

**Faculté des bioingénieurs**

# **Analyse de la trajectoire de la dégradation des terres de la palmeraie de Skoura au Maroc.**

Suivi temporel et cartographie de la superficie des  
terres dégradées.

Autrice : Charlotte VINGRE

Promoteurs : Pr. Pierre DEFOURNY  
Pr. Farid EL WAHIDI

Lecteurs : Pr. Charles BIELDERS  
Pr. Hassan IBOUH

Année académique 2023-2024

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement



## Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier mes promoteurs, Pierre Defourny et Farid El Wahidi, de m'avoir donné l'occasion de réaliser ce mémoire. Un grand merci au Pr Defourny pour ses conseils, son écoute attentive et sa bienveillance tout au long de cette période. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Farid pour sa disponibilité, ses relectures et son accueil chaleureux lors de mon séjour au Maroc.

Ensuite, je tiens à souligner l'importance de l'encadrement de Thibault Collet, qui a fait preuve de disponibilité, de patience, de soutien, de pertinence et de conseils précieux lors de la phase finale de ce mémoire.

Un sincère remerciement également à mes lecteurs, Charles Bielders et Hassan Ibouh, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et à l'évaluation de ce mémoire. Je souhaite également remercier particulièrement Hassan pour ses conseils, sa sympathie et sa disponibilité lors de mon séjour à Marrakech.

Je voudrais aussi adresser un immense merci à Fleury, mon binôme lors de ce séjour au Maroc, avec qui j'ai partagé des moments à la fois difficiles et magnifiques. Un grand merci également à Mamadou et à tous les doctorants du laboratoire pour leur accueil, leurs attentions, leur disponibilité et leurs cours de cuisine marocaine.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes-ressources sur place à Marrakech et Ouarzazate qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce séjour. Un merci particulier à l'ORMVAO, à Elhamidi, ainsi que toutes les personnes qui se sont rendues disponibles pour les enquêtes.

Un grand merci au groupe de soutien du mémoire, dont la présence a été un véritable moteur ces dernières semaines, apportant motivation, bienveillance et réconfort.

Enfin, je souhaite remercier du fond du cœur tous mes proches pour leur soutien et leur présence lors des (nombreux) moments plus difficiles de ce mémoire. Un merci spécial à ma famille, à Patrice et tout particulièrement à Evan et à ma maman. Un énorme merci à la TeamRoquette ainsi qu'à toutes les nouvelles amitiés qui ont émergé au cours de mes études. Enfin, merci du fond du cœur à Isabeau Goetz, sans qui ces deux dernières années d'études n'auraient pas eu la même saveur.

## Avant-propos

Pendant toute la réalisation de ce mémoire, divers outils ont été mis à contribution pour faciliter la formulation de texte, la correction orthographique, la traduction de documents, et bien plus encore.

Parmi ceux-ci, l'application de traduction DeepL s'est révélée particulièrement précieuse lors de la traduction de revues et d'articles scientifiques durant l'élaboration de la synthèse bibliographique du travail. Parallèlement, l'intelligence artificielle ChatGPT a été utilisée dans ce travail, mais s'est limitée à la reformulation de textes et de phrases, sans générer de contenu original.

## Résumé

Les projections climatiques du GIEC alertent sur la vulnérabilité du Maroc face à la baisse des précipitations et à l'augmentation des températures prévues d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

La ville de Skoura, confrontée à une sécheresse croissante et à des variations importantes des précipitations, a observé une transformation de sa palmeraie au fil des vingt dernières années. Cette évolution s'est manifestée par la diminution de la densité de palmiers dattiers au sein de la palmeraie, en réponse à des menaces provenant à la fois du vivant et de l'environnement, impactant la productivité des terres et le quotidien des habitants.

En employant une méthodologie de télédétection intégrant des images Pléiades et Landsat, il a été possible de retracer l'évolution de la palmeraie de Skoura sur les deux dernières décennies et de qualifier et quantifier l'état de dégradation des terres en quatre catégories : non dégradées, faiblement, fortement ou complètement dégradées.

L'analyse des images Landsat a révélé une diminution de la végétation au profit d'un élargissement des zones de sol nu centré principalement à l'est, au sud et au centre de la zone d'étude. En parallèle, une expansion de la palmeraie a été suggérée vers le nord et le nord-est au fil du temps.

Ensuite, grâce à l'image Pléiades d'octobre 2022, une carte décrivant l'état des terres à Skoura a pu être établie et a révélé les proportions suivantes : 18% de terres sont non dégradées, 16% sont légèrement dégradées, 25% sont en dégradation avancée et 41% sont complètement dégradées.

Finalement, des enquêtes locales ont mis en évidence les impacts des changements climatiques et des pratiques agricoles de plus en plus inadaptées. Pour relever ces défis, des solutions sont suggérées comme la promotion des terres coopératives, l'installation de stations d'épuration ou encore la transition vers des pratiques agricoles plus résilientes comme l'agroécologie. Toutefois, des problèmes persistants tels que le manque de connaissances en agriculture et l'exode rural des jeunes accentuent ces défis.

# Table des matières

Remerciements.....	2
Avant-propos .....	3
Résumé .....	4
Table des matières .....	5
Table des figures.....	9
Liste des tableaux .....	11
Liste des abréviations .....	12
Introduction.....	13
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique .....	14
1. Variations climatiques dans les oasis marocaines .....	14
1.1. Climat global du Maroc.....	14
1.2. Evolution des précipitations globales au Maroc.....	16
1.3. Évolution des températures globales au Maroc.....	16
1.4. Climat oasien.....	16
2. Systèmes oasiens .....	17
2.1. Végétation .....	17
2.2. Systèmes d'irrigation .....	19
2.3. Élevage .....	20
2.4. Diversification des activités .....	20
3. Agriculture oasienne.....	20
3.1. Double crise agraire.....	20
3.2. Programme Oasis Durable.....	21
3.3. L'impact du changement climatique sur l'agriculture des oasis au Maroc.	21
3.4. Plan Maroc Vert (PMV) .....	22
3.5. Propriétés du sol en zones arides.....	23
4. Dynamique de changement .....	23

4.1.	Sécheresse et désertification.....	23
4.2.	Ensablement.....	24
4.3.	Causes socio-économiques.....	25
5.	Utilisation de la télédétection dans le suivi de la végétation et de la dégradation des terres.....	26
5.1.	Classification de l'occupation du sol.....	26
5.2.	Signatures spectrales .....	27
5.3.	Indices de télédétection : NDVI, SAVI, MSAVI.....	27
5.4.	Indice de brillance (IB).....	28
5.5.	Indice de vulnérabilité environnementale (IVE).....	29
5.6.	Quantification de la dégradation des terres : DMI .....	30
5.7.	Surveillance de la dégradation des milieux arides et semi-arides .....	32
5.8.	Indice d'aridité (AI) .....	32
6.	Cartographie de la dégradation des terres.....	34
6.1.	Evaluation de la dégradation des terres arides (LADA).....	34
6.2.	Zonage à dire d'acteurs (ZADA).....	34
6.3.	Aperçu mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT) 34	
7.	Conclusion.....	35
	Chapitre 2 : Objectifs .....	37
	Chapitre 3 : Matériels et méthodes.....	38
1.	Zone d'étude .....	38
1.1.	Situation géographique.....	38
1.2.	Climat .....	39
1.3.	Hydrologie .....	39
1.4.	Contexte socio-économique.....	40
2.	Logiciels de géomatique.....	41
2.1.	QGIS .....	41
2.2.	eCognition .....	41

3. Méthodologie générale.....	41
4. Données et méthodologie de terrain.....	42
4.1. Échantillonnage.....	42
4.2. Données relevées sur la fiche terrain.....	43
4.3. Enquêtes auprès des habitants de Skoura.....	49
4.4. Rapports et documents internes de l'ORMVAO .....	51
5. Données satellites.....	52
5.1. Landsat.....	52
5.2. Pléiades .....	53
6. Méthodes de traitement et analyse des données.....	55
6.1. Classification des états de dégradation.....	55
6.2. Détection du changement.....	63
6.3. Validation.....	64
Chapitre 4 : Résultats.....	65
1. Étude du changement de la dynamique des terres .....	65
1.1. Traitement des images.....	65
1.2. Classification des objets d'intérêt (états de dégradation) .....	66
1.3. Indices de télédétection .....	70
1.4. Suivi temporel .....	72
2. Enquêtes auprès des habitants de Skoura.....	73
2.1. Système d'utilisation des terres .....	74
2.2. Dégradation des terres par le système d'utilisation des terres .....	76
Chapitre 5 : Discussion .....	79
1. Étude du changement de la dynamique des terres .....	79
1.1. Traitement des images.....	79
1.2. Classification des objets d'intérêt (états de dégradation) .....	81
2. Validation .....	85
3. Enquêtes auprès des habitants de Skoura.....	86

4. Elaboration de solutions durables .....	89
Conclusions.....	91
Bibliographie.....	92
Annexes .....	100
1. Annexe 1 : Fiche des relevés de terrain.....	100
2. Annexe 2 : Questionnaire des enquêtes de terrain auprès des habitants .....	101

## Table des figures

Figure 1 - Régions climatiques du Maroc et Indice d'aridité de De Martonne (Mokhtari et al., 2014).....	14
Figure 2 - Grands domaines climatiques du Maroc (Sebbar, 2013).....	15
Figure 3 - Composition multistrate de la palmeraie de Skoura.....	18
Figure 4 - Signatures spectrales de différents types de milieu (Charrier et al. 2016). 27	
Figure 5 - L'indice UNEP (P/ETP) conformément aux définitions de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) et de la Convention sur la diversité biologique (CBD) à échelle mondiale (UNEP-WCMC, 2007) (Plaza et al., 2018) et à échelle du Maroc (Mokhtari et al., 2014). ....	33
Figure 6 - Chorème du contexte actuel dans les milieux arides. ....	36
Figure 7 - Localisation de la zone d'étude : palmeraie de Skoura à gauche et massif montagneux de l'Atlas à droite.....	38
Figure 8 - Cumuls pluviométriques annuels relevés par l'Office régionale de mise en valeur agricole de Ouarzazate entre septembre 2016 et février 2023 pour les villes de Ouarzazate et Skoura (Source : ORMVAO). ....	39
Figure 9 - Hydrologie autour de la région de Skoura & localisation du barrage El Mansour Eddahbi au sud-ouest de la palmeraie.....	40
Figure 10 - Méthodologie générale du mémoire.....	42
Figure 11 - Relevés de terrain : 1) Fleury, mon binôme, 2) Des motos, un moyen de déplacement parmi tant d'autres au sein de la palmeraie, 3) Collecte d'un point GPS et remplissage de la fiche descriptive du sol.....	43
Figure 12 – Formes de l'érosion hydrique observées dans la palmeraie de Skoura : 1) Erosion en nappe, 2) Erosion en rigole, 3) Erosion en ravine, 4) Combinaison d'érosion en rigole et en ravine. ....	47
Figure 13 - Illustration d'une couche d'armature.....	47
Figure 14 – Indicateurs d'un milieu aride et salin : 1) Tamarix gallica, 2) Hammada scoparia, 3-4) Traces visibles de sel sur les terres. ....	48
Figure 15 - 4 catégories de classification : 1) Pas de dégradation, 2) Dégradation faible, 3) Dégradation avancée, 4) Dégradation complète. ....	49
Figure 16 - Palmeraie de Skoura et les 49 points GPS relevés.....	49
Figure 17 - Méthodologie de traitement et analyse des données. ....	55

Figure 18 - Pansharpening réalisé sur QGIS. (a) Image à 2 m, (b) Image à 0.5 m, (c) Image pansharpened à 0.5 m (Charlotte Vingre, 2023).....	56
Figure 19 - Fonctionnement eCognition.....	58
Figure 20 – Paramètre d'échelle (réalisé sur eCognition).....	59
Figure 21 – Paramètre de forme (réalisé sur eCognition).....	59
Figure 22 - Méthodologie pour la classification itérative.....	62
Figure 23 - Matrice de confusion type. ....	64
Figure 24 - Représentation d'un échantillon (SK <sub>nb</sub> ) des 4 classes après segmentation sur eCognition : 1) Pas de dégradation, 2) Dégradation faible, 3) Dégradation avancée, 4) Dégradation complète. ....	65
Figure 25 - Raster virtuel en vraies couleurs et fausses couleurs proche infrarouge des 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022). ....	66
Figure 26 - Scénario n°1 : classification à 9 classes. ....	67
Figure 27 – Scénario n°2 : classification itérative à 6 classes. ....	68
Figure 28 - Comparaison du MSAVI entre les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022). ....	70
Figure 29 - Comparaison des 2 formules d'indice de brillance via la calculatrice raster sur QGIS sur les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022). ....	71
Figure 30 - Comparaison de l'IB entre les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022). ....	72
Figure 31 - Composition colorée des images par les deux néocanaux (MSAVI, IB) des 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022). ....	72
Figure 32 - Parallélisme Pléiades-Landsat. ....	73
Figure 33 – Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillon SK14, kasbah et route traversant la palmeraie.....	79
Figure 34 - Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillons SK60 et 61, kasbah et oued traversant la palmeraie. ....	80
Figure 35 - Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillon SK25 (=terres collectives) et khettaras.....	80
Figure 36 – Pléiades en fausses couleurs infrarouges.....	81
Figure 37 - Représentation en pourcentage de la classification des terres selon les 6 classes et la superficie totale et représentation en pourcentage des 4 stades de dégradation des terres selon la superficie des terres uniquement. ....	83
Figure 38 - Chorèmes en milieu anthropique et naturel à Skoura.....	88

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Détails des indices de terrain.....	44
Tableau 2 - Images Landsat et leur date d'enregistrement et de production respective. .....	52
Tableau 3 - Bandes spectrales Landsat 7 (United States Geological Survey (USGS), s. d.). .....	53
Tableau 4 - Bandes spectrales Landsat 8 (United States Geological Survey (USGS), s. d.). .....	53
Tableau 5 – Bandes spectrales Pléiades (Dinamis DataTerra, 2020). .....	54
Tableau 6 - Distinction entre le multispectral & le panchromatique. ....	54
Tableau 7 - 9 classes d'état de dégradation du sol.....	60
Tableau 8 - Matrice de confusion de la classification itérative (n=49). ....	69
Tableau 9 - Matrice de confusion itérative améliorée.....	69
Tableau 10 - Matrice de confusion de la classification itérative avec fusion des classes de dégradation avancée et de dégradation complète. ....	69
Tableau 11 - Matrice de confusion de la classification itérative avec fusion des classes de dégradation faible et sans dégradation.....	70
Tableau 12 - Récapitulatif des enquêtes auprès des habitants de Skoura. ....	76
Tableau 13 – Comparaison des pourcentages entre les observations de terrain réalisées en mars 2023 et la classification réalisée sur eCognition via la Pléiades d'octobre 2022.....	83

## Liste des abréviations

FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
IB	Indice de Brillance
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
LADA	Land Degradation Assessment in Drylands (Land Degradation Assessment in Drylands)
LGP	Length of Growing Period (Durée de la période de croissance)
MS	MultiSpectral
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index (Indice de végétation ajusté au sol modifié)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisée)
ORMVAO	Office Régionale de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate
PAN	PANchromatique
RF	Random Forest
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index (Indice de végétation ajusté au sol)
SIG	Système d'Information Géographique
SLM	Sustainable Land Management (Gestion durable des terres)
SWIR	Short Wave InfraRed (Infrarouge à ondes courtes)
UNEP	United Nations Environment Program (Programme des Nations unies pour l'environnement)
WOCAT	World Overview of Conservation Approaches and Technologies (Aperçu mondial des approches et technologies de conservation)

## Introduction

Les recherches du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoient un réchauffement mondial entre 1,4 et 5,8°C d'ici la fin du 21ème siècle, entraînant des impacts variés selon les régions.

Selon les rapports du GIEC, le Maroc devrait connaître une diminution des précipitations annuelles, une hausse des températures moyennes annuelles et une réduction des ressources en eau, suscitant des inquiétudes quant à une possible pénurie entre 2030 et 2050 (Sinan et Belhouji, 2016).

Cette tendance concerne également le sud du Maroc, où les oasis, des écosystèmes complexes et fragiles, survivent malgré un climat aride. De plus, celui-ci rend l'agriculture de plus en plus difficile pour les habitants (Ait El Mokhtar et al., 2021). La situation touche notamment la palmeraie de Skoura, un environnement oasien situé au nord-est de Ouarzazate, dans le sud du pays.

Pour contrer les scénarios du GIEC, des mesures telles que la gestion plus efficiente de l'eau, la lutte contre la pollution et l'exploitation illégale des nappes et le recyclage de l'eau sont mises en place (Sinan et Belhouji, 2016). Mais restent des questions : ces actions sont-elles suffisantes et applicables à la Palmeraie de Skoura ? Quel est l'engagement local envers ces bonnes pratiques de gestion des ressources en eau ?

Confrontée à une sécheresse croissante et aux fluctuations imprévisibles des précipitations, la palmeraie de Skoura a été témoin d'une évolution significative, passant de la prédominance des palmiers dattiers à une diminution significative causée par des menaces biotiques et abiotiques impactant la fertilité des terres et la vie quotidienne des habitants.

En effet, la palmeraie de Skoura a subi deux crises agricoles majeures : d'abord la maladie du Bayoud, un champignon s'attaquant aux palmiers dattiers, suivie d'une période de sécheresse prolongée. Ces événements ont affecté l'approvisionnement en eau pour l'irrigation, menaçant les moyens de subsistance des agriculteurs. Cette détérioration met en évidence la nécessité urgente de comprendre et de lutter contre cette dégradation des terres.

Ce travail vise donc à dresser un état des lieux de la situation actuelle et à proposer des solutions adaptées pour répondre aux besoins de la communauté locale.

# Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

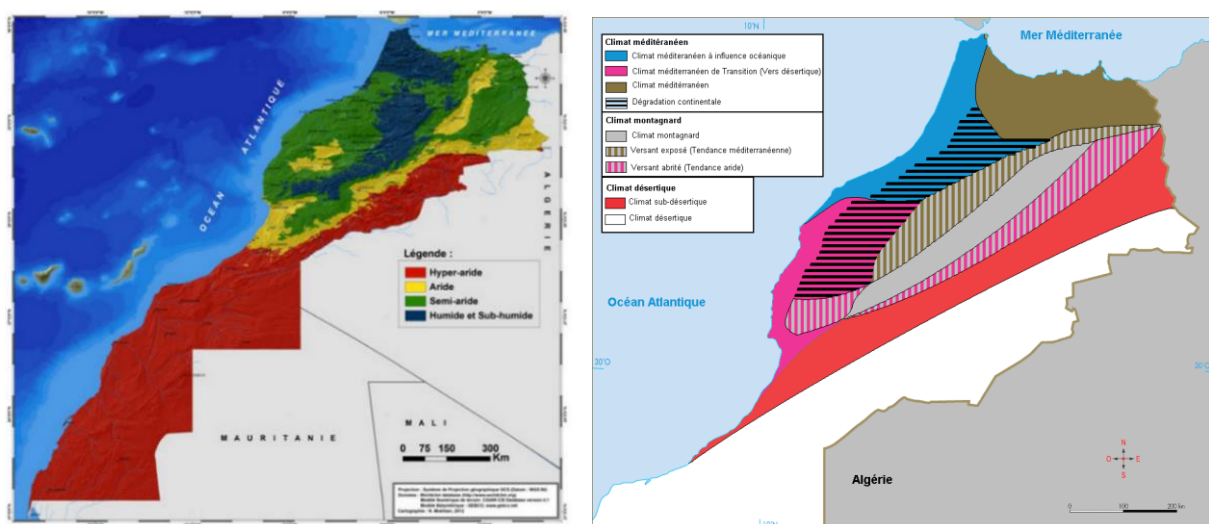
La synthèse bibliographique se divise en 4 sections. La première aborde le climat actuel du Maroc, en se concentrant sur ses oasis (1). La seconde décrit les systèmes oasiens (2) et l'agriculture dans ce contexte (3). La troisième analyse la dynamique actuelle des changements tels que la sécheresse, la désertification et l'ensablement dans les environnements arides (4). Enfin, la dernière partie traite des méthodes de télédétection spécifiques pour surveiller la végétation et la dégradation des terres dans ces milieux (5).

## 1. Variations climatiques dans les oasis marocaines

### 1.1. Climat global du Maroc

Le Maroc se situe au nord-ouest de l'Afrique et est bordé au nord par la mer Méditerranée et à l'ouest par l'océan Atlantique. Au total, il s'ouvre sur près de 3500km de côtes (Ait El Mokhtar et al., 2021).

Étant donné sa localisation, ce pays est confronté au climat aride et semi-aride des régions méditerranéennes, mais également au climat atlantique et saharien. En effet, la présence de la mer, de l'océan, des montagnes de l'Atlas et du Rif ainsi que du désert du Sahara au sud diversifie les climats au sein du pays comme le montre la Figure 1 (Mokhtari et al., 2014).



Dès lors, il se compose d'une saison sèche et chaude s'étalant du mois de mai au mois de septembre ainsi que d'une saison humide et froide d'octobre à avril (Sebbar et al., 2013). Ces régions s'avèrent être les plus affectées par le changement climatique avec

des prévisions de hausse des températures et diminution des pluies sur toute la région méditerranéenne (Ait-El-Mokhtar et al., 2021).

Le Maroc est considéré comme l'un des pays les plus vulnérables à ce changement climatique. En effet, ces dernières décennies, les précipitations ont diminué, la distribution spatio-temporelle de celles-ci change (Sebbar et al., 2019), les températures ont drastiquement augmenté et le sud du pays a été confronté à des inondations dévastatrices (Ait El Mokhtar et al., 2021 ; Abdelhadi, Mouloud, et Ali, 2015). Selon les données historiques fournies par le GIEC, les scénarios récents projettent un climat plus sec et plus chaud (Ouraich et al., 2018).

Par ailleurs, une étude réalisée en 2013 décrit l'évolution du climat lors du 20<sup>ème</sup> siècle et l'impact d'une persistante et sévère sécheresse globale présente depuis les années 1970 (Stour et Agoumi 2008 ; Sebbar et al., 2013). De plus, elle souligne l'influence de la topographie, de la disposition des chaînes de montagnes et de l'orientation de ces éléments sur la pluviométrie marocaine (Sebbar et al., 2013). L'irrégularité pluviométrique s'intensifie du Nord vers le Sud et également vers l'Est en s'écartant des côtes océaniques et méditerranéennes et diminue en altitude. Ainsi, il est possible de délimiter sept domaines dont la variabilité pluviométrique est relativement homogène (Sebbar et al., 2019).

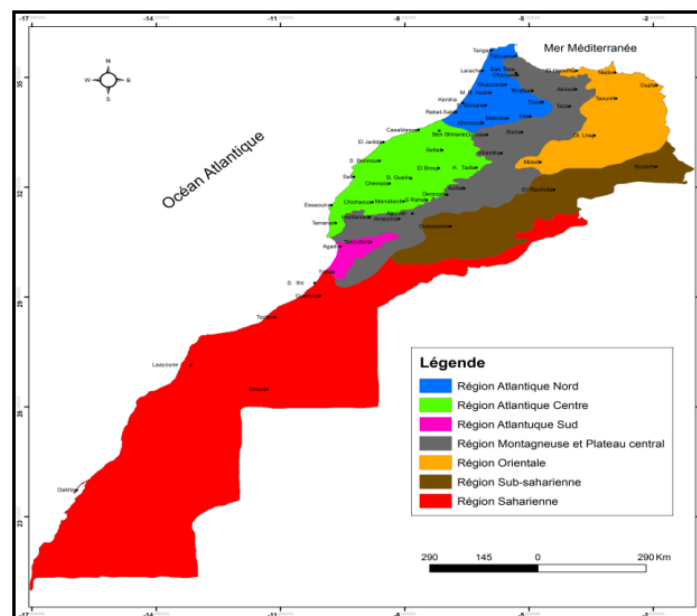


Figure 2 - Grands domaines climatiques du Maroc (Sebbar, 2013).

Enfin, dans le sud-est du Maroc, à 40 kilomètres au nord-est de la ville de Ouarzazate, se situe la palmeraie de Skoura. Elle s'étend sur près de 25 km<sup>2</sup> et

n'échappe pas aux aléas climatiques de la région. En effet, d'après une enquête effectuée en 2016 auprès des agriculteurs et agricultrices de la palmeraie, la majeure contrainte n'est pas tant le manque d'eau, mais l'irrégularité et la difficulté à prévoir les précipitations. Arrivée tardive, arrêt brutal, absence et abondance des pluies rythment le quotidien des espaces oasiens (Aziz et Elquaoumi, 2016).

### 1.2. Evolution des précipitations globales au Maroc

Les simulations des modèles climatiques concernant les précipitations suggèrent une diminution globale de celles-ci (Badraoui et Dahan, 2011) s'écartant de 10% à 52% de la ligne de base historique (Ouraich et al., 2018). Il est vrai que les précipitations diminuent dans plusieurs régions du Maroc, mais cette tendance n'est pas une généralité. En effet, les données pluviométriques récoltées par la station météorologique dans la région de Ouarzazate, où se situe la palmeraie de Skoura, montrent une légère augmentation, cependant non significative, des précipitations (Sebbar et al., 2013).

La variation annuelle des pluies dépend de la localisation des stations météorologiques. Ainsi, des variations plus faibles sont observées dans les régions intramontagnardes de l'Atlas et les plus élevées se localisent dans le Sud du pays dans les régions sahariennes et prédésertiques caractérisées par leur aridité (Sebbar et al., 2013).

### 1.3. Évolution des températures globales au Maroc

Les températures annuelles moyennes devraient augmenter de 1,1 °C à 3,5 °C d'ici les années 2060 et de 1,4 °C à 5,6 °C d'ici les années 2090. Certes, il existe une variabilité en fonction des différents modèles climatiques ; cependant, la tendance globale simulée par le scénario du Rapport spécial sur les émissions pour le Maroc montre une nette augmentation des températures (Badraoui et Dahan, 2011 ; Ouraich et al., 2018).

### 1.4. Climat oasien

Le sud du Maroc est caractérisé par la présence d'oasis qui sont des écosystèmes complexes et fragiles où l'agriculture se réalise dans des conditions climatiques qui se voient être de plus en plus contraignantes. Pourtant, ce système traditionnel s'est avéré durable et productif pendant des siècles grâce à une gestion efficace des plantes, du sol et de l'eau (Ait El Mokhtar et al., 2021). Cependant, à la suite des changements climatiques actuels, l'eau se raréfie et la qualité des sols se dégrade,

ceux-ci sont confrontés à de plus en plus de salinisation, ce qui compromet les productions agricoles (Sebbar et al., 2013 ; Ait El Mokhtar et al., 2021).

En effet, tout comme le pays, les oasis marocaines sont également marquées par un climat aride avec des précipitations irrégulières d'une année à l'autre, qui vont souvent être intenses et concentrées dans le temps sous forme d'orages ce qui engendre des inondations dévastatrices (Abdelhadi et al., 2015 ; Ait El Mokhtar et al., 2021).

De plus, selon une étude réalisée par le Département marocain de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, intitulée "Adaptations au changement climatique pour des oasis résilientes", les projections climatiques prévoient une baisse des précipitations moyennes. S'ajoute à cela une étude sur les cumuls pluviométriques hivernaux réalisée à Ouarzazate pour 2030-2050 qui montre une diminution de près de 35% des précipitations dans toute la région oasienne, par rapport à la période 1971-2000 (Ait-El-Mokhtar et al., 2021).

En ce qui concerne les températures moyennes, toujours selon le Département marocain de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, celles-ci devraient augmenter de 1,8°C et de 3,2°C pour les années 2045 et 2075 respectivement (Ait-El-Mokhtar et al., 2021).

## 2. Systèmes oasiens

### 2.1. Végétation

Les oasis sont constituées d'une palmeraie, elle-même agencée en trois strates aux espèces et rôles distincts et complémentaires (Aziz et Elquaoumi, 2016).

Ainsi, la strate herbacée est composée de cultures sous-jacentes, on y retrouve des céréales, majoritairement de l'orge pour la région de Skoura (Agrisud International, 2004 ; Aziz et Elquaoumi, 2016), des légumineuses fixatrices d'azote (luzerne et fèves), des légumes d'hiver (navets, oignons verts, carottes et petits pois) et également des légumes d'été (tomates, courgettes, piments, melons, etc...) (Agrisud International 2004 ; Aziz et Elquaoumi, 2016; Ait-El-Mokhtar et al., 2021).

Dans la strate arbustive sont plantés des arbres fruitiers (amandiers, figuiers, abricotiers, pommiers, etc.) (Aziz et Elquaoumi, 2016 ; Ait-El-Mokhtar et al., 2021). Cependant, dans la palmeraie de Skoura, c'est l'olivier qui est prédominant (Agrisud International, 2004).

Enfin, le palmier dattier, *Phoenix dactylifera*, constitue la strate arborée qui fonctionne comme une clé de voûte de cette composition multistrate. À Skoura, sa présence est réduite en raison du dépérissement sur pied de nombreux palmiers. Cette perte est principalement causée par la maladie du Bayoud, également appelée fusariose vasculaire du palmier dattier, qui est due à un champignon du genre *Fusarium*, mais également par l'impact de la sécheresse, de la salinité du sol, ou encore suite à des incendies (Agrisud International, 2004).



Figure 3 - Composition multistrate de la palmeraie de Skoura.

Au Maroc, le seul genre appartenant à la famille des *Tamaricaceae* est le genre *Tamarix* (Bihaoui et al., 2020). Jusqu'à aujourd'hui, six espèces ont été recensées ; *T. aphylla*, *T. amplexicaulis*, *T. boveana*, *T. africana*, *T. canariensis* et *T. gallica* (Bihaoui et al., 2020b). En 1978, les travaux de Baum remettent en cause ce résultat, suggérant que *T. gallica* pourrait être une espèce incertaine dans les terres marocaines. De plus, de nombreuses confusions entre *T. gallica* et *T. canariensis* existent (Baum, 1978).

*Tamarix gallica* est une espèce halophyte ayant des propriétés stimulantes grâce aux propriétés anti-inflammatoires et anti-diarrhéiques lors de l'infusion de ses feuilles et de ses fleurs (Ksouri et al. 2009; Boulaaba et al., 2015). C'est une espèce native de la région méditerranéenne et autrefois, elle était utilisée comme un arbuste d'ornement (Merkel et Hopkins, 1957).

En fonction des besoins, des espèces de *Tamarix* peuvent être plantées afin de lutter et contrôler l'érosion des berges près des oueds et également afin de limiter et réduire l'ensablement dans les régions sahariennes (Bihaoui et al., 2020b).

*Haloxylon* est le genre d'un arbuste appartenant à la famille des *Amaranthaceae* en classification phylogénétique et à la famille des *Chenopodiaceae* en classification

classique. Il pousse à l'état sauvage dans les habitats secs de la région méditerranéenne et du Proche-Orient (Tair et al., 2016; Hafidha et al., 2017).

Désormais, cette espèce végétale est classée dans le genre *Hammada*. Le genre *Scoparia*, de la famille des *Amaranthaceae*, est résistant aux sécheresses, à la salinité et aux faibles précipitations ; conditions typiques des milieux arides (Boucherit et al., 2018; Hafidha et al., 2017). De plus, elle présente des avantages écologiques en protégeant et en préservant les sols (Boucherit et al., 2018), des bienfaits médicaux en agissant comme un antidote contre les morsures de reptiles et d'insectes, tout en étant également un atout floristique (Boucherit et al., 2018).

## 2.2. Systèmes d'irrigation

Le Haut Atlas central, couvrant une distance d'environ 200 km, constitue une chaîne de montagnes qui joue un rôle crucial en tant que source essentielle d'eau pour le pays car c'est là que la plupart des cours d'eau prennent leur origine (Ait Khandouch, 2000).

Afin de faire face aux aléas climatiques et au taux élevé d'évaporation, les populations locales ont mis au point un dispositif de gestion de l'eau : les khetaras (Aziz et Elquaoumi, 2016). Les khetaras constituent un système hydraulique permettant de mobiliser l'eau par gravité de la nappe phréatique vers la surface afin d'irriguer les champs dans les oasis (Beraaouz et al., 2022).

Le système d'irrigation de la palmeraie de Skoura est composé comme ceci : les séguias branchées sur l'Oued El Hajaj, le système de captage de sources souterraines, les khetaras et les stations de pompage privées.

