

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE 1**  
**FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES**  
**DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre.....

Série.....

**THÈSE**

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

**EN PHYSIQUE**

**OPTION : ÉNERGÉTIQUE**

**THÈME**

Identification des zones qui ont tendance à  
la désertification à l'aide de l'imagerie  
satellitaire.

PAR

**Mohammed Taher Nakes**

Soutenu le : 29/06/2021

Devant le jury :

<b>Président</b>	<b>Nadir Attaf</b>	<b>Prof. Univ. Mentouri-Constantine 1</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>Ammar Mokhnache</b>	<b>Prof. Univ. Mentouri-Constantine 1</b>
<b>Examineur</b>	<b>Mohamed Salmi</b>	<b>MCA Univ. Boudiaf de M'Sila (UMBM)</b>
<b>Examineur</b>	<b>Yacine Marif</b>	<b>MCA Univ. Kasdi Merbah-Ouargla</b>

**Année universitaire 2020 / 2021**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ حَتَّىٰ إِذَا أَقْلَّتْ سَحَابًا  
ثَقُلَا سُقْتَاهُ لِيَلدَّ مَيِّتٍ فَأَنْزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ  
كَذَٰلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَىٰ لَعَلَّكُمْ تَذَكَّرُونَ﴾ (الأعراف 57)

# Dédicace

---

*Je dédie cet humble œuvre d'abord à l'âme de mon père (que Dieu lui fasse miséricorde), tout comme je le dédie à ma chère mère, qui nous a submergé et continue de nous submerger de ses prières (que Dieu la protège et la guérisse).*

*Je dédie également ce travail à ma chère épouse, Fadila, en échange de tout le soutien qu'elle apporte (que Dieu la protège et prenne soin d'elle).*

*Je le dédie également à mes fils : Mohammed El-Hachemi, Kheirreddine, Halima, Dia al-Haq, Mohammed Al-Anis, Nour El-Yaqine, et enfin, Ahmed Rami.*

*À mes frères et sœurs.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à mon succès.*

*MOHAMMED TAHER NAKES*

# Remerciements

---

En premier lieu je tiens à remercier **Allah** qui m'a donné le courage pour compléter ce modeste travail.

Je tiens à présenter mes humbles et sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon directeur de Thèse le Professeur **Ammar Mokhnache**, pour toute son aide et ses précieux conseils et pour l'intérêt qu'il a porté pour l'aboutissement de ce travail.

Tous mes vifs remerciements vont également à Monsieur le président de jury Mr **Nadir Attaf**, Professeur à l'université **Frères Mentouri – Constantine 1** ; Mes vifs remerciements sont aussi aux membres de jury d'avoir accepté examiner cette thèse : Mr **Mohammed Salmi**, Maitre de Conférence à l'université **Mohamed Boudiaf – M'Sila**, et Mr **Yacine Marif**, Maitre de Conférence à l'université **Kasdi Merbah – Ouargla**.

Je tiens à adresser mes respects à tous mes collègues et amis de département de physique, à l'université Kasdi Merbah.

Je n'oublie pas les collègues du Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA – Université des Sciences Technologiques, Lille1, France), notamment **Pr Michel Legrand**, Pr Fabrice Ducos, Pr Philippe Gouloub, et mes amis François Philippe, Louis Gonzalez, Christine Derro, Li Zhangqiang ; et tout le personnel du LOA, qu'ils trouvent ici mes sincères salutations et respects.

# Avant-propos

---

Les causes de la désertification sont nombreuses. La cause naturelle principale est bien connue : la sécheresse [1]. La dégradation des sols et la désertification sont intensifiées par les activités humaines non adaptées, combinées à des contraintes foncières et climatiques. Une utilisation inappropriée des terres, comme les monocultures, et des pratiques de gestion des terres non durables, comme la déforestation, les pratiques agricoles inadaptées et la surexploitation des ressources en eau, peuvent provoquer une dégradation des terres qui peut être encore aggravée par la sécheresse [2].

Dans notre étude à propos le suivi des zones qui ont tendance à la désertification, cas de la région semi-aride de M'Sila dans le Hodna, on s'intéresse particulièrement sur les causes susceptibles être à l'origine d'apparition de la désertification, particulièrement la persistance des conditions de sécheresse, où nous avons proposé des outils issus de l'imagerie satellitaire et des indices de sécheresse normalisé communément utiliser dans les domaines d'environnement, d'hydrologie et d'agronomie.

# Résumé

---

Aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique et vitale que l'eau. Compte tenu de la demande croissante d'eau, tant en termes de quantité que de gamme d'utilisation, la variabilité des précipitations est une question plus sensible et plus importante aujourd'hui qu'à tout autre moment dans le passé.

La sécheresse peut se produire dans pratiquement tous les régimes climatiques, dans les zones à forte comme à faible pluviométrie. Les conséquences sont dramatiques sur les domaines stratégiques (l'agriculture, la disponibilité et la qualité des eaux, la sécurité alimentaire des milliards de personnes), particulièrement pour les sociétés vulnérables. La sécheresse est comptée parmi les événements climatiques extrêmes, il est insidieux par nature, mais le changement climatique ressenti ces dernières décennies a généralement accéléré les processus hydrologiques pour les faire s'installer plus rapidement et devenir plus intenses, avec de nombreuses conséquences. La surveillance de la sécheresse est un défi, étant donné les dimensions spatio-temporelles complexes du phénomène et sa gravité. Un système d'alerte précoce et la planification proactive de la sécheresse s'avère plus que nécessaire.

L'objectif de la présente étude est de contribuer à la surveillance et au contrôle des risques de la sécheresse, au moyen des données des satellites et des indices normalisés. Le site d'étude est M'Sila (région de Hodna), zones fragile exposée à la vulnérabilité à la sécheresse. Les indices de sécheresse employés, SPI et SPEI, sont évalués aux multiples échelles de temps (de 1 à 24 mois). L'albédo de surface, déduit de données de trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7) et corrigé par le code de transfert radiatif 6S, est corrélé avec trois types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique), afin d'examiner sa sensibilité aux conditions de sécheresse, selon les indications de chaque indice.

Les résultats montrent que l'albédo de surface semble plus sensible aux épisodes de sécheresse à une classe d'échelle de temps moyenne (6, 9 et 12 mois), qui correspond à la sécheresse de type agriculture. Selon l'indice SPEI l'albédo de surface est plus sensible pendant la période de consommation des ressources d'eau et de croissance des plantes (Avril à Septembre). Cependant, selon l'indice SPI, l'albédo de surface est plus sensible pendant la période de chargement et d'approvisionnement en ressources d'eau (Octobre à Mars).

# Acronymes

---

Abréviation	Désignation
CREED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations.
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIZ	Entreprise fédérale allemande pour la coopération internationale - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH.
GWP	Partenariat mondial pour l'eau.
IDDI	Infrared Diffrence Dust Index
ITCZ	The Intertropical Convergence Zone
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IFAD	International Fund for Agricultural Development
MEER	Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables
MENA	Middle East and North Africa Zone (compte l'Algérie, la Tunisie, le Maroc, la Libye et l'Égypte).
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
Oxfam	Oxford Committee for Famine Relief.
PNC	Plan National CLIMAT
PNAEDD	Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable.
SPEI	Standard Precipitation and Evapotranspiration Index.
SPI	Standard Precipitation Index
SNEDD	Stratégie Nationale de l'Environnement et du Développement Durable.
UNECA	United Nation Economic Commission for Africa
UNICEF	United Nations Children's Fund
UNOCHA	United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs.
UNISDR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification.
UNDP	United Nations Development Program.
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change.
UNCBD	United Nations Convention on Biological Diversity.
WFP	World Food Program.
WHO	World Health Organization
WMO	World Meteorological Organization
WRI	World Resources Institute (Germany).
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

# Liste des tableaux

---

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Indicateurs et indices de sécheresse mentionnés par WMO (2016)	16
Tableau III.1	Lois fondamentales de rayonnements électromagnétiques	50
Tableau III.2	Comparaison des caractéristiques des satellites METEOSAT 1 <sup>ère</sup> , 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> génération.	53
Tableau III.3	Amélioration de l'indice IDDI (V2) par rapport à l'indice IDDI (V1)	56
Tableau IV.1	Classification des indices de sécheresse SPI et SPEI	83
Tableau V.1	Corrélations entre les indications SPEI et SPI.	89

# Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Diagramme de succession des situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse.	9
Figure I.2	Définition des caractéristiques de la sécheresse	10
Figure II.1	Changement de la température de l'air observée par rapport à 1850-1900	25
Figure II.2	Émissions des gaz à effet de serre durant la période (2007 – 2016)	26
Figure II.3	Diagramme schématique montrant la propagation de la sécheresse sous le cadre du changement climatique	29
Figure II.4	Utilisation des terres, topographie et croissance démographique en zone MENA	33
Figure II.5	Carte de risque des cultures stratégiques	38
Figure II.6	Carte de la vulnérabilité	39
Figure II.7	Carte de l'indice des menaces	40
Figure III.1	Téledétection passive.	47
Figure III.2	Téledétection active.	47
Figure III.3	Correspondances entre fenêtres atmosphériques et les énergies émises par le Soleil et la Terre	49
Figure III.4	Principaux satellites météorologiques du programme VMM (Veille Météorologique Mondiale)	51
Figure III.5	Principe de fabrication de l'indice de poussière IDDI	56
Figure III.6	Processus de construction de l'image de référence du canal VIS dans l'algorithme IDDI (V.2).	58
Figure III.7	Galerie des produits IDDI, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.	
	(a) - Image canal VIS ;	59
	(b) - Image canal IR ;	59
	(c) - Image référence VIS ;	60
	(d) - Image référence IR ;	60
	(e) - Image différence IR ;	61
(f) - Image poussières (Indice IDDI).	61	
Figure III.8	Potentiels et limites de l'image référence VIS.	67
Figure IV.1	Zones du pourtour méditerranéen qui ont connu des hivers nettement plus secs au cours de la période 1971-2010 par comparaison de la période 1902-2010	70
Figure IV.2	Location du lieu d'étude de M'Sila sur une carte d'altitude.	74
Figure IV.3	Le bassin versant de Hodna - Les grands ensembles du relief	75
Figure IV.4	Carte pluviométrique Hodna.	77
Figure IV.5	Régimes pluviométrique (a)- mensuel et (b) - saisonnier, pour M'Sila (Algérie), de 1994 à 2006.	78
Figure IV.6	Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour M'Sila, au cours de la période 1994 à 2006.	79
Figure V.1	Résumé de la méthode d'étude de la sensibilité de l'albédo de surface aux conditions de sécheresse.	86

Figure V.2	Carte de l'albédo de surface mensuel de M'Sila (Algérie), au cours de la période 1994 – 2006.	88
Figure V.3	Fréquence des épisodes de sécheresse pour M'Sila, selon SPEI et SPI, pendant la période d'étude (1994 – 2006), par rapport à la période de référence (1980 – 2013).	90
Figure V.4	Carte de l'indice de sécheresse SPEI de 1982 à 2013 (en haut), pour M'Sila (Algérie), aux échelles de temps de 1 à 24 mois. En bas, individuelles présentations de l'indice SPEI aux échelles de temps "6" (cyan), "12" (vert), "18" (rose), et "24" mois (rouge).	91
Figure V.5	Corrélations mensuelles entre l'albédo de surface, pour M'Sila (Algérie), et les indices de sécheresse SPEI et SPI, aux échelles de temps "1", "3", "6", "9", "12", "15", "18", "21" et "24" mois, pendant la période comprise entre février 1994 et juillet 2006.	92
Figure V.6	Corrélations mensuelles de l'albédo de surface avec les trois classes d'échelles de temps, M'Sila (Algérie), pour chacun d'indices SPEI et SPI.	94
Figure V.7	Sensitivité de l'albédo de surface mensuel aux périodes de charge et de décharge des ressources d'eau, M'Sila (Algérie), selon les trois classes d'échelle de temps.	95

# Table des matières

---

Dédicace .....	(ii)
Remerciements .....	(iii)
Avant-propos .....	(iv)
Résumé .....	(v)
Acronymes .....	(vi)
Liste des tableaux .....	(vii)
Liste des figures .....	(viii)

Introduction étendue .....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Phénomène de la sécheresse

I.1 – Définitions .....	6
I.2 - Types de sécheresse.....	7
I.2.1 - Sécheresse météorologique .....	7
I.2.2 - Sécheresse agricole .....	7
I.2.3 - Sécheresse hydrologique .....	7
I.2.4 - Sécheresse socio-économique .....	8
I.3 - Causes de la sécheresse .....	10
I.4 - Impacts de la sécheresse .....	12
I.5 – Indicateurs et indices de phénomène de sécheresse .....	15
I.6 - Suivi de la sécheresse par les indices de téléconnexions .....	18
I.7 - Liens entre sécheresse et désertification .....	20

## Chapitre II : Incidences de la variabilité climatique sur la sécheresse

II.1 – Changement climatique – Quels conséquences .....	23
II.1.1 – Changement climatique ou Réchauffement climatique .....	23
II.1.2 - Changement climatique planétaire .....	25

II.1.3 – La sécheresse dans le cadre du changement climatique .....	28
II.1.4 - La sécheresse du Sahel .....	30
II.2 - Vulnérabilité climatique régionale .....	32
(Zone de Moyen-Orient et Afrique de Nord – Zone MENA)	
II.3 - Vulnérabilité climatique en Algérie .....	34
II.3.1 - Climat de l'Algérie .....	34
II.3.2 - Vulnérabilité climatique de l'Algérie .....	35
II.3.3 - Stratégie de l'Algérie face au changement climatique .....	41
II.3.4 - Plan National CLIMAT – PNC	
(Diagnostique ; Stratégie ; Plan d'action ; Mise en œuvre) .....	42

