaines américaines causant une grande catastrophe environnementale. Elle a été provoquée par une sévère sécheresse et l'utilisation intensive du sol jusque-là non labouré (Hornbeck, 2012). Des épisodes de vent se succédèrent, balayant la terre arable dans de grandes tempêtes de poussière de 1930 à 1939. A titre d'exemple : la tempête de sable du 9 mai 1934 partie du Montana et du Wyoming, emporta 318 millions de tonnes de sol. La perte de sol sur l'année 1938 est évaluée à un milliard de tonnes. En mars 1939, une tempête de sable balaya l'Oklahoma et transporta une quantité de sol suffisante pour recouvrir une surface de 2,5 millions d'hectares d'une épaisseur de 30 cm de sable (Guillet, 2007).



Figure 177 : Voiture et matériel agricole ensevelis par le sable lors des tempêtes (Mitchum, 2016)¹⁷

Les préjudices de cette catastrophe environnementale furent importants : des dunes de sable (500 mètres de longueur et 7 mètres de hauteur) envahirent les champs ; l'agriculture fut anéantie sur 30 millions d'hectares abandonnés. Cela provoqua une migration et un exode massif de 3.5 millions d'habitants. Dans les années 1940, on évaluait les pertes dans les régions des Plaines à 75% de la terre végétale. (Guillet, 2007 ; Cook *et al.*, 2009 ; Hornbeck, 2012).

Annexe 2. Terres vierges au Kazakhstan : jusqu'en 1950, ce fut essentiellement une terre d'élevage et de steppes. La production commercialisée en céréales était en 1940 de 1,6 millions de tonnes avec un rendement très bas de moins de 5 quintaux par hectare. Une bonne production fut enregistrée en 1950 avec 3,3 millions de tonnes et un meilleur rendement de 7,9 quintaux (George, 1968). Le projet "Terres vierges" du Kazakhstan fut alors lancé en 1954. Cette année, 300 000 volontaires du Komsomol partent pour les « Terres vierges » (Taubman, 2003; Timofeïtchev, 2017). Puis, dans les années qui suivent, 40 millions d'ha des steppes du nord du Kazakhstan ont été défrichés pour cultiver des céréales du printemps (Lahmar, 2003).

¹⁷ <https://news.uchicago.edu/article/2016/12/19/dust-bowl-would-devastate-todays-crops-study-finds> (Consulté en 2016)

« Sans tenir compte des caractéristiques du sol, le plan est aussitôt mis en œuvre, sans aucune étude sérieuse » (Marie, 2010). D'immenses fermes d'État fortement mécanisées ont vu le jour pour produire du blé. Après plusieurs années de bonnes récoltes, les rendements ont chuté, passant de 20 à 12 quintaux par hectare la meilleure année (Lahmar, 2003).



*Figure 178 : Campagne des Terres vierges au Kazakhstan
Source : Nikolay Zhiganov/TASS d'après Timofeïtchev (2017)*

Soumise aux aléas des incertitudes climatiques, la production doit affronter des variations de précipitations de grande amplitude. Le record de la production est atteint en 1964 avec 18,1 millions de tonnes, mais il est entouré par des années médiocres. En 1963 la récolte n'est que de 5 millions de tonnes et celle de 1965 de 5,8 millions avec un rendement de 3,1 quintaux par hectare contre près de 10 l'année précédente. Mais après des débuts encourageants, écrit Timofeïtchev (2017) les choses sont allées de mal en pis. Dans des conditions pareilles, il est presque impossible de tenir l'équilibre financier des coopératives. Cette grande opération « d'agriculture de techniciens immigrés » (George, 1968) a causé des destructions écologiques. Les sols steppiques ont commencé à se dégrader sous l'effet de l'érosion causée par les vents violents du nord du Kazakhstan. Des tempêtes de poussières se sont alors développées en détruisant localement toute la couche arable, réduisant à néant une grande partie de l'effort en emportant la couche fertile de territoires immenses (Lahmar, 2003).