Le réseau des séguias de Skoura est alimenté par l'Oued El Hajaj mais de façon éphémère. En effet, les nappes phréatiques se régénèrent principalement grâce aux précipitations et aux crues, mais celles-ci diminuent (Aziz et Elquaoumi, 2016) et dépendent de la fonte des neiges du Haut Atlas. En été, l'oued s'assèche, entraînant également l'assèchement des séguias (Agrisud International, 2004).

Finalement, en raison des contraintes topographiques auxquelles est confronté le système khetaras-séguias pour atteindre une irrigation permanente, des motopompes font leur apparition et prennent la place des khetaras (Ait Khandouch, 2000). Ces motopompes puisent directement l'eau des nappes phréatiques en continu, 24 heures

sur 24, entraînant un abaissement du niveau des nappes phréatiques et l'assèchement des khattaras (Aziz et Elquaoui, 2016).

### 2.3. Élevage

Dans la strate herbacée sont notamment cultivées des légumineuses fourragères, la luzerne, qui permettent de nourrir le bétail (Agrisud International, 2004). En effet, les agriculteurs de Skoura pratiquent de l'élevage de type oasien, associant ovins, bovins et caprins (Aziz et Elquaoui, 2016).

Le bétail joue un rôle essentiel dans le développement économique de la région, comme indiqué par Ait-El-Mokhtar et al. (2021). La possession de ruminants garantit des revenus stables et sert de moyen d'épargne en cas de maladie ou de décès (Agrisud International, 2004). L'élevage joue également un rôle crucial en assurant un retour de fumier et une fertilisation à faible coût pour l'exploitation. Toutefois, il est important de noter que les aléas climatiques peuvent entraîner des pénuries d'eau, ce qui risque de perturber cette complémentarité entre les activités de l'exploitation et mettre en danger la survie du système oasien.

### 2.4. Diversification des activités

Le développement économique des oasis (Ait-El-Mokhtar et al., 2021) dépend de la variété des activités et des sources de revenus. Cette diversification des revenus est essentielle dans les oasis, qui sont réputées pour faire face à des incertitudes et à des fluctuations climatiques importantes (Aziz et Elquaoui, 2016).

Par exemple, certains agriculteurs recherchent des alternatives et se tournent vers l'apiculture en utilisant l'abeille jaune d'or du Sahara (Moujanni et al., 2017). Ce choix d'activité, ainsi que l'élevage du mouton D'man (Birdaha et al., 2005), bénéficie du soutien financier de l'État grâce au Plan Maroc Vert (Moujanni et al., 2017). Ces initiatives témoignent de la résilience des populations oasiennes face au manque d'eau et aux aléas climatiques. Elles démontrent également la possibilité d'une économie alternative.

## 3. Agriculture oasienne

### 3.1. Double crise agraire

Autrefois, la palmeraie de Skoura était caractérisée par une prédominance de palmiers dattiers comme l'ont mentionné Aziz et Elquaoui (2016). Cependant, depuis le 19<sup>ème</sup> siècle, ces arbres sont victimes de menaces biotiques, notamment la maladie du Bayoud (Agrisud International, 2004 ; Sedra, 2005) et subissent également des

menaces abiotiques telles que la sécheresse (Abdelhadi et al., 2015), la salinité des sols (Ait-El-Mokhtar et al., 2021) et la désertification (Anjarne et al., 2005), accrues dans la région. Par conséquent, la palmeraie de Skoura connaîtra sa première crise agricole au début des années 1900 (Sedra My, 2005).

Quelques décennies plus tard, les palmeraies vont faire face à une seconde crise agricole. Cette situation découle de deux facteurs majeurs. Tout d'abord, une longue période de sécheresse a entraîné la dessiccation de la plupart des khattaras et des sources d'eau, plongeant ainsi la région dans une crise agricole profonde (Agrisud International, 2004). Ensuite, les rosacées fruitières telles que le pommier, l'abricotier et le pêcher sont confrontées à des défis liés à la température car les conditions actuelles ne satisfont plus leurs besoins (Ait-El-Mokhtar et al., 2021). Selon les prévisions pour 2030, Ouarzazate devrait connaître une diminution du nombre de jours de vagues de froid et une augmentation des vagues de chaleur (Driouech et al., 2011). Cependant, ces arbres dépendent d'un certain nombre d'heures de froid pour pouvoir produire leurs fruits (Aziz et Elquaoumi, 2016). Cette situation complexe met en péril la stabilité des palmeraies, nécessitant ainsi une attention urgente pour assurer leur préservation.

### 3.2. Programme Oasis Durable

En 2016, lors de la COP22 à Marrakech, le Maroc a présenté diverses initiatives, dont le Programme Oasis Durables. Cette initiative vise à lutter contre l'abandon et la dégradation des oasis tout en favorisant l'adaptation au changement climatique. Son objectif est de réduire la vulnérabilité des écosystèmes naturels et humains des oasis en mettant en place des pratiques résilientes pour atténuer les effets du changement climatique (Ait El Mokhtar et al., 2021).

### 3.3. L'impact du changement climatique sur l'agriculture des oasis au Maroc

Au cours des trente dernières années, les oasis ont été confrontées à une augmentation continue de l'aridité en raison de la rareté des ressources en eau (Karmaoui et Moumane, 2016). Pourtant, l'eau est un élément essentiel au fonctionnement durable de ces écosystèmes les rendant désormais plus vulnérables aux effets du changement climatique (Chelleri et al., 2014).

De nombreuses recherches ont mis en évidence que la détérioration de l'eau et de l'environnement est principalement due à une exploitation humaine plus intense et à l'impact du changement climatique (Karmaoui et Moumane, 2016; Karmaoui, 2019).

La sécheresse et la salinité entraînent une altération négative des caractéristiques des sols, affectant ainsi l'activité microbiologique, la respiration et la minéralisation de la matière organique. Ces facteurs peuvent engendrer des conséquences telles que l'érosion du sol et la désertification (Steinhauer-Burkart et Aziki, 2008).

De plus, l'agriculture représente un secteur particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique car ses activités en sont étroitement dépendantes (Ait El Mokhtar et al., 2021). Dès lors, la raréfaction de l'eau, notamment due à une baisse de pluviométrie (Badraoui et Dahan, 2011) et à une surexploitation des eaux souterraines, accélère la dégradation et la salinité des sols, entraînant la perte de terres agricoles productives (Agovino et al. 2019).

Outre cela, les rivières et puits s'assèchent, les khattaras et terres sont de moins en moins exploitées et les infrastructures socio-économiques se détériorent en raison de l'avancée du sable. Tous ces facteurs ont un impact sur les agriculteurs et leurs familles, qui se voient contraints de migrer vers d'autres régions ou vers les grandes villes (Ait El Mokhtar et al., 2021).

Selon la Food and Agriculture Organisation (FAO), les céréales sont la source principale pour la consommation humaine et animale (FAO, 2009). Ce constat est également valable pour la région de Skoura où les superficies de cultures de céréales sont distribuées entre l'orge et le blé (Agrisud International, 2004 ; Aziz et Elquaoumi; 2016 ; Ait El Mokhtar et al., 2021).

Enfin, selon une étude réalisée auprès des agriculteurs de l'oasis de Skoura, l'orge s'adapte plus facilement que le blé aux conditions climatiques locales grâce à sa tolérance à un certain niveau de salinité et sa faible demande en eau. Dès lors, une superficie de culture plus grande lui est réservée (Aziz et Elquaoumi, 2016).

#### 3.4. Plan Maroc Vert (PMV)

Afin d'améliorer la production agricole sous le climat changeant, le Maroc s'est engagé dans le « plan vert marocain » (PVM) qui est l'actuelle stratégie marocaine de développement et d'investissement dans l'agriculture (Badraoui et Dahan, 2011 ; Ouraich et al., 2018).

Cependant, les résultats de différentes simulations démontrent que les impacts macroéconomiques du changement climatique ne diffèrent pas significativement, qu'on adopte ou non la stratégie PVM (Ouraich et al., 2018).

Il existe plusieurs explications possibles à ce résultat. L'une d'entre elles est le manque de représentativité du domaine agricole dans les simulations du PVM qui se concentre uniquement sur le blé, les tomates, les agrumes et les olives. En effet, ces secteurs ne représentent pas plus de 35 % du PIB agricole global. Par conséquent, les objectifs de productivité du PVM ne prennent en compte qu'un tiers de l'ensemble de l'agriculture marocaine, alors que les effets du changement climatique affectent l'ensemble des secteurs de ce domaine. De plus, il est également envisageable que les objectifs du PVM soient tout simplement irréalistes et impossibles à atteindre, comme cela a été suggéré dans l'étude menée par Ouraich et al. en 2018.

### 3.5. Propriétés du sol en zones arides

Les régions tropicales et celles où le pergélisol est présent révèlent les concentrations les plus élevées de carbone organique dans le sol, favorisées respectivement par une forte humidité (faible teneur en O<sub>2</sub>) et des températures négatives qui contribuent à la préservation de la matière organique du sol (Köchy et al., 2015 ; Plaza et al., 2018). En comparaisons, les zones arides affichent des niveaux beaucoup plus faibles, souvent inférieurs à 0,5 % de la masse du sol (Mlih et al., 2016; Plaza et al., 2018).

Malgré leur caractère aride, les sols des régions arides occupent près de 45% des terres cultivées de la planète, jouant ainsi un rôle significatif dans la production alimentaire mondiale. Avec une présence étendue sur environ 42% des terres du globe, ces zones sèches contribuent de manière substantielle à la rétention de carbone organique dans le sol, représentant environ un tiers du stockage mondial, comparativement aux zones humides (Lefèvre et al., 2017; Laban, Metternicht, et Davies, 2018).

À long terme, l'utilisation d'amendements organiques dans la restauration des écosystèmes stabilise la structure du sol, améliore la rétention, la perméabilité et l'infiltration d'eau, tout en réduisant le ruissellement de surface et l'érosion du sol (Hueso-González et al., 2018).

## 4. Dynamique de changement

### 4.1. Sécheresse et désertification

Le changement climatique accentue les événements de sécheresse, avec une augmentation de la variabilité des précipitations et des températures plus élevées (Anderegg et al. 2013). Cette situation entraîne une augmentation de la

désertification et est susceptible de provoquer davantage de dépérissement des plantes ligneuses (Wonkka et al., 2016).

La désertification est influencée par des facteurs naturels tels que la température de surface, les précipitations, l'évaporation et la vitesse moyenne du vent (Zongfan et al., 2022).

Par ailleurs, deux facteurs d'origine humaine jouent un rôle prépondérant dans la désertification, à savoir la densité de pâturage et les changements dans l'utilisation des terres (Tervonen et al., 2015). Alors que la désertification a été un processus naturel pendant longtemps, les activités humaines ont largement influencé ce phénomène et sont devenues le principal moteur de la désertification au cours de l'histoire humaine (Zongfan et al., 2022).

Enfin, la désertification est causée divers phénomènes néfastes comme l'érosion du sol (Ferreira et al., 2022), la réduction de la couverture végétale (Shen et al., 2022) et de l'humidité de surface, ainsi que l'ensablement (Zongfan et al., 2022). Un constat observable dans les palmeraies de la vallée du Tafilalet est leur transformation en milieu sablonneux. Ce sable recouvre alors les parcelles cultivées, entrave l'infiltration de l'eau, complique le labourage et entraîne la mort des végétaux (Beauché, 2020). De plus, la désertification menace la santé humaine et limite l'amélioration du niveau de vie ainsi que le développement social et économique (Zongfan et al., 2022).

Nombreuses études ont été réalisées sur la sécheresse et sur la désertification mais peu ont été effectuées sur le lien qui pourrait exister entre les deux phénomènes. Néanmoins, la sécheresse et la désertification causent habituellement la même perturbation, ce qui mène à souligner leurs relations (Karmaoui, 2019).

D'après une étude réalisée auprès des populations du sud du Maroc dans la vallée du Drâa entre 2015 et 2016, la région fait face à trois principaux problèmes environnementaux. En premier lieu, la sécheresse constitue un défi majeur, suivi de près par la désertification. Enfin, les inondations apparaissent comme le troisième facteur ayant un impact significatif dans la région (Karmaoui, 2019).

#### 4.2. Ensablement

L'ensablement d'un espace est une conséquence de la désertification (El Bernaoui, 2015 ; Alali et Benmohammadi, 2013) pouvant être contrôlée naturellement grâce à la plantation de palmiers dattiers. Ceux-ci sont d'ailleurs les premiers remparts contre le

sable. Cependant, comme expliqué précédemment, les palmiers sont les premiers touchés par la sécheresse ce qui a pour conséquence que les palmeraies s'ensablent (Beauché, 2020).

Selon Alali et Benmohammadi (2013), les études et travaux réalisés ces dernières années indiquent que le milieu naturel se dégrade notamment à cause des conditions climatiques, d'une mauvaise gestion de l'espace et également de mauvaises préservations des ressources naturelles.

En effet, étant donné la croissance démographique dans les régions oasiennes (Ait-El-Mokhtar et al., 2021), les terres sont de plus en plus (sur)exploitées pour l'agriculture et soumises à un surpâturage (Bensaïd, 2006; Alali et Benmohammadi, 2013). Ce phénomène entraîne le déboisement des espaces arides et les expose à de l'érosion hydrique et éolienne (Alali et Benmohammadi, 2013 ; El Bernaoui, 2015). Par conséquent, dans les zones arides, l'ensablement devient omniprésent ce qui limite la reconstruction du couvert végétal et engendre une dégradation des terres. De plus, la surexploitation des ressources en eau (Karmaoui et Moumane, 2016) et du couvert végétal (Bensaïd, 2006), accélèrent également l'extension de l'ensablement.

#### 4.3. Causes socio-économiques

Une étude réalisée dans les palmeraies du Ksar de Ouargla en Algérie révèle des menaces pesant sur les écosystèmes de palmeraie. Les contraintes mises en évidence incluent la fragmentation et le cloisonnement des terres, le vieillissement de la main-d'œuvre, une gestion inadéquate des cultures (Bonneau, 2011), les coûts élevés des intrants agricoles et le manque de ressources financières. De plus, l'évacuation des eaux usées, les problèmes d'approvisionnement en semences, engrais et plants, ainsi que l'insuffisance d'eau pour les parcelles agricoles constituent des problèmes cruciaux qui mettent en péril l'équilibre écologique de la région (Azzedine, 2011).

Dans une seconde étude, les agriculteurs ont mis en évidence que, outre la sécheresse qui a sévi ces dernières années, les cultures de céréales affichent désormais une rentabilité réduite en raison des coûts de production devenus excessifs, principalement dus à l'augmentation des coûts de la main-d'œuvre et à la diminution des formes traditionnelles d'entraide entre agriculteurs (Aziz et Elquaoumi, s. d.).

## 5. Utilisation de la télédétection dans le suivi de la végétation et de la dégradation des terres

### 5.1. Classification de l'occupation du sol

La cartographie de l'occupation des terres à l'aide de la télédétection peut être réalisée via diverses méthodes, parmi lesquelles figure l'utilisation de l'algorithme Random Forest.

Breiman (2001) introduit l'algorithme du Random Forest (RF) comme une méthode générique d'apprentissage automatique. Il s'agit d'un algorithme supervisé, ce qui signifie qu'il s'entraîne sur des données réelles et que l'utilisateur a une connaissance préalable des prédictions.

Afin de comprendre ce qu'est le Random Forest, deux concepts sont nécessaires à définir. Il s'agit de « l'ensemble learning » et « des arbres de décision ».

L'ensemble learning est le fait d'entraîner et de rassembler plusieurs petits modèles de machine learning. Chaque modèle est efficace dans un domaine et possède des avantages et des limites. L'objectif final de l'ensemble learning est de former un « super-modèle », plus robuste, capable de résoudre des problèmes plus complexes.

Les arbres de décision sont des algorithmes de machine learning qui permettent de résoudre des problèmes de classification ou de régression grâce à une suite de règles.

Le Random Forest utilise plusieurs de ces arbres de décision et combine les prédictions de plusieurs modèles pour obtenir des résultats plus détaillés et stables. La théorie de l'ensemble learning est appliquée pour faire fonctionner ces arbres ensemble. Ainsi, le Random Forest combine la simplicité des arbres de décision avec la puissance de l'ensemble learning pour créer un modèle bien meilleur qu'un seul arbre de décision.

Finalement, dans son article, l'auteur met en avant les avantages du Random Forest et notamment sa capacité à réduire le surajustement (overfitting) par rapport à un arbre de décision individuel. En effet, le Random Forest est relativement insensible au surapprentissage, ce qui lui permet de généraliser des modèles sur de nouvelles données sans perdre en performance. Il est également robuste aux valeurs aberrantes et aux données manquantes.

## 5.2. Signatures spectrales

Les images satellites fournissent des mesures de luminances spectrales sur les objets observés (Delhez, 2020). La signature spectrale correspond à la variation de l'intensité du signal à différentes longueurs d'onde à un moment donné. Les propriétés d'une surface influent sur le rayonnement incident, ce qui engendre des différences entre le spectre émis (lumière solaire) et le spectre réfléchi par un objet. Ainsi, chaque surface ou objet a une signature spectrale qui lui est propre (Defourny 2020).

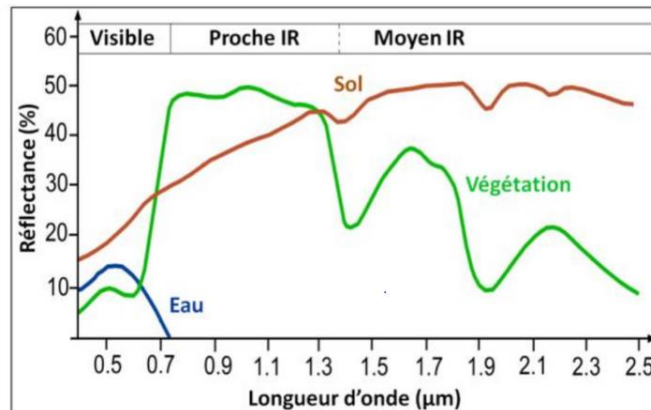


Figure 4 - Signatures spectrales de différents types de milieu (Charrier et al. 2016).

## 5.3. Indices de télédétection : NDVI, SAVI, MSAVI

Les changements dans les propriétés spectrales des sols, tels que leur couleur et leur brillance, ont un impact significatif sur la détection de la végétation dispersée dans des milieux hétérogènes. C'est pourquoi, une série d'indices de végétation tels que le NDVI, le SAVI et le MSAVI a été mise au point dans le but d'atténuer ces effets (Barrari et al., 1996).

Au début, l'utilisation du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) semblait être une approche adéquate pour ce projet. Il évalue la densité de la végétation en se basant sur la réflectance des plantes (Kinyanjui, 2011). De plus, c'est un choix assez commun car le NDVI peut être calculé à partir de n'importe quel capteur multispectral qui possède des bandes dans le rouge et le proche infrarouge (Huang et al., 2021). R = réflectance dans la bande rouge ; PIR = réflectance dans la bande proche infrarouge.

$$(1) \quad NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Néanmoins, il est important de noter que cet indice peut être influencé par la signature spectrale du sol et les effets atmosphériques (Rondeaux et al., 1996),

introduisant ainsi un biais dans les résultats, particulièrement dans les zones semi-arides à faible densité de végétation, comme c'est le cas dans la palmeraie de Skoura.

Dans l'étude menée par Barrari et al. (1996), il a également été observé que le NDVI présente des limitations dans la gestion des environnements à végétation clairsemée ou de densité modérée dues aux caractéristiques optiques des sols dépourvus de végétation.

Toutefois, Barrari et ses collaborateurs (1996) ont souligné que les indices de végétation comme le SAVI et le MSAVI présentent une plus grande robustesse face aux variations des caractéristiques optiques des sols (notamment la couleur et la brillance), ce qui les rend plus efficaces pour distinguer la végétation du sol nu dans un environnement végétal clairsemé et relativement complexe.

Pour cette raison, le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) a été développé afin de réduire l'influence du sol sur les spectres du couvert végétal. Il intègre un facteur d'ajustement du sol ( $L$ ) dans le dénominateur de l'équation du NDVI (Qi et al., 1994).

$$(2) \quad NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R+L} (1 + L)$$

Pour obtenir un ajustement optimal de l'effet du sol, il est impératif que le facteur  $L$  varie en proportion inverse de la quantité de végétation présente. C'est ainsi qu'a été développé le SAVI modifié (MSAVI), où la constante  $L$  a été substituée par une fonction variable (Qi et al., 1994).

$$(3) \quad MSAVI = \frac{2(PIR+1) - \sqrt{(2PIR+1)^2 - 8(PIR-R)}}{2}$$

#### 5.4. Indice de brillance (IB)

Les variations de la réponse spectrale enregistrée par un satellite fournissent des indications sur les changements environnementaux. Elles révèlent des variations dans la couleur du sol et la composition minérale, ainsi que des modifications subtiles dans la structure et la distribution spatiale de la végétation. Ces changements peuvent servir d'indicateurs pour détecter des altérations et des dégradations dans l'environnement (Maimouni et al., 2011).

Plusieurs études ont souligné l'importance d'employer des indices spectraux basés sur les propriétés de réflectance des sols, comme l'indice de brillance (IB), afin de décrire

l'état des surfaces du sol, notamment dans des zones caractérisées par un climat aride ou semi-aride (Maimouni et al., 2011).

Cet indice, calculé à partir de la bande rouge et proche infrarouge selon l'équation suivante, permet de différencier les zones végétalisées des sols nus (Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED), 2008).

$$(4) \quad IB = \sqrt{R^2 + PIR^2}$$

Il existe cependant deux formules répertoriées dans la revue de littérature. La seconde intègre également la bande verte (V) dans son équation. Cette dernière a été utilisée dans le travail sur l'apport des SIG et de la télédétection dans l'évaluation de l'écosystème steppique pour un développement durable en Algérie occidentale (Benguerai et Belgherbi, 2014).

$$(5) \quad IB = \sqrt{V^2 + R^2 + PIR^2}$$

Comme évoqué précédemment, l'indice de brillance réagit à la clarté des sols, qui est influencée par la couleur du sol, son niveau d'humidité et sa texture (Post et al., 2000).

La teinte d'un sol peut varier en fonction de plusieurs facteurs. Un sol sombre peut résulter de l'humidité causée par des pluies ou une irrigation, une rugosité importante due à une préparation du sol, ou encore de l'enrichissement en matière organique. En contraste, un sol clair indique généralement un terrain plus sec, avec une concentration de sels en surface et une moindre rugosité. Ces conditions sont souvent associées à une détérioration de l'environnement (Post et al., 2000).

#### 5.5. Indice de vulnérabilité environnementale (IVE)

L'Institut de l'Environnement de Stockholm (IES) a développé un indice de vulnérabilité environnementale afin de comparer les changements de vulnérabilité environnementale dans les oasis entre deux années différentes (Khebiza, 2014). Cet indice utilise 50 indicateurs qui sont classés en 5 catégories : le changement climatique, la géologie, la géographie, les ressources et les services (Karmaoui et Moumane, 2016).

Une étude a été conduite dans la Vallée du Draa afin d'examiner la vulnérabilité et son évolution entre 2009 et 2014. Les résultats indiquent un faible changement au cours de cette période. Néanmoins, l'agriculture s'avère être le principal facteur

contribuant à la vulnérabilité environnementale en raison de la croissance de la population. Cela accroît considérablement la pression sur les ressources en eau et les sols fertiles (Karmaoui et Moumane, 2016).

#### 5.6. Quantification de la dégradation des terres : DMI

Comme le souligne Yu et al. (2020), la télédétection est une méthode de surveillance de la désertification assez efficace étant donné qu'elle représente une alternative à l'observation sur le terrain, qui elle, demande beaucoup de temps et de main-d'œuvre.

Par exemple, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'albédo ont souvent été utilisés dans différentes études afin de calculer un indice de différence de désertification (Ma et al., 2011; Guo et Wen, 2020).

Cependant, le NDVI est sensible à la signature de fond du sol, ce qui biaise les résultats dans certaines zones semi-arides à faible couverture végétale (Li et al., 2013 ; Ranjeet et al. 2018). Par conséquent, Wu et al. (2019) ont remplacé le NDVI par le MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) qui ajoute un facteur d'ajustement qui change dynamiquement en fonction de la couverture végétale réelle afin de fournir une réduction optimale du bruit du sol (Wei et al., 2018). Cet indice est donc plus optimal que le NDVI pour identifier la végétation lors d'un faible recouvrement végétal (Li et al., 2013; Guo et al., 2020).

Lors de l'observation de la désertification, il faut également prendre en considération l'expansion du sable causé par cette dernière. Ainsi, le SFI (Sandy Feature Index) a été proposé par Meng (2005). C'est un indice basé sur la différence entre les caractéristiques spectrales de réflectance des terres ensablées et des terres non ensablées.

Dès lors, le DMI (Desertification Monitoring Index) peut être employé afin de surveiller la désertification. En effet, c'est un indice basé sur le MSAVI, l'albédo et le SFI (Zongfan et al. 2022b).

Le DMI peut être classé en quatre catégories : absence de désertification, désertification légère, désertification modérée ou bien désertification sévère (Guo et al., 2020). Trois méthodes de classification ont été expérimentées afin de faire des catégories et c'est la méthode des ruptures naturelles de Jenks (méthode Jenks Natural Breaks) qui ressort comme étant la plus optimale pour le suivi de la

désertification étant donné sa précision de classification globale plutôt satisfaisante par rapport aux deux autres méthodes (Zongfan et al., 2022).

Pour terminer, la littérature montre que le DMI regroupe les avantages du MSAVI, de l'albédo et du SFI dans le suivi de la désertification et semble être un indice cohérent avec les niveaux réels de désertification (Zongfan et al., 2022).

### 5.6.1. Équations : MSAVI, Albédo, SFI et DMI

Selon une étude réalisée par Zongfan et al. (2022) avec le satellite Landsat 8, voici les différentes étapes de la construction de l'indice de suivi de la désertification (DMI).

$$(6) \quad MSAVI = \frac{2(NIR+1) - \sqrt{(2NIR+1)^2 - 8(NIR-R)}}{2}$$

$$(7) \quad \text{Albédo} = 0.356B + 0.13R + 0.373NIR + 0.085SR_1 + 0.072SR_2 - 0.0018$$

$$(8) \quad SFI = \frac{SR_1 - B}{200 - SR_2}$$

Avec, B, R, NIR, SR<sub>1</sub> et SR<sub>2</sub> qui font référence à la réflectance de la bande bleue, la bande rouge, la bande du proche infrarouge et les bandes 1 et 2 de l'infrarouge moyen (SWIR<sub>1</sub> et SWIR<sub>2</sub>), respectivement.

Comme les amplitudes des indices ne sont pas uniformes, les indices sont régularisés selon les formules suivantes :

$$(9) \quad M = \frac{MSAVI - MSAVI_{\min}}{MSAVI_{\max} - MSAVI} \times 100\%$$

$$(10) \quad A = \frac{\text{Albédo} - \text{Albédo}_{\min}}{\text{Albédo}_{\max} - \text{Albédo}} \times 100\%$$

$$(11) \quad S = \frac{SFI - SFI_{\min}}{SFI_{\max} - SFI} \times 100\%$$

L'indice de suivi de la désertification se calcule comme suit :

$$(12) \quad DMI = \sqrt{(M - M_{\max})^2 + (A - A_{\min})^2 + (S - S_{\min})^2}$$

Avec, M<sub>max</sub> étant la valeur maximale de M et A<sub>min</sub> et S<sub>min</sub> étant les valeurs minimales de A et S, respectivement.

### 5.6.2. Indice de changement interannuel de la désertification (DICI)

Le DICI (Desertification Interannual Change Index) permet d'établir si l'état de désertification a changé sur une certaine période. Ainsi, l'équation est la suivante :

$$(13) \quad DICI = \frac{D_a - D_b}{D_b} \times 100\%$$

$D_b$  est la valeur du niveau de désertification de l'année précédente de la période de recherche et  $D_a$  est la valeur du niveau de désertification de la dernière année de la période de recherche. Lorsque  $DICI > 0$ , cela indique que l'état de désertification de la zone a été amélioré ;  $DICI = 0$  indique que l'état de désertification est resté inchangé et  $DICI < 0$  signifie que l'état de désertification de la zone a été détérioré.

#### 5.7. Surveillance de la dégradation des milieux arides et semi-arides

Afin de mettre en lumière les zones de dégradation ou de restauration, Nassira et Boutmedjet (2015) ont appliqué une méthode basée sur des indices spectraux : le NDVI, l'IR (Indice de Rougeur) et l'IB. Ces indices sont étroitement liés à la réflectance globale, incluant l'activité chlorophyllienne, l'albédo et la couleur du sol. Une série d'images Landsat a été traitée dans le but d'évaluer et de quantifier les conditions de la surface du sol (ces trois images datent de 1972, 2000 et 2010).

La méthodologie comporte les étapes suivantes :

- 1) Corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique des images
- 2) Calcul des indices spectraux (NDVI, Indice de Brillance, Indice de Rougeur)

$$(14) \quad NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R}$$

$$(15) \quad IB = \sqrt{V^2 + R^2 + PIR^2}$$

$$(16) \quad IR = \frac{R-V}{R+V}$$

Où : PIR correspond à la bande du proche Infrarouge, R à la bande rouge et V à la bande verte.

- 3) Composition colorée des néo-canaux NDVI dans la bande rouge, IB dans le vert et IR dans le canal bleu)
- 4) Classification non supervisée des néo-canaux issus des paramètres
- 5) Interprétation visuelle en termes d'état de surface à partir des observations de terrain
- 6) Interprétation des résultats sur les changements des états de surface des trois dates

#### 5.8. Indice d'aridité (AI)

Il existe un indice d'aridité (Aridity Index – AI) développé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) qui divise les zones sèches en quatre

régions distinctes (Plaza et al., 2018; Trabucco et Zomer, 2018). Une zone est définie comme sèche si son indice d'aridité, ou le rapport entre les précipitations annuelles totales et l'évapotranspiration potentielle, est inférieur à 0,65 (PNUE, 1997). Autrement, elle sera définie comme humide (Trabucco et Zomer, 2018). La Figure 5 illustre cette répartition spatiale à échelle marocaine et mondiale.

<b>Régions sèches (AI &lt; 0,65)</b>	<b>Régions humides (AI &gt; 0,65)</b>
- Régions hyperarides (AI < 0,05)	
- Régions arides (0,05 < AI < 0,2)	
- Régions semi-arides (0,2 < AI < 0,5)	
- Régions subhumides sèches (0,5 < AI < 0,65)	

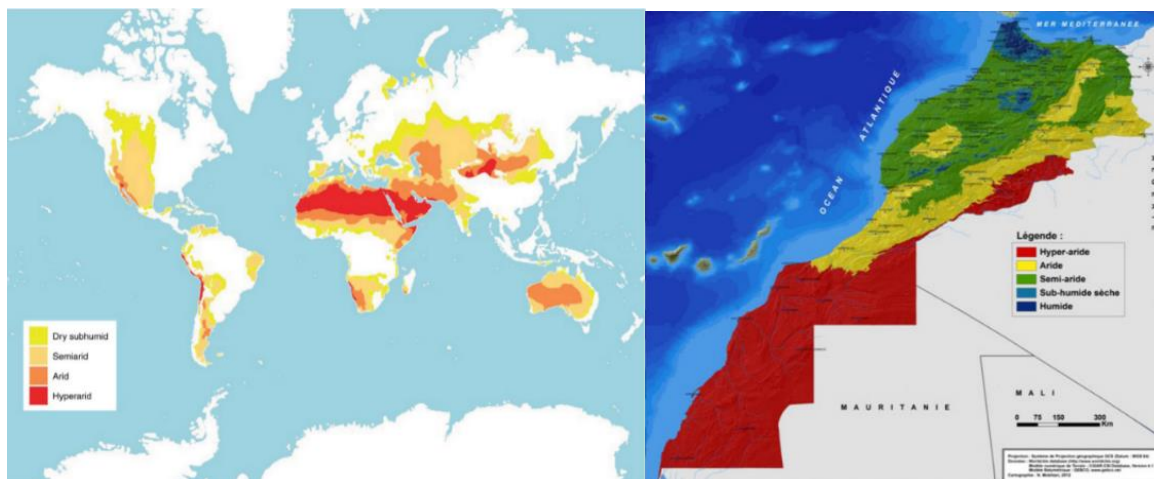


Figure 5 - L'indice UNEP (P/ETP) conformément aux définitions de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) et de la Convention sur la diversité biologique (CBD) à échelle mondiale (UNEP-WCMC, 2007) (Plaza et al., 2018) et à échelle du Maroc (Mokhtari et al., 2014).