### Chapitre III : Suivi de la sécheresse par télédétection

III.1 – Apport de la télédétection au suivi de la sécheresse .....	45
III.2 - Éléments physiques de la télédétection .....	46
III.3 - Lois fondamentales de rayonnements électromagnétiques .....	50
III.4 - Programme mondiale d'observation de la Terre .....	50
III.5 - Programme METEOSAT .....	52
(1) - METEOSAT FIRST GENERATION (MFG) .....	52
(2) - METEOSAT SECOND GENERATION (MSG) .....	52
(3) - METEOSAT THIRD GENERATION (MTG) .....	53
III.6 - Construction d'une image METEOSAT à ciel clair .....	53
III.7 - Image à ciel clair de l'imagerie IDDI .....	55
III.7.1 – Principe de l'imagerie IDDI .....	55
III.7.2 - Image référence ou image à ciel clair de l'imagerie IDDI .....	57
III.7.3 - Galerie de principaux produits de l'imagerie IDDI .....	58
(Journée 08 Mars 2006 à 12h00 UTC)	
III.8 - Albédo de surface comme indicateur de la dynamique de l'état de sol .....	62
III.9 - Code de transfert radiatif 6S .....	63
III.10 - Méthodologie de calcul de l'albédo de surface .....	63
III.11 - Potentielles et limites de l'image référence VIS .....	66

### Chapitre IV : Variabilité pluviométrique en Algérie – Evaluation de la sécheresse

IV.1 - Variabilité pluviométrique en Algérie .....	69
--	----

IV.2 - Téléconnexions et variabilité pluviométrique – cas de l’Algérie .....	72
IV.3 – Bassin versant de Hodna .....	73
IV.3.1 – Caractéristiques pluviométriques du bassin versant Hodna .....	74
IV.3.2 – Lieu d’étude de M’Sila .....	78
IV.4 - Quantification de la sécheresse par les indices normalisés .....	80
IV.4.1 - Indice de Précipitation Normalisé – SPI .....	81
IV.4.2 - Indice de Précipitation – Evapotranspiration Normalisé – SPEI .....	81
<b>Chapitre V : Résultats et discussions</b>	
V.1 – Résumé de la démarche de l’étude .....	85
V.2 - Albédo de la surface .....	87
V.3 - Sévérité des épisodes de sécheresse .....	89
V.4 - Sensitivité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse .....	92
Conclusion générale .....	97
Bibliographie .....	101
Résumés en Arabe, Français, Anglais .....	119



# **Introduction étendue**

# Introduction étendue

---

Au niveau mondial, aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique que l'eau. Son utilisation est essentielle pour chaque habitant et pour un large éventail d'activités du secteur socio-économique. Elle est vitale pour la santé, l'agriculture, l'industrie et l'hydroélectricité. L'eau fait également partie de l'environnement et abrite de nombreuses formes de vie, dont le bien-être humain dépend en fin de compte. Compte tenu de la demande croissante d'eau, tant en termes de quantité que de gamme d'utilisation, la variabilité des précipitations est une question plus sensible et plus importante aujourd'hui qu'à tout autre moment dans le passé.

La sécheresse peut être définie comme une disponibilité d'eau inférieure à la moyenne dans l'environnement. Les sécheresses réduisent la disponibilité de l'eau pour les êtres humains, les animaux et les écosystèmes. Les impacts sociaux sont plus importants lorsque de graves sécheresses frappent les régions pauvres et les populations vulnérables. La sécheresse diffère des autres phénomènes naturels dangereux par plusieurs manières. En effet, c'est un danger naturel qui commence lentement, de sorte qu'on parle souvent d'un phénomène à évolution lente. Une situation de sécheresse provoque, si elle est prolongée dans le temps, une diminution du ruissellement des cours d'eau et de l'humidité des sols et un renouvellement insuffisant des aquifères. Ce phénomène est amplifié par l'action néfaste de l'homme sur l'environnement (déforestation, rejets des gaz nocifs, pression du cheptel sur les parcours, surexploitation et mauvaise gestion des ressources naturelles « eaux et sols », etc.). La sécheresse est un élément normal du climat pour pratiquement tous les régimes climatiques. Il s'agit d'une aberration temporaire qui se produit dans les zones à fortes comme à faibles précipitations. Le caractère de la sécheresse est distinctement régional, reflétant des caractéristiques météorologiques, hydrologiques et socio-économiques uniques.

Les causes de la sécheresse sont notamment naturelles et/ou anthropiques. Les causes naturelles sont proclamées principalement aux variabilités des facteurs climatiques naturels. Quant aux causes anthropiques, ils s'adressent aux effets néfastes de l'homme sur l'environnement suite aux mauvaises pratiques dans la gestion des terres et les ressources hydriques. En tant que l'un

des principaux agents responsables de la sécheresse, les humains souffrent d'un manque d'eau en raison des effets complexes et interactifs des processus naturels et anthropiques, et dont la « combinaison mortelle » est l'abus des terres pendant les bonnes périodes et sa poursuite pendant les périodes de précipitations insuffisantes. Cela indique que les humains participent à la cause des sécheresses, ils souffrent de leurs impacts et ils font face à leurs effets.

La sécheresse est comptée parmi les événements climatiques extrêmes, il est insidieux par nature, mais le changement climatique ressenti ces dernières décennies a généralement accéléré les processus hydrologiques pour les faire s'installer plus rapidement et devenir plus intenses, avec de nombreuses conséquences. Le changement climatique est susceptible d'augmenter les risques de sécheresse au cours du XXI<sup>e</sup> siècle dans de nombreuses régions du monde, dont l'Afrique du Nord, suite à la susceptible diminution des précipitations selon les projections des modèles climatiques. Les facteurs à l'origine du changement climatique sont nombreux, et les impacts ne se limite pas à la sécheresse, mais elles le dépassent à d'autres éléments liés avec ce dernier tels que les canicules (vagues de chaleur), les feux de forêts, l'inondation, la disponibilité et la qualité des eaux, la sécurité alimentaire des milliards de personne, etc. Cependant, il existe maintenant un agrément sans équivoque selon lequel la cause principale de changement climatique est l'augmentation des gaz à effet de serre anthropiques, suite aux activités principalement humaine. Des études récentes sur la région de Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA), ont montrés que la sensibilité à ces changements est la plus élevée en Algérie, en Tunisie et en Égypte. Des suggestions ont étaient proposées pour tous les pays d'Afrique du Nord et en particulier l'Algérie et le Maroc, qu'il est important de réduire la dépendance économique et les moyens de subsistance vis-à-vis de l'agriculture pluviale, de renforcer les pratiques d'utilisation durable des terres et d'augmenter la capacité d'adaptation. Étant donné que tous les pays d'Afrique du Nord sont confrontés à une exposition similaire au changement climatique, une coopération régionale accrue sera utile. L'Algérie avait commencée, depuis 2011, à élaborer un plan national contre le changement climatique. Les efforts ont abouti au Plan National CLIMAT (PNC), composé au total de 155 actions (principalement d'adaptation et d'atténuation). Le PNC a bénéficié du soutien de la coopération algéro-allemande (GIZ).

Le Nord de l'Algérie, littorale et les hautes plaines inclus, est la partie la plus vulnérable envers la sécheresse. C'est la partie la plus dépendante des précipitations et qui représente près de 13 % de la superficie totale du pays. C'est sur cette bande septentrionale, qui s'étend du Maroc à

la Tunisie et de la Méditerranée au nord à l'isohyète de 200 mm au Sud, que s'observent les différentes formes de sécheresse, avec quelques disparités d'Ouest en Est et du Nord au Sud. La période de sécheresse perçue au milieu des années 1970 jusqu'au début des années 2000, a raccourci la saison des pluies, et a limitée les ressources en eau pour les utilisations de l'agriculture. Des nombreuses études ont liées la variabilité pluviométrique du nord de l'Algérie aux anomalies de la circulation atmosphérique générale, c'est-à-dire aux téléconnexions.

Les indices de sécheresse sont souvent employés pour identifier les principales caractéristiques des épisodes de sécheresse (déclenchement, fin, gravité, étendue spatiale), et pour bien d'autres objectifs, dans notre étude nous avons choisis deux indices normalisés et multi-échelles, SPI (Standardized Precipitation Index) et SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), fréquemment utilisés dans les domaines de l'hydrologie et de l'agronomie.

Au cours des dernières décennies, la télédétection par satellite a permis de réaliser des observations de la Terre à une résolution spatiale relativement élevée (de l'échelle locale à l'échelle synoptique) et à une résolution temporelle élevée (de quelques fractions d'heure à quelques jours). L'imagerie de télédétection fournit des mesures spectrales spatialement continues sur de vastes zones qui reflètent à la fois les caractéristiques de l'atmosphère, de la surface terrestre et d'océans. Les données de télédétection sont de plus en plus utilisées pour la surveillance des sécheresses sur de grandes surfaces. Des paramètres biophysiques liés à la surface terrestre, acquis à distance, sont souvent utilisés pour suivre et montrer la gravité de la sécheresse sur l'environnement, aux échelles locale et planétaire, tels que les indices de végétation, la température de la surface terrestre, l'humidité du sol et l'albédo de surface.

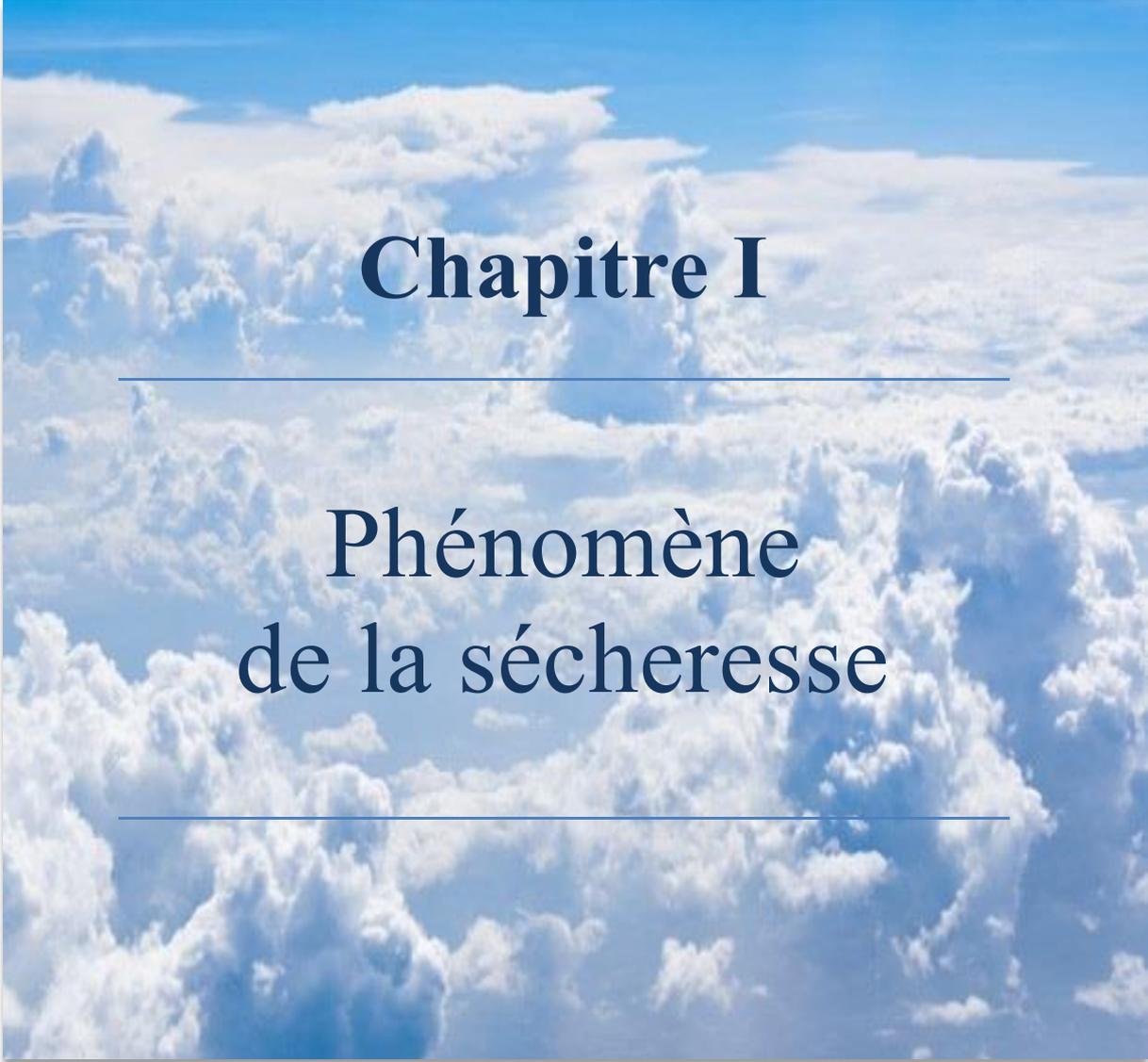
La série des satellites géostationnaires METEOSAT Première Génération (MFG), à la position nominale (0°E) au-dessus du golfe de Guinée en Afrique depuis la fin des années 1970, sont un outil important qui facilite l'observation des conditions de la surface terrestre à multiples échelles de temps. L'albédo de la surface, déduit de données de cette série des satellites, peut révéler la dynamique de la surface terrestre qui s'est produite au fil des années. Dans notre étude la luminance VIS (principale donnée pour remonter à l'albédo de surface) est extraite de l'image référence à ciel clair du canal VIS (un sous-produit de l'imagerie de l'indice de poussières IDDI, Infrared Difference Dust Index). L'albédo de surface est évalué pendant la période couverte par la succession de trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7).

Le site de notre étude est M'Sila, lieu semi-aride situé dans la région du Hodna (centre du nord

de l'Algérie). Le bassin versant du Hodna est marqué par un climat à tendance aride mis en évidence par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations. La région se caractérise par trois régions naturelles bien distinctes, (i) - Zone de steppe couvre la plus grande partie du territoire et se caractérise par un couvert végétal clairsemé, traduisant le degré de dégradation des parcours ; (ii) - Zone de la plaine du Hodna où se concentre la grande part de l'activité agricole (céréales, maraîchage, arboriculture) ; (iii) - Zone de montagnes, réservée à une agriculture de montagne de type extensif avec quelques massifs forestiers. En outre, la région est soumise à un stress humain important en raison du surpâturage et de l'augmentation de la surface d'agglomération. La région est comptée parmi les zones fragiles exposées à la vulnérabilité à la sécheresse. Les barrières naturelles situés au nord de la région, formées par la chaîne Hodna et les monts du Tetri, empêchent la progression des masses d'air chargés de l'humidité, particulièrement ceux venant de la direction de la méditerranée. Les ressources hydriques de la région sont principalement ceux transportées par les cours des Oueds, où leurs sources est le domaine tellien (Nord).