Annexe 03 : Principales caractéristiques des satellites Landsat

Satellites	Landsat (MSS)	Landsat (TM)	Landsat 7 (ETM+)	Landsat 8 (LDCM)
Date de lancement	1972	1984	15-avr-99	11 février 2013
Altitude	705 km	705 km	705 km	705 km
Capteurs	MSS	TM	ETM+	LDCM
Bandes spectrales	MSS-1 [0.5-0.6 µm] MSS-2 [0.6-0.7µm] MSS-3 [0.7-0.8µm] MSS-4 [0.8-0.11µm]	1.[0.45-0.52 µm] 2. [0.52-0.60 µm] 3.[0.63-0.69 µm] 4.[0.76-0.90 µm] 5.[1.55-1.75 µm] 6.[2.8-2.35 µm]	1.[0.45-0.52 µm] 2.[0.52-0.60 µm] 3.[0.63-0.69 µm] 4.[0.76-0.90 µm] 5.[1.55-1.75 µm] 6.[10.4-12.5 µm] 7.[2.09-2.35 µm] Pan [0.52-0.90 µm]	1.[0.433-0.453 µm] - Aérosols 2.[0.450-0.515 µm] - Bleu 3.[0.525-0.600 µm] - Vert 4.[0.630-0.680 µm] - Rouge 5.[0.845-0.885 µm] - Infrarouge proche 6.[1.560-1.660 µm] - Infrarouge moyen 1 7.[2.100-2.300 µm] - Infrarouge moyen 2 8.[0.500-0.680 µm] - Panchromatique 9.[1.360-1.390 µm] - Cirrus 10.[10.30-11.30 µm] - Infrarouge moyen 11.[11.50-12.50 µm] - Infrarouge moyen
Résolution spatiale	80x80 m	30 x30 m Bande 6 : 120 x 120 m	30 x 30 m Bande6 : 120x120m Panchro : 15x15 m	31 x 30 m Bande 10 et 11 : 100 x 100 m Panchro : 15 x 15 m
Dimension de la scène	185 x 172 km	185 x 172 km	185 x 172 km	185 x 180 km
Fréquence de passage	16 jours	16 jours	16 jours	16 jours

Annexe 04 : Correction des défauts des miroirs de LANDSAT 7

Un instrument appartenant au Landsat 7, le Scan Line Corrector (SLC), a cessé de fonctionner de façon inattendue le 31 mai 2003. Cet incident a entraîné des lacunes systématiques (des bandes noires) dans chaque image Landsat collectée depuis cette date. En effet, la scène ne contient désormais que 78% de contenu exploitable (Figure 179A). Diverses méthodes et solutions pour combler ces lacunes sont étudiées, proposées et testées par des chercheurs (Bolorani *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2011). Elles s'articulent autour de deux méthodes bien documentées :

- La première méthode coupe habituellement les données des images Landsat antérieures à 2003 et transfère ces informations (après la correspondance d'histogrammes) dans l'image à corriger.
- La deuxième (souvent plus efficace) utilise une approche de calcul qui synthétise les pixels d'intervalle en combinant des informations du canal lui-même, et des informations issues d'autres canaux de la même scène.

Dans ce travail, nous avons utilisé une extension du programme ENVI développée par Scaramuzza *et al.* (2004), disponible et maintenue par CEO (Center for Earth Observation, 2015) de l'université de Yale aux Etats Unis (<http://yceo.yale.edu/how-fill-gaps-landsat-etm-images>). Cette routine peut être utilisée pour combler les lacunes d'une scène avec des données provenant d'une autre scène Landsat. Une transformation linéaire est appliquée à l'image à corriger pour l'ajuster en fonction de l'écart type et des valeurs moyennes de chaque bande, de chaque scène.