Par ailleurs, la FAO a développé l'indice de longueur de la période de croissance (LGP) qu'elle utilise à la place du AI (Plaza et al., 2018). Il permet d'identifier le potentiel de culture des terres en se référant au nombre de jours dans l'année où la température et l'humidité du sol permettent la croissance des plantes (FAO et al., 2012).

- Régions hyperarides (durée de la période de croissance = 0 jour)
- Régions arides (durée de la période de croissance < 60 jours)
- Régions semi-arides sèches (durée de la période de croissance = 60 à 119 jours)
- Régions semi-arides humides (durée de la période de croissance = 120 à 179 jours)

## 6. Cartographie de la dégradation des terres

### 6.1. Evaluation de la dégradation des terres arides (LADA)

Le projet d'évaluation de la dégradation des terres arides (Land Degradation Assessment in Drylands - LADA), développé par la FAO en 2013, vise à établir et à mettre en œuvre une méthodologie complète afin d'évaluer et cartographier la dégradation des terres (Liniger et al., 2013). La collecte d'informations sur l'état des terres est réalisée à l'échelle locale, nationale et mondiale et prend en compte l'état de la dégradation des terres, ses facteurs et ses impacts dans les systèmes d'utilisation des terres (Land Use Systems - LUS) (Liniger et al., 2013).

### 6.2. Zonage à dire d'acteurs (ZADA)

Le Zonage à dire d'acteurs a pour objectif de comprendre les enjeux d'une région et d'obtenir une carte thématique de celle-ci (Saqalli et al., 2008). Cette méthode valorise les connaissances des acteurs locaux et régionaux vivant et travaillant sur le territoire considéré (Clouet, 2000 ; Bonin et al., 2001) tout en pratiquant une approche multisectorielle (Saqalli et al., 2008). Les résultats attendus sont alors visuels, pragmatiques et fonctionnels (Clouet, 2000). De plus, derrière ce processus d'élaboration apparaissent plusieurs intérêts communs en termes de co-construction et d'apprentissage, aussi bien pour les acteurs que pour les chercheurs (Bonin et al., 2001).

### 6.3. Aperçu mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT)

Le World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT) a pour mission de soutenir l'innovation et les processus décisionnels en matière de gestion durable des terres (Sustainable Land Management - SLM) (Liniger et al., 2013). Dans le contexte de WOCAT, la SLM est définie comme « *l'utilisation durable des ressources terrestres (y compris les sols, l'eau, la végétation et les animaux) pour la production de biens répondant à l'évolution des besoins humains, tout en assurant simultanément le potentiel productif à long terme de ces ressources et le maintien de leurs fonctions environnementales* » (Liniger et al., 2013 ; Liniger et al., 2019). WOCAT se concentre sur différentes pratiques ; elles peuvent être indigènes, nouvellement introduites par des projets ou encore être des innovations récentes par les utilisateurs des terres. L'objectif de ces méthodes vise à prévenir et à réduire la dégradation des terres et à restaurer les terres dégradées (Liniger et al., 2019).

## 7. Conclusion

Le Maroc subit des changements climatiques se traduisant par des variations dans les précipitations et une hausse des températures. Ces évolutions présentent des risques croissants pour des écosystèmes vulnérables tels que les oasis. En effet, ces dernières sont de plus en plus exposées à des conditions climatiques sévères, caractérisées par une diminution de la disponibilité en eau et une dégradation des sols. Ces facteurs conduisent à des problèmes de salinisation et menacent les cultures.

Concernant la palmeraie de Skoura, elle a connu une évolution marquée, passant de la prédominance des palmiers dattiers à des menaces biotiques et abiotiques. Des facteurs comme le Bayoud et la sécheresse ont déclenché la première crise agricole. Actuellement, une période prolongée de sécheresse a accentué la crise en impactant la disponibilité d'eau pour l'irrigation. De plus, de nombreux arbres fruitiers font face à des défis liés aux températures. L'agriculture, cruciale dans cette région, devient de plus en plus vulnérable aux effets du changement climatique, avec des répercussions significatives sur les moyens de subsistance des agriculteurs et de leurs familles.

Dans les environnements semi-arides, l'analyse d'images et la détection du couvert végétal reposent sur des indices et des techniques de télédétection adaptés. Des indices comme le NDVI, le SAVI et le MSAVI ont été créés pour minimiser l'influence des variations spectrales du sol. Bien que le NDVI soit courant, il peut être influencé par la signature spectrale du sol et les conditions atmosphériques, limitant son efficacité dans certaines situations. En revanche, le SAVI et le MSAVI se montrent plus robustes dans les environnements à végétation clairsemée. De plus, l'indice de brillance (IB) est crucial pour différencier les zones végétalisées des sols nus, en tenant compte de facteurs comme la couleur, l'humidité et la texture du sol, ce qui en fait un outil précieux pour l'analyse des terrains semi-arides.

La Figure 6 schématise le contexte actuel dans les milieux arides.

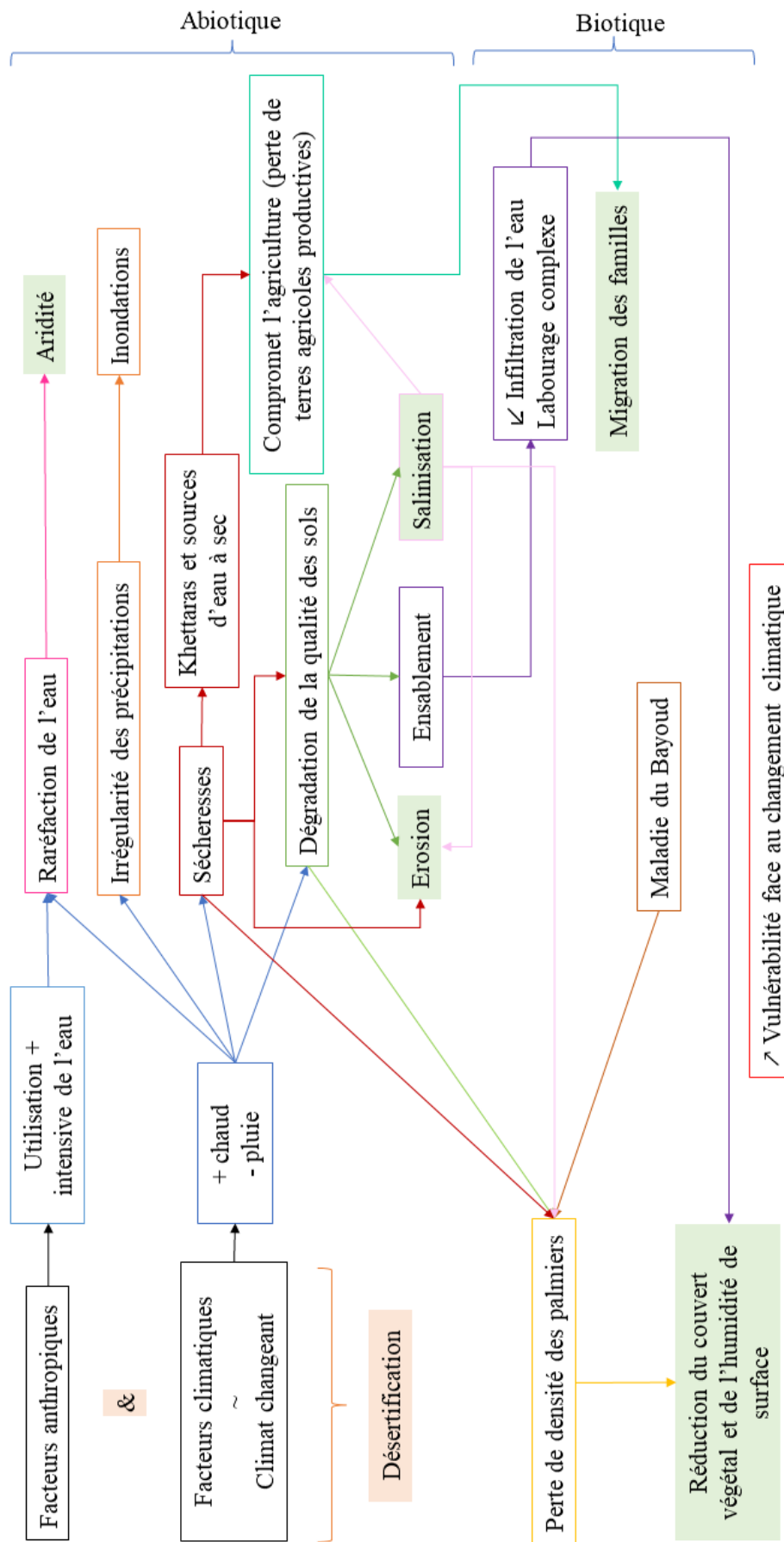


Figure 6 - Chorème du contexte actuel dans les milieux arides.

## Chapitre 2 : Objectifs

Le présent travail vise à réaliser une analyse approfondie de la trajectoire de la dégradation des terres au sein de la palmeraie de Skoura, située au Maroc, sur une période s'étendant depuis l'année 2000 jusqu'à nos jours.

L'objectif principal de cette étude est de cartographier la superficie actuelle des terres dégradées au sein de la palmeraie. Mais également, de suivre cette dégradation dans le temps afin de mieux comprendre l'ampleur du phénomène et de proposer des solutions adaptées pour une gestion durable des terres de Skoura.

Pour atteindre le premier objectif, une méthode de télédétection sera développée et adaptée aux spécificités du système oasien. Cette méthode permettra de cartographier de manière détaillée les zones de dégradation des terres, en utilisant des algorithmes de classification d'objets d'intérêt et de traitement des images satellitaires. La mise en place de cette méthode contribuera à une évaluation actuelle de l'état de dégradation des terres, fournissant ainsi des données pour une gestion efficace des ressources naturelles dans la région.

Ensuite, afin de réaliser un suivi de la dégradation des terres au sein de la palmeraie, des méthodes d'analyse et de traitement de données spatiales seront mises en œuvre. Des données satellitaires provenant de différentes sources seront utilisées pour évaluer les changements de l'occupation des sols sur la période étudiée. Des indicateurs de dégradation tels que la réduction de la végétation, la brillance des sols, et d'autres paramètres pertinents seront pris en compte pour déterminer l'ampleur des terres dégradées dans la région.

Afin d'évaluer la fiabilité et la précision de la méthode de cartographie des terres dégradées développée, une vérification sur le terrain sera entreprise. Des campagnes d'observation et de relevés seront réalisées dans des zones sélectionnées au sein de la palmeraie de Skoura, en comparant les résultats obtenus par la méthode de télédétection avec des données relevées directement sur le terrain. Cette étape de vérification permettra de valider l'exactitude des résultats obtenus.

Finalement, une approche socio-économique basée sur des entretiens auprès des habitants de la palmeraie de Skoura enrichira l'étude en intégrant les perceptions locales depuis le début des années 80, début de la crise agraire. Cela permettra d'élaborer des solutions durables plus adaptées à la réalité des acteurs impliqués.

## Chapitre 3 : Matériels et méthodes

Le chapitre 3 présente la zone d'étude et son contexte (1) ainsi que la méthodologie appliquée pour cette recherche. Celle-ci est détaillée au point (3).

### 1. Zone d'étude

#### 1.1. Situation géographique

La palmeraie de Skoura s'étend sur une superficie d'environ 25 km<sup>2</sup> et se trouve à environ 40 kilomètres au nord-est de Ouarzazate, dans le sud du Maroc. Cette oasis fait partie de la commune de Skoura, qui est rattachée à la province de Ouarzazate, située dans la région du Drâa-Tafilalet.

Le Maroc est traversé du Sud-Ouest au Nord-Est par les chaînes de montagnes des Atlas, avec le Djebel Toubkal se dressant comme le point culminant du Haut Atlas, atteignant une altitude de 4167 mètres. Il est également le sommet le plus élevé de l'Afrique du Nord.

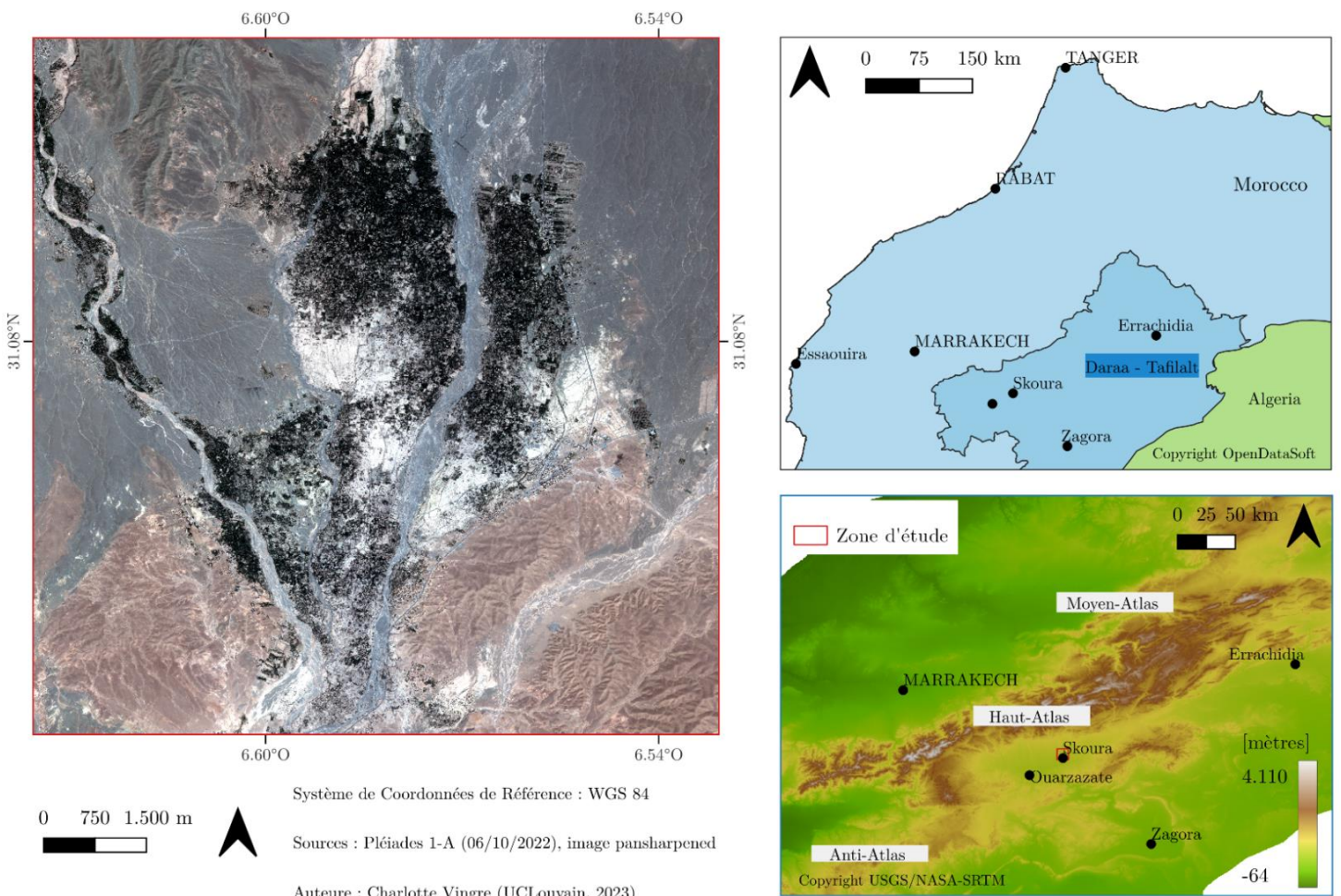


Figure 7 - Localisation de la zone d'étude : palmeraie de Skoura à gauche et massif montagneux de l'Atlas à droite.

## 1.2. Climat

La palmeraie de Skoura est située dans une région au climat aride et désertique typique du sud du Maroc. Les étés sont chauds et secs, avec des températures diurnes dépassant souvent les 35°C. Les hivers sont doux en journée, mais les nuits peuvent être fraîches, avec des températures descendant parfois en dessous de 10°C.

Comme le présente la Figure 8, les précipitations sont rares à Skoura, avec environ 50 mm par an. Elles sont principalement concentrées pendant la période hivernale de novembre à mars.

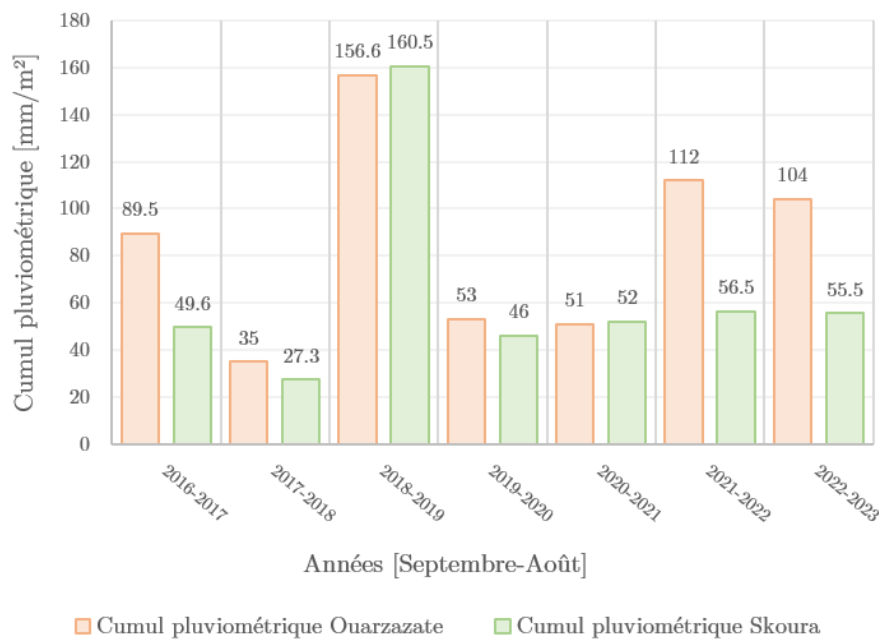


Figure 8 - Cumuls pluviométriques annuels relevés par l'Office régionale de mise en valeur agricole de Ouarzazate entre septembre 2016 et février 2023 pour les villes de Ouarzazate et Skoura (Source : ORMVAO).

## 1.3. Hydrologie

La palmeraie de Skoura est alimentée principalement par l'Oued El Hajaj, un cours d'eau saisonnier qui dépend des précipitations provenant des montagnes environnantes du Haut Atlas et qui se jette en aval dans le Dadès. Cependant, en raison du climat aride de la région, les pluies sont généralement limitées et l'Oued El Hajaj peut être à sec pendant les mois chauds d'été.

Cela limite considérablement les ressources en eau disponibles dans la région de Skoura, rendant l'agriculture difficile, en particulier en l'absence d'autres sources d'eau. L'eau est concentrée en automne et au printemps, mais elle est rare pendant l'hiver et l'été. Cette intermittence de l'eau de surface rend la pratique agricole durable difficile dans la zone.

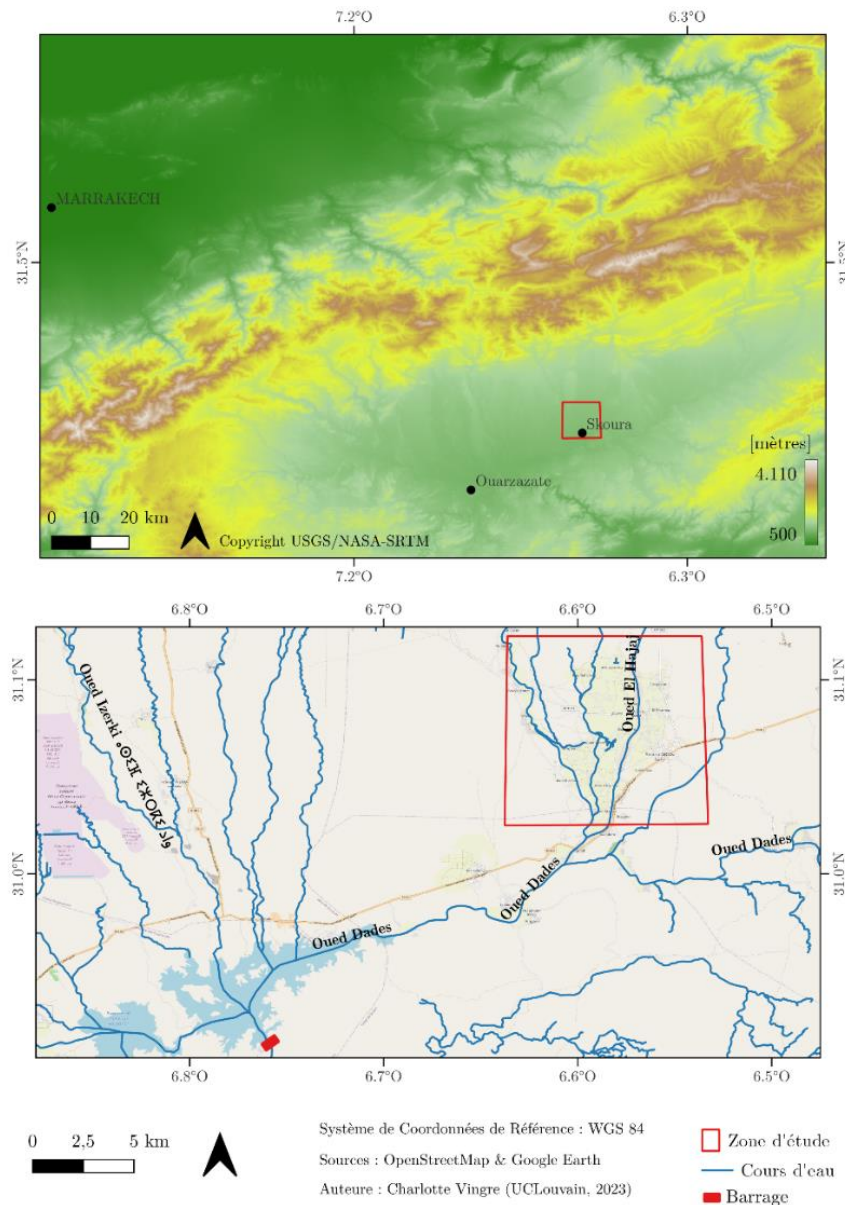


Figure 9 - Hydrologie autour de la région de Skoura & localisation du barrage El Mansour Eddahbi au sud-ouest de la palmeraie.

#### 1.4. Contexte socio-économique

La palmeraie de Skoura est une oasis essentielle pour l'agriculture régionale grâce à son sol fertile. Elle favorise la culture des palmiers dattiers et des oliviers, nécessitant tous les deux beaucoup d'eau pour survivre.

Pour ce faire, les khetaras, qui sont des systèmes traditionnels d'irrigation, jouent un rôle essentiel dans la prospérité agricole. En effet, elles permettent une distribution de l'eau de l'oued vers les parcelles agricoles grâce à des galeries souterraines creusées manuellement. Dès lors, une gestion durable de l'eau est nécessaire face aux défis de la sécheresse et des pressions urbaines.

Finalement, la palmeraie de Skoura présente un habitat dispersé au milieu des terres agricoles. Elle abrite de nombreuses casbahs, grandes maisons en pisé fortifiées avec quatre tours, originellement construites par des familles aisées.

## 2. Logiciels de géomatique

### 2.1. QGIS

QGIS est un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) Libre (Open Source). Il permet notamment la visualisation, l'analyse, la gestion ainsi que l'export de données géospatialisées et la création de cartes.

### 2.2. eCognition

Le logiciel eCognition est un produit commercialisé par la société Trimble. Il a été conçu pour traiter des images satellites, extraire et fusionner des données géospatiales en imitant ainsi les capacités cognitives de l'esprit humain. Parmi ses fonctionnalités, l'algorithme non- supervisé « *multiresolution segmentation* » permet de segmenter une image en identifiant des objets homogènes tout en se basant sur des critères tels que la forme et la similitude spectrale. Il offre également la possibilité de réaliser des classifications et des analyses spatiales en mesurant des paramètres comme la taille et la forme des objets (Trimble Geospatial, 2023).

## 3. Méthodologie générale

La Figure 10 récapitule la méthodologie appliquée tout au long de l'étude. Dans un premier temps, les relevés sur le terrain et les images satellites ont servi à caractériser les terres de Skoura (4.1). Simultanément, l'utilisation des images satellites Landsat et Pléiades ainsi que des points GPS collectés a permis d'analyser l'évolution de la dynamique des terres au sein de la palmeraie de Skoura (6.1). Finalement, les enquêtes menées parmi les habitants de la palmeraie ont été essentielles pour évaluer la situation socio-économique de la zone, saisir leur vision des changements, les répercussions sur la terre et l'agriculture, ainsi que les ajustements mis en place par la population locale (4.2).

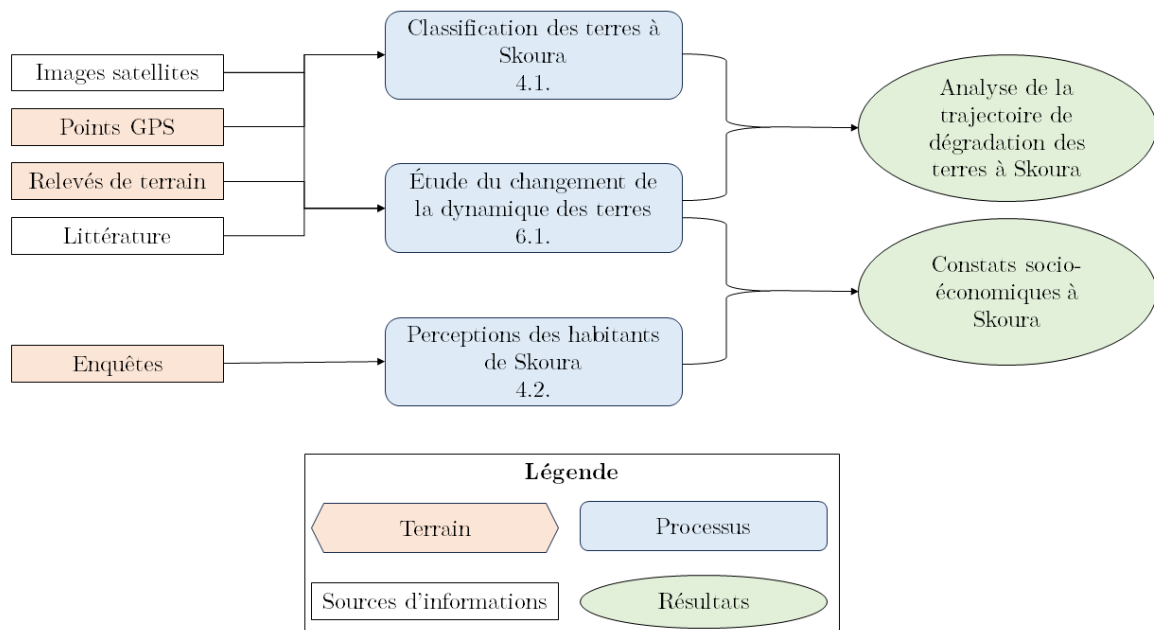


Figure 10 - Méthodologie générale du mémoire.

#### 4. Données et méthodologie de terrain

En mars 2023, un séjour sur site a été réalisé et visait à prospector la zone d'étude, décrire les états de dégradation de la palmeraie et du sol (densité de la végétation, érosion et salinité du sol, etc.) et servir comme relevés d'entraînement et de validation (voir Annexes 1 et 2) pour la cartographie.

Parallèlement, des enquêtes ont été menées auprès des habitants de la palmeraie de Skoura pour comprendre leurs perceptions et actions face au changement climatique survenu au cours des 20 dernières années. Cette approche multidisciplinaire offre une perspective complète pour analyser les interactions entre l'environnement et la société dans cette région en évolution.

##### 4.1. Échantillonnage

Au cours des deux semaines de mission, un total de 49 relevés a été enregistré, focalisant l'analyse sur des parcelles d'environ 100m<sup>2</sup>, avec une zone d'environ 6 mètres de rayon, présentant une certaine homogénéité.

Cependant, il est important de noter que la planification préalable d'une stratégie d'échantillonnage n'a pas été possible avant le voyage. Par conséquent, les points ont été collectés en suivant une méthode d'échantillonnage raisonnée. Cette approche de sélection d'échantillons garantit la représentativité en suivant une démarche réfléchie. La méthode d'échantillonnage raisonnée la plus couramment utilisée et reconnue est

la méthode des quotas. Dans ce cas d'étude, l'utilisateur prend en considération la représentativité des différents stades de dégradation ou de gestion de la palmeraie.

En effet, les contraintes logistiques ont façonné l'approche sur le terrain. Les déplacements se sont effectués à pied, en voiture, à moto et en taxi local afin de couvrir au mieux l'ensemble de la palmeraie, ainsi que ses divers types de sols, de végétation, de l'occupation et de l'utilisation des terres. Chacun des déplacements était guidé par les résidents, qui avaient à cœur de faire découvrir leur région : un délégué de la commune ; Abdel Hadi, un membre de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate ; Youssef, le fils d'un habitant et agriculteur de Skoura ; Elhamidi, ainsi qu'un habitant et un guide touristique ; Yassin.

Sur chaque parcelle, les coordonnées géographiques de l'échantillonnage ont été enregistrées grâce à un GPS Garmin GPSMAP 62S, tout en veillant à assurer une couverture exhaustive de la délimitation de la palmeraie. La fiche de relevés, qui a été utilisée pour rassembler les observations, est disponible en Annexe 1, fournissant ainsi une matérialisation concrète de la méthodologie employée.



Figure 11 - Relevés de terrain : 1) Fleury, mon binôme, 2) Des motos, un moyen de déplacement parmi tant d'autres au sein de la palmeraie, 3) Collecte d'un point GPS et remplissage de la fiche descriptive du sol.

#### 4.2. Données relevées sur la fiche terrain

La fiche terrain a été élaborée en s'appuyant sur deux références essentielles :


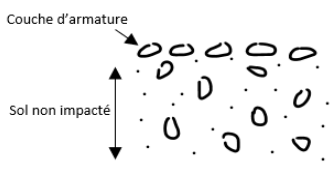
- FAO (2016) : « *Manual for Local Level Assessment of Land Degradation and Sustainable Land Management - Part 2 : Field methodology and tools* » ;
- Godron et al. (1969) : « *Vade-mecum pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu* », est un extrait du « *code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu* ». Éditions du centre national de la recherche scientifique.

Ces deux références ont été des piliers méthodologiques pour garantir la rigueur des relevés effectués sur le terrain par la suite.

La fiche de terrain comprenait onze critères qui ont permis une évaluation détaillée des caractéristiques de chaque station. Le Tableau 1 reprend de manière détaillée les différents indices de terrain et leurs critères associés.

Tableau 1 - Détails des indices de terrain.