L'objectif de la présente étude est de contribuer à la surveillance et au contrôle des risques de sécheresse qui peuvent affecter les ressources en eau, la productivité agricole et la vie humaine. Ce document vise tout d'abord à caractériser, pour la région semi-aride de M'Sila, les variations saisonnières et annuelles de l'albédo de surface sur une période de plus d'une décennie, du début de 1994 (Février) à mi-2006 (Juillet), date de fin du programme des satellites MFG à la position nominale. Les données pour la période d'étude ont été fournies par trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7). Après correction des données du canal VIS de METEOSAT, principalement ces atténuations atmosphériques (par le code transfert radiative 6S), on a supposé que la variation de l'albédo de surface pour la localité désignée fût principalement contrôlée par son bilan hydrique défini par la disponibilité des précipitations. Dans la deuxième partie, nous avons étudiés l'aspect de la sensibilité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse (SPI et SPEI), par corrélation aux multiples échelles de temps, de 1 à 24 mois. Ces échelles de temps (de 1 à 24 mois), sont regroupées dans trois classes, chacune correspondre à un type de sécheresse. Sécheresse météorologique : échelles de temps de 1 à 3 mois. Sécheresse agriculture : échelles de temps de 6 à 12 mois. Sécheresse hydrologique : échelles de temps de 15 à 24 mois. L'albédo de surface est ainsi corrélé avec chaque classe, afin d'examiner sa sensibilité aux trois types de sécheresse, selon les indications de SPI et de SPEI.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres, une introduction étendue et une conclusion générale. Le Chapitre I, est consacré à la définition de phénomène de sécheresse ; ses différents types ; les causes susceptibles de déclencher le phénomène. Les impacts de la sécheresse sur les êtres humains, les animaux et les écosystèmes, sont également discutés. Enfin un exposé sur les indices et indicateurs employés pour identifier les principales caractéristiques des épisodes de sécheresse. Le rôle des téléconnexions sur les variabilités pluviométriques aux échelles planétaire et local, et le lien entre la sécheresse et la désertification sont également exposés dans ce premier chapitre. Le Chapitre II, est à propos le changement climatique et ces liens avec les événements extrêmes comme les inondations, les sécheresses et la désertification. La vulnérabilité, c'est à dire le risque d'exposition, à l'échelle régionale et à l'échelle nationale face au changement climatique, et les mesures d'adaptations actuelles et d'actions futures présentées par les décideurs de la politique, pour le cas de l'Algérie, ont été les matériaux de Chapitre II. Le Chapitre III, a été réservé aux apports de la télédétection dans le domaine de suivi et contrôle de phénomène de la sécheresse. Le chapitre est enrichi par un exposé sur le programme des satellites géostationnaire METEOSAT. Enfin pour ce chapitre, une présentation de l'imagerie de l'indice de poussière IDDI, un accent particulier était sur l'image à ciel clair (image de référence), principale donnée pour avoir l'albédo de surface. Une galerie des principaux produits de l'imagerie IDDI, est incluse dans ce Chapitre III. Il est l'occasion de signaler que nous étions un des acteurs, avec l'équipe de laboratoire LOA (UST-Lille1), dans la préparation de produit de poussière final IDDI (Version 2), et qui couvre plus d'un quart de siècle de données de poussières, de 1982 à 2006. La variabilité pluviométrique est souvent considérée comme un deuxième titre à la sécheresse. Ce thème était le sujet de Chapitre IV, il a été dédié à la situation de l'Algérie de façon général, et à la situation de bassin versant de Hodna en particulier, dont notre site d'étude, M'Sila, est inclus. Ce chapitre, a exposé également les deux indices normalisés SPI et SPEI, qui sont des indices multi-échelles de temps et qui ont été employés pour quantifier les épisodes de sécheresse. La structure de cette thèse est enfin achevée par le Chapitre V, qui a regroupé les différents résultats constatés. Les résultats de l'étude se résument par (i) - la caractérisation des régimes mensuels et annuels de l'albédo de surface pour le site de M'Sila (au cours de la période 1994 – 2006), et (ii) – l'étude de la sévérité de la sécheresse au cours de la période de référence de 34 ans (1980 à 2013), et enfin (iii) - l'étude de la sensibilité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse SPI et SPEI, aux multiples échelles de temps.



# Chapitre I

---

## Phénomène de la sécheresse

---

# Chapitre I

## Phénomène de la sécheresse

---

### I.1 – Définitions

La sécheresse est un phénomène naturel qui affecte les processus écologiques, la productivité des terres et la vie humaine [4], [5]. Le phénomène est lent à s'installer et ses impacts ne sont pas instantanés, nécessitant une surveillance précoce de leurs signes d'apparition. La définition de la sécheresse a toujours été une pierre d'angle pour la surveillance et l'analyse de la sécheresse [6]. Tout de même, pour l'instant, la sécheresse peut être définie comme une disponibilité d'eau inférieure à la moyenne dans l'environnement [7]. La sécheresse est un «phénomène rampant», ce qui rend une prédiction précise de son sévérité et son ampleur une tâche difficile. Les effets de la sécheresse s'accumulent lentement sur une période de temps considérable et peuvent persister pendant des années après la fin de l'événement.

Tous les points de vue à propos du phénomène de la sécheresse semblent convenir que c'est une condition d'humidité insuffisante causée principalement par un déficit de précipitations sur une certaine période. Ce déficit est aggravé de plus en plus quand il est associé à d'autres facteurs principalement climatiques. On cite forts ensoleillement ou vagues de chaleurs [8], forts vents et faible humidité relative [9]. Ces facteurs sont responsables au déclenchement et de l'intensification de mécanisme de l'évaporation à partir des sols, des plantes, et des surfaces d'eau. L'ampleur d'un épisode de sécheresse est également liée au moment (c'est-à-dire la principale saison d'occurrence, les retards dans le début de la saison des pluies, etc.) et à l'efficacité des pluies (c'est-à-dire l'intensité des précipitations et le nombre de précipitations). Une situation de sécheresse provoque, si elle est prolongée dans le temps, une diminution du ruissellement des cours d'eau et de l'humidité des sols et un renouvellement insuffisant des aquifères. Ce phénomène est amplifié par l'action néfaste de l'homme sur l'environnement (déforestation, rejets des gaz nocifs, pression du cheptel sur les parcours, surexploitation et mauvaise gestion des ressources naturelles « eaux et sols », etc.) [10]. Wilhite et Glantz (1985) [11] ont conclu que la sécheresse n'est pas seulement météorologique (ou atmosphérique) mais aussi hydrologique en termes de remplissage des barrages et de renouvellement des nappes,

agricole en termes de production agricole et animale, environnementale en termes de destruction des équilibres naturels ou encore socio-économique lorsqu'il y a impact négatif sur les facteurs de production et la vie de l'homme. En général, la distinction entre les types de sécheresse réside dans leurs effets. Toutefois, la sécheresse ne doit pas être considérée comme un simple phénomène physique. Elle est le résultat de l'interaction entre un événement naturel (insuffisance des précipitations en raison de la variabilité climatique naturelle sur des échelles de temps variables) et la demande en eau des systèmes d'utilisation humaine [12].

## I.2 - Types de sécheresse

Les quatre types de sécheresses mentionnés ci-dessus sont caractérisés comme suite [13], [10] :

**I.2.1 - Sécheresse météorologique:** est le type de sécheresse qui survient lorsque les précipitations sont bien inférieures à la normale au cours d'une longue période. Elle est suivie par les services de la météorologie. Les outils sont principalement le réseau national des mesures des paramètres climatiques, l'observation et l'analyse des images satellitaires spécialisées. Ce type de sécheresse peut se caractériser soit par l'écart de la hauteur de précipitation par rapport à la normale, soit aux déciles<sup>1</sup> ou soit encore par un indice de précipitation, tel que l'indice de précipitation standardisé (SPI).

**I.2.2 - Sécheresse agricole:** est le type de sécheresse qui survient lorsque la faible humidité du sol, associée à la rareté de l'eau, arrête la croissance végétale, diminue les rendements et met en danger le bétail. Ce domaine est du ressort des services centraux et décentralisés de l'agriculture, des forêts, des éleveurs, des exploitants agricoles, des services de l'environnement et de la société civile.

**I.2.3 - Sécheresse hydrologique:** est le type de sécheresse qui survient lorsqu'une longue sécheresse météorologique provoque une diminution sensible du niveau des eaux souterraines, des rivières, des fleuves et des lacs. Le suivi de celle-ci est du ressort des services de l'hydraulique (Agences et directions centrales) qui ont pour mission principale la dotation en eau des populations, de l'agriculture, du tourisme et de l'industrie, production d'énergie hydroélectrique, protection des espèces menacées, gestion et préservation de l'environnement et des écosystèmes, etc.. Les données sur le ruissellement des eaux de surface, les apports aux

---

<sup>1</sup> Les déciles signifient que la série des valeurs de précipitation elle est partagée en dix sous-ensembles d'effectifs égaux. C'est pareil avec les quintiles (5 parts) ou les centiles (100 parts), tous sont des paramètres mesurant la dispersion d'un échantillon autour de la normale.

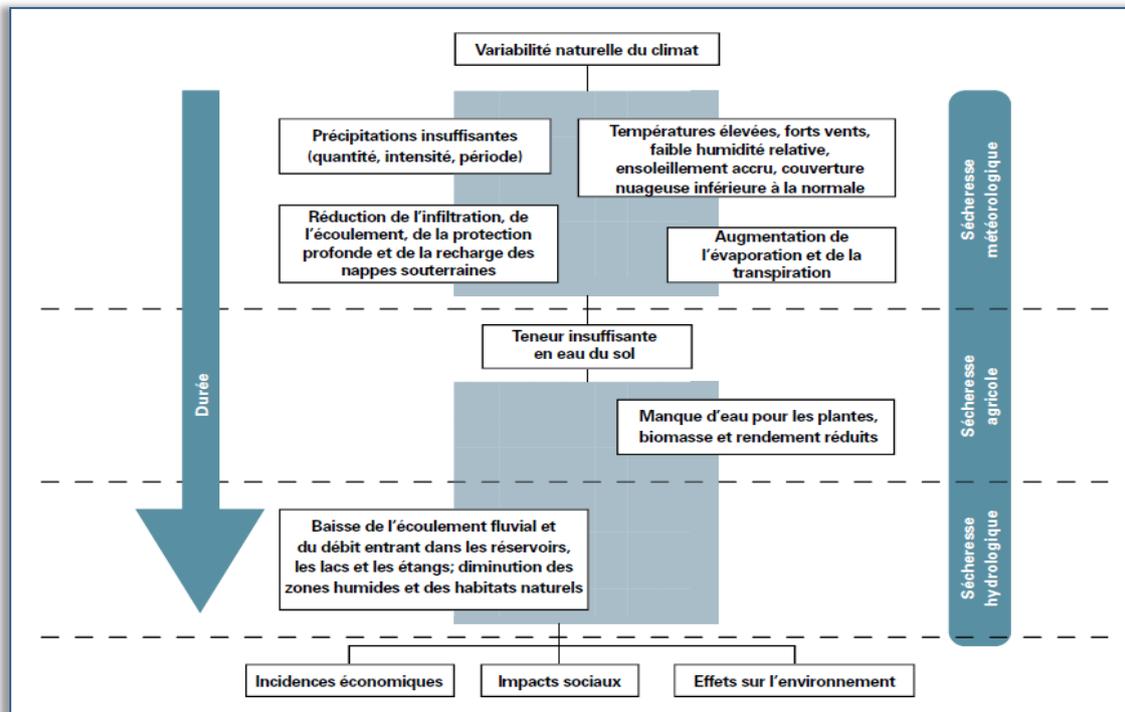
barrages, la dynamique des eaux souterraines, l'évolution des sols irrigués sont recueillis par des réseaux d'appareils de mesures ou par des observateurs répartis à travers le territoire national.

**I.2.4 - Sécheresse socio-économique:** est le type de sécheresse qui englobe les conséquences économiques et sociaux des formes précédentes (exode rurale, famine, baisses des rendements agricoles, perte de cheptel, augmentation des prix des produits de première nécessité, problème de santé humaine et animale, etc.). Cette forme qui se traite à un niveau élevé (gouvernement) engendre, selon son acuité, des campagnes de sensibilisation de la population, le déclenchement des plans ORSEC (**O**rganisation de la **R**éponse de **S**écurité **C**ivile : un dispositif d'urgence polyvalent national de gestion de crise), la mise en place de fonds de soutien et d'indemnisations ainsi que le lancement d'opérations de solidarité nationale et internationale. La sécheresse socio-économique est donc une forme de choc interne de l'offre, c'est-à-dire une grave perturbation provoquée par des événements hors du contrôle du pays, et qui a des effets importants sur les variables économiques intérieures.

La sécheresse diffère des autres phénomènes naturels dangereux par plusieurs manières. En effet, c'est un danger naturel qui commence lentement, de sorte qu'on parle souvent d'un phénomène à évolution lente. On observe un écart cumulé des précipitations par rapport à la normale ou aux valeurs prévues (la moyenne à long terme, par exemple). Ce déficit cumulé de précipitations peut se manifester rapidement sur une courte période, mais peut aussi prendre des mois avant que le manque d'eau se traduise par une diminution du débit des cours d'eau et une baisse du niveau des réservoirs ou de la nappe phréatique. Du fait de la lenteur de cette évolution, les effets de la sécheresse mettent souvent plusieurs semaines ou plusieurs mois à se faire sentir (Figure I.1). Généralement, ce déficit se reflète en premier lieu dans la teneur en eau du sol ; l'agriculture est donc souvent le premier secteur touché [13].

Il est assez difficile d'établir un lien direct entre les principaux types de sécheresse et l'insuffisance des précipitations, du fait qu'il y a un décalage de temps (temps de latence ou « lag time » en Anglais) pour apprécier le transfert des aptitudes du phénomène de sécheresse d'un type à un autre. Le concept de temps de latence est exposé par Figure I.2 suivant, selon Sattar et Kim (2018) [14]. Une sécheresse météorologique avec le temps peut se propager en sécheresse hydrologique alors qu'une sécheresse hydrologique doit suivre la ou les sécheresses météorologiques précédentes. Le manque de précipitations combiné à des taux d'évaporation plus élevés se propage à travers le cycle hydrologique d'un phénomène météorologique à

l'appauvrissement de l'humidité du sol au point où les cultures ou les écosystèmes terrestres sont touchés, et finalement à un phénomène hydrologique [15].