L'efficacité de ces algorithmes est bien visible, le remplissage des intervalles peut produire des corrections remarquables, notamment la zone proche du centre où l'image est peu impactée par les lacunes. Dans l'exemple des images ci-dessous du 23 avril 2011, la première image source du site comporte des lacunes et la seconde, la même image après le « remplissage d'intervalle ».

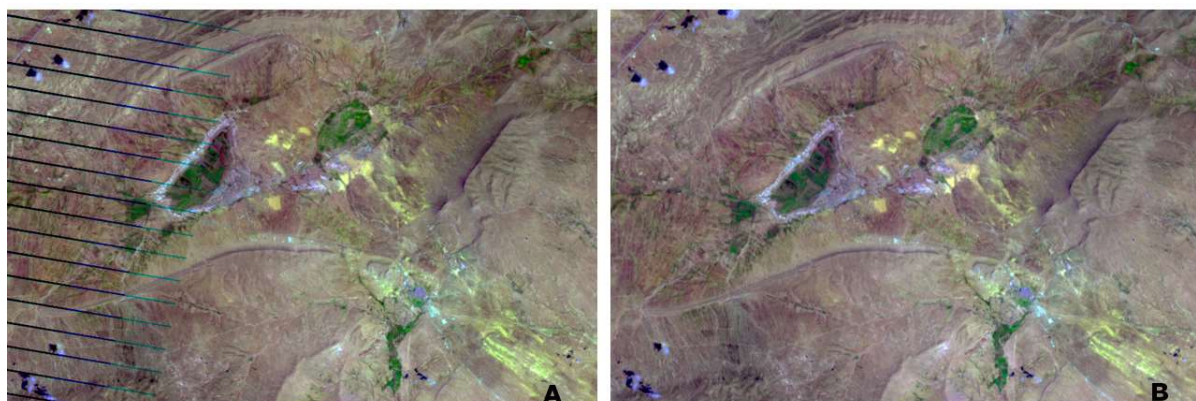
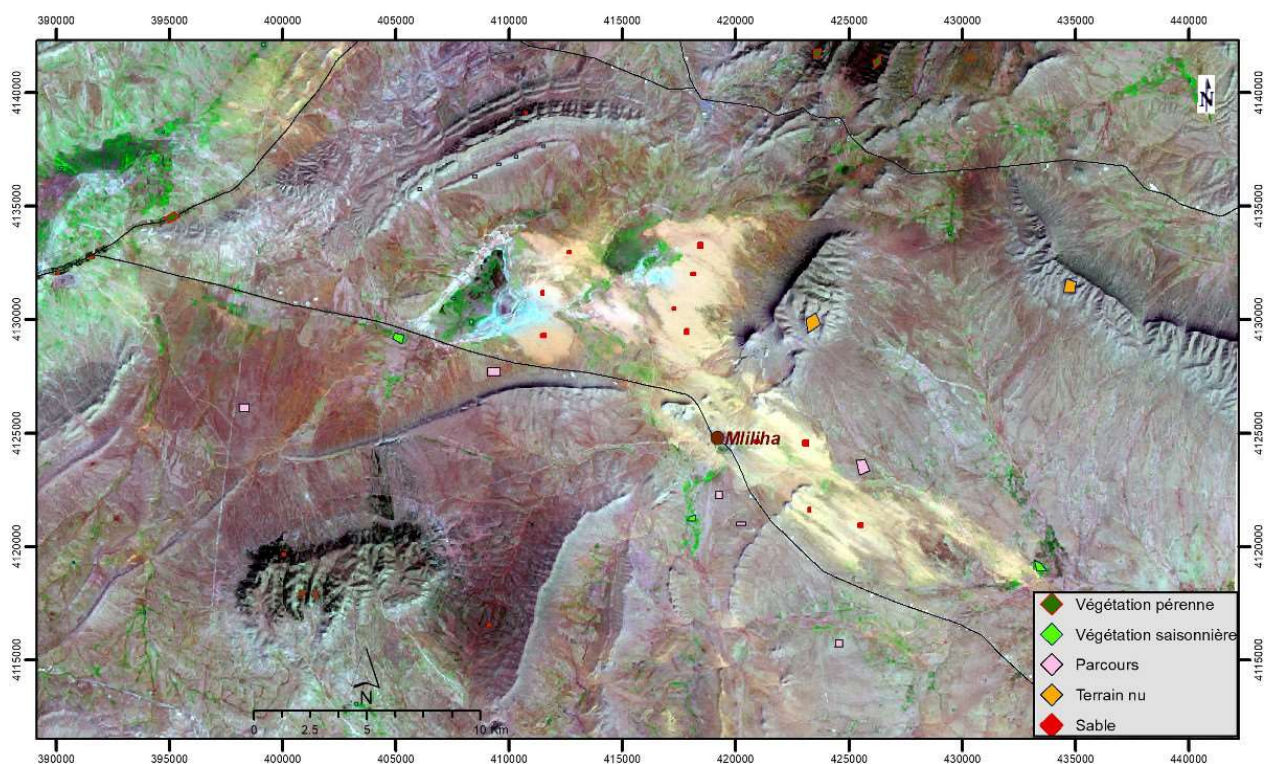
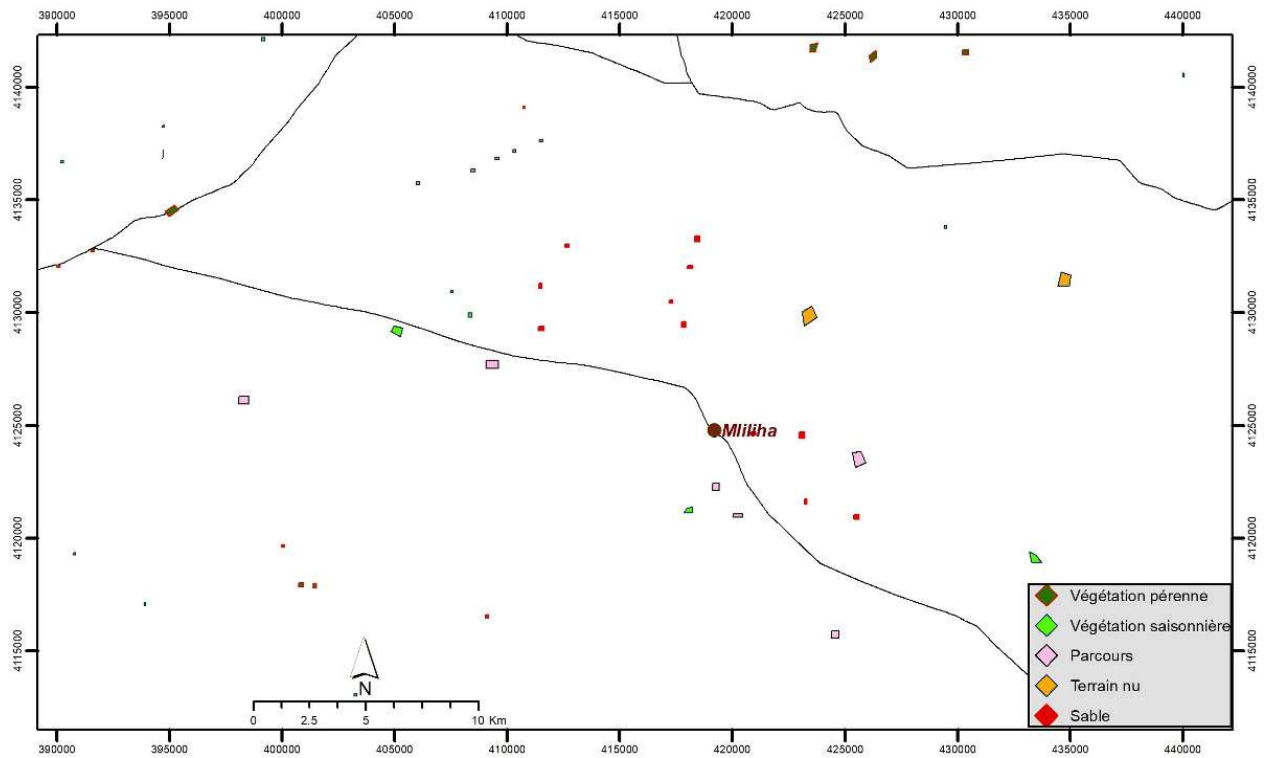