Indices	Critères	Explications supplémentaires
Occupation de la station : degré d'ouverture de la végétation ligneuse (pérenne)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fermé (recouvrement global &gt; 90%)</li> <li>2. Peu ouvert (recouvrement global entre 75% et 90%)</li> <li>3. Semi-ouvert (recouvrement global entre 50% et 75%)</li> <li>4. Ouvert (recouvrement global entre 25% et 50%)</li> <li>5. Très ouvert (recouvrement global entre 10% et 25%)</li> <li>6. Extrêmement ouvert (recouvrement global &lt; 10%)</li> <li>7. Totalement ouvert (recouvrement global nul)</li> </ol>	
Influence de l'homme : degré d'artificialisation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Terres au repos</li> <li>2. Terres abandonnées</li> <li>3. Artificialisation assez faible : terres cultivées et entretenues</li> </ol>	
Caractère de la surface du sol : éléments constitutifs de la surface du sol	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Roche dure et blocs : particules &gt; 20cm</li> <li>2. Pierrailles : particules entre 2mm et 20cm de diamètre (graviers et cailloux)</li> <li>3. Terre fine : particules &lt; 2mm (MO fine aussi)</li> <li>4. Végétation : recouvrement basal (base de touffes, troncs, collets)</li> <li>5. Litière : débris d'organismes végétaux et animaux</li> </ol>	<p>Il faut imaginer la végétation à la surface du sol rasée à quelques centimètres au-dessus du sol. Le sol se retrouve occupé par les éléments ci-contre et le % de chaque élément est estimé et indiqué.</p> <p>Au total, on doit avoir 100% de recouvrement par parcelle analysée.</p>
Types de litière	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pas de litière</li> <li>2. Type I : Litières foliacées denses : feuilles formant un tapis dense et continu à la surface du sol, peu de place entre elles</li> <li>3. Type II : Litières foliacées aérées : feuilles ou aiguilles formant un tapis continu mais aéré à la surface du sol permettant à l'air de circuler librement</li> <li>4. Type III : Litières ligneuses : morceaux de bois (branches, brindilles) ou écorce ne formant pas de tapis continu à la surface du sol</li> <li>5. Type IV : Débris transformés par les animaux : débris d'origine animale (bouses, crottes)</li> </ol>	

Etude édaphique : texture	Famille	Séquence dimensionnelle	Genre	Tribus
	Fine	0 - 2 $\mu\text{m}$	Argiles (A)	Poudres
		2 - 50 $\mu\text{m}$	Limons (L)	
		50 - 2000 $\mu\text{m}$	Sables (S)	Sables
	Grossière	2 - 20 mm	Graviers (G)	Pierrailles
		2 - 20 cm	Pierres (P)	
Très grossière	20 - >100 cm		Blocs	
Etude édaphique : structure	0 : Conditions pauvres 1 : Conditions modérées 2 : Bonnes conditions		 Distribution de la taille des agrégats	
Types d'érosion	S : Erosion sur nappe (Sheet) R : Erosion en rigole (Rill) : jusqu'à 30cm de profondeur et largeur G : Erosion ravinante (Gully) : 30cm – 2m de profondeur et largeur A : Ravin : > 2m profondeur et largeur N : Pas d'érosion			
Etat actuel de l'érosion et son étendue	3 Active : l'élément d'érosion augmente en taille 2. Partiellement stabilisé : entre actif et stable 1. Stable : élément d'érosion plus récent pour lequel des interventions anthropogéniques récentes (digues de contour ou changement dans la gestion des terres) ont ralenti ou arrêté l'érosion. 0. Diminue		Concerne l'activité actuelle de l'érosion	
	0. Négligeable (0-2%) 1. Localisée (3-15%) 2. Modérée (16-30%) 3. Etendue (31-50%)		Concerne l'étendue de l'érosion	
Couche d'armature	<input type="checkbox"/> Oui : épaisseur : __ mm <input type="checkbox"/> Non			
Degré de salinité	<i>S0</i> : Pas de salinité : aucune végétation ne semble affectée par la salinité <i>S1</i> : Légèrement salin : présence d'espèces tolérantes au sel et diminution des espèces locales. Pas de taches salines nues ni de taches/cristaux de sel sur le sol nu. <i>S2</i> : Modérément salin : les espèces tolérantes au sel commencent à dominer la communauté végétale et toutes les plantes sensibles au sel sont nettement affectées. De petites zones dénudées allant jusqu'à 1m <sup>2</sup> peuvent être présentes			

	<p>et des taches/cristaux de sel peuvent être visibles sur le sol.</p> <p><i>S3 : Hautement salin</i> : seules les plantes tolérantes au sel restent intactes. De grandes zones salines dénudées peuvent apparaître, présentant des taches ou des cristaux de sel ou le sol supérieur peut être fleuri ou gonflé.</p> <p><i>S4 : Extrêmement salin</i> : seules les plantes très tolérantes au sel survivent. Les arbres sont morts ou dépérissent. Les zones salines dénudées sont étendues et présentent des taches ou des cristaux de sel.</p>
Plantes indicatrices	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Tamarix gallica : arbuste adapté au climat méditerranéen et au sel</li> <li><input type="checkbox"/> Haloxylon scoparium (Hammada scoparia) : plante indicatrice de milieu aride, salinité, etc.</li> </ul>

Pour offrir une meilleure visualisation des différents critères, des explications supplémentaires ainsi que des photographies de terrain sont fournies après ces lignes.

Le premier critère abordait le degré d'ouverture de la station, déterminé par la présence de végétation ligneuse pérenne. Par exemple, un recouvrement global supérieur à 90% indiquait une terre entretenue et non dégradée, car elle réussissait à remplir ses fonctions écosystémiques.

Le deuxième critère se penchait sur l'influence humaine sur la parcelle, distinguant les terres abandonnées, en repos et entretenues. Cette distinction, parfois difficile à percevoir, était souvent facilitée par nos accompagnateurs locaux.

Le troisième critère portait sur l'état de la surface du sol, en mettant l'accent sur la proportion d'éléments qui la compose : roche, pierraille, terre fine, végétation ou litière. Si de la litière était présente, le quatrième critère permettait de qualifier plus précisément son type.

Les cinquième et sixième critères concernaient la structure (agencement des éléments minéraux et de la matière organique) et la texture (granulométrie en éléments fins : argile – limon – sable) du sol. Nous avons prélevé et analysé des échantillons de sol pour évaluer ces caractéristiques.

Les septième et huitième critères portaient sur le type et l'étendue de l'érosion du sol. Nous avons observé différentes formes d'érosion, telles que l'érosion en nappe, en rigole ou en ravine, ainsi que des combinaisons de ces phénomènes.



Figure 12 – Formes de l'érosion hydrique observées dans la palmeraie de Skoura : 1) Erosion en nappe, 2) Erosion en rigole, 3) Erosion en ravine, 4) Combinaison d'érosion en rigole et en ravine.

Le neuvième critère examinait la présence éventuelle d'une couche d'armature. Lorsque le sol subit un processus d'érosion, les particules les plus fines sont emportées, laissant en place celles de plus grande taille, des petits cailloux dans le cas de la palmeraie de Skoura. Cela entraîne le compactage du sol, formant ainsi une couche superficielle plus dense, d'une certaine épaisseur. Cette couche, connue sous le nom de couche d'armature, se caractérise par sa compacité et sa hauteur spécifique. En cas de présence, son épaisseur était mesurée en millimètres.

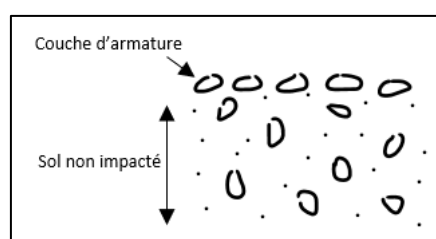


Figure 13 - Illustration d'une couche d'armature.

Le dixième point abordait la salinité du sol. Les traces de sel observables permettaient de classer le sol en quatre catégories de salinité différente en fonction de leur importance et de leur étendue.

Enfin, le onzième critère portait sur la présence de plantes indicatrices des états de forte dégradation du milieu (espèces invasives et halophytes), telles que le *Tamarix gallica* et le *Hammada scoparia*, également appelé *Haloxyylon scoparium*.

Le *Tamarix* s'établit aisément dans des environnements abandonnés et non entretenus. Bien qu'il fasse naturellement partie de l'écosystème de type steppe dans la région, il tend à devenir rapidement envahissant lorsque cet écosystème est altéré par la dégradation, ou lorsque l'activité agricole, qui contrôlait son expansion, diminue sur des terres laissées à l'abandon.

*Hammada scoparia* est une espèce propre aux zones arides qui indique des environnements fortement dégradés. Son apparition correspond généralement aux stades avancés de dégradation de l'écosystème et indique une concentration élevée de sel dans le sol.

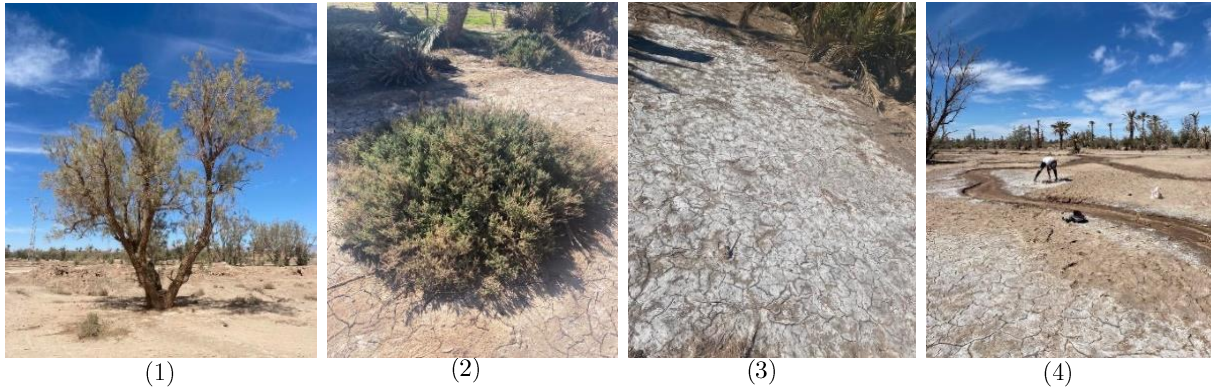


Figure 14 – Indicateurs d'un milieu aride et salin : 1) *Tamarix gallica*, 2) *Hammada scoparia*, 3-4) Traces visibles de sel sur les terres.

Ces critères combinés ont offert une vision approfondie des spécificités de chaque station au sein de la palmeraie et ont permis de classer les terres en 4 catégories :

- 1) **Pas de dégradation** : la terre est entretenue et cultivée. Les 3 strates sont présentes : la strate herbacée avec principalement de la luzerne, la strate arbustive composée majoritairement d'oliviers mais également d'autres arbres fruitiers et finalement la strate arborescente constituée de palmiers dattiers. Le sol est brun et meuble.
- 2) **Dégradation faible** : la terre est entretenue, mais pas toujours cultivée. Les oliviers et palmiers dattiers occupent l'espace mais la strate herbacée, composée de cultures annuelles et de maraîchage, est absente. Le sol est encore brun et meuble.
- 3) **Dégradation avancée** : la terre est abandonnée depuis plus de 5 ans. Quelques oliviers et palmiers dattiers sont encore sur pieds. Par ailleurs, les contours des parcelles aménagées avec des billonnages sont encore visibles. Le sol devient compact, lisse et brillant.
- 4) **Dégradation complète** : la terre est abandonnée depuis des années. Les quelques oliviers et palmiers dattiers restants dépérissent sur pied. De plus, les délimitations des parcelles ne sont plus visibles. Le sol est compact et brillant.



Figure 15 - 4 catégories de classification : 1) Pas de dégradation, 2) Dégradation faible, 3) Dégradation avancée, 4) Dégradation complète.

Ces données serviront également de références pour vérifier la cartographie produite.

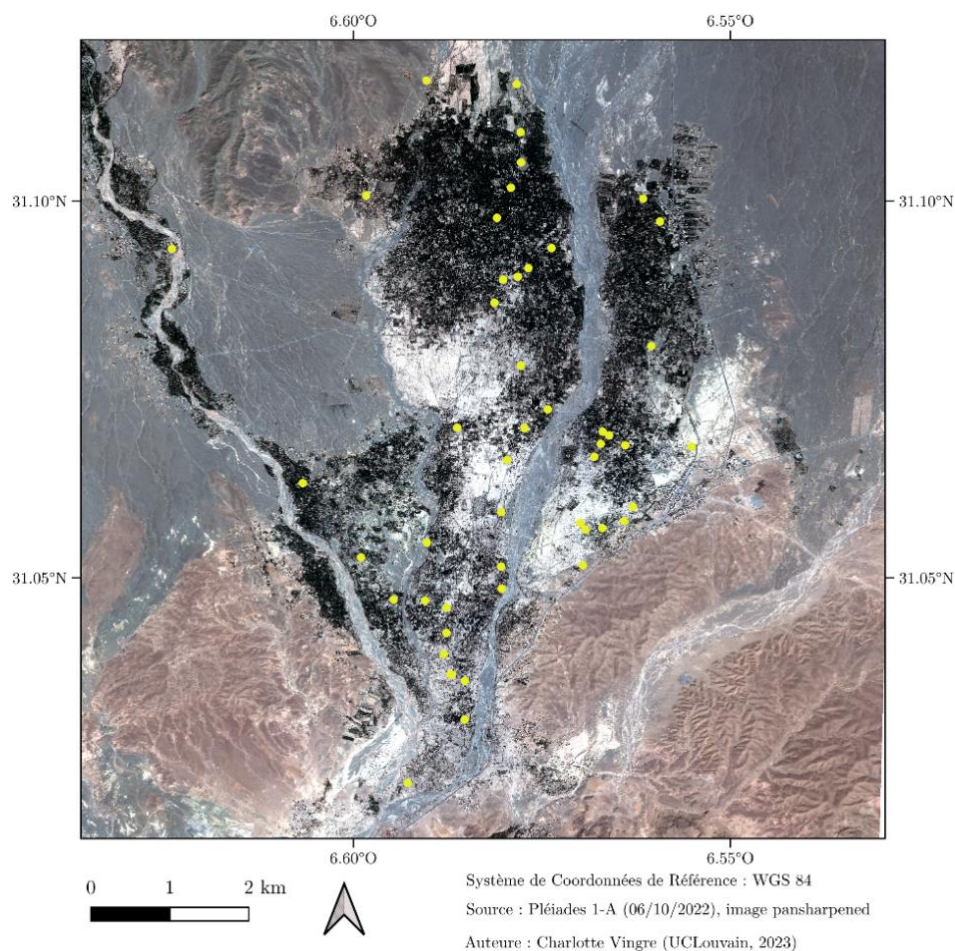


Figure 16 - Palmeraie de Skoura et les 49 points GPS relevés.

### 4.3. Enquêtes auprès des habitants de Skoura

En parallèle, une approche socio-économique complémentaire a été adoptée afin de mieux appréhender l'impact de la dégradation des terres sur la communauté agricole locale. Des entretiens ont été réalisés avec les agriculteurs de la palmeraie de Skoura, leur donnant l'opportunité d'exprimer leur expérience et leurs perceptions quant aux

changements qu'ils ont observés au cours des dernières années. Ces échanges ont permis de recueillir des connaissances essentielles sur la manière dont les agriculteurs ont vécu le phénomène de dégradation, les défis auxquels ils ont dû faire face, ainsi que leurs adaptations et stratégies pour maintenir leurs activités agricoles durables malgré les contraintes environnementales.

Cette approche, contribue à enrichir la compréhension globale de la dégradation des terres au sein de la palmeraie, en prenant en compte les dimensions humaines et culturelles qui interagissent avec les évolutions environnementales. Les perspectives des agriculteurs fournissent des informations précieuses pour élaborer des politiques et des mesures de gestion qui soient mieux adaptées aux réalités locales et qui intègrent les aspirations et les préoccupations des acteurs locaux. En combinant cette approche sociétale à l'analyse des terres, l'étude permet ainsi de brosser un portrait complet de la dégradation des terres de la palmeraie de Skoura et d'orienter vers des solutions durables et inclusives pour préserver cette région du Maroc.

Pour mener à bien cette quête, un questionnaire a été élaboré, auquel des habitants de la palmeraie de Skoura ont répondu. La conception du questionnaire s'est appuyée sur des références documentaires. Le contenu en tant que tel a été élaboré en s'appuyant sur le « *Land Degradation Assessment in Drylands – LADA project. Questionnaire for mapping land degradation and sustainable land management. Version 2* ». Tandis que la méthodologie s'est mise en place grâce à « *WOCAT - World Overview of Conservation Approaches and Technologies Questionnaire on Sustainable Land Management (SLM) Technologies 2019 Edition* ».

Parallèlement à cela, une série de témoignages a été recueillie, bien que la fiche ne soit pas systématiquement complétée. Cette lacune trouve son origine dans la difficulté engendrée par la barrière linguistique. Les habitants de Skoura s'expriment en arabe dialectal marocain, le darija, et l'obtention d'un interprète s'est avérée complexe. En outre, au-delà de cette difficulté linguistique, certains termes scientifiques employés n'ont pas toujours été compris. Ce vocabulaire, plutôt technique, combiné à la barrière de la langue, a entravé le bon déroulement de cette phase. Cependant, puisque cette partie sert de complément à l'analyse de la dégradation des terres et de sa projection future, son impact sur l'étude en tant que telle reste limité.

Au total, quatre hommes ont été interrogés, parmi lesquels un propriétaire de papeterie, un professeur d'anglais, un tailleur et un accompagnateur touristique. À l'exception de ce dernier, tous sont également agriculteurs dans la palmeraie de Skoura. Le choix de ces participants s'est basé sur divers critères : leur maîtrise du français, leur disponibilité, leurs liens amicaux avec les personnes accompagnatrices, ainsi que leur connaissance approfondie de la palmeraie et de la région sur plusieurs années. En effet, solliciter l'opinion d'un jeune de 15 ans n'aurait pas été judicieux étant donné qu'il n'a pas une perspective à long terme de la palmeraie et n'est pas encore suffisamment impliqué dans l'agriculture pour contribuer de manière pertinente à l'étude. Cette méthodologie porte le nom de « zonage à dires d'acteurs ».

Le questionnaire, disponible en annexe, avait pour objectif de saisir les perceptions des locaux autour des tendances dans l'évolution du système d'utilisation des terres dans la palmeraie de Skoura au cours des vingt dernières années, en prenant en compte les changements, les ajustements, les défis, les réponses et les impacts résultant de la pénurie d'eau et de l'aridité prévalant dans la palmeraie.

Dans cette optique, le questionnaire a été structuré en trois parties distinctes :

- Première section : informations personnelles des participants.
- Deuxième section : informations sur le système d'utilisation des terres, englobant des aspects tels que les tendances de la couverture végétale sur vingt ans, l'évolution de la structure et de la densité des trois strates de la palmeraie, l'intensité des pratiques agricoles et un volet additionnel portait sur l'adoption de nouvelles méthodes agricoles.
- Troisième section : informations sur la dégradation des terres causée par le système d'utilisation des terres. Cette section analysait les diverses formes de dégradation observées au sein de la palmeraie, tout en explorant les causes directes et indirectes sous-jacentes à cette dégradation.

#### 4.4. Rapports et documents internes de l'ORMVAO

Afin de simplifier l'accès à la zone d'étude et aux données régionales, mon co-promoteur de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech m'a mise en relation avec l'Office Régionale de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate (O.R.M.V.A.O). Cette démarche a rendu plus aisé l'accès aux données pluviométriques régionales ainsi qu'aux explications concernant la gestion du barrage El Mansour Eddahbi, situé à une vingtaine de kilomètres au Sud de la ville de Ouarzazate, et de la répartition de

l'eau autour de la ville de Ouarzazate. De plus, l'équipe de l'Office a souhaité accompagner les visites dans la palmeraie de Skoura, ce qui a facilité la prise de notes sur le terrain.

## 5. Données satellites

Deux sources de données satellitaires ont été sélectionnées pour enrichir l'analyse. D'une part, l'archive Landsat, composée d'images optiques remontant à 1972, permet de construire une série temporelle sur une période de 20 ans. Cela offre la possibilité de suivre l'évolution de la végétation et de l'état de dégradation des terres depuis le début de la période de stress hydrique jusqu'à aujourd'hui. Et d'autre part, les images Pléiades, grâce à leur haute résolution spatiale, permettent une évaluation détaillée de l'état de la palmeraie.

Les images satellites utilisées ont été acquises entre début juillet et début octobre. Cela coïncide avec l'une des périodes de croissance les plus actives de la luzerne, la seconde étant au printemps. Il est bon de rappeler que la luzerne, une plante herbacée vivace, tolère bien les niveaux de salinité élevés de la région.

### 5.1. Landsat

Depuis 1972, les satellites Landsat enregistrent continuellement des images de la surface de la Terre, fournissant des données qui facilitent la prise de décision concernant l'utilisation des ressources naturelles et la protection de l'environnement.

Afin de comprendre l'évolution de la dynamique des terres de la palmeraie de Skoura sur les vingt dernières années, deux satellites Landsat ont été utilisés. En effet, Landsat 7 permet de remonter jusqu'aux années 2000, tandis que Landsat 8 fournit des images de qualité supérieure à partir de 2013. La combinaison de ces deux satellites s'est donc avérée être la solution optimale.

Elles ont été obtenues grâce à l'interface de recherche pour les données Landsat : EarthExplorer - United States Geological Survey (USGS). Les images y sont téléchargeables gratuitement et le site est en libre accès.

*Tableau 2 - Images Landsat et leur date d'enregistrement et de production respective.*

Satellite	Date d'acquisition	Date de production
Landsat 7	5 juillet 2000	18 septembre 2022
Landsat 8	8 octobre 2014	11 septembre 2020
Landsat 8	10 juillet 2022	22 juillet 2022

### 5.1.1. Landsat 7

Landsat 7 a été lancé en avril 1999, il tourne autour de la Terre à une hauteur de 705 km et réalise un tour complet de la Terre toutes les 99 minutes. Son cycle de répétition, soit la période nécessaire pour que le satellite retrouve sa position initiale dans son orbite, s'étend sur 16 jours (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2021).

Tableau 3 - Bandes spectrales Landsat 7 (United States Geological Survey (USGS), s. d.).

Bandes spectrales Landsat 7	Résolution spatiale
Bande 1 – Bleu (0.45-0.52 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 2 – Vert (0.52-0.60 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 3 – Rouge (0.63-0.69 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 4 – Proche Infrarouge (0.77-0.90 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 5 – Infrarouge à ondes courtes (1.55-1.75 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 6 – Thermique (10.4-12.50 $\mu\text{m}$ )	60 m
Bande 7 – Infrarouge moyen (2.08-2.35 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 8 – Panchromatique (PAN) (0.52-0.90 $\mu\text{m}$ )	15 m

### 5.1.2. Landsat 8

Landsat 8 a été lancé en février 2013, il tourne autour de la Terre à une hauteur de 705 km et réalise un tour complet de la Terre toutes les 99 minutes. Son cycle de répétition, tout comme celui de Landsat 7, est de 16 jours (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2021).

Tableau 4 - Bandes spectrales Landsat 8 (United States Geological Survey (USGS), s. d.).

Bandes spectrales Landsat 8	Résolution spatiale
Bande 1 – Aérosol côtier (0.43-0.45 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 2 – Bleu (0.45-0.51 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 3 – Vert (0.53-0.59 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 4 – Rouge (0.64-0.67 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 5 – Proche infrarouge (0.85-0.88 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 6 – SWIR 1 (1.57-1.65 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 7 – SWIR 2 (2.11-2.29 $\mu\text{m}$ )	30 m
Bande 8 – Panchromatique (PAN) (0.50-0.68 $\mu\text{m}$ )	15 m
Bande 9 – Cirrus (1.36-1.38 $\mu\text{m}$ )	30 m

## 5.2. Pléiades

L'utilisation des images Pléiades offre une résolution remarquable dans la perception des divers éléments grâce à leur résolution spatiale élevée. Dans le cas de la palmeraie de Skoura, cette haute résolution se révèle indispensable pour discerner les palmiers,

les cultures annuelles et les différentes natures de sol. En raison de la sécheresse sévissant dans la région depuis une vingtaine d'années, certaines parcelles sont abandonnées, conduisant ainsi à un sol sec et réfléchissant faute d'humidité. Les images Pléiades permettent une discrimination fine entre les teintes variées du sol, facilitant ainsi la segmentation de la zone d'étude en espaces suffisamment homogènes pour calculer les valeurs moyennes de réflectance au sein de chaque polygone. De plus, dans le but de distinguer les zones de végétation au sein de la palmeraie, une bande infrarouge est impérative.

Pléiades est un couple de deux satellites, Pléiades 1A et 1B, qui fonctionnent sur la même orbite à 180° l'un de l'autre (Airbus Defence and Space Intelligence, 2023). Ils ont spécialement été développés pour permettre une télédétection de très haute résolution dans des secteurs tels que la cartographie, l'agriculture, la foresterie, l'hydrologie et la prospection géologique. Pléiades 1A a été lancé en décembre 2011 et Pléiades 1B en décembre 2012 (European Space Agency, s. d.).

Une image Pléiades est composée d'une bande panchromatique (PAN) en noir et blanc acquise par un instrument à 70 cm de résolution puis rééchantillonnée à 50 cm et d'une image multispectrale (MS) (4 bandes : visible et proche infrarouge) à 2.8 m de résolution et rééchantillonnée à 2 m. La fusion des deux permet d'obtenir une seule image à 4 bandes à 50 cm de résolution (Dinamis DataTerra, 2020).

Dans le cadre de cette étude, l'acquisition de l'image Pléiades 1A a été commandée pour ce travail auprès d'Airbus Defence & Space en octobre 2022. Et plus précisément, l'image date du 6 octobre 2022 et sa production du 12 octobre 2022.

*Tableau 5 – Bandes spectrales Pléiades (Dinamis DataTerra, 2020).*

Bandes spectrales Pléiade	Résolution spatiale
Bande 1 – Bleu (430–550 nm)	2 m
Bande 2 – Vert (500–620 nm)	2 m
Bande 3 – Rouge (590–710 nm)	2 m
Bande 4 – Proche infrarouge (740–940 nm)	2 m
Bande 5 – Panchromatique (PAN) (470–830 nm)	0.5 m

*Tableau 6 - Distinction entre le multispectral & le panchromatique.*

Multispectral	Panchromatique
4 bandes spectrales (B, R, V, PIR)	1 seule bande spectrale
Couleur	Noir et blanc
Résolution : 2 m	Résolution : 50 cm

## 6. Méthodes de traitement et analyse des données

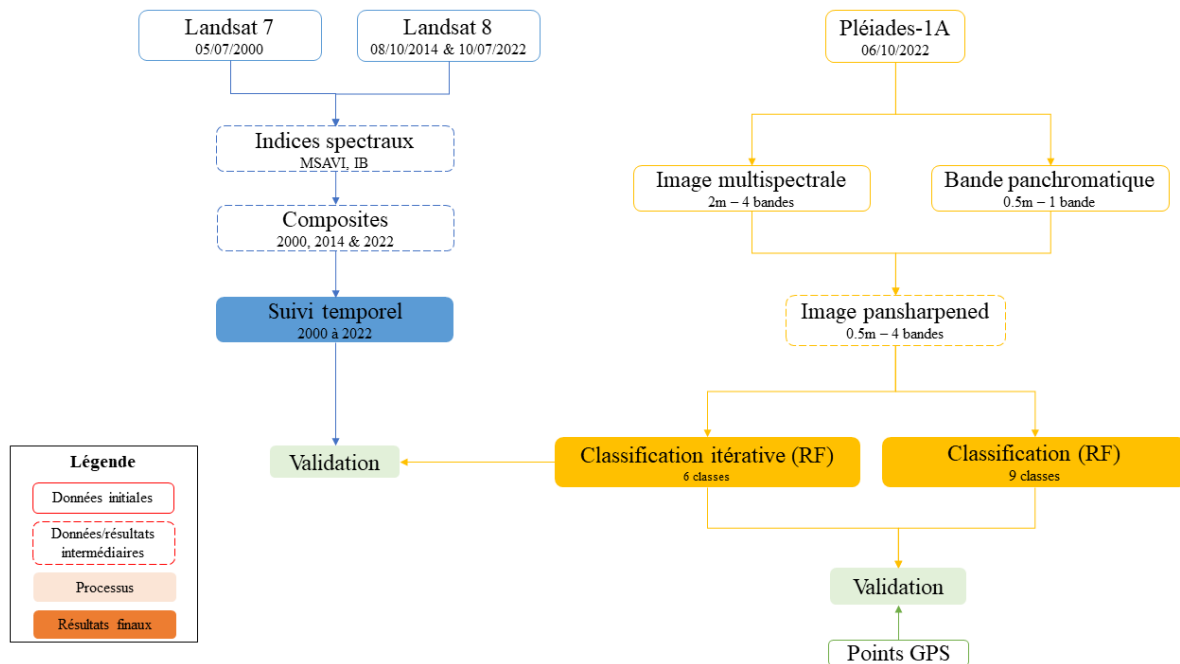


Figure 17 - Méthodologie de traitement et analyse des données.

### 6.1. Classification des états de dégradation

Pour être pleinement exploitable, l'image Pléiades devra subir un processus appelé Pansharpening. Cela vise à obtenir une image offrant une qualité spectrale et spatiale optimale. Ensuite, elle sera soumise à une segmentation pour générer des polygones qui présentent des caractéristiques relativement homogènes. L'usage de l'image Pléiades se révèle particulièrement précieux pour obtenir une vision détaillée de la palmeraie, permettant ainsi de la connaître au mieux, de s'acclimater au terrain et d'acquérir une connaissance approfondie de la région.

Par ailleurs, les trois images Landsat téléchargées offrent la possibilité d'observer l'évolution temporelle de la végétation et de l'état du sol sur une période d'environ vingt ans dans la zone d'étude. Le satellite Landsat 7 fournit une image de la situation en 2000, coïncidant avec le début de la sécheresse qui touche la région de Skoura. Landsat 8 permet d'obtenir des images datant de 2014 et de 2022. En les combinant, elles permettent de suivre les changements dans la dynamique des terres.

Des indices de végétation et de brillance seront calculés sur l'ensemble de la zone pour évaluer la dégradation des sols. Cela permettra ensuite de classer la zone en différentes catégories. L'objectif est de créer une carte afin d'établir l'étendue des zones dégradées par rapport à celles qui ne le sont pas.

### 6.1.1. Traitement des images

#### A. Découpage de la zone d'étude

Deux délimitations de la zone d'étude ont été effectuées : la première, de forme rectangulaire, englobe une zone plus vaste, tandis que la seconde délimite de manière plus rigoureuse les frontières de la palmeraie. Ces délimitations ont été créées à l'aide de shapefiles générés à partir de Google Earth. Ces fichiers de polygones ont ensuite été utilisés pour localiser et délimiter la zone d'étude tout au long du projet.

#### B. Pansharpening

La réalisation de ce qui est appelé « pansharpening » permet de générer une image avec la même résolution spatiale des données panchromatiques et la même résolution spectrale de l'image multispectrale donnant ainsi une image à 50 cm de résolution en multispectral (4 bandes).



Figure 18 - Pansharpening réalisé sur QGIS. (a) Image à 2 m, (b) Image à 0.5 m, (c) Image pansharpened à 0.5 m (Charlotte Vingre, 2023).

#### C. Segmentation

Comme mentionné précédemment, le logiciel eCognition permet de segmenter des images satellites en une multitude de polygones homogènes selon des critères prédéfinis. La segmentation multispectrale est non-supervisée, c'est-à-dire que le logiciel n'a pas de connaissance préalable des catégories et organise les données en groupes homogènes.

L'image Pléiades pansharpened a été intégrée dans eCognition et les paramètres clés (paramètre d'échelle, de forme et compacité) ont été sélectionnés par essais et erreurs jusqu'à ce qu'une segmentation satisfaisante soit obtenue.

Il était essentiel que les objets aient une taille suffisante pour ne pas isoler chaque arbre, tout en restant assez petite pour respecter au mieux les limites des parcelles

agricoles et éviter la création de zones trop grandes et trop hétérogènes. La valeur de 400 a été choisie à cet effet. De plus, la couleur joue un rôle crucial dans l'identification des zones dégradées. Après plusieurs itérations, le paramètre de forme a été fixé à 0.5. Finalement, la fluctuation du paramètre de compacité avait un impact limité et entraînait une variation beaucoup moins importante du résultat final de la segmentation, c'est pourquoi la valeur de 0.5 a été choisie.

#### D. Série tri-chronique de la palmeraie de Skoura

Pour faciliter la visualisation et l'analyse des données Landsat, trois compositions colorées ont été générées, chacune correspondant à une image spécifique (2000, 2014 et 2022). Pour réduire la charge de données, les régions d'intérêt de chaque satellite ont été extraites en utilisant la zone d'étude préalablement définie comme couche de masque.

En effet, lors de l'affichage d'une image en fausses couleurs infrarouge, la bande rouge peut être remplacée par celle du proche infrarouge dans la combinaison des canaux. Dès lors, une image en vraies couleurs utilisera les canaux Rouge, Vert et Bleu (RVB), tandis qu'une image en fausses couleurs utilisera, dans ce cas-ci, le Proche Infrarouge, Vert et Bleu (PIRVB).

De plus, il est essentiel de souligner que, lors de l'observation de la végétation par satellite, des pics de réflectance sont détectés dans les canaux vert et proche infrarouge. Ce phénomène est directement lié à la photosynthèse : la chlorophylle absorbe principalement les ondes bleues et rouges pour la photosynthèse. Par ailleurs, la forte réflectance dans le proche infrarouge est due à la structure interne des feuilles qui réfracte ces rayons en raison de la présence d'air et d'eau. C'est pourquoi, le proche infrarouge permet de distinguer les éléments de couleur verte des éléments foliaires (Defourny, 2021).

#### 6.1.2. *Segmentation*

La Figure 19 schématise le fonctionnement de l'algorithme non-supervisé « multiresolution segmentation » d'eCognition. En effet, celui-ci a la capacité de segmenter une image en une multitude d'objets pouvant varier en taille, allant des plus petits objets à ceux englobant toute l'image.

Les objets sont des ensembles de pixels qui, selon les critères choisis, peuvent varier en homogénéité. Lors de la sélection des paramètres de segmentation, il est possible

de déterminer l'importance accordée à la forme des objets. En fonction, les objets seront constitués de pixels avec des réflectances similaires, ou pas.

Il en va de même pour la compacité des objets. Elle peut être ajustée selon le degré d'importance que l'utilisateur donne à la forme des objets.