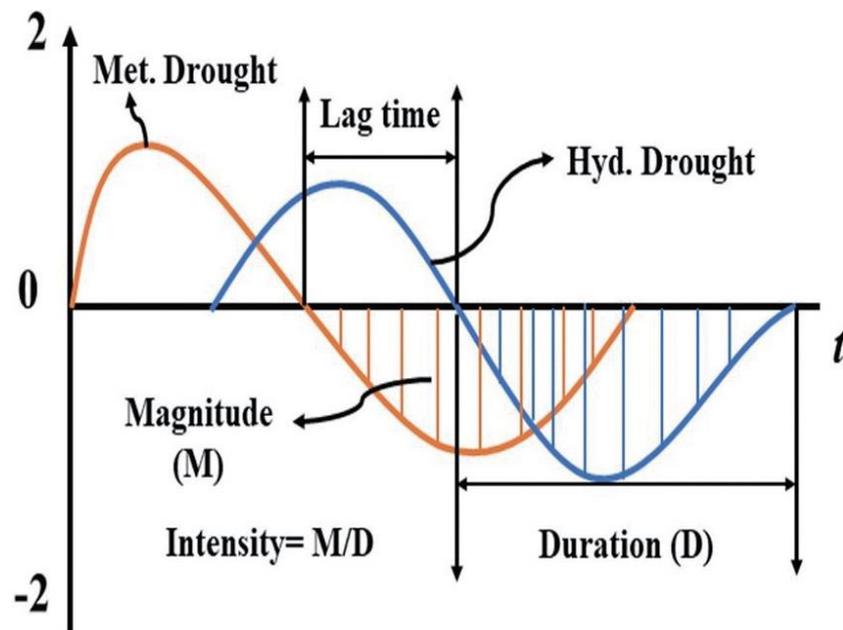


**Figure I.1 :** Diagramme de succession des situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse. Si toutes les sécheresses sont dues à un manque de précipitations ou à une sécheresse de type météorologique, les autres types de sécheresse et leurs incidences découlent de ce manque. (Source: Centre national de lutte contre la sécheresse, Université du Nebraska–Lincoln, États-Unis d’Amérique).

Figure I.2, montre aussi les éléments caractéristiques d’un épisode de sécheresse. Quel que soit le type de la sécheresse, elle est caractérisée par une durée  $D$  où sévérité, qui est la durée entre la date de déclenchement et la date de l’atténuation de l’épisode. La sévérité peut être à courte termes (semaines, mois) ou longue termes (saisons, années, voire décennies). Une magnitude  $M$  qui reflète le degré de gravité par rapport à la normale. Enfin une intensité  $I$  déduite du quotient entre la magnitude et la durée de l’épisode de sécheresse.

Des modifications apportées à la gestion des systèmes d’approvisionnement en eau peuvent aussi bien atténuer les incidences de la sécheresse que les aggraver. Par exemple, l’adoption des méthodes de travail du sol appropriées et le semis de variétés plus résistantes à la sécheresse

peuvent beaucoup atténuer les effets de la sécheresse en préservant l'eau du sol et en limitant la transpiration [13].



**Figure I.2 :** Définition des caractéristiques de la sécheresse [14].

### I.3 - Causes de la sécheresse

Les causes de la sécheresse sont notamment naturelles et/ou anthropiques. Les causes naturelles sont proclamées principalement aux variabilités des facteurs climatiques naturels tels que les oscillations de la circulation générale de l'atmosphère à grand échelle conduisant aux anomalies des précipitations et à leurs variabilités [16]. Plusieurs études dans la littérature étaient le sujet des relations possibles entre les oscillations de la circulation atmosphérique à grande échelle et les précipitations aux échelles locaux telles que l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO), la phase chaude (El Niño) de l'oscillation australe (ENSO), l'oscillation méditerranéenne (MO), l'oscillation méditerranéenne de l'Ouest (WeMO) comme le font remarque Taibi et al. 2019 [17]; Zerouali et al. (2018) [18]; Massei et al. (2017) [19]; Pomposi et al. (2016) [20]; Martín-Vide et al. (2008) [21]. Souvent pour être dans des configurations de sécheresse, il faut qu'un certain type de temps persiste. Les dépressions sont des phénomènes climatiques (des masses d'air froides et humides ascendantes) qui engendrent des précipitations. Les anticyclones (masses d'air descendantes) vont favoriser l'apport d'air chaud et sec, donc pas de précipitations. Ainsi, pour être dans un état de sécheresse, il faut qu'un anticyclone soit

présent pendant une certaine période de temps ([https://www.notre-planete.info/terre/risques\\_naturels/secheresse.php](https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/secheresse.php)). En général, le manque d'eau et les températures élevées sont des causes naturelles directes de la sécheresse. En effet, le manque d'eau va créer un déficit dans les réserves souterraines et les barrages d'eau, et si ces dernières sont mal gérées, alors la sécheresse sera d'autant plus marquée. L'agriculture, les usines, et les habitations sont les principaux secteurs nécessitant un apport en eau permanent, ce sont donc les secteurs les plus vulnérables aux pénuries des apports pluviaux. Ainsi, des restrictions d'eau doivent être mises en place pour ne pas abaisser encore plus le niveau des nappes phréatiques et les cours d'eau. Des dispositifs réglementaires sont recommandés pour lutter contre les consommations excessives des réserves d'eau.

Les causes anthropiques quant-à-eux s'adressent aux effets néfastes de l'homme sur l'environnement suite aux mauvaises pratiques dans la gestion des terres et les ressources hydriques [22]. Van Loon et al. (2016a) [23] ont indiqués que la sécheresse d'origine humaine pourrait survenir à la suite de l'urbanisation, de la déforestation et de la construction de réservoirs. En outre, les prélèvements sectoriels d'eau pour l'irrigation, l'utilisation domestique, la production d'électricité, l'élevage, l'exploitation minière et la fabrication sont également en augmentation [24] [25]. Wada et al. (2013) [26] ont conclu que la consommation humaine d'eau est plus que doublé, ce qui a intensifié l'ampleur de la sécheresse mondiale de 10 à 500% et la fréquence de 27%. Pekel et al. (2016) [27] ont déclaré que plus de 70% des pertes d'eau permanentes nettes mondiales sont dues à la sécheresse et aux activités humaines telles que le détournement de rivière ou la construction de barrages et les prélèvements. Les conditions de sécheresse sévère sont principalement dues à la consommation humaine d'eau dans de nombreuses régions du monde [17].

En plus la consommation excessive des ressources hydriques, d'autres activités humaines vont accentués la sécheresse telles que la surexploitation, le surpâturage, les mauvaises pratiques d'irrigation, l'exploitation forestière illégale et excessive, les incendies de brousse et de forêt et la déforestation due à l'augmentation de la population [15].

En tant que l'un des principaux agents responsables de la sécheresse, les humains souffrent d'un manque d'eau en raison des effets complexes et interactifs des processus naturels et anthropiques [19], et dont la « combinaison mortelle » est l'abus des terres pendant les bonnes périodes et sa poursuite pendant les périodes de précipitations insuffisantes. Cela indique que les humains participent à la cause des sécheresses, ils souffrent de leurs impacts et ils font face à leurs effets [16].

## I.3 - Impacts de la sécheresse

La variabilité climatique et les sécheresses touchent toutes les régions du monde. La sécheresse peut se produire dans pratiquement tous les régimes climatiques, dans les zones à forte comme à faible pluviométrie [28]. Contrairement à l'aridité, qui est une caractéristique permanente du climat et qui est limitée aux zones à faibles précipitations, la sécheresse est une condition temporaire provoquée par une pénurie d'eau. En général, les zones sèches - zones qui ont un déficit annuel de précipitations - sont plus sujettes à la sécheresse que les zones humides. Dans les zones sèches, les zones semi-arides, qui sont généralement plus peuplées et abritent une plus grande activité économique et sociale, souffrent davantage de la sécheresse. La vulnérabilité aux sécheresses est également liée au fait que la principale source d'eau est une eau souterraine ou de surface. Les zones dépendantes des eaux de surface ont tendance à être plus vulnérables aux sécheresses car les effets de la réduction des précipitations se font sentir plus rapidement. Au contraire, les zones urbaines qui sont approvisionnées en eau principalement par dessalement (par exemple, les grandes villes côtières), ont une très faible vulnérabilité aux sécheresses [22].

Tout au long de l'histoire, les sécheresses ont influencés le développement de la technologie, en particulier celles destinées à l'approvisionnement en eau et l'irrigation, et ont contribués à la chute et au déclin des civilisations [28], [29]. À l'avenir, le changement climatique pourrait entraîner des sécheresses plus fréquentes et plus graves. Les tendances observées en matière de sécheresse montrent des différences régionales importantes en ce qui concerne la sécheresse et ses conséquences [30].

Les sécheresses réduisent la disponibilité de l'eau pour les êtres humains, les animaux et les écosystèmes. Les impacts sociaux sont plus importants lorsque de graves sécheresses frappent les régions pauvres et les populations vulnérables. Lorsque les sécheresses sont associées à des conflits, comme les guerres civiles, les impacts sociaux peuvent devenir dévastateurs, entraînant des catastrophes humanitaires majeures dues à la faim, la malnutrition et la soif. Il est impossible de calculer le coût de l'impact social lorsque des millions de vies sont perdues [28]. Les répercussions économiques sont également importantes, car elles affectent les activités qui dépendent des précipitations.

L'agriculture et la production alimentaire sont particulièrement touchées par la sécheresse. Dans certains cas, la production agricole peut échouer, entraînant une perte de revenus, le chômage,

l'érosion des capitaux, la malnutrition et la pauvreté. La plupart des personnes extrêmement pauvres vivent dans les zones rurales et dépendent de l'agriculture pluviale pour leur subsistance, ce qui les rend extrêmement vulnérables à la sécheresse. Le risque de famine est nettement plus élevé dans ces régions. Par exemple, en 2015/2016, les graves sécheresses liées à El Niño ont entraîné des pertes de 50 à 90 % de la récolte dans le corridor sec d'Amérique centrale [31]. Les impacts environnementaux sont également importants, notamment la perte de biodiversité et l'augmentation de la dégradation des terres et de la désertification.

La société et les gouvernements sont confrontés à la sécheresse depuis l'Antiquité. Au départ, leurs réponses ont été orientées vers la fourniture d'eau et d'aide alimentaire. Plus tard, tout en poursuivant des actions de secours à court terme, ils ont commencé à construire des infrastructures hydrauliques, tant pour l'eau potable que pour l'irrigation. Au fil du temps, les concepts de gestion intégrée de l'eau, de préparation à la sécheresse, d'atténuation et de réaction, et de développement durable ont évolué. Néanmoins, les sociétés actuelles, en particulier dans le monde en développement, ne sont pas totalement préparées à faire face aux conséquences des sécheresses ou à réduire leurs vulnérabilités face à l'augmentation de la population, à la dégradation des terres et au changement climatique [28]. Par conséquent, la sécheresse continue d'être un danger dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les pays en développement et dans les régions sujettes aux conflits et à la dégradation de l'environnement.

Les stratégies gouvernementales sont des considérations clés pour la préparation, l'atténuation et la réponse à la sécheresse. La gouvernance fait référence aux règles, organisations, structures et processus formels et informels par lesquels les acteurs publics et privés articulent leurs intérêts, définissent et hiérarchisent les questions, et prennent et mettent en œuvre des décisions. Dans de nombreux cas, des innovations techniques visant à améliorer la préparation, l'atténuation et la réponse à la sécheresse existent déjà, mais leur mise en œuvre est entravée par des facteurs de gouvernance et d'économie politique.

Dans le monde, les sécheresses se produisent partout en Afrique, en Asie, en Amérique latine, en Amérique du Nord, en Australie et en Europe. Les effets de la sécheresse sont potentiellement dévastateurs sur la population, l'économie, les moyens de subsistance et l'environnement. Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les impacts des récents phénomènes extrêmes liés au climat, telles que les sécheresses « révèlent une vulnérabilité et une exposition importantes de certains écosystèmes et de nombreux systèmes humains à la variabilité climatique actuelle » [30].

En Afrique, les sécheresses modérées à extrêmes sont fréquemment produites et ils sont un des principaux facteurs de famine, les déplacements, les épidémies, la perte de bétail et de production agricole, et la pauvreté en général [28]. Les sécheresses dans la Corne de l'Afrique ont provoqué au moins une famine par décennie au cours des 30 dernières années [32]. En novembre 2017, environ 15 millions des populations du Kenya, de la Somalie et de l'Éthiopie ont été déclarées en grave insécurité alimentaire et qui ont besoin d'une aide alimentaire d'urgence [33]. Les projections à l'époque ont indiqué que 5.6 millions d'enfants dans la région seraient atteints de malnutrition aiguë. La combinaison de la sécheresse et des conflits avait déplacé 3.7 millions de personnes dans la région en juillet 2017. Les épidémies de rougeole ont également augmenté en Somalie et Éthiopie [33].

D'autres régions d'Afrique sont également touchées par de graves sécheresses pluriannuelles. Par exemple, les années 1972–1973, 1983–1984 et 1991–1992 ont été des années de sécheresse extrême sur tout le continent ; l'Afrique du Nord-Ouest a souffert de la sécheresse en 1999–2002 ; l'Afrique occidentale (Sahel) a été frappée dans les années 1970 et 1980 et les sud-est de l'Afrique en 2001–2003 [34]. Dans la région du Sahel, des sécheresses récurrentes, combinées à de faibles niveaux d'investissement agricole, aux conflits armés, à la dégradation de l'environnement, à une forte croissance démographique et à l'extrême pauvreté, ont créé une vulnérabilité chronique aux chocs de la population [35]. Les sécheresses de 2010 et de 2012 au Sahel ont provoqué des mauvaises récoltes et des prix alimentaires élevés, contribuant à l'insécurité alimentaire et à la malnutrition. En 2017, on estime que 30 millions de personnes étaient en situation d'insécurité alimentaire dans la région, avec près de 12 millions de personnes en situation de crise et d'urgence [36]. En Afrique australe, El Niño 2015/16 a provoqué la pire sécheresse de la région depuis 35 ans ; cinq pays ont déclaré des urgences nationales, et près de 29 millions de personnes sont en situation d'insécurité alimentaire en raison de sécheresses, d'inondations et d'autres facteurs structurels [37].