Figure 179 : Correction des défauts de miroirs Landsat 7. (A) : les bandes noires altèrent la qualité de l'image. (B) : Résultat du traitement de correction sur l'image précédente. (Image Landsat ETM+ du 23 avril 2011, Composition colorée des bandes 5,4,1)

Annexe 05 : parcelles d'apprentissage pour la classification supervisée de l'image Landsat ETM de mars 2001 (image du haut sans fond et images du bas sur composition colorée 541)



Annexe 06 : Incidents climatiques : Il s'agit de recenser les incidents climatiques constatés dans la région de Djelfa, principalement ceux qui ont causé des décès ou des dégâts majeurs. Source articles de journaux et presse.

Date d'évènement	Lieu	Durée	Type	Dégâts signalés
27/08/2008	Ville de Djelfa	17h00 18h00	Pluies et grêlons	Inondations et stagnation des eaux dans la ville, réseau de canalisation bouché
01/10/2009	Ain ouessara, Had Shari, Sidi-Ildjal, Birine	Quelques minutes	Pluies et grêlons	3 personnes décédées destruction de maisons et 600 réfugiés
17/08/2015	Hioumi, Tadmaïte	20 minutes	Averses orageuses	Destruction de maisons et inondations suite au débordement d'un oued. 1 décès et 6 blessés, la commune de Beni Yakoub est isolée suite à la destruction d'un pont
22/08/2015	Djelfa	30 minutes	Vent de sable 70km/h pluies et grêlons	Débordement de l'oued Ghdir et Oued Djedila à Dar-Chioukh, érosion des cimetières
29/08/2015	Dar Chioukh	17h00 17h30	Pluies et grêlons	2 décès + 1 disparu En plus, deux familles isolées à Akilya à 7 km de Dar Chioukh Destruction de plusieurs maisons + la mort de 100 Ovins
08/09/2015	L'ensemble du territoire	00h- 4h00		Evacuation de dizaines de familles Coupure des routes pour la circulation. Des immeubles inondés : Habitations, collège Lakhnech Mustapha et l'école Zouhour
21/10/2015	Djelfa		Pluies	Routes coupées, 5 décès dont 3 à bord d'un taxi renversé dans l'Oued, près de Dar Chioukh, une autre personne foudroyée
29/09/2017	Moudjbara (Djelfa)	En journée	Pluies	Une femme et ses deux enfants sont morts noyés, vendredi soir, emportés par les eaux d'un oued dans la commune de Medjbara (25 km, au sud de Djelfa) »

Annexe 07 : les points de calage et les résidus pour le géoréférencement des photos aériennes

La photo aérienne N°175 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	2.909025	6.203096	390043.773167	4131094.121123	-0.225798	4.96065	4.96579
2	2.113394	7.010342	389689.759959	4131513.221961	-1.5468	-1.34298	2.04846
3	1.044460	8.783694	389246.052821	4132422.993572	0.13392	0.272516	0.303644
4	4.496468	8.743951	390919.942627	4132266.836176	0.746498	-2.38148	2.49574
5	8.993085	5.345470	392961.127751	4130432.970147	0.564537	-0.75433	0.942187
6	8.080744	2.742409	392410.793317	4129198.686429	0.436539	1.64127	1.69833
7	6.742071	1.199706	391695.093969	4128494.893355	-2.00466	-0.229061	2.01771
8	2.817042	1.440425	389804.509980	4128763.049099	1.89576	-2.16659	2.87889