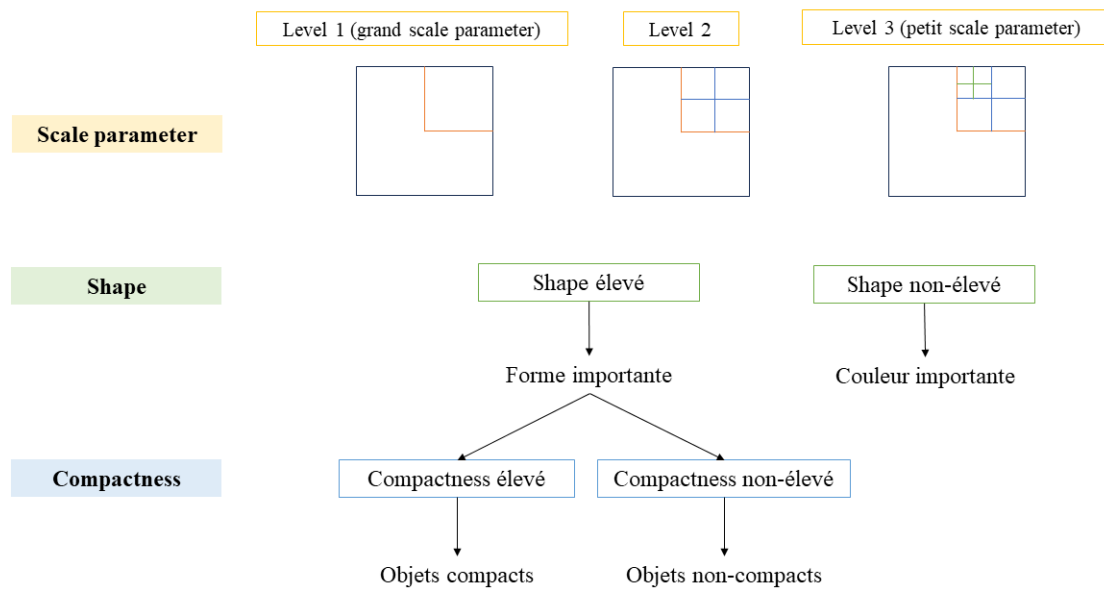


Figure 19 - Fonctionnement eCognition.

Comme expliqué précédemment, le logiciel eCognition permet de réaliser des segmentations d'images. Elle fonctionne en prenant en compte les pixels voisins et en identifiant celui qui semble le mieux adapté pour éventuellement fusionner (Trimble - eCognition, 2020). Dans ce travail, trois critères ont été optimisés afin d'obtenir la segmentation la plus adaptée au cas d'étude.

Le « *paramètre d'échelle* » permet de spécifier la signature spectrale des objets. Ainsi, plus l'utilisateur souhaite une signature spectrale homogène au sein des objets, plus ceux-ci seront de petite taille. Par conséquent, plus le paramètre d'échelle est petit, plus les objets seront petits, et inversement. Par exemple, la segmentation sur l'image (a) de la Figure 20 possède un paramètre d'échelle de 50, tandis que celui de l'image (b) vaut 600 (les autres paramètres restent identiques entre les deux tests). Les formes obtenues sont plus petites et plus nombreuses dans le premier cas. À l'inverse, elles sont de plus grande superficie et moins nombreuses sur la segmentation de droite. Les deux approches sont valides, la décision concernant la valeur de ce paramètre dépend uniquement de l'usage que l'utilisateur compte faire des résultats de la segmentation (Trimble - eCognition, 2020).

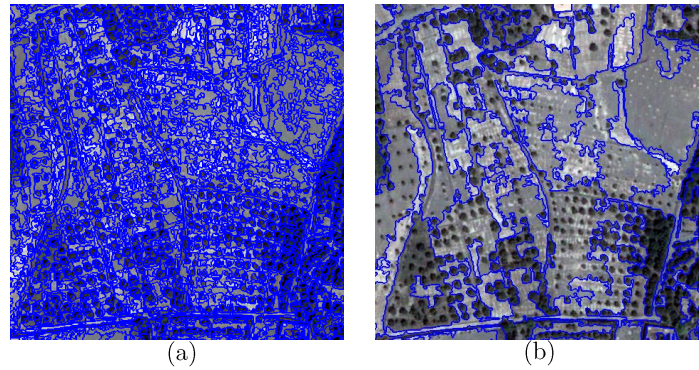
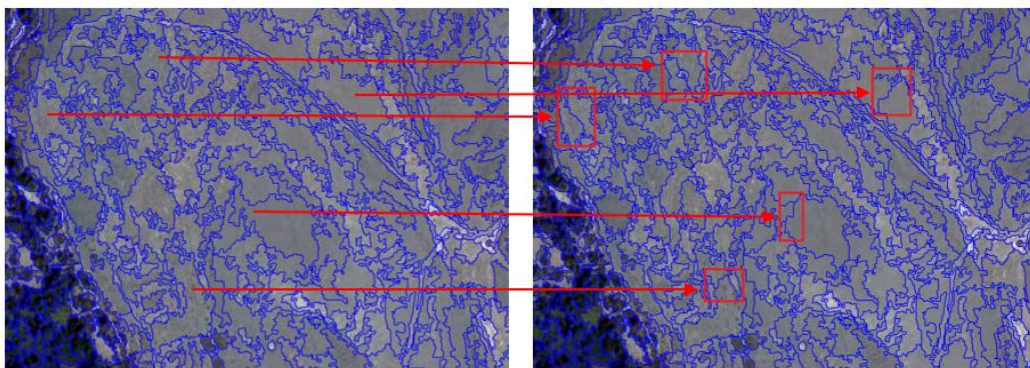


Figure 20 – Paramètre d'échelle (réalisé sur eCognition).

Le « *paramètre de forme* » définit l'importance accordée à la forme des objets (compact, allongé, sans forme spécifique) dans le processus de segmentation ; une valeur élevée de ce paramètre signifie un poids plus important en comparaison de l'influence de la couleur, c'est-à-dire de la réflectance spectrale. En d'autres termes, si la valeur du paramètre de forme est augmentée, cela force la segmentation à conserver certains traits de la forme (régularité de la forme des objets) aux dépens mêmes d'une homogénéité relative du critère de couleur. On peut également envisager ce critère comme une somme constante de 1 pour la couleur et la forme ; si l'une augmente, l'autre diminue. Les valeurs possibles pour ce paramètre sont bornées entre ]0 et 1[. Par exemple, sur la photo (a) de la Figure 21, le paramètre forme a une valeur de 0.1 et sur la (b), cette valeur vaut 0.9 (les autres paramètres restent inchangés). La méthode de paramétrisation (b) est plus sensible à la variation des teintes dans l'image, ce qui entraîne une segmentation plus rigoureuse en fonction des nuances de couleurs. Quelques zones ont été sélectionnées afin de mettre en évidence cette distinction (Trimble - eCognition, 2020).



(a) Figure 21 – Paramètre de forme (réalisé sur eCognition). (b)

Le « *paramètre de compacité* » permet de rendre les objets plus lisses ; il désigne la proportion qu'aura la forme sur la représentation finale. Lorsque la valeur du paramètre de forme et celle du paramètre de compacité sont élevées, la forme exerce

une forte influence sur le processus de segmentation, conduisant ainsi à l'obtention d'objets d'image très compacts. À l'inverse, si la forme a une valeur élevée mais que la compacité est faible, les objets seront plus lisses. Ce paramètre varie également entre ]0 et 1[ (Trimble - eCognition, 2020).

### 6.1.3. Classification des objets d'intérêt (états de dégradation)

L'un des objectifs finaux de ce mémoire est d'effectuer une classification de l'état actuel de la palmeraie selon les quatre catégories de dégradation définies précédemment. Cette tâche est possible grâce à l'utilisation de l'image Pléiades de l'année 2022.

Pour ce faire, deux scénarios vont être envisagés : le scénario n°1 comprend une seule segmentation et une seule classification et le scénario n°2 est une succession de plusieurs segmentations et classifications qui ont été réalisées itérativement.

#### A. Scénario n°1 : classification supervisée (Random Forest)

Le processus de classification supervisée, basée sur la segmentation préalable de l'image Pléiade, a commencé par la création de neuf classes d'état de dégradation du sol sur eCognition (voir Tableau 7). Ensuite, l'algorithme de Random Forest a été utilisé pour effectuer une classification détaillée de la palmeraie en se basant sur ces mêmes classes. Pour ce faire, des échantillons représentant chacune des neuf classes ont été générés manuellement à l'aide de l'outil "samples". Ensuite, le modèle a été entraîné afin de produire une carte de l'occupation du sol.

Tableau 7 - 9 classes d'état de dégradation du sol.

Catégories		Catégories		Catégories	
1	Pas de dégradation	4	Entre faible dégradation & dégradation avancée	7	Dégradation complète
2	Entre pas de dégradation & faible dégradation	5	Dégradation avancée	8	Bâti
3	Faible dégradation	6	Entre dégradation avancée & dégradation complète	9	Autres

Durant l'ensemble du processus de classification orientée objet sur eCognition, chaque phase a été réalisée en choisissant le domaine "image object level" plutôt que "pixel level". Ce choix découle de la nature même de l'étude menée. En effet, analyser la dégradation des terres d'une palmeraie en se basant sur des pixels ne reflète pas fidèlement la réalité. Les divers types de dégradation correspondent parfois à différentes parcelles et parfois à divers types de sol, déterminés par des critères tels

que l'homogénéité ou la couleur. L'utilisation de l'approche basée sur des objets permet de sélectionner des "features" pendant la classification. À chaque étape, les valeurs moyennes, les écarts-types, la brillance et l'homogénéité ont été extraites pour chaque polygone. De plus, une image Pléiades étant limitée à seulement 4 bandes, cela impose des contraintes. Un dernier élément essentiel est l'utilisation des données recueillies sur le terrain pour valider le processus car la collecte de données d'entraînement par objet s'avère plus aisée et plus représentative.

Les échantillons complémentaires à ceux relevés sur le terrain ont été collectés en réalisant une photo-interprétation de l'image Pléiades, affichée en fausses couleurs proche infrarouge, afin de mettre en évidence la végétation. Cette interprétation reposait sur les critères suivants :

- 1) Une dense végétation recouvre entièrement le sol, rendant celui-ci invisible.
- 2) La végétation est moins dense, permettant d'apercevoir le sol qui prend une teinte rougeâtre. La strate herbacée est toujours présente.
- 3) La végétation est moins dense, le sol est désormais visible et apparaît dans des tons foncés. Il ne présente plus de teinte rouge, signifiant que la strate herbacée a disparu.
- 4) La végétation est moins dense, le sol est clairement visible et adopte une teinte claire. Il ne présente plus de teinte rouge, ce qui indique l'absence de strate herbacée.
- 5) Seuls quelques arbres sont visibles et le sol se présente sous une teinte claire.
- 6) Seuls quelques arbres sont visibles, le sol prend une teinte claire et de vastes zones complètement blanches apparaissent.
- 7) Il n'y a plus d'arbres en vue, le sol est entièrement blanc.
- 8) Des espaces plus ou moins rectangulaires se distinguent en blanc, présentant des lignes noires qui se révèlent être en réalité les murs des maisons (kasbahs).
- 9) Catégorie regroupant les oueds, certaines khetaras et la zone située en dehors de la palmeraie.

#### B. Scénario n°2 : classification itérative (Random Forest)

Comme le décrit la Figure 22, le processus de classification itérative se décompose en plusieurs étapes répétées successivement pour aboutir à un résultat final spécifique.

Tout d'abord, il est nécessaire d'utiliser la même segmentation de l'image Pléiades puis d'effectuer une classification en suivant la méthodologie précédemment décrite.

Dans cette première phase, une classification binaire a été réalisée pour distinguer ce qui fait réellement partie de la zone d'étude "palmeraie" de ce qui n'en fait pas partie. Cette classification permet d'obtenir deux classes distinctes ; « palmeraie » et « divers ». Ensuite, il faut fusionner les polygones de la même classe à l'aide de l'outil "merge region" et utiliser l'outil "grow region" pour réattribuer la bonne classe aux petites entités polygonales qui pourraient avoir été mal classées et sont isolées au sein d'une classe qui n'est pas la leur. Finalement, deux classes sont obtenues. Il convient de garder la classe « divers » qui est désormais correctement délimitée et de supprimer la classe « palmeraie » dont la classification doit être améliorée. Cette classe, désormais appelée « unclassified », sera d'abord fusionnée puis segmentée afin de permettre la distinction entre les autres classes souhaitées. Le processus se poursuit de cette manière jusqu'à l'obtention de six classes distinctes : les quatre classes de dégradation, les bâtiments et une classe "divers".

Ensuite, la méthode basée sur des objets a été mise en œuvre de manière similaire pour cette classification, en se fondant sur les mêmes critères et explications utilisés pour le scénario n°1.

Finalement, les catégories répertoriées dans la Figure 22 : la catégorie "divers" englobe les oueds, une partie des khattaras ainsi que les zones non entretenues ; "100% dégradé" représente une dégradation complète ; "faible végétation" correspond à une dégradation avancée ; "absence de végétation au sol" reflète une dégradation modérée et "totalement boisé" représente l'absence de dégradation.

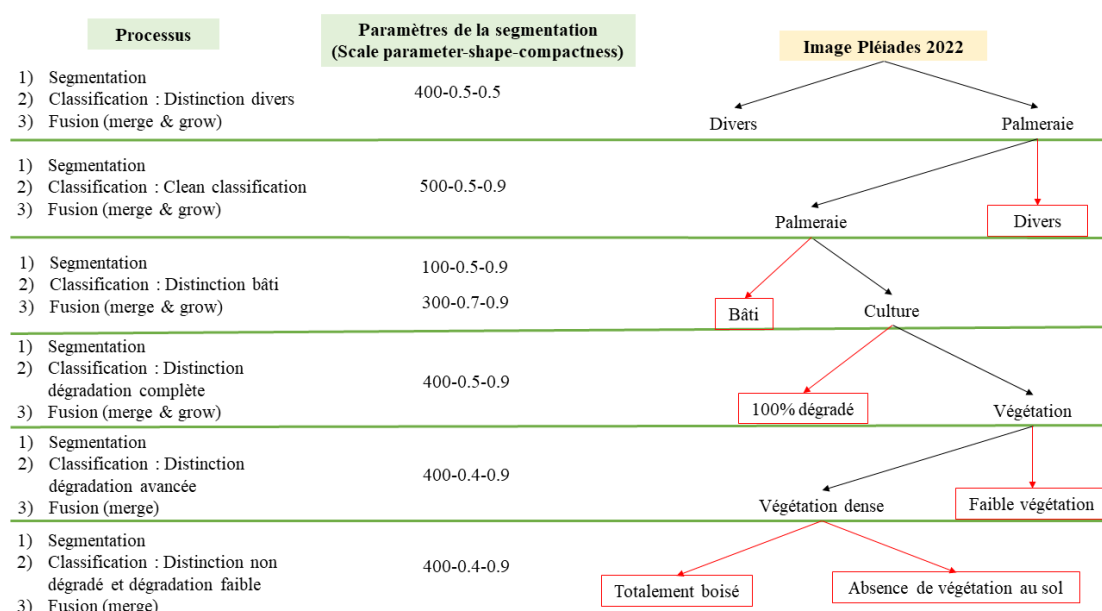


Figure 22 - Méthodologie pour la classification itérative.

## 6.2. Détection du changement

Afin d'évaluer et de représenter la zone d'étude selon les quatre catégories de dégradation (pas de dégradation, dégradation faible, dégradation avancée, dégradation complète), deux indices vont être utilisés. Ces derniers mettent en lumière les zones de végétation et les zones où le sol réfléchit fortement. Il s'agit du MSAVI et de l'IB, respectivement.

Ces indices offrent une évaluation continue de l'état de dégradation en tout point de la zone étudiée. Ils viennent en complément des relevés sur le terrain et des enquêtes menées avec les habitants locaux. Les deux indices peuvent être calculés à l'aide de l'outil "Calculatrice Raster" disponible sur QGIS.

### 6.2.1. Indice de végétation modifié ajusté au sol (MSAVI)

Utiliser le MSAVI pour évaluer le changement dans la dynamique des sols dans la palmeraie semblait plus optimal étant donné le faible recouvrement végétal de la région (Guo et al. 2020b). En effet, les conclusions de Al-Quraishi en 2020 ont mis en lumière que le MSAVI représente un indicateur de végétation fiable, apte à être employé de manière efficace pour étudier la santé et la présence de la végétation dans des régions arides et semi-arides. Ceci est dû à sa capacité à repérer la végétation clairsemée et à filtrer les interférences provenant des zones non végétalisées.

Les bandes 3 & 4 et 4 & 5, utilisées respectivement par les satellites Landsat 7 et Landsat 8, correspondent aux plages spectrales des bandes rouge et proche infrarouge.

### 6.2.2. Indice de brillance (IB)

L'indice de brillance est crucial pour évaluer les changements environnementaux, particulièrement dans les domaines du sol et de la végétation, où des variations subtiles dans la couleur, la composition minérale du sol et la distribution de la végétation peuvent signaler des altérations du milieu.

Basé sur les bandes du rouge, proche infrarouge et parfois verte, l'IB permet de distinguer les zones végétalisées des sols nus. Deux formules sont répertoriées dans la littérature, l'une (15) utilise uniquement les bandes du rouge et du proche infrarouge, tandis que l'autre (16) intègre également la bande verte.

Dans le cadre de l'étude de cas, une évaluation comparative des deux formules sera incluse. La formule qui fournira les résultats les plus probants sera choisie pour la suite du projet.

Les bandes 2, 3 & 4 et 3, 4 & 5, utilisées respectivement par les satellites Landsat 7 et Landsat 8, correspondent aux plages spectrales des bandes verte, rouge et proche infrarouge.

### 6.2.3. Suivi temporel

Après l'obtention des indices, une composition colorée a été créée pour chaque année (2000, 2014 et 2022). Cela implique la création d'une image virtuelle (raster virtuel) où la bande rouge est liée au MSAVI et la bande verte est associée à l'indice de brillance.

### 6.3. Validation

Pour évaluer l'exactitude de la classification de la zone étudiée, une matrice de confusion est employée, offrant une évaluation statistique de la qualité de la carte. Le Tableau 8 associe les classes de prédiction (colonnes) avec les classes de référence (lignes). De là, diverses métriques sont calculées : l'exactitude de l'utilisateur (UA) représente la proportion de pixels correctement classés pour une classe prédite, indiquant ainsi la justesse des prédictions. Elle s'obtient en divisant le nombre de pixels correctement classés par le nombre total de pixels prédits pour une classe donnée (= somme de la ligne). En parallèle, l'exactitude du producteur (PA) est évaluée de la même manière mais selon les colonnes, signalant la proportion de pixels correctement prédits comme n'appartenant pas à la classe en question.

Le F-score, une valeur entre 0 et 1, offre une évaluation de la performance de chaque classe et du modèle dans son ensemble. Il se calcule selon la formule suivante :

$$(17) \quad F - score = \frac{2*UA*PA}{UA+PA}$$

Enfin, l'exactitude globale (OA), exprimée en pourcentage, représente la fiabilité du modèle en indiquant la proportion globale de pixels correctement classés par rapport à l'ensemble des pixels classés.

		Classes de prédiction			UA	
		Classe 1	...	Classe N		
Classes de référence	Classe 1					
	...					
	Classe N					
		PA				OA
		F-score				

Figure 23 - Matrice de confusion type.

## Chapitre 4 : Résultats

Le quatrième chapitre compile les résultats obtenus dans cette étude, débutant par l'étude du changement de la dynamique des terres avec le traitement des images Pléiades (1.1.1) et Landsat (1.1.2). Ensuite, il présente les cartes des deux scénarios de classification (1.2) ainsi que leur validation, suivies par une série de cartes illustrant les indices spectraux pour les trois périodes d'études (1.3) et leur suivi temporel (1.4). Enfin, la section (2) expose les conclusions des enquêtes menées auprès des intervenants locaux.

### 1. Étude du changement de la dynamique des terres

#### 1.1. Traitement des images

##### 1.1.1. Segmentation

La Figure 24 présente des zones spécifiques de la palmeraie de Skoura qui ont été identifiées à partir de l'image Pléiades de 2022 en utilisant le logiciel eCognition. Ces zones mettent en évidence les quatre catégories de dégradation du sol présentes dans la palmeraie.

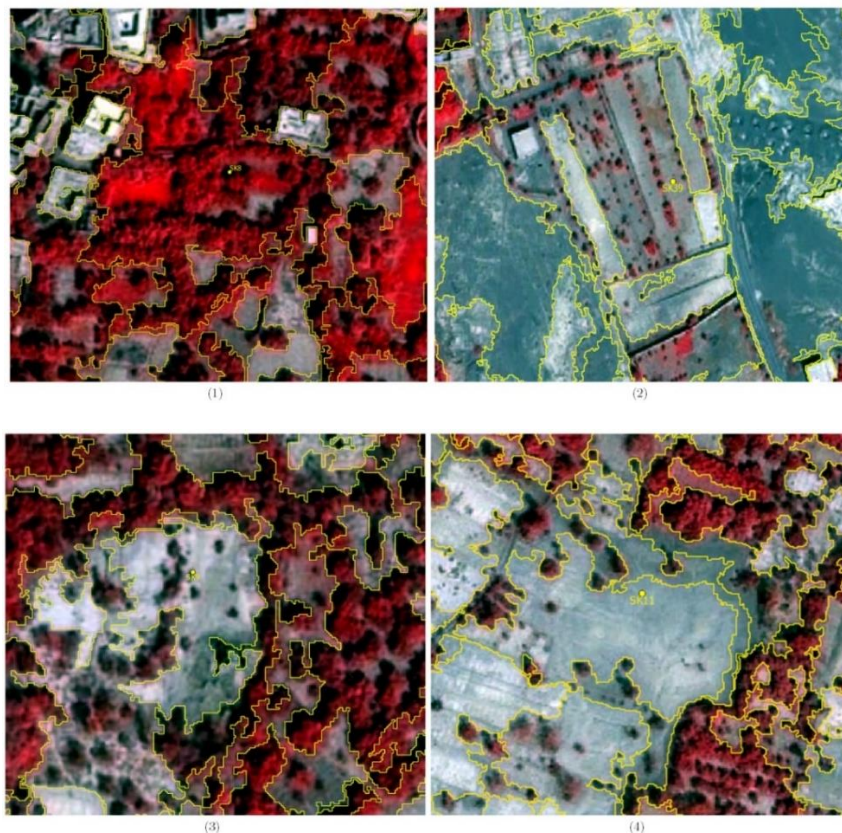


Figure 24 - Représentation d'un échantillon ( $SK_{nb}$ ) des 4 classes après segmentation sur eCognition : 1) Pas de dégradation, 2) Dégradation faible, 3) Dégradation avancée, 4) Dégradation complète.

### 1.1.2. Série tri-chronique de la palmeraie de Skoura

La Figure 25 présente les images de la palmeraie de Skoura pour les trois années d'étude. Les images de la première ligne sont affichées en couleurs naturelles, où les bandes rouge, verte et bleue correspondent respectivement aux canaux du rouge, vert et bleu. La seconde ligne d'images est représentée en fausses couleurs proche infrarouge, où la bande proche infrarouge est associée au canal rouge.

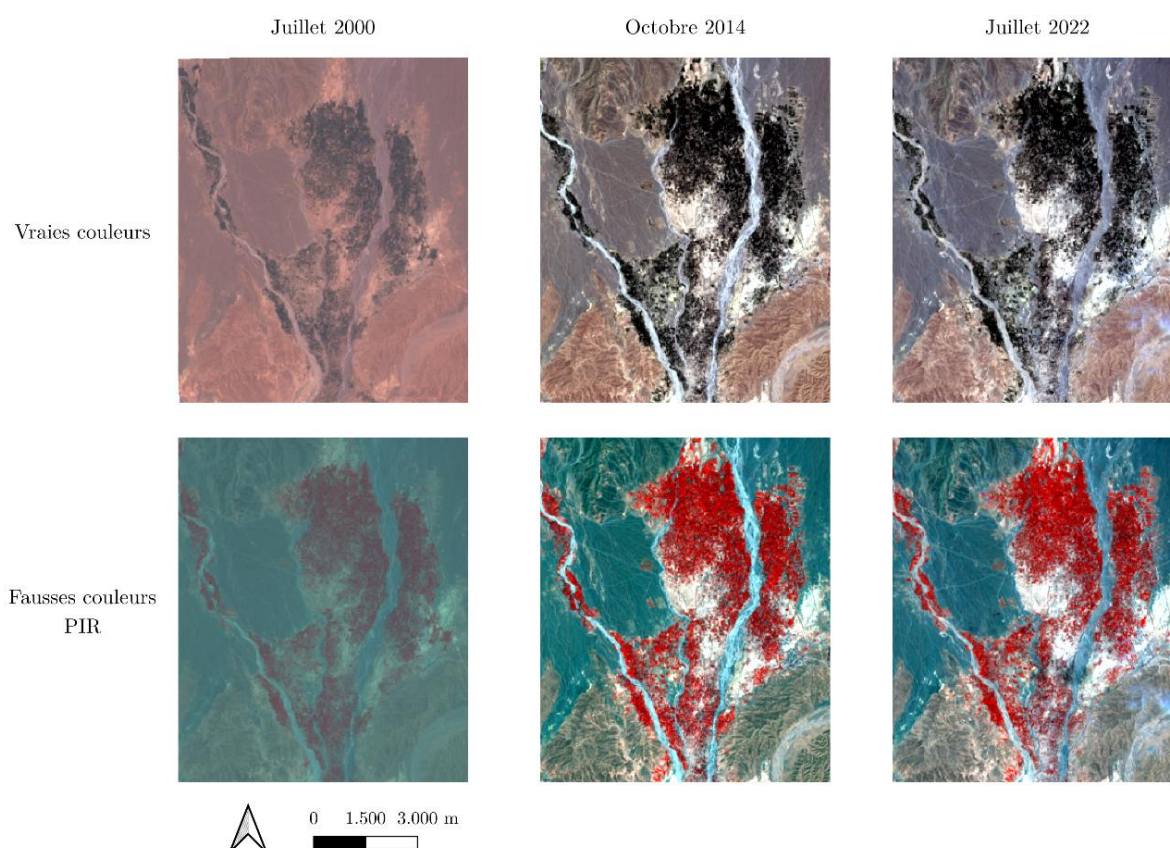
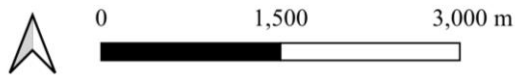
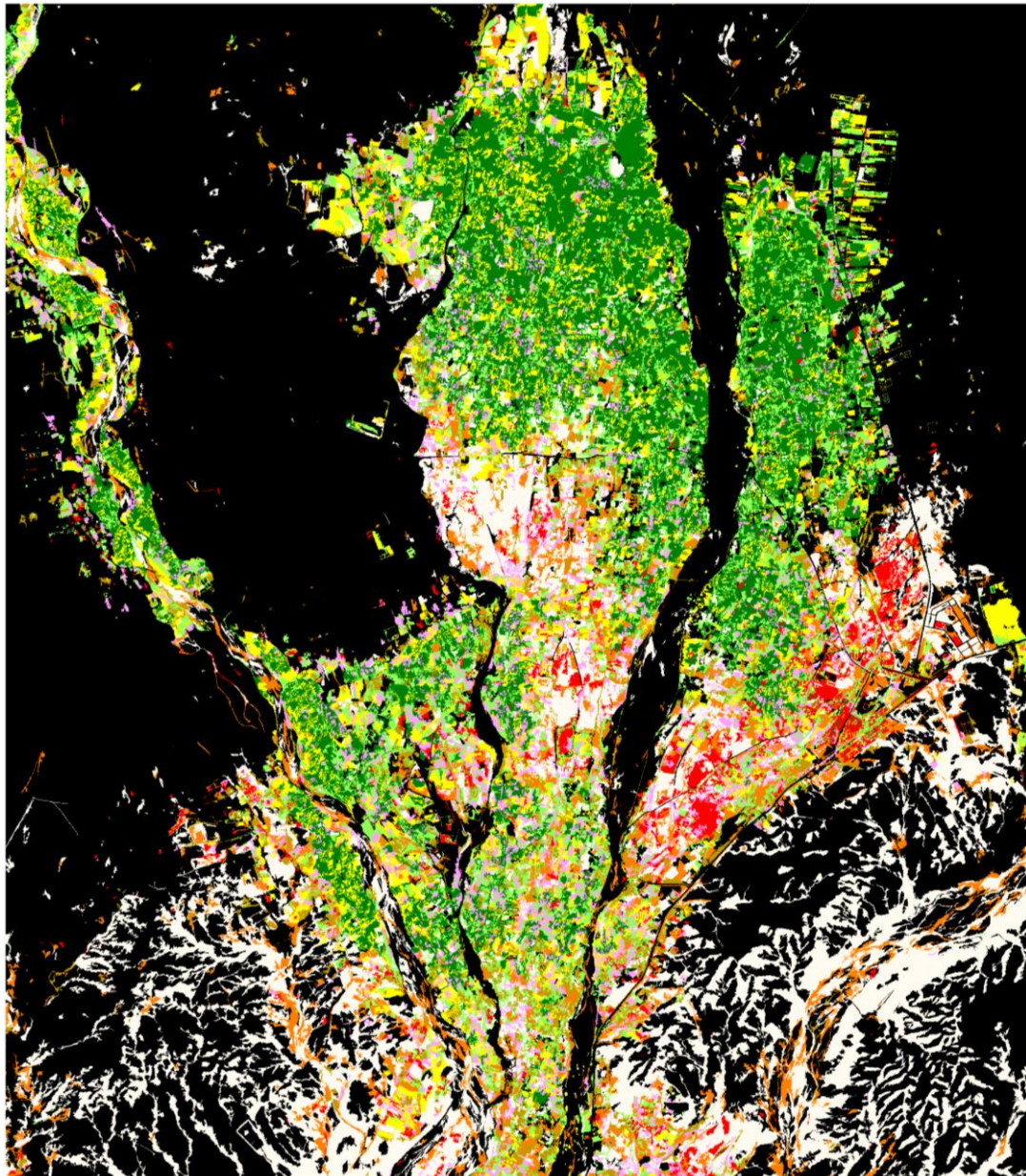


Figure 25 - Raster virtuel en vraies couleurs et fausses couleurs proche infrarouge des 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022).

### 1.2. Classification des objets d'intérêt (états de dégradation)

La section suivante présente la carte des deux scénarios de classification. La première carte représente la zone d'étude selon le premier scénario de classification et la seconde montre la palmeraie de Skoura selon la classification itérative. Les exactitudes globales respectives des cartes sont également fournies.