La sécheresse a été la catastrophe naturelle la plus coûteuse pour les pays en développement entre 2005 et 2015, selon un rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Selon le rapport intitulé "Proactive approaches to drought preparedness- Where are we now and where do we go from here "2, présenté lors de la 14<sup>ème</sup> Conférence des

---

<sup>2</sup> «Approches proactives de la préparation à la sécheresse - Où en sommes-nous maintenant et où allons-nous à partir d'ici»

Parties (COP 14) de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), les sécheresses ont coûté 29 milliards de dollars aux pays en développement [28].

D'autres catastrophes météorologiques comme les températures extrêmes et les tempêtes coûtent 26.5 milliards de dollars, suivies par les inondations (19 milliards de dollars), les tremblements de terre et les glissements de terrain (10.5 milliards de dollars), les catastrophes biologiques comme les maladies et les infestations (9.5 milliards de dollars) et les incendies (1 milliard de dollars), comme indiqué par FAO (2018) [38].

## I.5 - Indicateurs et indices de phénomène de sécheresse

Divers indicateurs conventionnels et indices de sécheresse ont été employés ou développés pour quantifier si une région connaît ou non une sécheresse et pour catégoriser la gravité de la sécheresse. Il est important à signaler qu'un indicateur et un indice de sécheresse ne désignent pas la même chose [39].

Les **indicateurs**, sont des variables ou des paramètres qui servent à décrire les conditions de sécheresse. Citons, par exemple, les précipitations, la température, l'écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l'humidité du sol et le couvert neigeux.

Les **indices**, quant-à-eux, sont des représentations numériques indiquant la gravité ou l'intensité des épisodes de sécheresse, calculées à l'aide des paramètres climatiques ou hydrométéorologiques [39]. Les indices servent à établir l'intensité, l'emplacement, l'époque d'apparition et la durée d'un épisode de sécheresse.

Les informations tirées des indicateurs et des indices sont utiles pour planifier et concevoir des applications (évaluations des risques, systèmes d'alerte précoce, outils d'aide à la décision en vue d'atténuer la menace dans les zones touchées), de cartographier les tendances (temporelles et spatiales) à l'échelle régionale de l'approvisionnement en eau, et pour définir les conditions de catastrophe qui sont éligibles à l'aide gouvernementale et où et quand des restrictions d'eau d'urgence peuvent être nécessaires [22]. De plus, divers indicateurs et indices peuvent servir à valider les résultats obtenus par modélisation, par assimilation ou par télédétection.

Les indicateurs et indices utilisés dans les programmes de gestion intégrée des sécheresses sont classés, d'après WMO/GWP (2016) [36], en cinq catégories: (a) - météorologie, (b) - humidité du sol, (c) - hydrologie, (d) - télédétection et (e) - valeurs composites ou modélisées. Un échantillon de ces indices et indicateurs sont indiqués dans Tableau I.1. Les paramètres d'entrés

sont précipitation (P), température (T), teneur en eau disponible (TED), évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réel (ET), déficit hydrique du sol (DHS), type de sol (TS), niveau des réservoirs (RS), valeurs modélisées (Mod.), l'écoulement fluviale (EF), couverture terrestre (TC), données satellitaires (SAT.), coefficient de culture (CC), combinaison des plusieurs indices (Plus.).

**Tableau I.1 :** Indicateurs et indices de sécheresse [39], (a) – Météorologie ; (b) - Humidité de sol ; (c) – Hydrologie ; (d) – Télédétection ; (e) - Composites ou modélisées.

**(a) – Météorologie**

Météorologie	Paramètres d'entrés	Informations complémentaires
Déciles	P	Facile à calculer
KBDI – Indice de sécheresse de Keetch-Bayram	P, T	Calculs fondés sur le climat de la zone visée
AI – Indice d'aridité	P, T	Peut aussi servir à la classification des climats
WASP – Anomalie pondérées des précipitations normalisées	P, T	Suivi de la sécheresse dans les régions tropicales a partir de données aux points de grille
NDI – Indice de la sécheresse de la NOAA	P	Destiné surtout aux applications agricoles
SPI – Indice de précipitations normalisé	P	Recommandé par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisée	P, ETP	Séries de données complètes requises ; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
Sc-PDSI – Indice de sécheresse de Palmer auto-étalonné	P, T, TED	nécessité d'avoir des séries de données complètes

**(b) - Humidité de sol**

Humidité de sol	Paramètres d'entrés	Informations complémentaires
SMA – Anomalie d'humidité de sol	P, T, TED	Destiné à améliorer le bilan hydrique du PDSI
ETDI – Indice de déficit d'évapotranspiration	Mod.	Calculs complexes et multiples valeurs d'entrée requises
SMDI – Indice de déficit d'humidité de sol	Mod.	Valeurs hebdomadaires à différentes profondeurs; calculs compliqués
SWS – Stockage d'eau dans le sol	TED, RS, TS, DHS	Interpolation difficile sur de vastes étendues en raison des

		variations du type de sol et de culture
NDI – Indice de la sécheresse de la NOAA	P	Destiné surtout aux applications agricoles
SPI – Indice de précipitations normalisé	P	Recommandé par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisée	P, ETP	Séries de données complètes requises ; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
Sc-PDSI – Indice de sécheresse de Palmer auto-étalonné	P, T, TED	nécessité d'avoir des séries de données complètes

**(c) – Hydrologie**

Hydrologie	Paramètres d'entrés	Informations complémentaires
PHDI – Indice de sécheresse hydrologique de Palmer	P, T, TED	Séries de données complètes Requises
SDI – Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial	EF	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur l'écoulement
SRSI – Indice d'alimentation des réservoirs normalise	RS	Calculs similaires à ceux du SPI avec des données sur les réservoirs
SSFI – Indice d'écoulement fluvial normalisé	EF	Utilise le programme du SPI avec des données sur l'écoulement fluvial

**(d) - Télédétection**

Télédétection	Paramètres d'entrés	Informations complémentaires
NDVI – Indice de végétation par différence normalise.	SAT.	Calculé pour la plupart des emplacements
NDWI et LSWI – Indice de quantité d'eau par différence normalise et indice de quantité d'eau en surface	SAT	Produit en exploitation a partir des données de radiométriques à moyenne résolution
TCI – Indice des conditions de température	SAT.	Généralement présenté avec l'indice NDVI
VCI – Indice des conditions de vegetation	SAT.	Généralement présenté avec l'indice NDVI
VegDRI – Indice de réaction de la végétation a la sécheresse	SAT., P, T, TED, CT, ER	Prend en compte de nombreuses variables pour distinguer le stress dû à la sécheresse des autres stress subis par la végétation

VHI – Indice de sante de la végétation	SAT.	L'une des premières tentatives de suivre la sécheresse par télédétection
Indices de satisfaction des besoins en eau (WRSI et geospatial – WRSI)	SAT., Mod., CC	Opérationnel pour de nombreux endroits
Indice d'eau par différence normalisé (NDWI) et Indice des eaux de surface des terres (LSWI)	SAT.	Opérationnel produit utilisant les données radiométriques à résolution modérée

**(e) - Composites ou modélisées**

Composites ou modélisées	Paramètres d'entrés	Informations complémentaires
CDI – Indicateur de sécheresse composé	Mod., P, SAT.	Utilise à la fois des données de surface et de télédétection
GIDMaPS – Système mondial intégré de suivi et de prévision de la sécheresse	Plus., Mod.	Produit opérationnel qui donne les valeurs mondiales de l'indice d'humidité du sol normalise, du SPI et du MSDI
GLDAS – Système mondial d'assimilation des données sur les terres émergées	Plus., Mod., SAT.	Utile pour les régions ou les données sont rares étant donne sa couverture mondiale
MSDI – Indice de sécheresse normalise multi-varié	Plus., Mod	Disponible, mais une interprétation est nécessaire

## I.6 - Suivi de la sécheresse par les indices de téléconnexions

La sécheresse n'est jamais le résultat d'une cause unique. Elle est plutôt le résultat de nombreuses causes, qui sont souvent de nature synergique. Certaines de ces causes peuvent être le résultat d'influences provenant de régions éloignées de la zone touchée par la sécheresse [12]. Le rôle des systèmes en interaction (processus d'interaction entre l'océan et l'atmosphère), souvent appelés "téléconnexions", est employé pour "expliquer" les schémas climatiques régionaux et même mondiaux de la variabilité climatique. Les téléconnexions sont des modèles des circulations atmosphériques régionaux ou mondiaux qui réapparaissent avec une fréquence considérable dans à peu près la même source et qui persistent ou réapparaissent souvent pendant un mois ou une saison. Ces schémas ont tendance à se reproduire avec une fréquence suffisante et avec un caractère similaire.

Les anomalies de la circulation atmosphérique à grand échelle, sont généralement étudiées au moyen des indices climatiques tels que l'indice ENSO (El Niño de l'Oscillation Australe), NOA (Oscillation de l'Atlantique Nord), MO (Oscillation Méditerranéenne), WeMO (Oscillation Occidentale méditerranéenne). Un indice climatique est une série chronologique établie à partir des variables climatiques qui constitue un résumé global de l'état du système climatique. La plupart des indices utilisent une seule variable (par exemple, la pression au niveau de la mer, les anomalies de la température de surface de la mer, la hauteur de géopotentielle, les précipitations). Ces indices sont décrits dans ce qui suit :

(1) – **El Niño de l'Oscillation Australe (ENSO)** : Walker et Bliss (1932) [40] ont proposé le terme d'oscillation australe (Southern Oscillation, SO) pour décrire un phénomène à grande échelle. Le SO caractérise la différence de pression atmosphérique entre Tahiti (17°31'S, 210°26'E) dans le sud-est du Pacifique et Darwin (12°28'S, 130°5'0E) dans le nord de l'Australie, à l'ouest de l'océan Pacifique. Il est utilisé pour suivre et prédire les changements de la force de la circulation de Walker<sup>3</sup> (WC) - l'un des systèmes de vent atmosphérique les plus importants au monde [41]. Au mois de novembre, la pression est plus forte à l'Est de Tahiti qu'à l'Ouest; cette différence de pression le long de l'équateur génère une circulation de masses d'air vers l'ouest et fournit une phase positive appelée "La Niña", qui est l'opposé de "El Niño" (phase négative). La combinaison entre l'oscillation australe et El Niño (phase chaude) donne le phénomène ENSO [18].

(2) - **Oscillation Nord Atlantique (NAO)** : Sir Gilbert Walker a découvert l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) pour la première fois depuis 1920 ; elle caractérise la circulation atmosphérique de l'hémisphère nord. Elle est mise en évidence par la différence de pression normalisée au niveau de la mer entre l'anticyclone des Açores (35,1° N, 5,3° W) et la dépression islandaise (65° N, 20° W) [39]. La NAO est le principal mode de variabilité climatique en saison hivernale, en particulier en Europe du Nord, et comporte deux phases, à savoir une phase positive et une phase négative ; chaque phase est responsable des conditions atmosphériques distinctes autour de l'Atlantique Nord. Dans le cas d'une NAO positive, il y a un fort courant d'ouest générant de multiples dépressions vers l'Europe du Nord. Néanmoins, en cas de NAO négatif, le courant de pression est moins intense et se déplace davantage vers le sud [43].

---

<sup>3</sup> La circulation de Walker s'étend sur tout l'océan Pacifique tropical, englobant (1) les alizés soufflant d'est en ouest, (2) l'air forcé de s'élever au-dessus du Pacifique occidental, de l'Asie du sud-est et du nord de l'Australie par une convection accrue, (3) les vents soufflant contre les trafics aériennes, et (4) l'air descendant au-dessus de la l'océan Pacifique oriental [39].

(3) - **Oscillation Méditerranéenne (MO)** : Conte et al. (1989) [44] et Palutikof et al. (1996) [45] sont les premiers chercheurs à avoir parlé de l'Oscillation Méditerranéenne (MO). La MO est l'un des phénomènes décrivant la circulation atmosphérique à l'échelle du bassin méditerranéen. Le MO est défini comme la différence de pressions normalisées entre Alger (36.4°N, 3.1°E) en Algérie et Le Caire (30.1°N, 31.4°E) en Egypte, à une hauteur géopotentielle de 500 hPa.

(4) - **Oscillation Occidentale de la Méditerranée (WeMO)** : L'indice WeMO proposé par Martin-Vide et Lopez-Bustins (2006) [46], il est défini comme la différence des pressions de surface normalisées entre la station San Fernando (36.3°N, 6.1°W) en Espagne et la station Padoue (45°N, 10°E) en Italie. Elle se caractérise dans sa phase positive par le renforcement de l'anticyclone des Açores et son extension sur le quart sud-ouest de la péninsule ibérique, associée à une dépression dans le golfe de Ligurie induisant une circulation générale nord-ouest et sud-est des masses d'air de surface. Cependant, la phase négative joue un rôle inverse.

Les valeurs mensuelles de NAO, MO, SOI peuvent être obtenues auprès de Climatic Research Unit, University of East Anglia (<https://crudata.uea.ac.uk>). Cependant, le WeMO peut être obtenu auprès du Groupe de climatologie, Université de Barcelone (<http://www.ub.edu/gc>), [18].

(5) - **Oscillation atlantique multi-décennale** ou **AMO** (Atlantic Multi-decadal Oscillation), est une variation de la température de surface de la mer qui s'étend sur plusieurs décennies, de 40 à 80 ans, observée dans le Nord de l'Océan Atlantique en soustrayant la variation linéaire due au réchauffement climatique. Ce mode de variabilité expliquerait jusqu'à 40% de la variance de la température de surface moyennée annuellement dans l'océan Atlantique Nord. L'indice OAM défini comme la moyenne glissante sur 10 ans de la température de surface dans l'Atlantique Nord (à partir de l'équateur) montre que cette moyenne était plus froide durant les périodes 1900-1920 et 1970-1990 et plus chaudes sur la période 1940-1960.