La photo aérienne N°192 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	5.404024	3.784912	416951.216129	4129789.757506	6.57252	-8.29681	10.5847
2	8.694638	8.855000	418731.386316	4132144.691161	1.79294	-0.369267	1.83057
3	6.832698	4.428139	417661.687639	4130069.156414	-7.31133	5.08668	8.90673
4	1.091813	7.947116	414955.509641	4131945.120512	-1.05413	0.17168	1.06802
5	3.845274	3.164485	416156.980684	4129550.548301	0	3.40771	3.40771

La photo aérienne N°194 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	8.651480	8.910000	421553.300467	4132386.889779	3.92783	3.22218	5.08039
2	0.935164	7.375263	417915.272357	4131659.284157	-9.64713	-11.6575	15.1316
3	0.565691	4.035789	417710.219864	4130104.853965	13.0778	16.0375	20.6937
4	6.534112	5.073158	420494.965017	4130567.875724	-3.13535	-1.25645	3.37773
5	2.810954	0.170526	418675.950962	4128246.152331	-4.2232	-6.34569	7.62255

La photo aérienne N°271 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	5.467138	8.554813	398237.461776	4136243.411771	0.414552	-10.5711	10.5792
2	1.514770	6.388887	396353.095507	4135125.809535	-0.191473	4.88257	4.88632
3	2.647724	0.463982	397045.114599	4132207.846408	0.26408	-6.73404	6.73921
4	5.492227	5.020219	398330.686666	4134522.056480	-0.487159	12.4225	12.4321

La photo aérienne N°273 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	1.534692	3.584004	393120.032104	4133833.868313	-12.8061	-17.3419	21.5578
2	4.139525	-4.315434	394397.972160	4134251.910815	1.85411	14.7829	14.8988
3	3.572834	1.603150	394153.893547	4132909.147713	12.362	2.81579	12.6786
4	4.339780	6.537509	394475.362940	4135338.027571	-0.700716	13.5382	13.5563
5	7.149652	5.537928	395876.334492	4134857.807861	23.3698	-9.51916	25.2341
6	8.149574	4.433789	396324.804139	4134349.806845	-24.079	10.6613	26.3337
7	8.182218	5.972684	396352.585445	4135076.089547	0	-14.9372	14.9372

La photo aérienne N°275 (mission AV53 du 2 février 1957, Service historique de la défense)

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	2.840497	8.502282	390489.266409	4136269.911753	-0.353217	0.285997	0.454485
2	8.283538	8.403497	393067.259862	4136329.981504	2.61574	0.0712304	2.61671
3	8.767140	6.361524	393301.286041	4135355.595496	-2.74784	0.744889	2.84702
4	7.459136	6.876451	392682.159803	4135577.845941	-0.514319	0.629144	0.812617
5	7.125945	5.743641	392531.347001	4135022.219830	0.36081	-2.14469	2.17483
6	3.310609	2.551833	390742.230923	4133409.316604	-0.783544	-0.297758	0.838213
7	5.122236	1.382248	391607.420154	4132882.265550	1.42237	0.711187	1.59026