1.2.1. Scénario n°1 : classification supervisée (Random Forest)

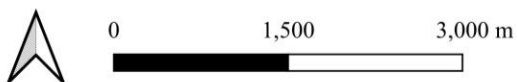
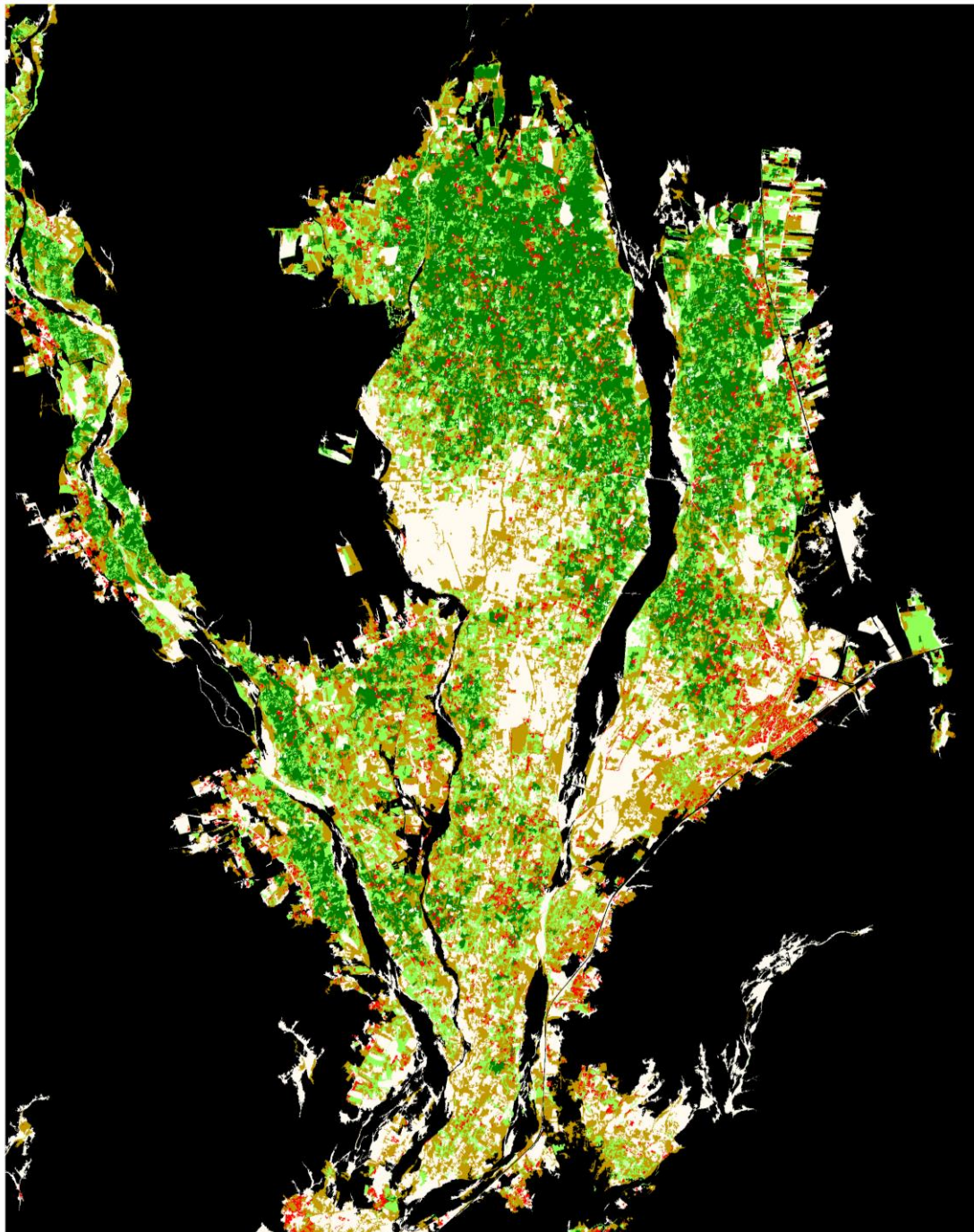








	Pas de dégradation		Entre dégradation avancée et dégradation complète
	Entre pas de dégradation et faible dégradation		Dégradation complète
	Faible dégradation		Bâti
	Entre faible dégradation et dégradation avancée		Divers
	Dégradation avancée		

Exactitude globale	44.90%
--------------------	--------

Figure 26 - Scénario n°1 : classification à 9 classes.

1.2.2. Scénario n°2 : classification itérative (Random Forest)



	Pas de dégradation		Dégradation avancée		Bâti
	Faible dégradation		Dégradation complète		Divers

Exactitude globale 73.47%

Figure 27 – Scénario n°2 : classification itérative à 6 classes.

### 1.2.3. Validation de la classification : matrices de confusion

Les tableaux ci-dessous illustrent les matrices de confusion utilisées pour évaluer la classification itérative. Les 49 points de validation sont les échantillons relevés sur le terrain. Le Tableau 9 représente la matrice de confusion d'une classification améliorée. Initialement, les résultats de la première classification (Tableau 8) n'étaient pas satisfaisants, ce qui a motivé une amélioration de ces résultats.

Tableau 8 - Matrice de confusion de la classification itérative (n=49).

		Classes de prédiction					UA
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	
Classes de référence	Pas de dégradation - 1	10	1	0	1	0	0.83
	Faible dégradation - 2	0	1	3	2	0	0.17
	Dégradation avancée - 3	0	0	9	7	0	0.56
	Dégradation complète - 4	0	0	2	12	0	0.86
	Divers - 5	0	0	0	0	1	1
<b>PA</b>		1	0.5	0.64	0.55	1	<b>OA</b>
<b>F-score</b>		0.91	0.25	0.6	0.67	1	67.35%

Tableau 9 - Matrice de confusion itérative améliorée.

		Classes de prédiction					UA
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	
Classes de référence	Pas de dégradation - 1	10	1	1	0	0	0.83
	Faible dégradation - 2	0	1	4	1	0	0.17
	Dégradation avancée - 3	0	0	13	3	0	0.81
	Dégradation complète - 4	0	0	3	11	0	0.79
	Divers - 5	0	0	0	0	1	1
<b>PA</b>		1	0.5	0.62	0.73	1	<b>OA</b>
<b>F-score</b>		0.91	0.25	0.7	0.76	1	73.47

Tableau 10 - Matrice de confusion de la classification itérative avec fusion des classes de dégradation avancée et de dégradation complète.

		Classes de prédiction				UA
		[1]	[2]	[3]	[4]	
Classes de référence	Pas de dégradation - 1	10	1	1	0	0.83
	Faible dégradation - 2	0	1	5	0	0.17
	Dégradation (avancée/complète) - 3	0	0	30	0	1.00
	Divers - 4	0	0	0	1	1
<b>PA</b>		1	0.5	0.83	1	<b>OA</b>
<b>F-score</b>		0.91	0.25	0.91	1	85.71%

Tableau 11 - Matrice de confusion de la classification itérative avec fusion des classes de dégradation faible et sans dégradation.

		Classes de prédiction			UA
		[1]	[2]	[3]	
Classes de référence	Dégradation (absente/faible) - 1	12	6	0	0.67
	Dégradation (avancée/complète) - 2	0	30	0	1.00
	Divers - 3	0	0	1	1
<b>PA</b>		1	0.83	1	<b>OA</b>
<b>F-score</b>		0.80	0.91	1	87.76%

### 1.3. Indices de télédétection

#### 1.3.1. Indice de végétation modifié ajusté au sol (MSAVI)

Pour accentuer les variations de densité de la végétation au fil des trois périodes d'étude, l'apparence de l'image a été ajustée. Plus précisément, les images de la Figure 28 ont été présentées en utilisant une palette de couleurs monocanal et une interpolation linéaire. La gamme de couleurs s'étend du vert foncé au rouge.

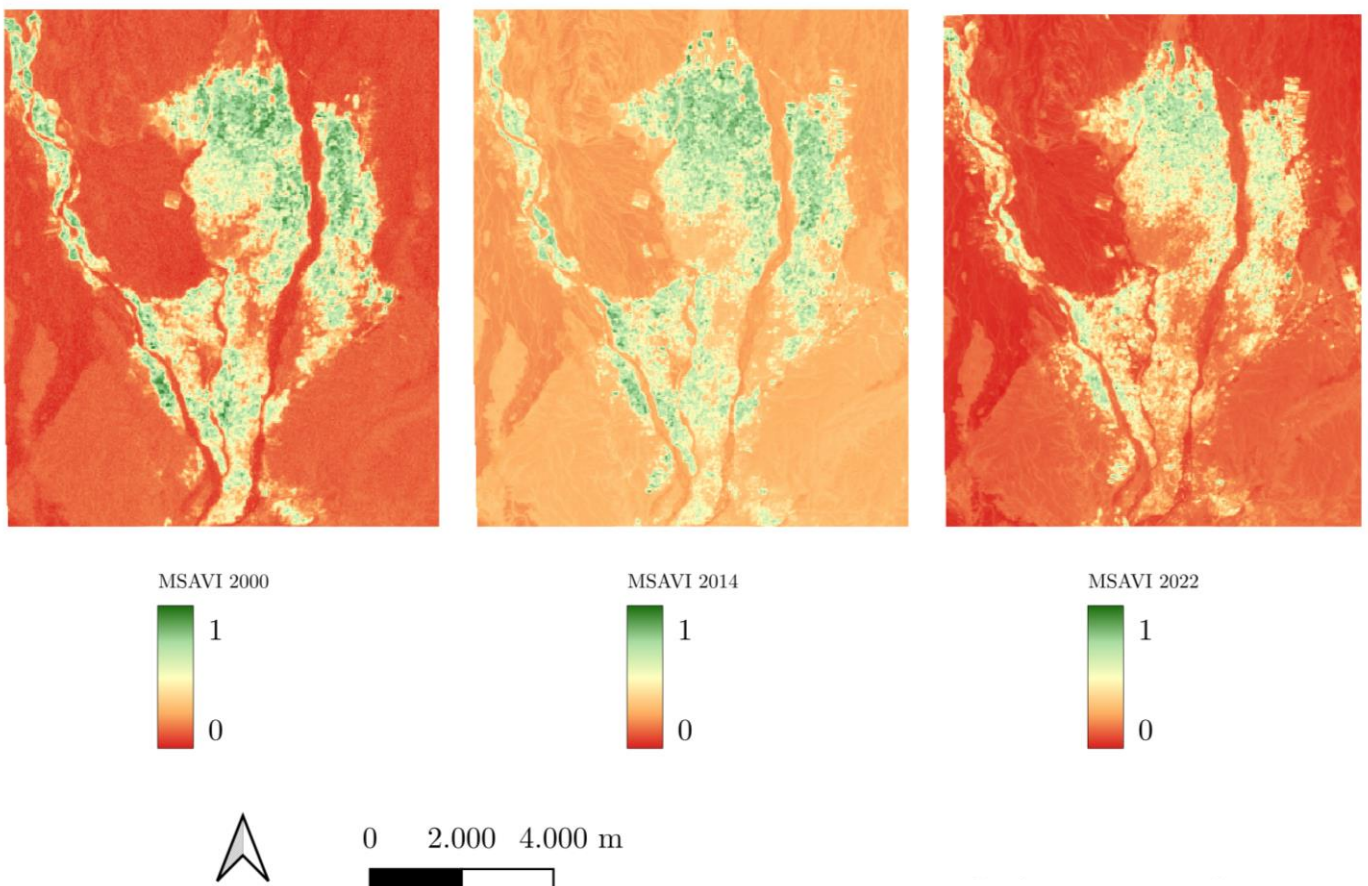


Figure 28 - Comparaison du MSAVI entre les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022).

### 1.3.2. Indice de brillance (IB)

Dans le but de mettre en avant les zones brillantes, la symbologie de l'image a été ajustée. Concrètement, les images de la Figure 29 ont été présentées avec une palette de couleurs grises uniformes et un contraste maximal, permettant ainsi de mieux mettre en évidence les variations entre les différentes années et formules. La formule de brillance des trois images supérieures (a) contient la bande verte, rouge et proche infrarouge et celle des trois images inférieures (b) contient uniquement la bande rouge et proche infrarouge.

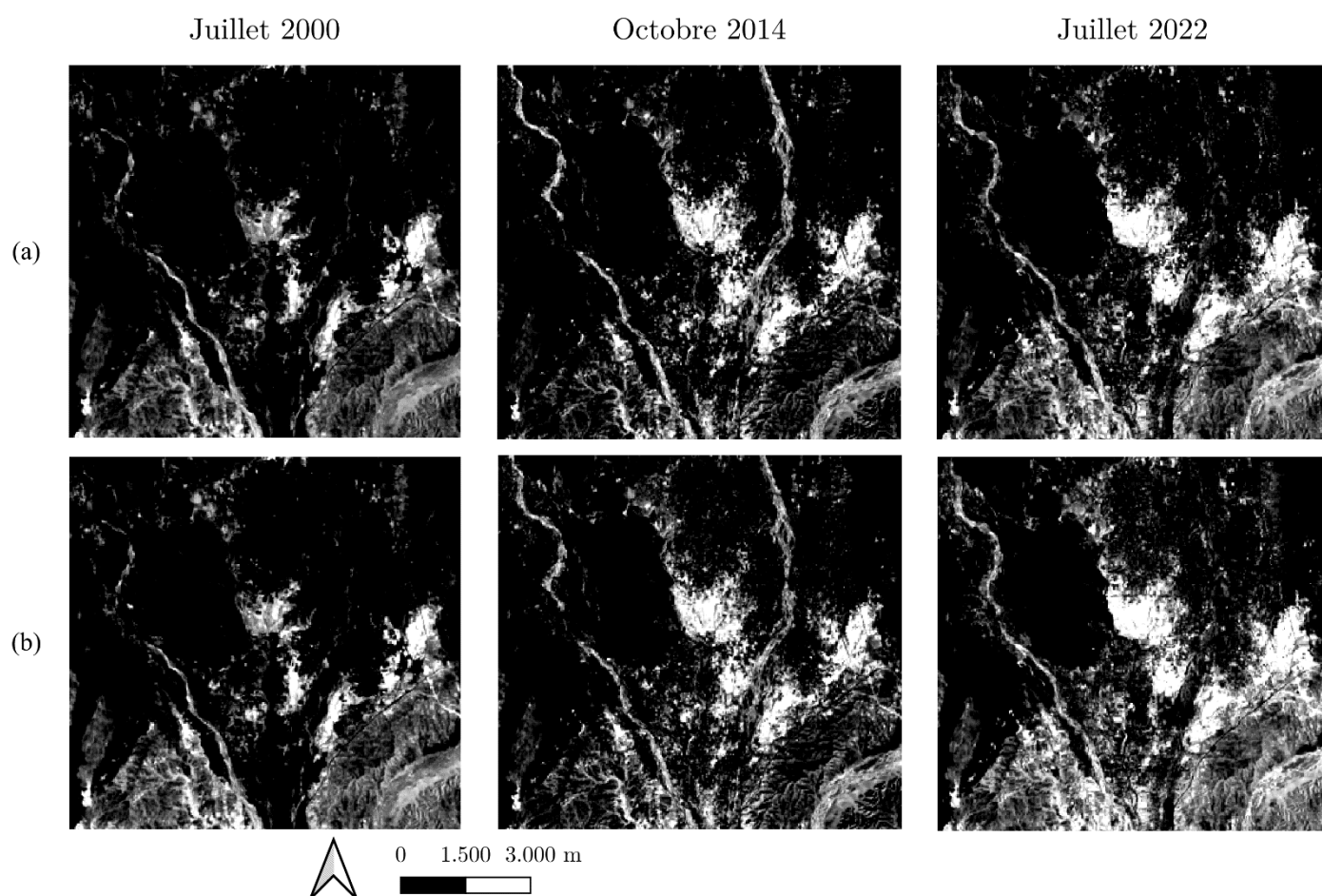


Figure 29 - Comparaison des 2 formules d'indice de brillance via la calculatrice raster sur QGIS sur les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022).

La Figure 30 illustre l'indice de brillance calculé en utilisant les bandes du rouge et proche infrarouge. La justification de ce choix est exposée en détail dans la section Chapitre 5 : Discussion. Ainsi que précisé précédemment, c'est cette formule spécifique de l'indice de brillance qui sera utilisée pour les prochaines étapes de ce travail.

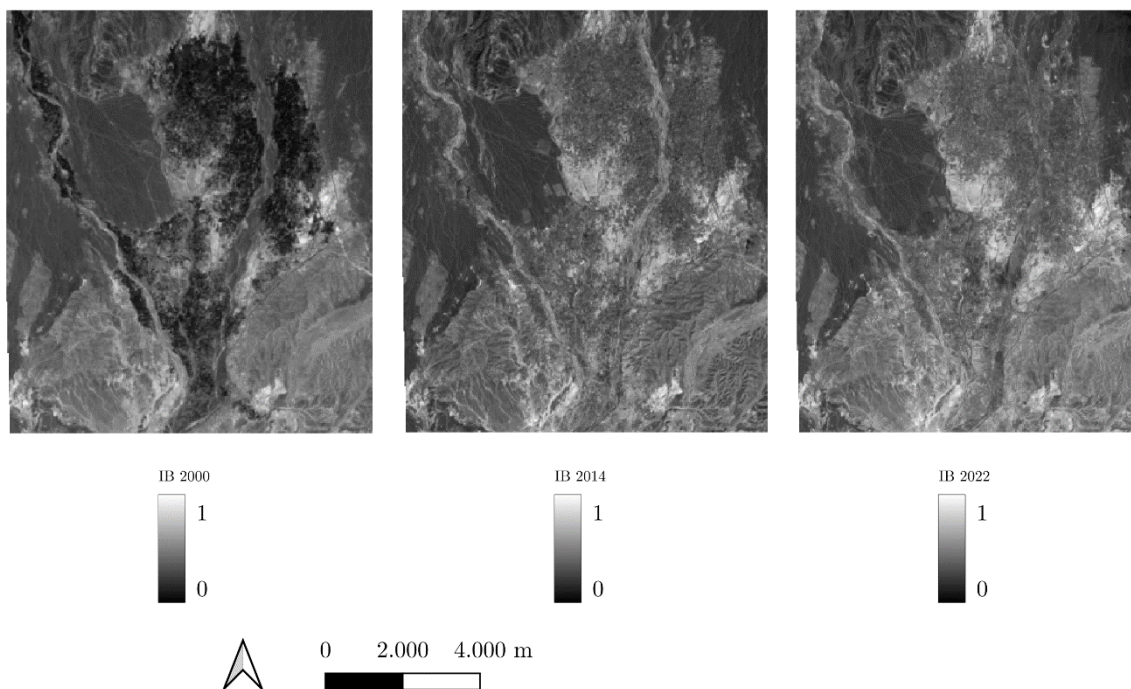


Figure 30 - Comparaison de l'IB entre les 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022).

#### 1.4. Suivi temporel

##### 1.4.1. Composition colorée

La Figure 31 présente la composition colorée des trois images, où les néocanaux MSAVI et IB ont été liés à la bande rouge et verte respectivement. Des essais ont été faits en associant les bandes rouge et verte avec le MSAVI et la bande bleue avec l'IB mais les résultats n'ont pas été concluants.

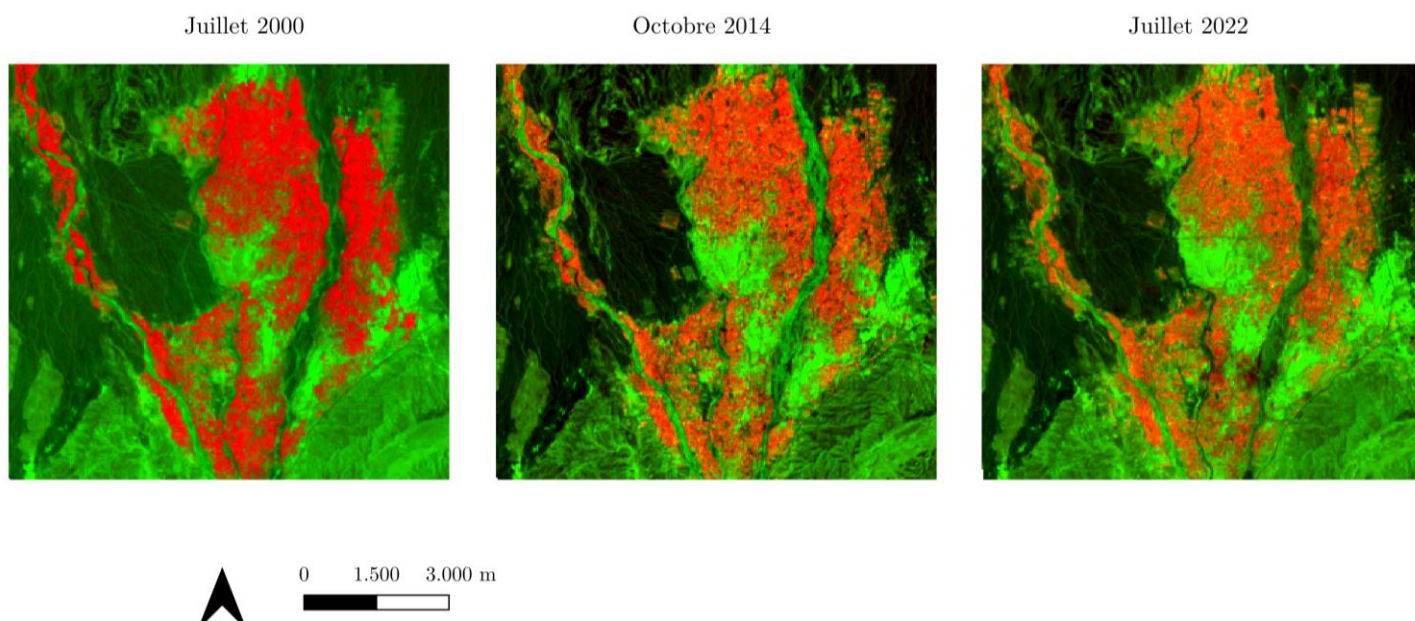


Figure 31 - Composition colorée des images par les deux néocanaux (MSAVI, IB) des 3 années d'étude (2000, 2014 et 2022).

#### 1.4.2. Validation de la composition colorée : Landsat 8 et Pléiades (2022)

La Figure 32 présente deux images : à gauche, la classification de l'image Pléiades de 2022, et à droite, la composition colorée de l'image Landsat 8 de la même année. L'objectif de cette figure est d'établir une corrélation entre le calcul des indices de brillance et du MSAVI sur l'image Landsat 8 de juillet 2022 et la classification effectuée sur l'image Pléiades d'octobre 2022.

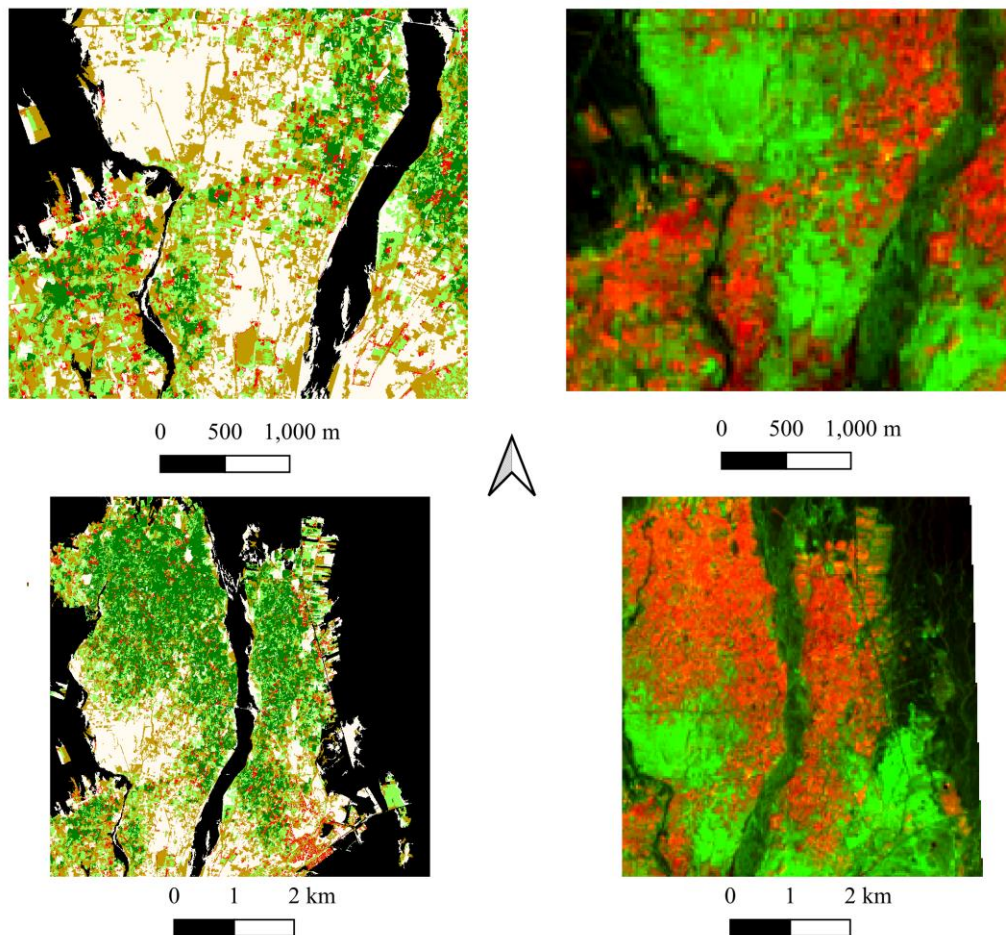


Figure 32 - Parallélisme Pléiades-Landsat.

## 2. Enquêtes auprès des habitants de Skoura

Après deux semaines d'immersion dans le rythme de vie de la palmeraie marocaine de Skoura, quelques observations ont été faites. Les avis des agriculteurs enquêtés sont rarement divergents et tous s'accordent sur le même point : le manque d'eau qui sévit dans la palmeraie depuis une vingtaine d'années est la principale cause du déclin de leurs terres de culture et du changement de dynamique de la région. Les diverses tendances, causes et conséquences sont exposées dans la suite de cette constatation.

## 2.1. Système d'utilisation des terres

### Tendance de la couverture

La taille de la zone couverte par la végétation diminue rapidement ; un phénomène qui se manifeste uniquement en cas de manque d'eau dans le sol. En effet, dès que la palmeraie reçoit une irrigation adéquate, ce constat ne s'applique plus, la végétation reprenant vie immédiatement.

### Tendance de la structure

La configuration de la palmeraie en trois strates reste stable. Cependant, tout comme pour la tendance de la densité du couvert végétal, ce constat n'est vérifié que lorsque de l'eau est présente dans la région. En effet, la présence d'eau favorise le renouvellement dans la structure. Néanmoins, le renouvellement est tout de même moins significatif qu'il y a 20 ans ; on observe une légère diminution de la strate herbacée et arbustive.

### Densité d'espèces arboricoles

- Strate arborescente : baisse de 20 à 25% des palmiers dattiers.
- Strate arbustive : baisse de 80% des figuiers, pêchers, vignes, grenadiers, amandiers, pommiers, abricotiers, oliviers et de 100% des poiriers. Lors de la première crise agraire (perte des palmiers dattiers), les oliviers étaient prédominants, supportant bien la chaleur. Toutefois, depuis le début de la seconde crise, la densité de ces oliviers diminue.
- Strate herbacée : pas de diminution spéciale sauf légère diminution des plants de roses. La luzerne recouvre +/- 80% de la surface et sa densité ne varie pas.

*Les pourcentages proviennent des estimations des agriculteurs, ces valeurs ont été moyennées par souci de clarté des résultats.*

Espèces cultivées actuellement dans la strate arbustive : pommiers, figuiers, vignes, abricots et oliviers.

Espèces cultivées actuellement dans la strate herbacée : luzerne (utilisée pour nourrir les animaux), maïs (demande beaucoup d'eau), fèves, carottes, navets, blé, orge, haricots, poivrons, aubergines, tomates, piments, courges, oignons, coriandre, persil et menthe.

Il y a quelques années, les habitants plantaient de la pastèque et du melon. Cependant, ces cultures requièrent une grande quantité d'eau et le climat n'est plus suffisamment humide depuis quelques années pour les récolter avec succès.

### **Intensité**

Aucun changement majeur dans les intrants ou le niveau de gestion. Les agriculteurs recourent à l'utilisation et à la valorisation d'un compost en tant qu'engrais. Ils travaillent la terre à la main, avec l'aide d'animaux et occasionnellement avec des petits tracteurs.

### **Raisons de la tendance**

La diminution de la densité d'espèces est principalement due au manque d'eau et à sa salinité accrue. Par conséquent, les palmiers dattiers se retrouvent isolés et dépérissent sur pied puisqu'auparavant, ils profitaient de l'irrigation des cultures annuelles et des arbres fruitiers.

Le manque d'eau est une contrainte majeure pour les arbres fruitiers, bien que les oliviers semblent plus résistants à la sécheresse. Ainsi, ils prennent progressivement le dessus sur les autres arbres fruitiers. Une solution est de planter les oliviers et les arbres fruitiers suffisamment loin les uns des autres afin d'éviter la concurrence.

Finalement, les palmiers souffrent du manque d'entretien par les habitants.

### **Pratiques adoptées à cause de l'aridité**

Depuis quelques années seulement, les habitants cultivent 2 nouvelles espèces dans la palmeraie de Skoura : du safran et des orangers.

Dans la palmeraie, plusieurs mesures sont prises pour réduire au minimum le gaspillage de l'eau. En été par exemple, les agriculteurs se contentent d'arroser uniquement le pourtour du tronc de l'arbre afin de limiter les pertes d'eau. De plus, sur les parcelles collectives des coopératives, les agriculteurs ont recours au système d'irrigation du goutte-à-goutte. Ils récoltent et stockent l'eau de pluie dans des réservoirs et ils ont posé des panneaux solaires. Ces installations permettent de limiter le gaspillage d'eau. Le goutte-à-goutte est mis en place sur certaines parcelles de la palmeraie de Skoura depuis environ cinq ans. Cependant, sa gestion s'avère exigeante en raison de la dispersion des parcelles dans la palmeraie ; cette technique semble plus efficace au sein des coopératives.

## 2.2. Dégradation des terres par le système d'utilisation des terres

Tableau 12 - Récapitulatif des enquêtes auprès des habitants de Skoura.

Types de dégradation	Explications générales (explications locales)
Érosion du sol par l'eau	<p>Perte de la couche arable.</p> <p>Erosion par ravinement et érosion des berges (en hiver, la rivière déborde souvent. Il y a 3-4 ans, la commune a construit un mur pour éviter les crues).</p>
Détérioration chimique du sol	<p>Pollution du sol (il y a peu de sensibilisation à la gestion des déchets).</p> <p>Salinisation du sol (une fois que la parcelle de terre reçoit un entretien adéquat, il n'y a pas de problème notable en ce qui concerne la matière organique, le sel ou d'autres éléments observables).</p>
Détérioration physique du sol	<p><b>Saturation des sols en eau par l'agriculteur</b> (ce processus se produit seulement à certains moments de l'année donc ce type de dégradation n'est pas évoquée par tous les agriculteurs).</p>
Dégradation des eaux	<p>Aridification.</p> <p>Changement de la quantité des eaux de surface (diminution de la quantité car sécheresse depuis 20 ans).</p> <p>Changement de la quantité d'eau sous-terrainne (diminution de la quantité car sécheresse depuis 20 ans).</p> <p>Changement de la qualité des eaux de surface (surtout sur le goût, l'eau est plus salée depuis 2012-2014).</p> <p>Changement de la qualité d'eau sous-terrainne (la qualité de l'eau dépend notamment de la qualité du puits et ceux-ci ont une teneur en sel accrue. On observe alors un impact sur le goût notamment, l'eau est plus salée depuis 2012-2014).</p>
Dégradations biologiques	<p>Réduction de la couverture végétale (augmentation de la superficie des sols nus).</p> <p>Perte de la quantité de biomasse produite.</p> <p>Effets néfastes des incendies (3-4 incendies par an. Selon certains agriculteurs, ce type de dégradation est négligeable vu leur faible nombre).</p> <p>Diversité d'espèces (perte d'espèces naturelles, propagation d'espèces invasives et perte de la vie du sol car non-respect du temps de jachère).</p> <p>Augmentation des maladies (exemple : cochenille. En été, il arrive parfois que des maladies apparaissent sur les oliviers. Si février et mars n'ont pas apporté suffisamment de pluie, les arbres n'ont pas pu se débarrasser des maladies qui les affectent ; les précipitations jouent un rôle crucial dans le nettoyage des arbres).</p>

Causes directes de dégradation des terres	Explications générales (explications locales)
Gestion des cultures et du pâturage	Application inappropriée d'engrais, etc. → contamination et lessivage, prélèvement excessif de nutriments, irrigation et utilisation inappropriée de l'eau (manque de connaissance des besoins des terres. On observe alors une utilisation excessive d'engrais et d'eau. Parfois, les agriculteurs brûlent les terres aussi. Mais c'est surtout l'irrigation et l'utilisation de l'eau qui sont inappropriées, mal gérées et difficiles à mettre en place efficacement car les parcelles sont dispersées au sein de la palmeraie).
Déforestation et élimination de la végétation naturelle	Exploitation forestière à grande échelle, expansion des zones urbaines, conversion à l'agriculture, incendies et construction de routes (il y a 10-15 ans, des entreprises de Marrakech sont venues enlever beaucoup de palmiers à pollen de la région pour décorer la ville de Marrakech).
Rejets	Contamination ponctuelle des ressources en eaux de surface et souterraines (surtout rejets domestiques. De plus, l'eau vient des montagnes donc si elle est polluée en amont, ça engendre des conséquences en aval dans la palmeraie).
Perturbation du cycle de l'eau	Diminution de l'infiltration - augmentation du ruissellement.
Prélèvement excessif d'eau	Irrigation, industrie, mine, usage domestique (naissance de puits ; 2-3 puits par hectare. Problème identique à la gestion de l'eau dans les cultures dû à la dispersion des parcelles).
Causes naturelles	Températures (En septembre, il peut parfois faire jusqu'à 40 degrés, ce qui est excessivement chaud et a pour effet de provoquer une sécheresse), précipitations (en diminution), tempêtes, sécheresse, topographie.