## I.7 - Liens entre sécheresse et désertification

La sécheresse et la désertification sont des phénomènes étroitement liés. Persistant pendant des mois ou des années, la sécheresse peut affecter de vastes zones et avoir de graves répercussions environnementales, sociales et économiques. Alors que la sécheresse est un phénomène naturel, dont les effets peuvent être exacerbés par des activités humaines qui ne sont pas adaptées au climat local, la dégradation des sols est le processus de transformation de terres fertiles en terres

moins ou non productives. Dans les cas extrêmes, ce phénomène est appelé désertification. Le Centre CRSTRA<sup>4</sup> a convenu que la désertification correspond à un cas grave de sécheresse (à la fois en intensité et en durée).

L'UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) a défini (1994) la désertification comme étant "la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches résultant de divers facteurs, notamment les variations climatiques et les activités humaines".

Le changement climatique devrait accroître la fréquence, la durée et la gravité des sécheresses dans de nombreuses régions du monde. Ces conditions changeantes viennent s'ajouter à une utilisation des terres déjà éprouvantes à l'échelle mondiale, notamment dans les zones arides fragiles de la planète. Cela pourrait entraîner une accélération de la dégradation des terres et de la désertification, ce qui, à son tour, pourrait accroître la pauvreté [3].

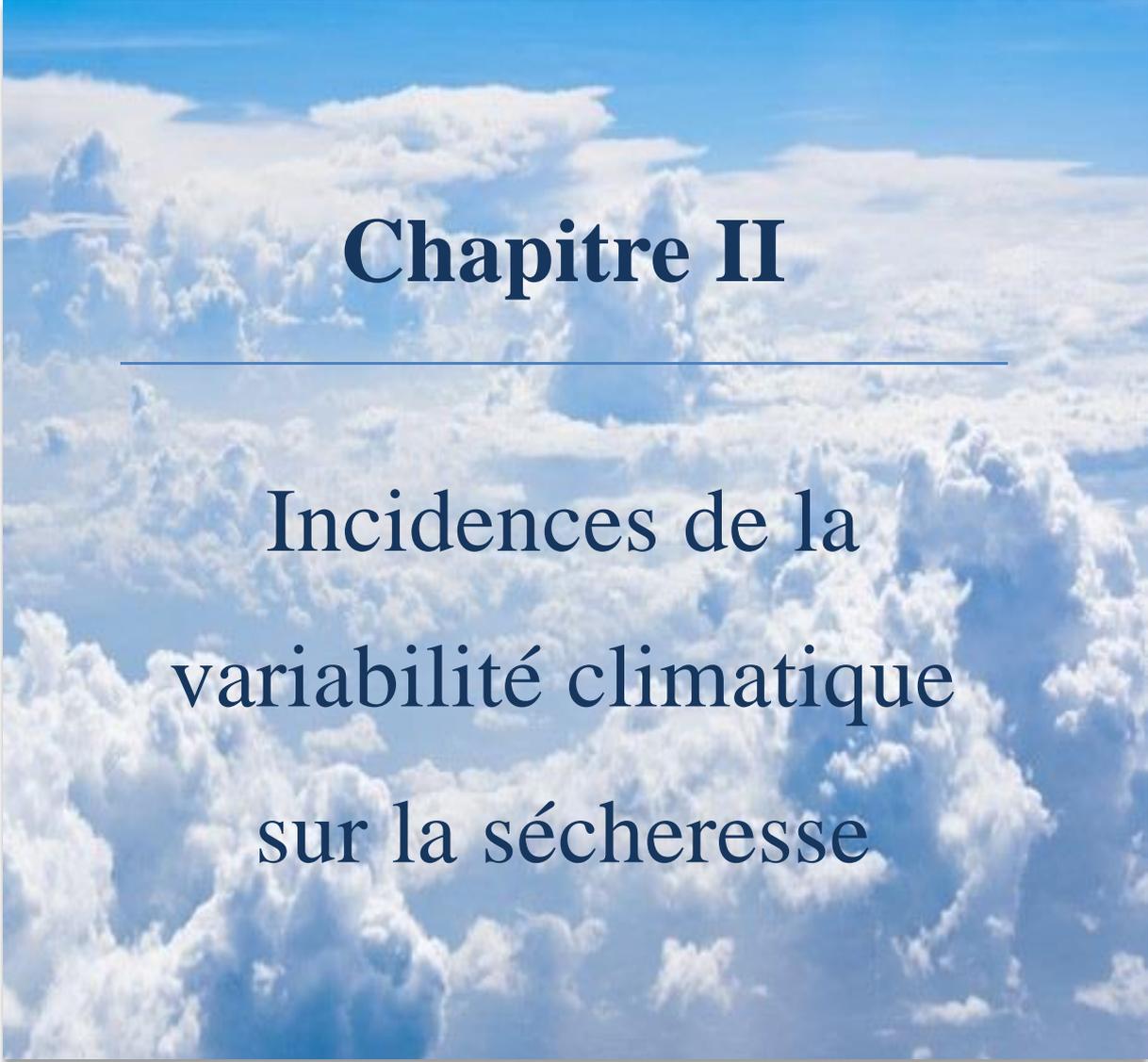
La sécheresse et la désertification causent habituellement la même perturbation, ce qui mène à souligner leurs relations. Toutefois, les impacts de la sécheresse peuvent persister pendant des périodes plus au moins limités (quelques mois, ou saisons, ou années, ou encore quelques décennies). Par contre les impacts de la désertification, en cas d'installation, sont irréversibles. En effet, une fois que la "cascade de processus de dégradation commence, il est difficile de l'interrompre ou de l'arrêter". Pour arrêter la désertification avant qu'elle ne commence, il faut prendre des mesures pour " rationaliser la consommation des sources d'eau, protéger contre l'érosion des sols, prévenir la perte de végétation, empêcher le surpâturage ou la mauvaise gestion des terres".

Dans cette étude, à propos le suivi des zones qui ont tendance à la désertification, cas de la région semi-aride de M'Sila dans le Hodna, on s'intéresse particulièrement sur les causes susceptibles êtres à l'origine d'apparition de la désertification, particulièrement la persistance des conditions de sécheresse. Nous avons proposés des outils de suivi et de contrôle issus de l'imagerie satellitaire et des indices de sécheresse normalisé. L'albédo de surface déduit de la luminance enregistrée dans le canal visible (VIS) de la série des satellites METEOSAT (METEOSAT-5, -6, et -7), est un indicateur souvent utilisé comme indicateur sur la dynamique de l'état de surface. Cependant les indices normalisés SPI (Indice de Précipitation Normalisé)

---

<sup>4</sup> CRSTRA - Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides - Biskra, Algérie.  
<http://www.besafenet.net/fr-fr/natural-hazards-drought-and-desertification#faq114> (accès le 21 Mars 2021)

et l'indice SPEI (Indice de Précipitation et d'Evapotranspiration Normalisé), calculer aux échelles de temps de 1 à 24 mois, ce sont deux indices les mieux appropriés pour montrer la sévérité des épisodes de sécheresse en terme des dates de déclenchement et d'atténuation, et d'intensité des conditions de sécheresse dont la région d'étude a vécue.



# Chapitre II

---

Incidences de la  
variabilité climatique  
sur la sécheresse

# Chapitre II

## Incidences de la variabilité climatique sur la sécheresse

---

### II.1 - Changement climatique – Quels conséquences

Les facteurs à l'origine du changement climatique sont nombreux, et les impacts ne se limite pas à la sécheresse, mais elles le dépassent à d'autres éléments liés avec ce dernier tels que les canicules (vagues de chaleur), les feux de forêts, l'inondation, la disponibilité et la qualité des eaux, la sécurité alimentaire des milliards de personne, etc. Cependant, il existe maintenant un agrément sans équivoque selon lequel la cause principale de changement climatique est l'augmentation des gaz à effet de serre anthropiques, ex., Berhail 2019 [47], suite aux activités principalement humaine [30]. Pour cette raison les sections qui vont suivre ont comme objectifs la description de la notion du changement climatique; sa distinction du réchauffement climatique; ses causes, ses impacts, et ses outils d'évaluation; ses répercussions sur les différentes types de sécheresse (la sécheresse du Sahel aux années 70 elle est présentée comme exemple); la vulnérabilité (c.-à-d. le risque d'exposition) à l'échelle régionale et à l'échelle nationale face au changement climatique; les mesures d'adaptations actuelles et d'actions futurs present par les décideurs de la politique, pour le cas de l'Algérie.

#### II.1.1- Changement climatique ou Réchauffement climatique

Avant d'aller plus loin dans notre sujet nous devons s'interrogés à propos de changement climatique et de réchauffement climatique de quoi s'agissent-ils ? Le réchauffement climatique (ou planétaire) et le changement (dérèglement) climatique sont des phénomènes techniquement distincts, et elles n'ont pas la même cause. Le terme « réchauffement climatique » désigne plus communément le réchauffement mondial observé depuis le milieu du XXème siècle, tandis que l'expression « changement climatique » désigne plutôt les épisodes de réchauffement ou de

refroidissement d'origine naturelle qui se sont produits avant l'ère industrielle (1850 – 1900). Le changement climatique en cours depuis la révolution industrielle, certains l'appellent réchauffement climatique, résulte d'une modification de la composition de l'atmosphère terrestre par les émissions des gaz à effet de serre engendrées par les activités humaines. À part que les deux notions varient sur le plan temporel, des nombreuses distinctions entre le concept de « réchauffement planétaire » et le concept de « changement climatique », on note que (i) – le **réchauffement climatique (RC)** désigne l'augmentation globale des températures, cependant le changement climatique (CC) englobe d'autres paramètres que la température (qu'elle peut être en augmentation ou en descente), comme les précipitations et les vents ; (ii) - Le RC est un phénomène global observé à l'échelle de la planète, les manifestations du CC peuvent varier localement avec des variations significatives observées entre les différentes régions du monde ; (iii) - le RC est un phénomène récent et rapide, CC est aussi antique que le temps ; durant la période préhistoire et jusqu'au l'ère avant la révolution industrielle (1850 - 1900), la Terre a connu une alternance de régime climatique entre les périodes glaciaires (périodes froides) et les périodes interglaciaires (périodes chaudes) ; (iv) – le RC global est d'origine anthropique (man-made) observé à la suite de la révolution industrielle est lié aux émissions des gaz à effet de serre, le CC est normalement un phénomène dont les causes sont entièrement naturelles (des causes astronomiques et volcaniques ainsi que l'effet de déplacement des continents vers les pôles) ; (v) – le RC ne concerne que l'augmentation de la température à la surface de la Terre, le CC inclut le réchauffement et les "effets secondaires" du réchauffement, comme la fonte des glaciers, des pluies plus fortes ou des sécheresses plus fréquentes ; (vi) - le rythme de RC est plus rapide, le rythme de CC est lent, en particulier au cours des périodes préhistoire.

« Sous tout autre nom, qu'on les appelle "réchauffement climatique" ou "changement climatique", les conséquences des changements à grande échelle actuellement observés dans le système climatique de la Terre pourraient être considérables » [48].

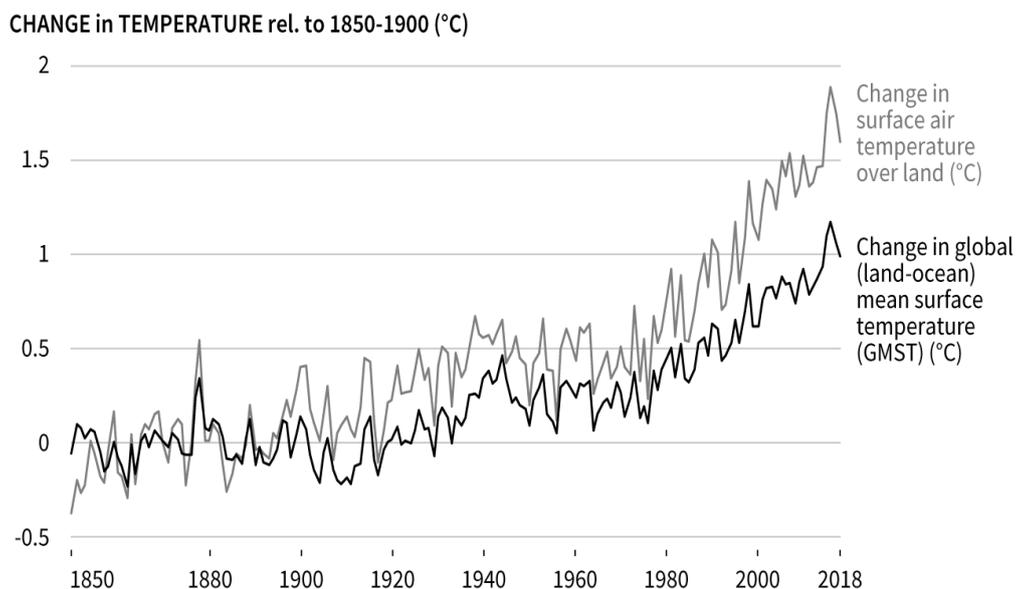
Dans ce qu'il suit nous allons conserver qu'un seul terme, parmi RC et CC mentionnés ci-dessus. Plusieurs auteurs proposent le mot « Changement Climatique Global » ou tout simplement « Changement Climatique » (Climate Change, en anglais), pour désigner l'état de climat à l'échelle planétaire. Le terme « Changement Climatique » aura ainsi une définition globale comme suite [49] :

« Le changement climatique désigne toute modification significative des mesures du climat (telles que la température, les précipitations ou le vent) pendant une période prolongée (plusieurs

décennies ou plus). Le changement climatique peut résulter : (1) - de facteurs naturels, tels que des changements d'intensité du Soleil ou des lentes modifications de l'orbite de la Terre autour du Soleil ; (2) - de processus naturels au sein du système climatique (par exemple, des changements dans la circulation océanique) ; (3) - d'activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère (par exemple, par la combustion de combustibles fossiles) et la surface des terres (par exemple, la déforestation, le reboisement, l'urbanisation, la désertification, etc.) »

## II.1.2 - Changement climatique planétaire

Le réchauffement du système climatique, depuis les années 1950, est sans équivoque et beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté. Les trois dernières décennies ont été successivement les plus chaudes à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850 [27]. Depuis la période préindustrielle (1850-1900), la température moyenne de l'air à la surface des terres a augmenté considérablement plus que la température moyenne de la surface global (terre et océan), (GMST), voir Figure II.1, [50].