L'image google haute résolution 2017

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	3975.102217	-329.226675	410333.334356	4138774.847134	100.566	4.19366	100.653
2	3383.949841	-123.437489	409897.193449	4138969.552896	78.9725	20.2007	81.5152
3	2570.448270	-916.112593	409228.379157	4138352.335631	3.9289	-27.8985	28.1738
4	2428.394828	-185.163850	409157.311554	4138950.082320	17.7179	10.6339	20.6641
5	1181.531363	-279.298281	408199.359205	4138917.955869	-54.428	1.72598	54.4554
6	51.745877	-1471.894006	407450.165520	4138021.913841	22.9896	-34.4351	41.4041
7	63.238924	-177.948187	407339.840863	4139049.509222	-123.504	13.3664	124.225
8	865.213563	-1835.361483	408030.158005	4137739.797932	34.2735	-9.82696	35.6545
9	246.230052	-2347.692815	407639.293504	4137418.280359	93.2354	32.9002	98.8699
10	4213.946294	-1139.994322	410389.381088	4138120.468843	-4.87985	-26.7696	27.2108
11	3814.742724	-1503.330754	410063.146897	4137869.047756	-30.5331	-18.3408	35.6182
12	4497.577567	-1922.709929	410482.693117	4137566.112880	-85.893	22.7659	88.8588
13	3529.942369	-1972.543122	409819.448446	4137554.402982	-62.2056	11.4841	63.2568

Annexe 8 : Exemple de traitement de séparabilité : faite sur le fichier d'apprentissage lors de la classification supervisée :

VEGETATION PERENNE [Yellow] 150 points and PARCOURS [Cyan] 446 points - 1.87423763
 VEGETATION PERENNE [Yellow] 150 points and VEGETATION SAISONNIERE [Blue] 97 points - 1.88792020
 PARCOURS [Cyan] 446 points and TERRAIN NU [Magenta] 67 points - 1.97386327
 PARCOURS [Cyan] 446 points and VEGETATION SAISONNIERE [Blue] 97 points - 1.99784350
 SABLE [Red] 215 points and TERRAIN NU [Magenta] 67 points - 1.99804006
 PARCOURS [Cyan] 446 points and SABLE [Red] 215 points - 1.99829068
 VEGETATION PERENNE [Yellow] 150 points and TERRAIN NU [Magenta] 67 points - 1.99945875
 VEGETATION PERENNE [Yellow] 150 points and SABLE [Red] 215 points - 1.99978637
 VEGETATION SAISONNIERE [Blue] 97 points and TERRAIN NU [Magenta] 67 points - 1.99999989
 SABLE [Red] 215 points and VEGETATION SAISONNIERE [Blue] 97 points - 2.00000000

Annexe 9 : Indice d'humidité : Nous avons utilisé l'Indice d'humidité (INH) du sol pour démontrer le caractère orageux des pluies

$$INH = \frac{(MIR - V)}{(MIR + V)}$$

Sachant que le **MIR** est le Moyen Infrarouge et le **V** la bande Verte.

Annexe 10 : Les résultats de test de normalité

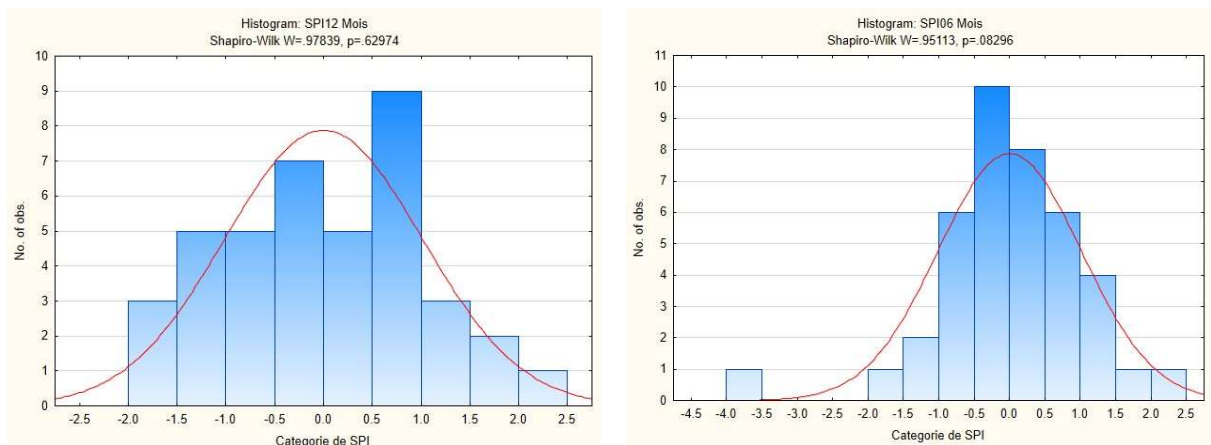


Figure 180 : Histogramme des fréquences et test de Shapiro sur les séries de SPI-12 et SPI-6