Causes indirectes de dégradation des terres	Explications générales (explications locales)
Pression de la population	Vieillessement de la population.
Pauvreté	Il n'y a pas de travail disponible dans la palmeraie à part le travail dans les champs.
Disponibilité de la main-d'œuvre	Peu de main-d'œuvre disponible.
Education	Manque de formation et manque de transmission de génération en génération.
Hostilités et conflits	Les conflits qui surviennent sont principalement liés à l'héritage, car il manque les documents qui prouvent qui est le propriétaire de la parcelle.

Finalement, lors des échanges avec les agriculteurs, plusieurs observations socio-économiques et environnementales ont été relevées.

Sur le plan économique, il est apparu que le Plan Maroc Vert est principalement adapté aux personnes aisées. De plus, le projet de construction de khattaras en béton par le gouvernement s'est soldé par un échec manifeste car le béton bloque l'écoulement de l'eau. Il est également apparu que les autorités manquent de connaissances approfondies du terrain.

Par ailleurs, on constate que les jeunes sont de moins en moins motivés par l'agriculture et ont tendance à migrer vers les grandes villes.

En ce qui concerne la palmeraie elle-même, le déficit en eau est particulièrement marqué depuis les vingt dernières années (2000-2002). Par conséquent, les habitants ont commencé à creuser des puits pour pallier ce manque d'eau. Cela a conduit à une utilisation des nappes phréatiques, ce qui n'était pas le cas auparavant. Il est à noter que l'ensemble de la production de la palmeraie, à l'exception d'une partie des olives qui est revendue, est destiné à la consommation locale.

Malgré ces défis, il est à souligner que la palmeraie montre une certaine résilience. De plus, les pluies survenues en février 2023 apportent un certain espoir pour l'avenir.

## Chapitre 5 : Discussion

Cette partie adopte une approche similaire à celle du chapitre 4 en analysant l'ensemble des résultats obtenus.

### 1. Étude du changement de la dynamique des terres

#### 1.1. Traitement des images

##### 1.1.1. Pansharpening - interprétation



Figure 33 – Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillon SK14, kasbah et route traversant la palmeraie.

Certes, le pansharpening permet d'obtenir une image de haute qualité mais explorer le terrain permet de mieux décrire ce qui s'y trouve. Un exemple illustratif se trouve dans l'échantillon SK14, où le sol est fortement dégradé. Lorsqu'on examine l'image Pléiades, cette dégradation apparaît évidente étant donné la clarté du sol et l'absence de végétation. Cependant, en regardant le haut de l'image, on remarque la présence de la même teinte de couleur et des lignes noires qui pourraient être interprétées comme des délimitations de parcelles. Dans ce cas précis, il s'agit en réalité de kasbahs, maisons typiques de la région, et non de zones abandonnées ou dégradées. Par conséquent, lors de la classification ou du calcul des indices, il est possible que les logiciels et algorithmes puissent parfois confondre ces éléments, classifiant du bâti comme une zone totalement dégradée, et vice versa.

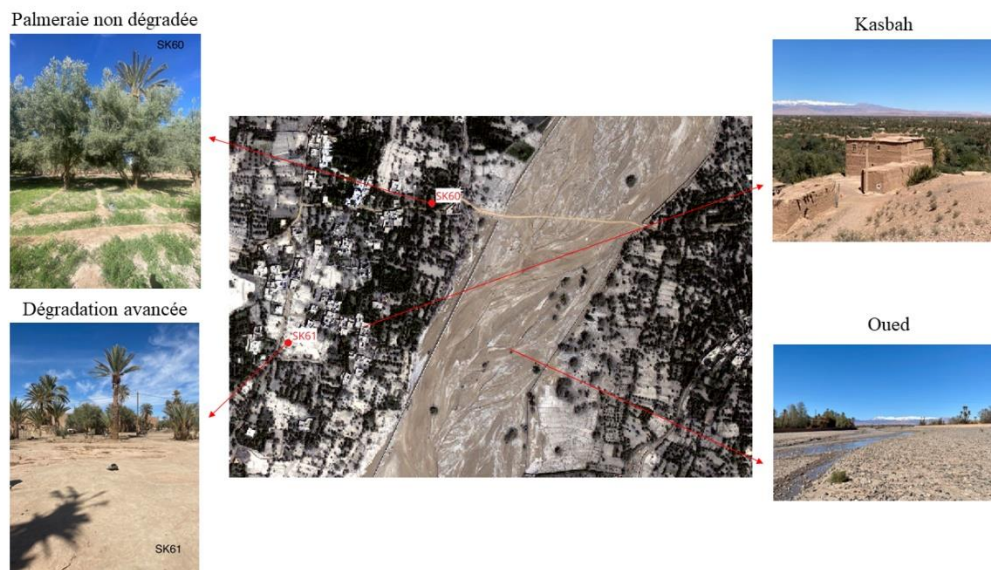


Figure 34 - Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillons SK60 et 61, kasbah et oued traversant la palmeraie.

Les oueds sont les cours d'eau qui traversent les régions semi-désertiques et qui sont notamment alimentés par des précipitations, souvent irrégulières. Celui de Skoura ne fait pas exception à cette règle et au moment de la capture de l'image de la palmeraie, il était presque à sec. Cependant, lors de la visite sur le terrain, il avait plu quelques jours auparavant, pendant plusieurs jours d'affilée, ce qui avait entraîné une augmentation du niveau d'eau dans l'oued. Cela souligne que l'image Pléiades représente la zone d'étude à un instant donné et que cet état n'est pas constant dans le temps. Il connaît des variations continues, notamment en ce qui concerne les eaux de surface.

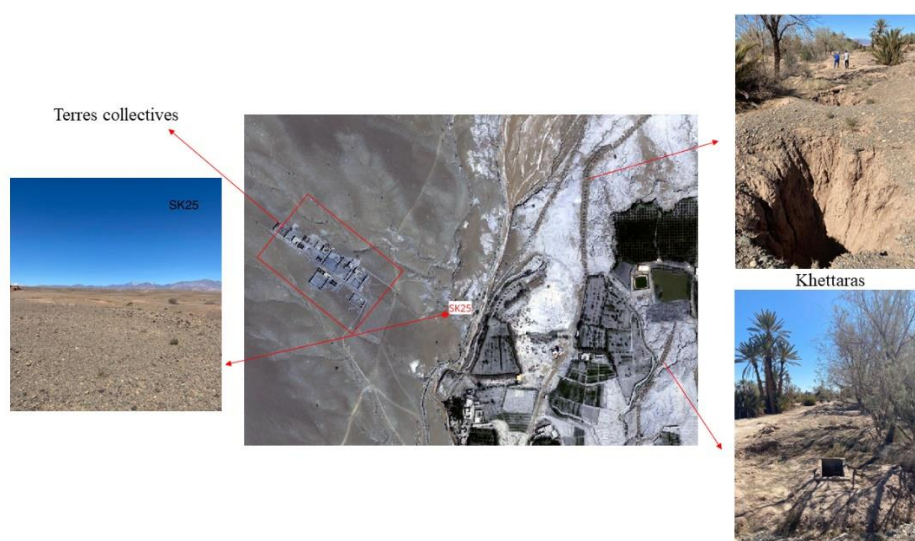


Figure 35 - Découpage d'une zone de l'image Pléiades pansharpened. Photos de terrain : échantillon SK25 (=terres collectives) et khettaras.

La Figure 35 illustre la partie nord de la palmeraie de Skoura. La teinte du sol, la densité de végétation et le contexte environnant laissent penser à une zone potentiellement dégradée ou abandonnée. Toutefois, une visite sur place a révélé une perspective totalement différente de celle initialement envisagée. En réalité, il s'agit de ce que les habitants désignent comme des terres collectives. Ces parcelles sont mises à disposition des résidents sur demande, attribuées en portions de 300m<sup>2</sup>, et sont utilisées à des fins d'habitat et d'activités diverses. Cette expérience sur le terrain souligne l'importance de mener des observations in situ pour éviter d'imposer une perspective subjective sur la réalité locale.

En fausses couleurs infrarouges, les images permettent de mettre en évidence la végétation et de distinguer celle qui est en plein processus de photosynthèse de celle qui l'est moins ou pas du tout. Par exemple, sur l'image ci-dessous, certains palmiers présentent une teinte foncée, indiquant qu'ils sont en train de dépérir sur place, tandis que d'autres arbres apparaissent en rouge vif (correspondant au pic d'infrarouge), ce qui suggère qu'ils ont encore un accès suffisant aux ressources du sol et sont donc en bonne santé.



Figure 36 – Pléiades en fausses couleurs infrarouges.

## 1.2. Classification des objets d'intérêt (états de dégradation)

### 1.2.1. Scénario n°1 : classification supervisée (Random Forest)

Plusieurs observations liées à eCognition peuvent être décrites pour comprendre les éventuelles erreurs. En effet, la classification dépend d'une segmentation préalable qui est elle-même dépendante de paramètres. Ainsi, les erreurs commises lors de la segmentation peuvent se propager à la classification. Idéalement, il aurait été préférable d'entraîner le modèle sur un parcellaire déjà établi ou bien d'en réaliser un sur place et non pas dépendre de ma subjectivité lors des photo-interprétations.

Quant aux limites du modèle, collecter un excès d'échantillons peut le saturer. Etant donné que le travail est réalisé selon des objets, il n'est pas nécessaire d'avoir un grand jeu d'entraînement, une centaine d'échantillons maximum est suffisante. Cependant, il faut veiller un à équilibre de leur nombre par classe.

De plus, il est important de sélectionner des polygones représentatifs, et à travers toute la zone d'étude, afin de limiter les confusions dans la classification.

Enfin, la similitude spectrale entre deux objets est si marquée qu'il est difficile de différencier la classe à laquelle ils appartiennent. Et parfois, il est même subtil de différencier les divers types de végétation, les zones résidentielles et leurs cours, ainsi que les zones de gestion différenciée (monocultures, abandonnées ou en jachère).

### *1.2.2. Scénario n°2 : classification itérative (Random Forest)*

La classification itérative suit des étapes similaires à la première classification, impliquant la segmentation et la collecte d'échantillons, rencontrant ainsi les mêmes difficultés énoncées précédemment. De plus, comme indiqué dans les paramètres de la Figure 22, il peut y avoir plusieurs combinaisons de paramètres de segmentation pour une même classification. Une deuxième segmentation a été nécessaire lorsque la première segmentation a partiellement distingué les deux classes mais n'a pas isolé complètement la classe souhaitée. Par exemple, dans le cas de l'identification des bâtiments, une première segmentation (100-0.5-0.9) a partagé les bâtiments des cultures mais a inclus trop d'éléments "culture" dans la catégorie "bâtiment". La catégorie "bâtiment" a donc été resegmentée avec d'autres paramètres (300-0.7-0.9) afin de mieux isoler les bâtiments. En effet, tout au long du processus de classification, le logiciel a rencontré des difficultés à distinguer le bâtiment des zones complètement dégradées. Ces deux catégories apparaissent avec des tons très clairs (blanc et gris clair), entraînant ainsi de nombreuses confusions ; cela a conduit à classer les espaces complètement dégradés comme des bâtiments ; mais pas inversement.

La Figure 37 illustre la répartition des 6 catégories de classification selon deux diagrammes circulaires.

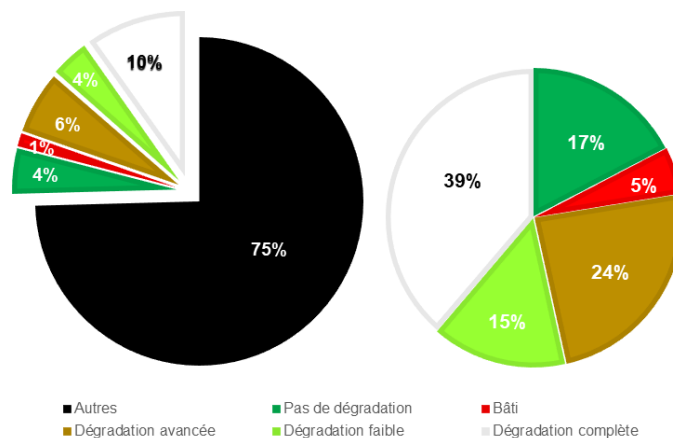


Figure 37 - Représentation en pourcentage de la classification des terres selon les 6 classes et la superficie totale et représentation en pourcentage des 4 stades de dégradation des terres selon la superficie des terres uniquement.

Les observations de mars 2023 indiquent que plus de la moitié de la palmeraie semblait être dégradée, voire complètement, ce que les pourcentages des différentes classes reflètent également. Le Tableau 13 compare les observations de mars 2023 aux prédictions d'octobre 2022 via l'image Pléiades.

Tableau 13 – Comparaison des pourcentages entre les observations de terrain réalisées en mars 2023 et la classification réalisée sur eCognition via la Pléiades d'octobre 2022.

Stades de dégradation	Observations mars 2023	Prédictions octobre 2022
Pas de dégradation	24%	18%
Dégradation faible	12%	16%
Dégradation avancée	33%	25%
Dégradation complète	31%	41%

### 1.2.3. Indice de végétation modifié ajusté au sol (MSAVI)

Sur la Figure 28, la densité de la végétation se reflète dans la tonalité du vert : plus sombre, plus dense. En observant les données pour l'année 2000, les zones nord et nord-est de la palmeraie présentent une densité élevée, tout comme une partie du sud-ouest et les rives des oueds. Cependant, au fil des années, le vert semble s'éclaircir, suggérant une réduction de la densité végétale. Par exemple, en 2022, la végétation à l'est de la palmeraie et le long des oueds a quasiment disparu, tout comme dans la région sud de la zone d'étude. Ces observations corroborent diverses études qui signalent une diminution de la densité des palmiers et des arbres fruitiers. (Agrisud International, 2004 ; Anjarne et al., 2005 ; Sedra, 2005 ; Abdelhadi et al., 2015 et Ait-El-Mokhtar et al., 2021).

#### 1.2.4. *Indice de brillance (IB)*

Comme illustré à la Figure 29, la différence entre les deux formules de brillance n'est pas immédiatement perceptible. En conséquence, comme référence, la préférence se porte sur la formule utilisant les bandes du rouge et du proche infrarouge, car visuellement, elle offre un résultat légèrement plus uniforme et intense en blanc.

La Figure 30, bien que présentant des contrastes moins marqués que la Figure 29, met en évidence les zones de sol nu et brillant. Au cœur de la palmeraie et vers l'est, des zones blanches s'agrandissent d'année en année, indiquant des régions de sol nu. Ces zones blanches représentent des sols de plus en plus dénudés et brillants, tandis que le noir correspond aux zones végétalisées où le sol est sombre et fertile. Cette observation est en corrélation avec les zones mises en évidence par le MSAVI. En effet, là où la végétation diminue au fil du temps dans la palmeraie, des zones de sol nu apparaissent. La diminution de l'approvisionnement en eau entraîne le dépérissement des arbres, ce qui conduit à l'abandon des terres par les agriculteurs et à la dégradation de ces espaces.

#### 1.2.5. *Composition colorée*

L'utilisation des indices en trois étapes a révélé que dans certaines parties de la palmeraie, la végétation connaît un déclin, laissant place à des zones de sol exposé à une forte réflectance, dépourvues de végétation. Ces zones se concentrent principalement au centre, à l'est et au sud de la palmeraie. Par ailleurs, le long des cours d'eau, l'évolution végétale varie au fil du temps, avec des méandres plus ou moins couverts de végétation selon l'année. Enfin, la composition colorée suggère une expansion de la palmeraie vers le nord et le nord-est, avec une croissance végétale entre 2000 et 2022.

Pour de futures recherches, il serait préférable d'élargir l'échantillon d'images Landsat utilisé au-delà de trois. Par exemple, en incluant quatre images par année, une par saison, offrant ainsi une perspective temporelle plus complète et prenant en compte davantage de paramètres climatiques. Ici, la sélection des dates s'est focalisée sur une correspondance annuelle, alignée sur une des saisons de croissance de la luzerne, l'été, caractérisé par des précipitations réduites. Cependant, cela peut fausser l'évaluation de la sécheresse et de la proportion des sols nus dans la région. En effet, il est probable qu'en hiver, certains terrains bénéficient d'une meilleure irrigation, impactant ainsi la perception de la dégradation des sols. Cette approche pourrait biaiser les estimations des zones légèrement dégradées et des zones très dégradées.

## 2. Validation

La première classification affichait une exactitude globale de 67.35%, mais présentait des précisions d'utilisateur très basses pour les catégories "faible dégradation" et "dégradation avancée", avec des scores de seulement 0.17 et 0.56 respectivement. C'est pourquoi une seconde classification a été effectuée, avec une segmentation différente de l'image Pléiades (400-0.6-0.9), visant à améliorer spécifiquement la classification de ces catégories en accentuant l'importance du paramètre de forme des objets. La nouvelle matrice de confusion affiche une exactitude globale plus satisfaisante, atteignant 73.47%. En outre, la précision de l'utilisateur pour la catégorie "dégradation avancée" a considérablement augmenté, atteignant une valeur de 0.81. En revanche, la valeur pour la catégorie "faible dégradation" est restée inchangée. En regroupant les catégories "dégradé" et "non dégradé", l'exactitude globale a augmenté pour atteindre une valeur finale de 87.76%.

À la suite de ces résultats, plusieurs conclusions peuvent être tirées. Premièrement, eCognition parvient efficacement à différencier les zones dégradées des zones non dégradées. Cependant, la distinction de la catégorie "faible dégradation" semble plus complexe. Ce phénomène peut résulter d'un manque d'échantillons représentatifs lors de la classification, d'un déficit de relevés sur le terrain pour cette catégorie ou encore d'une insuffisance de bandes disponibles dans l'image Pléiades.

En plus des évaluations basées sur les matrices de résultats, il est essentiel d'examiner le rendu visuel final de la classification. On remarque la présence de formes allongées spécifiques qui ne correspondent pas fidèlement à la réalité. Principalement, ces formes sont le résultat d'ombres ou de l'alignement des khettaras dans la palmeraie.

eCognition offre divers outils pour éliminer ces effets indésirables. Chaque objet présente des caractéristiques distinctes, ce qui permet généralement de supprimer les éléments atypiques en les fusionnant avec une autre classe. Par exemple, pour éliminer un objet très fin et étiré, comme l'ombre d'un mur, une route ou des khettaras, l'analyse des valeurs de la fonctionnalité "forme" peut être pertinente. En utilisant la fonction de suppression par attribut disponible dans le logiciel, il devient possible de cibler et de supprimer ces objets. Ainsi, diverses fonctionnalités d'eCognition permettent d'améliorer la qualité visuelle de la carte comme l'analyse de la géométrie des polygones en évaluant l'aire des objets, leur forme ou encore leur position par rapport à d'autres éléments.

Finalement, d'un point de vue visuel, la Figure 32 expose que les zones de brillance et de végétation sont mises en avant de manière similaire dans l'image Landsat 2022 et dans la classification effectuée sur l'image Pléiades 2022. Cette convergence suggère que les calculs de l'indice de brillance et du MSAVI sont corrects. Par extension, en appliquant la même méthodologie aux images Landsat 2000 et 2014, on peut présumer que la représentation visuelle des zones de végétation et de sol dénudé est également correctement définie pour ces deux années.

### 3. Enquêtes auprès des habitants de Skoura

La palmeraie de Skoura, située dans un environnement aride, a fait l'objet de recherches préalables à travers la revue de la littérature. Il est important de noter que cette revue ne se concentrait pas exclusivement sur la palmeraie de Skoura en particulier, mais sur les milieux arides en général, expliquant ainsi certaines divergences entre les informations recueillies dans la littérature et les observations faites sur le terrain. En outre, il est important de noter que seuls quelques habitants, exclusivement des hommes, ont pu être interrogés, ce qui restreint la représentativité de manière objective. Des facteurs tels que la barrière linguistique, le jargon scientifique parfois complexe, les considérations religieuses et les pratiques culturelles (comme le Ramadan, les moments de prière et les invitations diverses telles que thé, couscous, mariages, etc.) ont été des éléments incontournables au quotidien. Ils ont parfois limité les échanges et pourraient influencer la perception de la réalité.

Tout d'abord, il n'existe pas de problème d'ensablement proprement dit à Skoura. Cette situation découle du fait que l'ensablement est une conséquence de la désertification, un stade que la palmeraie n'a pas encore atteint. Cette constatation est appuyée par des travaux de recherche antérieurs (El Bernaoui, 2015 ; Alali et Benmohammadi, 2013).

Ensuite, des recherches antérieures soulignent que la dégradation de l'eau et de l'environnement est principalement due à une exploitation humaine plus intense et à l'impact du changement climatique (Karmaoui et Moumane, 2016 ; Karmaoui, 2019). Sur le terrain, cela se traduit notamment par l'excavation fréquente de puits par les habitants, contribuant ainsi à l'assèchement des nappes phréatiques. Cette situation crée une boucle de rétroaction positive, mettant en lumière le lien étroit entre les aspects naturels et anthropiques du chorème.

De plus, la qualité des eaux souterraines et de surface se détériore, cette dégradation découle de facteurs à la fois anthropiques (gestion inadéquate des déchets et des engrais) et naturels (Veyret et al., 2017) En effet, naturellement, l'eau présente une certaine salinité en raison de son passage à travers des roches lors de son écoulement de la montagne vers la vallée. Toutefois, lorsque la neige fond et que de l'eau s'écoule vers elle, cette dernière agit comme un filtre naturel, capturant une partie des sels minéraux dissous dans l'eau (Vanclooster, 2023). Cependant, avec la diminution de la couverture neigeuse dans le Haut Atlas, le processus de lessivage devient moins efficace, entraînant ainsi une augmentation de la teneur en sel de l'eau. Cette situation accentue la détérioration de la qualité des ressources hydriques.

Par ailleurs, la transmission du savoir-faire de génération en génération montre des signes de déclin, un aspect qui est particulièrement remarquable sur le terrain. Les habitants soulignent que ce phénomène contribue grandement à la réduction du couvert végétal. En effet, le manque de connaissances conduit à un usage inefficace de l'eau et des engrais, laissant les arbres isolés et en déperdition. Cette situation entraîne également une dégradation de la qualité des sols de la palmeraie de Skoura.

Un autre effet en cascade est observé avec le désintérêt des jeunes pour l'agriculture. Or, les opportunités d'emploi sont de plus en plus concentrées autour de l'agriculture. Et, les jeunes, conscients des perspectives plus prometteuses offertes par les grandes villes, sont incités à migrer. Cela engendre un double défi : un manque de main-d'œuvre au sein de la palmeraie et une perte de transmission des bonnes pratiques agricoles, posant ainsi des défis considérables pour l'avenir de la palmeraie de Skoura.

Finalement, en plus de ces défis environnementaux, il apparaît que les autorités peuvent parfois faire défaut en termes de connaissances et d'expertise pour répondre de manière appropriée aux besoins des habitants de la palmeraie. Cela se traduit par la construction d'infrastructures sans une considération adéquate de leur utilité à long terme, créant ainsi des problèmes potentiels.

Il convient tout de même de souligner l'importance capitale de l'approvisionnement en eau pour la viabilité de la palmeraie. Les habitants sont tributaires de variables telles que les précipitations et la fonte des neiges dans le Haut Atlas, des paramètres sur lesquels ils exercent peu de contrôle. Toutefois, dès qu'un apport en eau est enregistré dans la région, l'activité agricole reprend vigueur, ce qui remet en question les observations et les conséquences négatives précédemment évoquées.

Le schéma ci-dessous récapitule les relations entre les divers composants. Il s'agit en fait de ce que l'on nomme un chorème. R. Brunet a introduit ce terme en 1980 pour décrire des configurations fondamentales d'aménagement de l'espace. Les chorèmes se retrouvent aussi bien dans le milieu naturel que dans l'espace organisé par l'homme et sont souvent représentés par des schémas ou des modèles graphiques élémentaires.

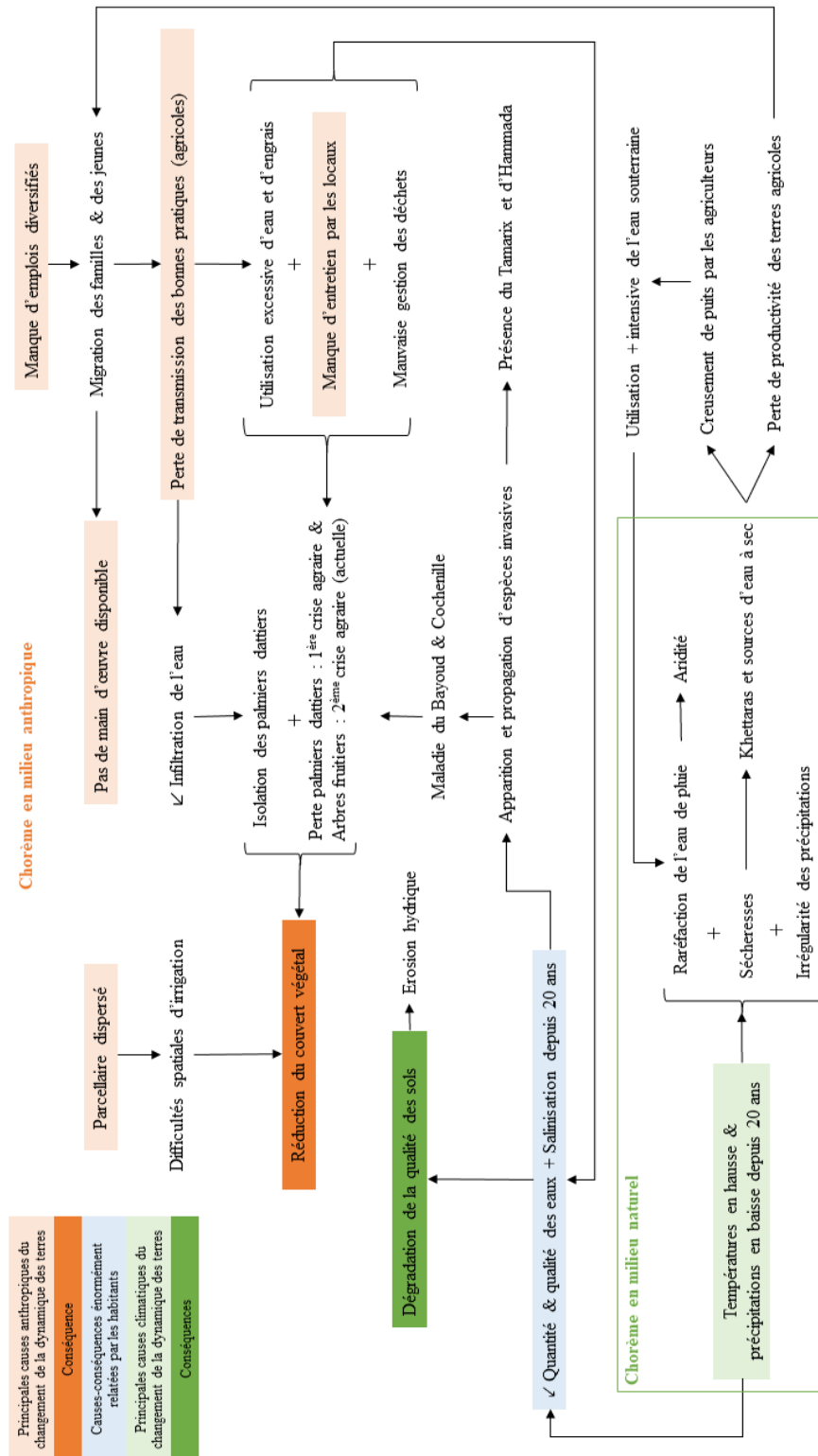


Figure 38 - Chorèmes en milieu anthropique et naturel à Skoura.

#### 4. Elaboration de solutions durables

Le dernier objectif de ce mémoire était de proposer des solutions durables pour favoriser la prospérité de la palmeraie malgré la pénurie d'eau et la sécheresse.

En premier lieu, comme le mentionne la célèbre citation de Nelson Mandela « L'éducation est l'arme la plus puissante qu'on puisse utiliser pour changer le monde », les résidents de Skoura soulignaient le manque de connaissances des jeunes sur les bonnes pratiques agricoles, l'utilisation efficace de l'eau et des engrais, entraînant ainsi un gaspillage de ces précieuses ressources.

Par ailleurs, la construction improvisée de puits par les habitants, bien que motivée par la nécessité, néglige souvent les dangers de telles structures. De plus, la population n'est pas toujours consciente que creuser chaque année, un petit plus profondément, assèche progressivement les nappes phréatiques. Il est impératif qu'une prise de conscience survienne, mettant fin à ce cycle sans fin de creusement toujours plus profond.

De plus en plus de déchets domestiques sont générés et ceux-ci contribuent à la pollution des ressources en eau. Les habitants ne sont pas suffisamment conscients de ce problème et donc ces eaux usées sont directement déversées dans les séguis (ruisseaux) en raison de l'absence de systèmes de traitement et de recyclage des eaux usées en milieu rural.

En effet, seulement 38 % des douars (habitations) sont équipés de dispositifs d'évacuation des excréments et 88 % des eaux usées ménagères sont rejetées directement dans la nature. L'aspect dispersé et peu peuplé du milieu rural rend toute approche similaire aux zones urbaines superflue, voire inappropriée. Malgré ces défis, quelques expériences pilotes d'assainissement écologique ont été menées en milieu rural (Latrach, 2018).

Par exemple, Salma Bougarrani, docteure en traitement des eaux, lauréate du prix Women in Africa, a développé une station d'épuration entièrement écologique. Son objectif était de créer une solution "lowtech" accessible et intégrable dans le milieu rural marocain et africain, traitant les eaux usées pour les réutiliser dans l'irrigation des cultures. Ainsi, l'eau provenant des toilettes devient la source d'eau des légumes, contribuant à une approche durable et adaptée à la réalité locale.

Ensuite, comme le souligne Salma Bougarrani, la dispersion naturelle des zones rurales (Latrach, 2018) rend parfois l'irrigation complexe. Une solution adoptée par certains agriculteurs de la palmeraie de Skoura consiste à opérer en coopérative, regroupant ainsi les parcelles pour rendre l'irrigation plus efficace et plus facile à mettre en œuvre. Dans ce contexte, le système d'irrigation goutte à goutte se révèle adapté à ce type de configuration dans la palmeraie de Skoura. Certaines coopératives optent également pour l'utilisation de panneaux solaires.

En outre, la politique agricole nationale, incarnée par le Plan Maroc Vert, a misé sur des cultures intensives telles que celle du palmier dattier pour verdir le Maroc. Cependant, cette espèce végétale se révèle particulièrement gourmande en eau, accentuant ainsi la crise hydrique. À titre illustratif, un palmier dattier demande 150 litres d'eau par jour, un choix peu judicieux dans un environnement confronté à un stress hydrique, surtout en culture intensive. Il serait peut-être préférable d'envisager d'autres cultures ou du moins d'adopter des méthodes de culture alternatives.

Dans ce contexte, l'agroécologie émerge comme une solution viable dans la palmeraie et certains agriculteurs locaux l'appliquant déjà. Selon leurs témoignages, cette approche agricole est raisonnée, économe en eau et ne requiert pas de produits chimiques. Les légumes sont cultivés en association, favorisant l'interconnexion nutritionnelle, la complémentarité et la protection mutuelle. Cette méthode permet de préserver efficacement l'eau et les sols et favorise la diversification des espèces cultivées. Ainsi, au lieu de privilégier uniquement les oliviers, bien que plus résistants au climat local, cette approche assure une production variée et résiliente face aux aléas climatiques.

Finalement, l'aménagement de barrages pourrait être considéré comme une option pour stocker l'eau mais cette proposition n'est pas toujours bien accueillie par les habitants car elle risque de compromettre l'approvisionnement en eau des palmeraies en aval lors des précipitations.

Je conclurai en soulignant ce constat : même face à la pénurie d'eau et à la sécheresse persistante dans la région, les habitants de Skoura s'adaptent constamment en ajustant leurs pratiques agricoles en fonction des conditions arides. Une oasis représente ainsi une véritable école de vie où, avec des ressources limitées voire inexistantes, ils parviennent à insuffler la vie et à préserver la résilience de leur environnement.

## Conclusions

Le principal objectif de cette étude était d'utiliser des méthodes de télédétection pour créer une carte illustrant l'état des terres dans la palmeraie de Skoura en 2022 et de suivre cette évolution sur les vingt dernières années en se basant sur l'indice de brillance et le MSAVI. En parallèle, des enquêtes auprès des habitants locaux ont été menées pour mieux comprendre les enjeux actuels découlant des changements climatiques et des activités humaines, afin de proposer des solutions adaptées et durables.