**Figure II.1 :** Changement de la température de l'air observée par rapport à 1850-1900, [50].

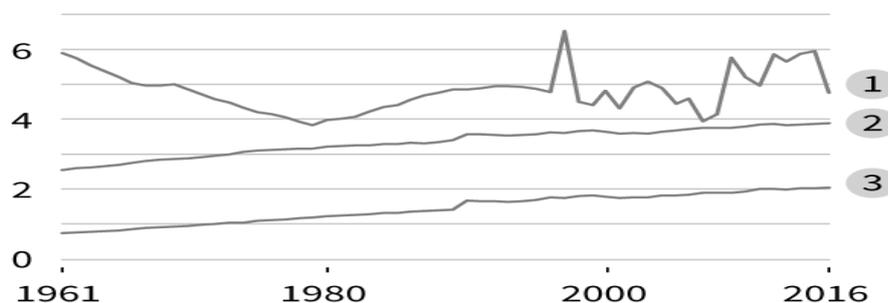
Le groupe GIEC dans son quatrième rapport de GIEC (2007) [51] affirme que le réchauffement climatique depuis 1950 est « très probablement <sup>1</sup> » dû à l'augmentation des gaz à effet de serre d'origine anthropique (Greenhouse Gas, GHG). Le degré de certitude est passé à « extrêmement probable <sup>2</sup> » dans le cinquième rapport [30]. L'émission des gaz à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) sont liés aux activités humaines. Figure (II.2) suivant, indique les taux d'émissions de dioxyde de carbone (en Gt de CO<sub>2</sub> / an), et l'équivalent de son émission à partir de méthane et d'oxyde nitreux. On estime que 23% d'émissions des gaz à effet de serre d'origine anthropique durant (2007 – 2016) proviennent des secteurs d'agriculture et de la foresterie.

**An estimated 23% of total anthropogenic greenhouse gas emissions (2007-2016) derive from Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU).**

**CHANGE in EMISSIONS since 1961**

- ① Net CO<sub>2</sub> emissions from FOLU (GtCO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup>)
- ② CH<sub>4</sub> emissions from Agriculture (GtCO<sub>2</sub>eq yr<sup>-1</sup>)
- ③ N<sub>2</sub>O emissions from Agriculture (GtCO<sub>2</sub>eq yr<sup>-1</sup>)

GtCO<sub>2</sub>eq yr<sup>-1</sup>



**Figure II.2 :** Émissions des gaz à effet de serre durant la période (2007 – 2016), [50].

Plusieurs communautés scientifiques et organismes nationaux et internationaux ont comme mission d'évaluer régulièrement la base scientifique du changement climatique, ses impacts et risques futurs, ainsi que les mesures d'adaptation et d'atténuation. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change) (<https://www.ipcc.ch/about/>), créé conjointement en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, WMO) et le Programme des Nations Unies

<sup>1</sup> Selon GIEC, la mention « très probablement » signifiée une probabilité entre 90% et 100%.

<sup>2</sup> Selon GIEC, la mention « extrêmement probable » signifiée une probabilité entre 95% et 100%.

pour l'Environnement (UNEP – The United Nations Environment Program) ; L'objectif du GIEC est de fournir aux gouvernements à tous les niveaux des informations scientifiques qu'ils peuvent utiliser pour élaborer des politiques climatiques. La Banque mondiale (World Bank, WB), dans une réflexion pour servir de «guichet unique» pour les informations, données et outils liés au climat, a créé le Portail des connaissances sur le changement climatique (Climate Change Knowledge Portal - CCKP). Le portail fournit un outil en ligne pour accéder à des données globales, régionales et nationales sur le changement climatique et le développement (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>). A l'échelle nationale, les questions relatives aux changements climatiques et ces impacts sont abordées principalement par le Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables (MEER). Le Plan National CLIMAT (PNC), élaboré récemment en 2018, propose les mesures d'adaptation actuelles et d'actions futures face aux changements climatiques en Algérie [52].

Les observations relatives au système climatique reposent sur des mesures physiques et biogéochimiques directes et sur des mesures de télédétection obtenues à partir des stations au sol ou de l'espace ; les informations issues des données relatives au paléoclimat permettent de les inscrire dans un contexte temporel plus vaste [30]. Les observations des changements au sein du système climatique comprennent :

- Évolution de la température (Surface du globe ; Troposphère et Stratosphère ; Océan) ;
- Évolution du bilan énergétique et de la teneur en chaleur ;
- Évolution de la circulation atmosphérique et modes de variabilité ;
- Évolution du cycle hydrologique et de la cryosphère (Atmosphère ; Flux océaniques et flux de surface ; Glaces de mer ; Glaciers et nappes glaciaires ; Enneigement, eau douce et gélisol<sup>3</sup>) ;
- Évolution du niveau de la mer ;
- Évolution des extrêmes
  - Atmosphériques ou climatiques : nombre des journées et nuits chaudes et froides ; périodes et vagues de chaleur ; précipitations abondantes ; fréquence et intensité des épisodes de sécheresse ; tempêtes ; inondations ;
  - Océaniques : élévation de niveau de la mer ; hauteur de la houle significative moyenne.

---

<sup>3</sup> Gélisol est un sol soumis au gel, constitué d'un mollisol (couche active) en surface et d'un pergélisol en profondeur (<https://www.larousse.fr/dictionnaires>)

- Évolution de cycle du carbone et d'autres cycles biogéochimiques (Dioxyde de carbone ; Méthane ; Oxyde nitreux ; Oxygène océanique).

Le changement climatique et les fluctuations atmosphériques à grande échelle qui sont parfois responsables de l'apparition d'événements extrêmes et de catastrophes naturelles comme les inondations, les sécheresses et la désertification, sont de plus en plus récurrents dans le monde [53], [54].

### II.1.3 - La sécheresse dans le cadre du changement climatique

La sécheresse est un élément normal du climat pour pratiquement tous les régimes climatiques. Il s'agit d'une aberration temporaire qui se produit dans les zones à fortes comme à faibles précipitations. Le caractère de la sécheresse est distinctement régional, reflétant des caractéristiques météorologiques, hydrologiques et socio-économiques uniques [12].

Les catastrophes liées au climat telles que les inondations, les tempêtes, les sécheresses et autres phénomènes météorologiques extrêmes représentent 91 % de toutes les catastrophes qui se sont produites dans le monde entre 1998 et 2017 [55]. Bien que les sécheresses ne représentent que 4.8 % des événements enregistrés au cours de cette même période, elles ont affecté un incroyable 1.5 milliards de personnes (soit 33 % de toutes les personnes touchées par des catastrophes au cours de cette période) [55]. Les sécheresses touchent une population plus importante que les autres catastrophes malgré une fréquence d'occurrence plus faible [56].

La sécheresse est comptée parmi les événements climatiques extrêmes, il est insidieux par nature car il se développe lentement et se produit souvent de manière insidieuse [57], mais le changement climatique ressenti ces derniers décennies <sup>4</sup> a généralement accéléré les processus hydrologiques pour les faire s'installer plus rapidement et devenir plus intenses, avec de nombreuses conséquences [58], [59]. Le changement climatique est susceptible d'augmenter les risques de sécheresse au cours du XXI<sup>e</sup> siècle dans de nombreuses régions du monde, telles que l'Afrique

---

<sup>4</sup> Suite à l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> en particulier) accumulés depuis le milieu de XX<sup>e</sup>me siècle, vers 1950 (GIEC 2014). La moyenne mondiale de dioxyde de carbone atmosphérique en 2019 était de 409,8 parties par million (ppm), avec une marge d'incertitude de plus ou moins 0,1 ppm. Les niveaux de dioxyde de carbone sont aujourd'hui plus élevés qu'à aucun moment au cours des 800 000 dernières années au moins. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (Accès Décembre 2020)

du Nord et de Sud, le sud de l'Europe et l'Asie centrale suite à la susceptible diminution des précipitations selon les projections des modèles climatiques [60].

Les sécheresses ont toujours existé, et la variabilité de température à la surface de la mer peut provoquer des sécheresses globales, par exemple [22]. En outre, un changement de climat régional tel que des anticyclones à faible vitesse qui modifient la climatologie d'une région en entravant la progression des systèmes météorologiques synoptiques peut être responsable de l'amélioration des processus de rétroaction terre-atmosphère [61] [62]. En raison du manque d'humidité disponible dans ces régimes, les processus de rétroaction terre-atmosphère exaspèrent la situation en augmentant les températures atmosphériques et donc la demande atmosphérique d'humidité, ce qui entraîne un assèchement et un réchauffement accrus de la surface terrestre en même temps. Mukherjee et al. (2018) [51] ont schématisés le lien entre les processus qui affectent la propagation de la sécheresse d'un type à un autre dans le cadre du changement climatique, comme indiqué par Figure II.3 suivant.

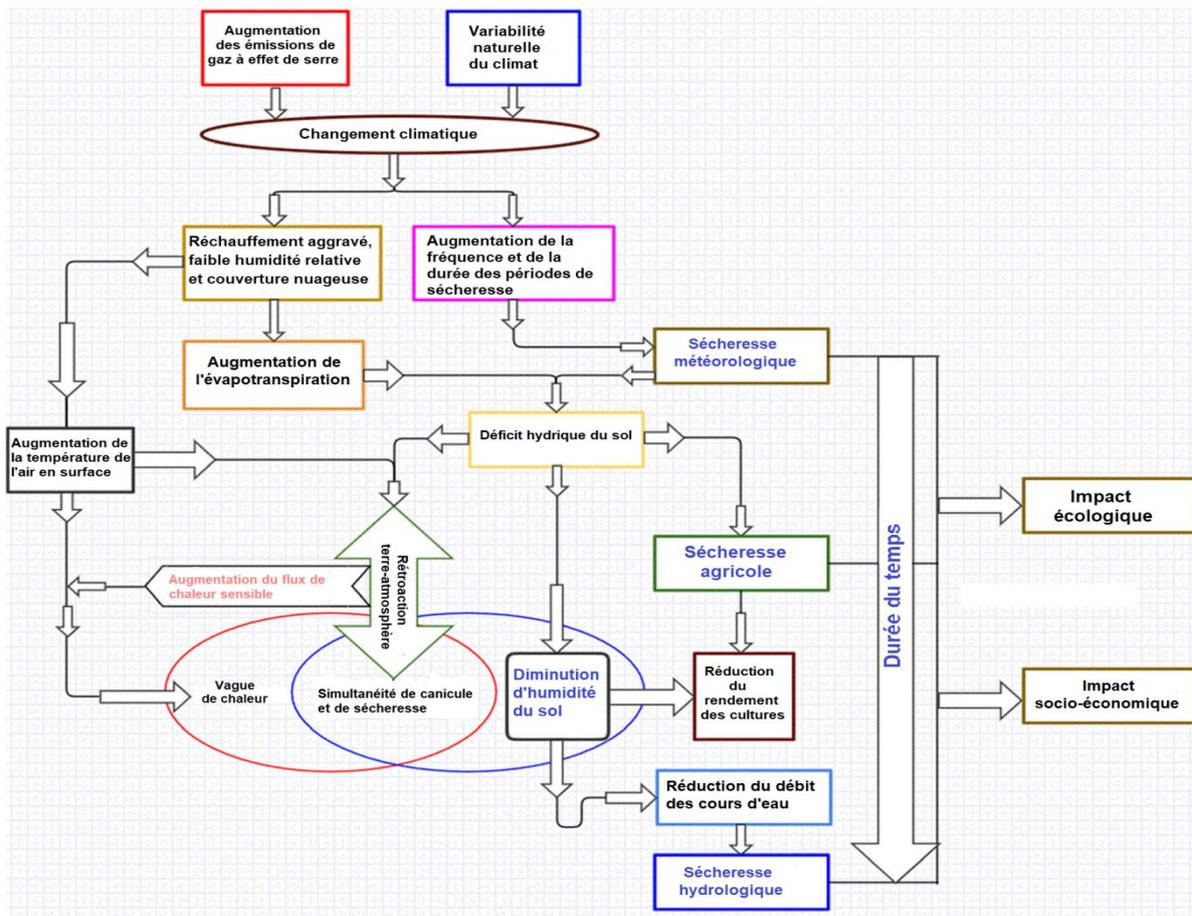


Figure II.3 : Diagramme schématisé montrant la propagation de la sécheresse sous le cadre du changement climatique [61].

## II.1.4 - La sécheresse du sahel

La sécheresse n'est pas un phénomène récent. Les sécheresses les plus dévastatrices se sont produites au cours du siècle précédent. L'Afrique, depuis le début des années 1970, a connu les sécheresses les plus fréquentes, 42% des sécheresses signalées dans le monde sont survenant sur le continent africain et avaient touchés plus de 400 millions de personnes [56]. Au Sahel la sécheresse était parmi les plus épouvantables [63], elle est persistée pendant plus d'une vingtaine d'années. La diminution des pluies dans la région à provoquer des situations épouvantables pour l'agriculture, et par conséquence des famines et morts au milieu des populations que l'on vécut. Les situations sociales provoquées étaient terriblement graves, certains chercheurs se sont alors posé la question : pourquoi ces sécheresses ont-elles existé pendant ces années-là ? Qu'est-ce qui ont provoqué ces situations exceptionnelles ?

Certains chercheurs tels que Jules Charney (1975, 1977) ([64], [65]) et Joe Otterman (1976) [66], ont proposé des théories pour expliquer ces sécheresses qui avaient existé non seulement au Sahel mais dans d'autres régions semi arides tels que le Sinaï, le Mexique et l'Arabie. Dans leurs modèles, ils ont simplement changé l'albédo des sols pour ces régions semi arides, et ils s'avèrent une variabilité des pluies. L'augmentation de l'albédo de sol, justifié par l'effet de l'augmentation de pouvoir réfléchissant du sol induit par le surpâturage, a entraîné dans les modèles une réduction des précipitations. La théorie de Charney (ou Mécanisme de Charney) appliquée au Sahel, se résume par l'effet que l'augmentation de l'albédo de surface, suite à l'augmentation d'activités agricoles et pastorales, entraîne une perte radiative nette qui est compensée par un accroissement de la subsidence de l'air (tendance à la descente) ; cette subsidence forte réduit d'autant les phénomènes convectifs susceptibles d'engendrer les pluies. La diminution, la rareté, voire l'absence de pluie, résultant de ce processus conduisent à l'appauvrissement de la végétation restante qui favorise et entretient alors l'effet de rétroaction positif (positif feedback) entre la surface du sol et l'atmosphère [67].