La statistique W sur le SPI-4 donne le $W_{SPI-4} < W_{crit}$, il ne respecte pas l'hypothèse de normalité, donc la normalité est rejetée avec un risque de 5%. L'analyse graphique du diagramme ci-dessous l'approuve. D'un côté, on constate la présence d'une perturbation par une valeur extrême (-3.5) qui traduit l'étalement du graphique sur le côté gauche. De l'autre côté, exprime une forte concentration dépassant la normale théorique attendue. Cette intensité est autour de deux tranches de catégories (0-0.5) et (0.5-1.0).

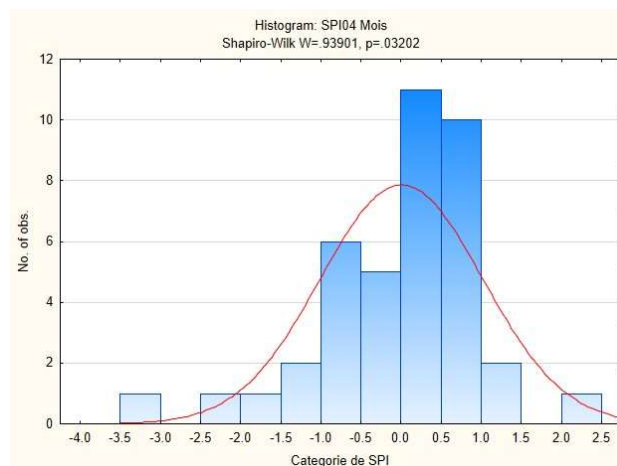


Figure 181 : Diagramme de fréquence doublé par le test de Shapiro sur la série SPI-4 Mois

Ces tests nous assurent que la distribution des données SPI-12 et SPI-6 suivent une loi normale. Donc, les tests de détection des ruptures peuvent être appliqués.

Annexe 11 : Confusion Matrix

[Landsat TM 05-1995]

Overall Accuracy = (3637/3673) 99.0199%
Kappa Coefficient = 0.9530

Class	Ground Truth (Pixels)		Total
	Sable (Points)	Autres (Point)	
Unclassified	0	0	0
Sable (Points)	416	26	442
Autres (Point)	10	3221	3231
Total	426	3247	3673

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	Sable (Points)	Autres (Point)	
Unclassified	0.00	0.00	0.00
Sable (Points)	97.65	0.80	12.03
Autres (Point)	2.35	99.20	87.97
Total	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
	Sable (Points)	5.88	2.35	26/442
Autres (Point)	0.31	0.80	10/3231	26/3247

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
	Sable (Points)	97.65	94.12	416/426
Autres (Point)	99.20	99.69	3221/3247	3221/3231

[Landsat ETM 04-2006]

Overall Accuracy = (1699/1726) 98.4357%
Kappa Coefficient = 0.9242

Class	Ground Truth (Pixels)		Total
	Sable	Autre	
Unclassified	0	0	0
Sable	188	0	188
Autre	27	1511	1538
Total	215	1511	1726

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	Sable	Autre	
Unclassified	0.00	0.00	0.00
Sable	87.44	0.00	10.89
Autre	12.56	100.00	89.11
Total	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
	Sable	0.00	12.56	0/188
Autre	1.76	0.00	27/1538	0/1511

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
	Sable	87.44	100.00	188/215
Autre	100.00	98.24	1511/1511	1511/1538