La carte réalisée à partir de l'image Pléiades d'octobre 2022 a montré une précision globale de 73 %, un résultat satisfaisant. Cependant, la catégorie de "faible dégradation" a montré un F-score de 0,5, relativement bas par rapport aux autres classes, rendant sa représentation sur la carte moins fidèle à la réalité.

Lorsqu'on compare les données d'observation de mars 2023 avec la classification de l'état de dégradation des terres effectuée sur l'image Pléiades de 2022, les pourcentages se ressemblent. La catégorie de "faible dégradation" présente des pourcentages très proches : 12% et 16% respectivement. De plus, la proportion totale des terres fortement et complètement dégradées est similaire, atteignant 64% pour 2023 et 66% pour l'image Pléiades.

Ensuite, l'analyse des images Landsat a révélé une diminution de la végétation au profit d'une expansion des zones de sols nus au cours des vingt dernières années et ces zones se concentrent principalement au centre, à l'est et au sud. Par ailleurs, le suivi temporel suggère aussi une expansion de la palmeraie vers le nord et le nord-est.

Enfin, la rareté de l'eau, en particulier les précipitations irrégulières sur deux décennies, s'avère être la cause principale du déclin des terres cultivables et du changement dynamique de la région. Pour faire face à ces défis, des solutions peuvent être envisagées, telles que la promotion des terres coopératives pour faciliter l'irrigation et l'entretien, l'installation de stations d'épuration ou encore la réduction des monocultures intensives au profit de l'agroécologie, plus résiliente.

Par ailleurs, certaines activités humaines accentuent ce phénomène, telles que l'oubli des bonnes pratiques agricoles, entraînant le gaspillage d'eau et de fertilisants ou encore la migration des jeunes vers les grandes villes, s'accompagnant d'une perte de savoir-faire d'une génération à l'autre.

## Bibliographie

Agrisud International. 2004. « Sécurité alimentaire et lutte contre la pauvreté dans les vallées du Drâa et du Dadès ».

Airbus Defence and Space Intelligence. 2023. « Pléiades | Very High-Resolution (50cm) Satellites ». 2023. <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/pleiades/>.

Ait Khandouch, Mohamed. 2000. « L'eau, facteur limitant de l'espace oasien. Le cas des oasis de Skoura et Amkchoud au sud du Maroc (The water : limiting factor of the oasian space. The case of the oasis Skoura and Amkchoud in the south of Morocco) ». *Bulletin de l'Association de géographes français* 77 (1): 52-60. <https://doi.org/10.3406/bagf.2000.2147>.

Ait-El-Mokhtar, Mohamed, Abderrahim Boutasknit, Raja Ben-Laouane, Mohamed Anli, Fatima El Amerany, Salma Toubali, Soufiane Lahbouki, Said Wahbi, et Abdelilah Meddich. 2021. « Vulnerability of Oasis Agriculture to Climate Change in Morocco »: In *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies*, édité par Ahmed Karmaoui, Kirby Barrick, Michael Reed, et Mirza Barjees Baig, 76-106. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3343-7.ch004>.

Alali, A, et A Benmohammadi. 2013. « L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (Sud-Est du Maroc) », Larhyss Journal, .

Al-Quraishi, Ayad, Hawar Razvanchy, et Heman Gaznayee. 2020. « A Comparative Study for Performance of Five Landsat-Based Vegetation Indices: Their Relations to Some Ecological and Terrain Variables ». *Journal of Geoinformatics & Environmental Research* 1 (01): 20-37. <https://doi.org/10.38094/jgier119>.

Anjarne, M, M Bougerfaoui, et L Abahmane. 2005. « La multiplication in vitro du palmier dattier : Un outil de développement des palmeraies marocaines dévastées par la maladie du Bayoud. »

Aziz, Larbi, et Imane Elquaoumi. 2016. « Analyse des stratégies d'adaptations des agriculteurs de Skoura (Ouarzazate) aux changements climatiques ».

Azzedine, IDDER Mohamed. 2011. « La palmeraie du Ksar d'Ouargla; entre dégradation et réhabilitation » 3.

Badraoui, M, et R Dahan. 2011. « Le Plan Maroc Vert en matière de sécurité alimentaire et de changement climatique. Sécurité alimentaire et changement climatique dans les zones arides. », 61.

Barrari, A., A. R. Huete, D. Morin, et F. Zagolski. 1996. « Effets de La Couleur et de La Brillance Du Sol Sur Les Indices de Végétation ». *International Journal of Remote Sensing*, juillet. <https://doi.org/10.1080/01431169608948745>.

Benguerai, Abdelkader, et Benamar Belgherbi. 2014. « Revue Agro-Ecologie Volume 02/02. Apport des SIG et de la télédétection dans l'évaluation de l'écosystème steppique pour un développement durable (Algérie occidentale) » 02.

Bensaïd, Abdelkrim. 2006. « SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride. Le cas de la Wilaya De Naâma (Algérie). (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I). »

Beraaouz, Mohamed, Mohamed Abioui, Mohammed Hssaisoune, et Jesús Martínez-Frías. 2022. « Khettaras in the Tafilalet Oasis (Morocco): Contribution to the Promotion of Tourism and Sustainable Development ». *Built Heritage* 6 (1): 24. <https://doi.org/10.1186/s43238-022-00073-x>.

Berger, André Léon. 2005. « Le réchauffement climatique au XXIe siècle. Causes et conséquences ». *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique* 16 (7): 323-39. <https://doi.org/10.3406/barb.2005.28496>.

Bihaoui, Abdesslam, Abdelmajid Haddioui, et Soumaya Hammada. 2020a. « Distribution géographique des espèces du genre Tamarix L. (Tamaricaceae) au Maroc / Geographical distribution of Tamarix L. (Tamaricaceae) in Morocco ». *Ecologia mediterranea* 46 (1): 63-74. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2020.2099>.

———. 2020b. « Les erreurs d'identification des espèces du genre Tamarix L. au Maroc: clés non uniformes et espèces polymorphes / The identification errors of species of the genus Tamarix L. species in Morocco: non-uniform keys and polymorphic species ». *Ecologia mediterranea* 46 (1): 49-61. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2020.2098>.

Bonin, Muriel, Pascal thinon, Patrick Caron, Jean-Paul Cheylan, et Yves Clouet. 2001. « Territoire, zonage et modélisation graphique: recherche-action et

apprentissage / Territory, zoning and graph modelling: concerted applied research and training ». *Géocarrefour* 76 (3): 241-52. <https://doi.org/10.3406/geoca.2001.2562>.

Bonneau, X. 2011. « Rapport de mission dans les palmeraies de SIAT-Gabon (Gabon), 10 au 15 décembre 2010. », 12.

Boucherit, Hafidha, Khéloufi Benabdeli, Abdelkrim Benaradj, et Mostafia Boughalem. 2018. « Phytoécologie de “Hammada scoparia” dans la région de Naâma (Algérie occidentale) ». *Botanica Complutensis* 42: 93-99. <https://doi.org/10.5209/BOCM.61371>.

Boulaaba, Mondher, Mejdî Snoussi, Mariem Saada, Khaoula Mkadmini, Abderrazak Smaoui, Chedly Abdely, et Riadh Ksouri. 2015. « Antimicrobial Activities and Phytochemical Analysis of Tamarix Gallica Extracts ». *Industrial Crops and Products* 76 (décembre): 1114-22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.08.020>.

Breiman, Leo. 2001. « Random Forests ». *Machine Learning* 45 (1): 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

Charrier, Bertrand (ed ), Claude (ed ) Torre, Agnès Bégué, Louise Leroux, Danny Lo Seen, Jean-Philippe Tonneau, et Philippe Morant. 2016. « Observation spatiale pour l’agriculture en Afrique: potentiels et défis ». Monograph. AFD. Afrique. 2016. <https://agritrop.cirad.fr/579494/>.

Chelleri, Lorenzo, Guido Minucci, Angela Ruiz, et Ahmed Karmaoui. 2014. « Responses to Drought and Desertification in the Moroccan Drâa Valley Region: Resilience at the Expense of Sustainability? » *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses* 5 (2): 17-33. <https://doi.org/10.18848/1835-7156/CGP/v05i02/37199>.

Clouet, Yves. 2000. « Le zonage à dire d’acteurs. Méthode et perspectives. »

Defourny, Pierre. 2020. « LBIR2102 - Géomatique appliquée ».

Delhez, Baptiste. 2020. « LBIR2102 - Géomatique appliquée - TP Télédétection ».

Dinamis DataTerra. 2020. « Images Pléiades – Dinamis ». 2020. <https://dinamis.data-terra.org/pleiades/>.

Drones Imaging. s. d. « Indice de Brillance ».

El Bernaoui, Omar. 2015. « Le phénomène d'ensablement dans la région d'Ain Sefra. Conditions et facteurs. »

European Space Agency. s. d. « Missions - Earth Online ». Consulté le 20 septembre 2023. <https://earth.esa.int/eogateway/missions>.

FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, et JRC. 2012. « Harmonized World Soil Database ».

Guo, Bing, Wenqian Zang, Baomin Han, Fei Yang, Wei Luo, Tianli He, Yewen Fan, Xiao Yang, et Shuting Chen. 2020a. « Dynamic Monitoring of Desertification in Naiman Banner Based on Feature Space Models with Typical Surface Parameters Derived from LANDSAT Images ». *Land Degradation & Development* 31 (12): 1573-92. <https://doi.org/10.1002/ldr.3533>.

Hafidha, BOUCHERIT, BENABDELI Khéloufi, et BENARADJ Abdelkrim. 2017. « CARACTERISATION FLORISTIQUE DE LA STEPPE A HAMMADA SCOPARIA DANS L'ATLAS SAHARIEN ORANAIS (NAAMA- ALGERIE) ».

Huang, Sha, Lina Tang, Joseph P. Hupy, Yang Wang, et Guofan Shao. 2021. « A Commentary Review on the Use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Era of Popular Remote Sensing ». *Journal of Forestry Research* 32 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.

Hueso-González, P., M. Muñoz-Rojas, et J.F. Martínez-Murillo. 2018. « The Role of Organic Amendments in Drylands Restoration ». *Current Opinion in Environmental Science & Health* 5 (octobre): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.002>.

John Ranjeet, Jiquan Chen, Vincenzo Giannico, Hogeun Park, Jingfeng Xiao, Gabriela Shirkey, Zutao Ouyang, Changliang Shao, Raffaele Laforteza, et Jiaguo Qi. 2018. « Grassland Canopy Cover and Aboveground Biomass in Mongolia and Inner Mongolia: Spatiotemporal Estimates and Controlling Factors ». *Remote Sensing of Environment* 213 (août): 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.002>.

Karmaoui, Ahmed. 2019. « Drought and Desertification in Moroccan Pre-Sahara, Draa Valleys: Exploring from the Perspective of Young People ». *Geoenvironmental Disasters* 6 (1): 2. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0118-8>.

Karmaoui, Ahmed, et Adil Moumane. 2016. « Changes in the Environmental Vulnerability of Oasean System (desert oasis), Pilot Study in Middle Draa Valley,

Morocco ». *Expert Opinion on Environmental Biology* 5 (3).  
<https://doi.org/10.4172/2325-9655.1000135>.

Kinyanjui, Mwangi J. 2011. « NDVI-Based Vegetation Monitoring in Mau Forest Complex, Kenya ». *African Journal of Ecology* 49 (2): 165-74.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2010.01251.x>.

Köchy, M., R. Hiederer, et A. Freibauer. 2015. « Global Distribution of Soil Organic Carbon – Part 1: Masses and Frequency Distributions of SOC Stocks for the Tropics, Permafrost Regions, Wetlands, and the World ». *SOIL* 1 (1): 351-65.  
<https://doi.org/10.5194/soil-1-351-2015>.

Ksouri, Riadh, Hanen Falleh, Wided Megdiche, Najla Trabelsi, Baya Mhamdi, Kamel Chaieb, Amina Bakrouf, Christian Magné, et Chedly Abdelly. 2009. « Antioxidant and Antimicrobial Activities of the Edible Medicinal Halophyte *Tamarix Gallica* L. and Related Polyphenolic Constituents ». *Food and Chemical Toxicology* 47 (8): 2083-91. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.05.040>.

Laban, Peter, Graciella Metternicht, et Jonathan Davies. 2018. *Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive*. 1<sup>re</sup> éd. IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.03.en>.

Latrach, Lahbib. 2018. « Rural sanitation in morocco: Situation, realizations and perspectives ». *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal* 2 (3): 63-72. <https://doi.org/10.48421/IMIST.PRSM/ewash-ti-v2i3.13051>.

Lee, Cathy, Thomas Schaaf, et Unesco, éd. 2008. *The future of drylands: international scientific conference on desertification and drylands research, Tunis, Tunisia, 19-21 June 2006*. Man and the biosphere series. Dordrecht, Netherlands: Paris: Springer ; UNESCO.

Lefèvre, Clara, Rekek Fatma, Alcantara Viridiana, et Wiese Liesl. 2017. « Carbone Organique Du Sol Une Richesse Invisible ».

Li, Jinya, Xiuchun Yang, Yunxiang Jin, Zhi Yang, Wenguang Huang, Lina Zhao, Tian Gao, et al. 2013. « Monitoring and Analysis of Grassland Desertification Dynamics Using Landsat Images in Ningxia, China ». *Remote Sensing of Environment* 138 (novembre): 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.010>.

Liniger, Hanspeter, Godert van Lynden, Freddy Nachtergaele, Gudrun Schwilch, et Riccardo Biancalani. 2013. « Questionnaire for Mapping Land Degradation and Sustainable Land Management (QM) Version 2 ».

Ma, Zongyi, Yaowen Xie, Jizong Jiao, Linlin li, et Xiangqian Wang. 2011. « The Construction and Application of an Aledo-NDVI Based Desertification Monitoring Model ». *Procedia Environmental Sciences* 10: 2029-35. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.318>.

Maimouni, S., A. Bannari, A. El-Harti, et A. El-Ghmari. 2011. « Potentiels et limites des indices spectraux pour caractériser la dégradation des sols en milieu semi-aride ». *Canadian Journal of Remote Sensing* 37 (3): 285-301. <https://doi.org/10.5589/m11-038>.

Merkel, Daniel L., et Harold H. Hopkins. 1957. « Life History of Salt Cedar (*Tamarix gallica* L.) ». *Transactions of the Kansas Academy of Science (1903-)* 60 (4): 360. <https://doi.org/10.2307/3626390>.

Mlih, Rawan, Roland Bol, Wulf Amelung, et Nadhem Brahim. 2016. « Soil Organic Matter Amendments in Date Palm Groves of the Middle Eastern and North African Region: A Mini-Review ». *Journal of Arid Land* 8 (1): 77-92. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0054-8>.

Mokhtari, N, R Mrabet, P Lebailly, et L Bock. 2014. « Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc », *Revue Marocaine des sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 2: 50-66.

Nassira, Boukaya, et Ahmed Boutmedjet. 2015. « IMPACT DE L'APPLICATION DES BOUES D'EPURATION URBAINES SUR L'AMELIORATION DES SOLS CULTIVES DANS LA STEPPE SUD ALGEROISE ». In .

National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2021. « Satellites | Landsat Science ». 30 novembre 2021. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>.

Pierre George, et Fernand Verger. 1970. « Dictionnaire de la géographie ». 6ème édition revue et mise à jour 1970.

Plaza, César, Gabriel Gascó, Ana M. Méndez, Claudio Zaccone, et Fernando T. Maestre. 2018. « Soil Organic Matter in Dryland Ecosystems ». In *The Future of Soil Carbon*, 39-70. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00002-X>.

Post, D. F., A. Fimbres, A. D. Matthias, E. E. Sano, L. Accioly, A. K. Batchily, et L.g. Ferreira. 2000. « Predicting Soil Albedo from Soil Color and Spectral Reflectance Data ». *Soil Science Society of America Journal* 64 (3): 1027-34. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431027x>.

Qi, J., A. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr, et S. Sorooshian. 1994. « A modified soil adjusted vegetation index ». *Remote Sensing of Environment* 48 (2): 119-26. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1).

Rondeaux, Geneviève, Michael Steven, et Frédéric Baret. 1996. « Optimization of soil-adjusted vegetation indices ». *Remote Sensing of Environment* 55 (2): 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).

Sedra My, H. (2005). La maladie du Bayoud du palmier dattier en Afrique du Nord: Diagnostic et caractérisation.

Sinan, Mohamed, et Abdelaziz Belhouji. 2016. « Impact Du Changement Climatique Sur Le Climat et Les Ressources En Eau Du Maroc Aux Horizons 2020, 2050 et 2080 et Mesures d'adaptation ». *La Houille Blanche* 102 (4): 32-39. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016037>.

Steinhauer-Burkart, Bernd, et Slimane Aziki. 2008. « Plan cadre de gestion de la Réserve de Biosphère des Oasis du Sud Marocain (RBOSM) ».

Stour, L., et A. Agoumi. 2008. « Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies ». *Hydroécologie Appliquée* 16: 215-32. <https://doi.org/10.1051/hydro/2009003>.

Taïr, Kaddour, Omar Kharoubi, Oussama Anouar Taïr, Nouria Hellal, Iméne Benyettou, et Abdelkader Aoues. 2016. « Aluminium-Induced Acute Neurotoxicity in Rats: Treatment with Aqueous Extract of *Arthrophytum* (*Hammada Scoparia*) ». *Journal of Acute Disease* 5 (6): 470-82. <https://doi.org/10.1016/j.joad.2016.08.028>.

Tervonen, Tommi, Adel Sepehr, et Miłosz Kadziński. 2015. « A Multi-Criteria Inference Approach for Anti-Desertification Management ». *Journal of Environmental Management* 162 (octobre): 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.006>.

Trabucco, Antonio, et Robert J Zomer. 2018. « Global Aridity Index and Potential Evapo-Transpiration (ET<sub>0</sub>) Climate Database V2 ».

Trimble - eCognition. 2020. « Multi-Resolution Segmentation ». eCognition | Knowledge Base. 1 septembre 2020. <https://support.ecognition.com/hc/en-us/articles/360016173600-Multi-resolution-Segmentation>.

United States Geological Survey (USGS). s. d. « Landsat 7 | U.S. Geological Survey ». Consulté le 20 septembre 2023. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>.

Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED). 2008. « Les indices prenant en compte la température de surface ». 2008. <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/qques-indices/indices-temperature-surface.html>.

Veyret, Yvette, Richard Laganier, et Helga-Jane Scarwell. 2017. « Chapitre 5. Roches, sols et environnement ». In *L'environnement*, 108-31. Coursus. Paris: Armand Colin. <https://www.cairn.info/l-environnement--9782200618605-p-108.htm>.

Wonkka, Carissa L., Dirac Twidwell, Trenton E. Franz, Charles A. Taylor, et William E. Rogers. 2016. « Persistence of a Severe Drought Increases Desertification but Not Woody Dieback in Semiarid Savanna ». *Rangeland Ecology & Management* 69 (6): 491-98. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2016.07.005>.

Wu, Zhenhua, Shaogang Lei, Zhengfu Bian, Jiu Huang, et Yong Zhang. 2019. « Study of the Desertification Index Based on the Albedo-MSAVI Feature Space for Semi-Arid Steppe Region ». *Environmental Earth Sciences* 78 (6): 232. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8111-9>.

Yacoubi Khebiza M, Messouli M. 2014. « Environmental Vulnerability to Climate Change and Anthropogenic Impacts in Dryland, (Pilot Study: Middle Draa Valley, South Morocco) ». *Journal of Earth Science & Climatic Change* s11 (01). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.S11-002>.

Zongfan, Bai, Han Ling, Jiang Xuhai, Liu Ming, Li Liangzhi, Liu Huiqun, et Lu Jiaxin. 2022a. « Spatiotemporal Evolution of Desertification Based on Integrated Remote Sensing Indices in Duolun County, Inner Mongolia ». *Ecological Informatics* 70 (septembre): 101750. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101750>.

# Annexes

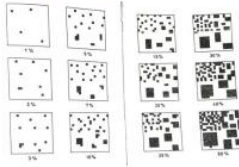
## 1. Annexe 1 : Fiche des relevés de terrain

Numéro de la parcelle : \_\_\_\_\_ Coordonnées de la parcelle : \_\_\_\_\_

### Indices de terrain

#### 1. Occupation de la station : degré ouverture végétation ligneuse (pérenne)

1. Fermé (recouvrement global > 90%)
2. Peu ouvert (recouvrement global entre 75% et 90%)
3. Semi-ouvert (recouvrement global entre 50% et 75%)
4. Ouvert (recouvrement global entre 25% et 50%)
5. Très ouvert (recouvrement global entre 10% et 25%)
6. Extrêmement ouvert (recouvrement global < 10%)
7. Totalement ouvert (recouvrement global nul)



#### 2. Influence de l'homme : degré d'artificialisation

1. Terres au repos
2. Terres abandonnées
3. Artificialisation assez faible : terres cultivées et entretenues

#### 3. Caractère de la surface du sol : éléments constitutifs de la surface du sol

Imaginer la végétation à la surface du sol rasée à quelques centimètres au-dessus du sol.

Au total, on doit avoir 100% de recouvrement par parcelle analysée.

Le sol est alors occupé par :

1. Roche dure et blocs : particules > 20cm : \_\_\_\_\_%
2. Pierrailles : particules entre 2mm et 20cm de diamètre (graviers et cailloux) : \_\_\_\_\_%
3. Terre fine : particules < 2mm (MO fine aussi) : \_\_\_\_\_%
4. Végétation : recouvrement basal (base de touffes, troncs, collets) : \_\_\_\_\_%
5. Litière : débris d'organismes végétaux et animaux : \_\_\_\_\_%

#### 4. Types de litière

1. Pas de litière
2. Type I : Litières foliacées denses : feuilles formant un tapis dense et continu à la surface du sol, peu de place entre elles
3. Type II : Litières foliacées aérées : feuilles ou aiguilles formant un tapis continu mais aéré à la surface du sol permettant à l'air de circuler librement
4. Type III : Litières ligneuses : morceaux de bois (branches, brindilles) ou écorce ne formant pas de tapis continu à la surface du sol
5. Type IV : Débris transformés par les animaux : débris d'origine animale (bouses, crottes)

#### 5. Etude édaphique : texture

Famille	Séquence dimensionnelle	Genre	Tribus
Fine	0 - 2 µm	Argiles (A)	Poudres
	2 - 50 µm	Limons (L)	
	50 - 2000 µm	Sables (S)	Sables
Grossière	2 - 20 mm	Graviers (G)	Pierrailles
	2 - 20 cm	Pierres (P)	
Très grossière	20 - >100 cm		Blocs

#### 6. Etude édaphique : structure

Distribution de la taille des agrégats :

- 0 : Conditions pauvres
- 1 : Conditions modérées
- 2 : Bonnes conditions



#### 7. Type d'érosion

- S : Erosion sur nappe (Sheet)
- R : Erosion en rigole (Rill) : jusqu'à 30cm de profondeur et largeur
- G : Erosion ravinante (Gully) : 30cm - 2m de profondeur et largeur
- A : Ravin : > 2m profondeur et largeur
- N : Pas d'érosion

#### 8. Etat actuel de l'érosion et son étendue

##### 8.1. Son activité

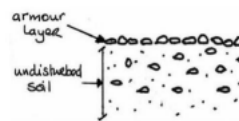
3. Active : l'élément d'érosion augmente en taille
2. Partiellement stabilisé : entre actif et stable
1. Stable : élément d'érosion plus récent pour lequel des interventions anthropogéniques récentes (digues de contour ou changement dans la gestion des terres) ont ralenti ou arrêté l'érosion.
0. Diminué

##### 8.2. Son étendue

0. Négligeable (0-2%)
1. Localisée (3-15%)
2. Modérée (16-30%)
3. Étendue (31-50%)

#### 9. Couche armature

- Oui : épaisseur : \_\_\_\_\_ mm
- Non



#### 10. Degré de salinité

S0 : Pas de salinité : aucune végétation ne semble affectée par la salinité

S1 : Légèrement salin : présence d'espèces tolérantes au sel et diminution des espèces locales. Pas de taches salines nues ni de taches/cristaux de sel sur le sol nu.

S2 : Modérément salin : les espèces tolérantes au sel commencent à dominer la communauté végétale et toutes les plantes sensibles au sel sont nettement affectées. De petites zones dénudées allant jusqu'à 1m<sup>2</sup> peuvent être présentes et des taches/cristaux de sel peuvent être visibles sur le sol.

S3 : Hautement salin : seules les plantes tolérantes au sel restent intactes. De grandes zones salines dénudées peuvent apparaître, présentant des taches ou des cristaux de sel ou le sol supérieur peut être fleuri ou gonflé.

S4 : Extrêmement salin : seules les plantes très tolérantes au sel survivent. Les arbres sont morts ou dépérissent. Les zones salines dénudées sont étendues et présentent des taches ou des cristaux de sel.

#### 11. Plantes indicatrices

- Tamarix gallica : arbre adapté au climat méditerranéen et au sel
- Haloxylon scoparium (Hammada scoparia) : plante indicatrice de milieu aride, salinité, etc.

## 2. Annexe 2 : Questionnaire des enquêtes de terrain auprès des habitants

### Questionnaire : Land Degradation Assessment in Drylands

#### 1. Informations générales

Nom :
Prénom :
Age approximatif :
Profession :
Rôle dans la palmeraie :
Autres :
Remarques :

#### 2. Système d'utilisation des terres (land use system)

##### 2.1. Tendence de la couverture

- 2 : la couverture de la zone augmente rapidement en taille (> 10% / 10 ans)
- 1 : la couverture de la zone augmente lentement en taille (< 10% / 10 ans)
- 0 : la couverture de la zone reste stable
- 1 : la couverture de la zone diminue lentement en taille (< 10% / 10 ans)
- 2 : la couverture de la zone diminue rapidement en taille (> 10% / 10 ans)

##### 2.2. Tendence de la structure (importance des 3 strates)

- 2 : la structure se densifie rapidement
- 1 : la structure se densifie lentement
- 0 : la structure reste stable
- 1 : la structure tend lentement vers une simplification de la structure verticale
- 2 : la structure tend rapidement vers une simplification de la structure verticale

##### 2.3. Densité d'espèces arboricoles

Strate arborescente (palmiers) : \_\_\_\_\_

Strate arbustive (arbres fruitiers) : \_\_\_\_\_

Strate herbacée (cultures fourragères) : \_\_\_\_\_

Autres : \_\_\_\_\_

#### 3. Dégradation des terres par système d'utilisation des terres

##### 3.1. Types de dégradation

- Pas de dégradation
- W : Érosion du sol par l'eau
  - o Wt : Perte de la couche arable
  - o Wg : Érosion par ravinement
  - o Wm : Mouvement de masse (glissements de terrain, coulées de boue)
  - o Wr : Érosion des berges
- E : Érosion du sol par le vent
  - o Et : Perte de la couche arable
  - o Ed : Déflation & dépôt (enlèvement inégal des matériaux du sol par l'action du vent)
  - o Eo : Effets de dégradation hors site (pollution atmosphérique due aux activités minières)
- C : Détérioration chimique du sol
  - o Cn : Déclin de fertilité et matière organique
  - o Cp : Pollution du sol
  - o Cs : Salinisation
- P : Détérioration physique du sol
  - o Pc : Compaction (piétinement, utilisation de machines)
  - o Pk : Scellement et encroûtement (couche imperméable)
  - o Pw : Engorgement de l'eau (saturation des sols en eau par l'homme)
  - o Ps : Affaissement des sols organiques, tassement du sol (drainage)
  - o Pu : Perte bio-productivité (construction, minage)
- H : Dégradation des eaux
  - o Ha : Aridification
  - o Hs : Changement de la quantité des eaux de surface
  - o Hg : Changement de la quantité d'eau sous-terrain
  - o Hp : Changement de la qualité des eaux de surface
  - o Hq : Changement de la qualité d'eau sous-terrain
  - o Hw : Réduction de la capacité tampon des zones humides (faire face à la sécheresse, pollution)
- B : Dégradations biologiques
  - o Bc : Réduction de la couverture végétale (augmentation de la superficie des sols nus)
  - o Bq : Perte de la quantité de biomasse produite
  - o Bf : Effets néfastes des incendies
  - o Bs : Qualité et diversité d'espèces (perte d'espèces naturelles et propagation d'espèces invasives)
  - o Bl : Perte de la vie du sol
  - o Bp : Augmentation des maladies

##### 2.4. Intensité

- 2 : Augmentation importante (travail manuel → mécanisation, faibles intrants → intrants élevés)
- 1 : Augmentation modérée (intrants faibles-nuls → pesticides, travail manuel → traction animale)
- 0 : Aucun changement majeur dans les intrants ou le niveau de gestion
- 1 : Diminution modérée de l'intensité de l'utilisation des terres (légère réduction des intrants)
- 2 : Diminution importante de l'intensité de l'utilisation des terres (mécanisation → travail manuel)

##### 2.5. Raisons de la tendance

---



---



---



---

##### 2.6. Niveau d'adoption des pratiques

*Pratiques adoptées par les agriculteurs dues à l'aridité croissante des milieux (retour aux arido-cultures peu consommatrices d'eau avec des espèces locales d'arbres fruitiers comme le henné, cumin, ...).*

---



---



---



---

##### 3.2. Causes directes de dégradation des terres

- S : Gestion des sols inadéquate (culture inadaptée, machinerie lourde, labourage)
- C : Gestion des cultures et du pâturage (application inappropriée de engrais, etc. → contamination et lessivage, prélèvement excessif de nutriments, irrigation et utilisation de l'eau inappropriée)
- F : Déforestation et élimination de la végétation naturelle (exploitation forestière à grande échelle, expansion des zones urbaines, conversion à l'agriculture, incendies, construction de routes)
- E : Surexploitation de la végétation pour l'usage domestique
- G : Surpâturage
- I : Activités industrielles et minières
- U : Urbanisation et développement d'infrastructures
- P : Rejets (contamination ponctuelle des ressources en eau de surface et souterraines)
- Q : Libération d'air polluée (mine, industrie)
- W : Perturbation du cycle de l'eau (diminution infiltration/augmentation du ruissellement)
- : Prélèvement excessif d'eau (irrigation, industrie, mine, usage domestique)
- N : Causes naturelles (température, précipitations, tempêtes, sécheresse, topographie)

##### 3.3. Causes indirectes de dégradation des terres

- P : Pression de la population (augmentation de la densité de population)
- C : Mode de consommation changeant et individualiste
- T : Régime foncier
- H : Pauvreté
- L : Disponibilité de la main d'œuvre
- R : Infrastructures
- E : Education
- W : Guerres et conflits
- G : Gouvernance, politique et institution
- Autres :

# Analyse de la trajectoire de la dégradation des terres de la palmeraie de Skoura au Maroc.

Suivi temporel et cartographie de la superficie des terres dégradées.

Charlotte Vingre

Les projections climatiques du GIEC alertent sur la vulnérabilité du Maroc face à la baisse des précipitations et à l'augmentation des températures prévues d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

La ville de Skoura, confrontée à une sécheresse croissante et à des variations importantes des précipitations, a observé une transformation de sa palmeraie au fil des vingt dernières années. Cette évolution s'est manifestée par la diminution de la densité de palmiers dattiers au sein de la palmeraie, suite à des menaces provenant à la fois du vivant et de l'environnement, impactant la productivité des terres et le quotidien des habitants.

En employant une méthodologie de télédétection intégrant des images Pléiades et Landsat, il a été possible de retracer l'évolution de la palmeraie de Skoura sur les deux dernières décennies et de qualifier et quantifier l'état de dégradation des terres en quatre catégories : non dégradées, faiblement, fortement ou complètement dégradées.

L'analyse des images Landsat a révélé une diminution de la végétation au profit d'un élargissement des zones de sol nu centré principalement à l'est, au sud et au centre de la zone d'étude. En parallèle, une expansion de la palmeraie a été suggérée vers le nord et le nord-est au fil du temps.

Ensuite, grâce à l'image Pléiades d'octobre 2022, une carte décrivant l'état des terres à Skoura a pu être établie et a révélé les proportions suivantes : 18% de terres sont non dégradées, 16% sont légèrement dégradées, 25% sont en dégradation avancée et 41% sont complètement dégradées.

Finalement, des enquêtes locales ont mis en évidence les impacts des changements climatiques et des pratiques agricoles de plus en plus inadaptées. Pour relever ces défis, des solutions sont suggérées comme la promotion des terres coopératives, l'installation de stations d'épuration ou encore la transition vers des pratiques agricoles plus résilientes comme l'agroécologie. Toutefois, des problèmes persistants tels que le manque de connaissances en agriculture et l'exode rural des jeunes accentuent ces défis.

Mots clés : Palmeraie, télédétection, dégradation, sol, aride, Pléiades, Landsat.