Des modèles expérimentaux ont soutenu ce mécanisme [68] [69] pour la même zone sahélienne et [70] [71] [72] pour la partie sud-est australienne. Cependant, d'autres études ne sont pas convaincues par le mécanisme de Charney. Courel et al. (1992, 1984) ([67], [73]), avait indiqué que les causes de sécheresses au Sahel relèvent davantage aux anomalies de la circulation générale de l'atmosphère que de modifications ponctuelles de l'état des surfaces attribuées de façon abusive à l'homme. Zeng et al. (1999, 2003) ([74], [75]) avait souligné dans une étude sur le rôle de la

variabilité naturelle de la végétation, que la variabilité des précipitations au Sahel est influencée par les variations de température de l'eau de surface des océans, et que la rétroaction de la surface de la terre peut renforcer cette variabilité à la fois sur des échelles de temps interannuelles et interdécennales. Lorsque les températures de surface de la mer sont plus élevées dans l'Atlantique Sud que dans le Nord, la circulation de la mousson ouest-africaine est affaiblie [76], ce qui réduit l'ampleur de la migration vers le nord de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), et ce qui prive la région de ses pluies habituelles. A leur tour, ces précipitations sont responsables de l'appauvrissement du couvert végétal qui se traduit dans une augmentation de l'albédo de surface. Govaerts et Lattanzio (2008) [77] ont montrés, dans leur étude pour expliquer les causes de la sécheresse au Sahel, que le déficit de précipitations entre Juin à Octobre (JJASO) qui s'est produit dans la zone entre 12°N et 18°N se traduit par une augmentation de l'albédo de surface d'environ 0.06. Ces dernières études révèlent donc que les principales causes de la sécheresse (le cas du Sahel comme exemple) sont davantage liées à la variabilité des précipitations qui est en relation avec les anomalies de la circulation atmosphérique à grande échelle.

## II.2 – Vulnérabilité climatique régionale

### (Zone de Moyen-Orient et Afrique de Nord – Zone MENA)

L'Afrique du Nord est souvent considérée comme un « point chaud » du changement climatique [78]. Des nombreuses études ont souligné la grande variabilité des quantités de pluie d'une année sur l'autre, les périodes de sécheresse, et les vagues de chaleur qui en découlent [58], [79]. Plusieurs chercheurs ont étudié l'impact du changement climatique sur la situation de l'eau et l'agriculture en Afrique du Nord. Par exemple, Schmitz et al. (2013) [80] prévoient une augmentation de la pénurie d'eau en Afrique du Nord, tandis que Alboghdady et El-Hendawy (2016) [81] montrent qu'une augmentation de 1% de la température en hiver entraîne une diminution de 1.12% de la production agricole dans la région Moyen-Orient et Afrique du Nord (MENA). Le changement climatique en Afrique du Nord, qui émet de faibles niveaux de gaz à effet de serre (entre 1.5 et 3.5 tonnes d'émission de CO<sub>2</sub>/habitant/an), représente une véritable menace pour le développement socio-économique de la région et pour sa population [82]. Certains chercheurs en sciences sociales ont affirmé que la pénurie d'eau dans la région MENA est un "problème créé par l'homme" [83] et principalement causée par une forte croissance démographique. D'autres ont souligné que des précipitations moins abondantes et plus irrégulières sont les principaux facteurs de la pénurie d'eau qui affectera le plus fortement la population pauvre

des zones rurales [84]. Scheffran et al. (2019) [85] affirment que dans les régions qui dépendent de l'agriculture pluviale, les sécheresses peuvent augmenter le risque de conflit civil [86]. Figure II.4 montre la zone MENA, y compris la topographie, l'utilisation des terres et la croissance démographique prévue [87].

Dans un rapport de la Banque mondiale qui distingue les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord par, [10] :

- Un taux de croissance démographique élevé, de l'ordre de 2 % par an qui, conjugué à un processus d'expansion urbaine important, devrait se traduire par un doublement de la population des villes de la région à l'horizon 2050 ;
- Une augmentation de la consommation des ressources amplifiée par une sous-valorisation de l'eau et un manque de rigueur dans l'application de la réglementation qui conduirait sur le moyen et long terme à une exploitation excessive des ressources en eau, notamment des eaux souterraines ;
- Un dérèglement climatique qui exerce des pressions supplémentaires sur les volumes d'eau disponibles et la qualité des sols par ses effets négatifs dus, en particulier, aux phénomènes météorologiques extrêmes des sécheresses et inondations qui seront plus fréquents et plus graves augmentant ainsi les pénuries d'eau et accentuant la dégradation des terres.

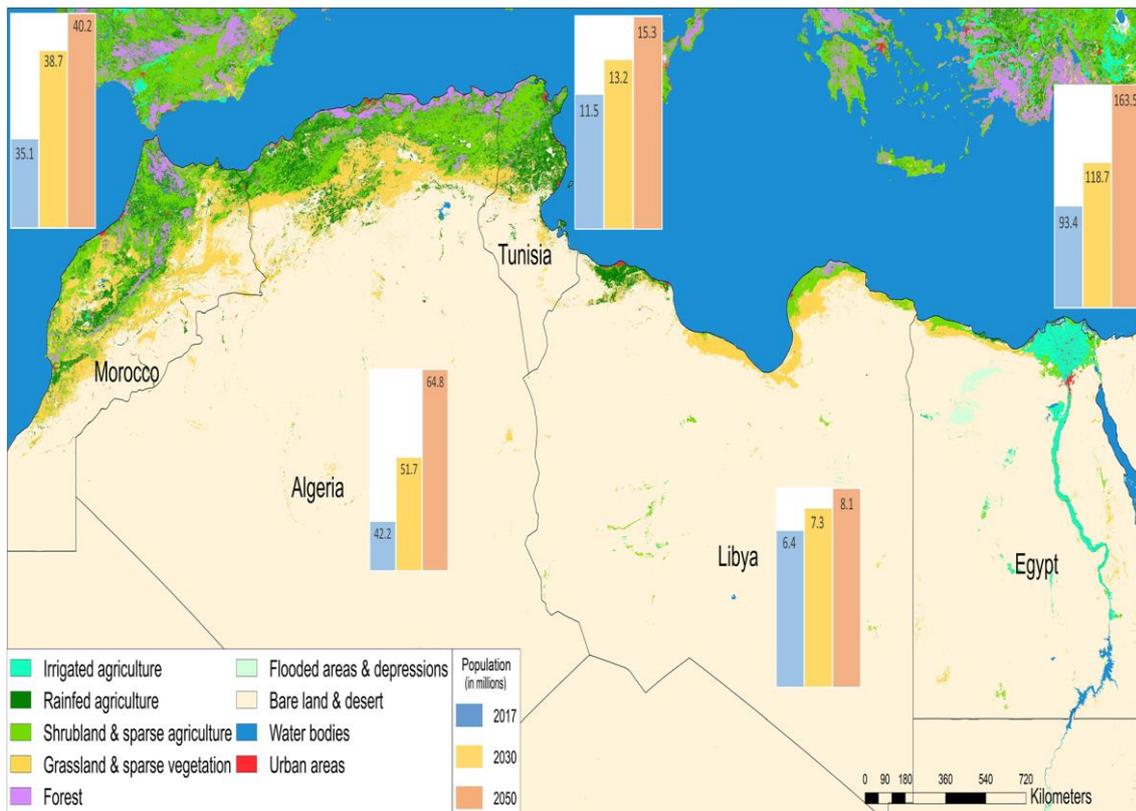
Schilling et al. (2020) [87] ont menées une récente étude d'évaluation et de comparaison de la vulnérabilité au changement climatique de l'Algérie, du Maroc, de la Tunisie, de la Libye, et de l'Égypte. L'évaluation de la vulnérabilité est concentrée sur l'exposition au changement climatique, les ressources en eau, la sensibilité et la capacité d'adaptation. Les résultats de l'étude attestent que tous les pays sont exposés à de fortes hausses de température et à un risque élevé de sécheresse dans le cadre du changement climatique. La sensibilité à ces changements est la plus élevée en Algérie, en Tunisie et en Égypte. L'Algérie a la capacité adaptative générique<sup>5</sup> la plus élevée, mais aussi la capacité d'adaptation spécifique<sup>6</sup> à l'impact la plus faible. L'étude avait conclu que l'Algérie apparaît comme le pays le plus vulnérable, suivie du Maroc. L'étude suggère que pour tous les pays d'Afrique du Nord et en particulier l'Algérie et le Maroc, qu'il est important

---

<sup>5</sup> Capacité adaptative générique : Les indicateurs génériques comprennent des facteurs tels que l'éducation, le revenu et la santé.

<sup>6</sup> Capacité d'adaptation spécifique : Les indicateurs spécifiques peuvent concerner les institutions, les connaissances et la technologie, [85].

de réduire la dépendance économique et les moyens de subsistance vis-à-vis de l'agriculture pluviale, de renforcer les pratiques d'utilisation durable des terres et d'augmenter la capacité d'adaptation. Étant donné que tous les pays d'Afrique du Nord sont confrontés à une exposition similaire au changement climatique, une coopération régionale accrue sera utile à travers le partage de bonnes pratiques pour atténuer les impacts du changement climatique.



**Figure II.4 :** Utilisation des terres, topographie et croissance démographique en zone MENA, [87].

## II.3 – Vulnérabilité climatique en Algérie

### II.3.1 - Climat de l’Algérie

Située sur la rive sud-ouest du bassin méditerranéen, et elle s'étend vers le sud jusqu'à la latitude de 18°57' S. L'Algérie est un vaste territoire avec une superficie près de 2.4 millions de km<sup>2</sup>. Les trois quarts de l'espace algérien sont soumis aux influences climatiques hyperaride, aride et semi-aride. Les plaines littorales (1200 km d'Est en Ouest et de 100 à 150 km de largeur) sont

séparées des hautes plaines et des hauts plateaux de l'intérieur par le grand massif de l'Atlas tellien et bénéficient ainsi d'un climat moins torride et plus humide [86]. Cette bande littorale est la zone la plus arrosée, avec une augmentation de la pluviométrie moyenne annuelle d'Ouest en Est (de 400 à plus de 1000 mm/an) [10].

Derrière la bande littorale, se trouve une ceinture montagneuse parallèle à la côte, qui la sépare du Sahara. Il existe deux chaînes de montagnes, Atlas Tellien et Atlas Saharien ; La première est plus humide car elle est plus souvent affectée par les vents humides de la mer. Entre les deux massifs se trouve les hauts plateaux, de 1000 à 1300 mètres d'altitude et de 300 à 350 km de large, contenant les hautes plaines céréalières, la steppe présaharienne à vocation pastorale et les bassins endoréiques, tels que les chotts oranais à l'Ouest, de l'Hodna au Centre, et de Sud constantinoise à l'Est. Le climat de la zone des hauts plains est semi-aride, la pluviométrie est comprise entre 100 et 400 mm/an.

Au-delà de cette bande septentrionale, le Sahara qui occupe les 87 % du pays s'étend au Sud de l'Atlas saharien sur 1500 kilomètres jusqu'aux frontières avec le Niger et le Mali. Le Sahara est un espace particulièrement aride et quasi-indépendant des aléas climatiques, sauf pour la région du massif du Hoggar et du Tassili où les rares pluies apportées par la remontée du front intertropical (FIT) en saison des pluies (Juillet et Aout) viennent alimenter épisodiquement les poches d'eau des massifs volcano-granitiques et les nappes fort utiles à la population.

### II.3.2 - Vulnérabilité climatique de l'Algérie

Le Nord de l'Algérie, littorale et les hautes plaines inclus, est la partie la plus vulnérable envers la sécheresse. C'est la partie la plus dépendante des précipitations et qui représente près de 13 % de la superficie totale du pays. C'est aussi la plus dense en population, celle qui concentre les meilleurs sols, les ressources en eau renouvelables et l'essentiel des infrastructures hydrauliques (dessalement, barrages, etc.), la faune et la flore les plus remarquables du pays. C'est dans cette zone que se concentrent les activités économiques hors hydrocarbures et les infrastructures de base les plus importantes [10]. C'est aussi sur cette bande septentrionale, qui s'étend du Maroc à la Tunisie et de la Méditerranée au nord à l'isohyète de 200 mm au Sud, que s'observent les différentes formes de sécheresse, avec quelques disparités d'Ouest en Est et du Nord au Sud.

L'Algérie a la tête en Méditerranée, un « hot spot » vis-à-vis aux projections climatiques annoncées, et le corps qui plonge dans l'aride voire l'hyperaride ; ce qui fait d'elle un carrefour des risques majeurs liés au climat [90].

Les statistiques de la Banque Mondiale (2020) sur l'Algérie<sup>7</sup>, indiquent que les températures moyennes annuelles ont augmenté dans toute l'Algérie depuis les années 1960 ; La variabilité interannuelle et décennale montre un réchauffement d'environ 2.7 °C par siècle depuis les années 1900. Les précipitations, quant-à-eux, leurs variabilités est élevée ; La variabilité décennale et la tendance linéaire indiquent une réduction de 12.4 mm/mois par siècle depuis les années 1960. La Banque Mondiale évalue qu'au cours de la période 1901 - 2016 les moyennes annuelles de température et de précipitation sont respectivement 22.71 °C et 83.27 mm pour l'Algérie, contre 17.49 °C et 318.81 mm pour le Maroc, et 19.42 °C et 263.47 mm pour la Tunisie. À l'horizon 2050, on s'attend à une hausse des températures jusqu'à 3°C, une réduction des précipitations de 5 à 20%, une accentuation des sécheresses et une plus large vulnérabilité à la désertification (Rapport du 3<sup>ème</sup> Forum Med-Think, Alger, 2018). Sachant qu'à chaque degré de plus, la production de blé diminuerait de 7.5 %; et qu'une réduction de la disponibilité en eau de 5 à 20% va provoquer des tensions entre les différents secteurs : l'agriculture étant le plus grand consommateur avec 70% de la ressource disponible (l'Algérie étant déjà en dessous du seuil critique des 500 m<sup>3</sup> par habitant et par an); On attend à une modification du calendrier agricole; à une hausse à la vulnérabilité des terres au processus de dégradation et de désertification; et à une augmentation de la fréquence des épisodes caniculaires, ce qui va accroître l'ETP et par conséquence la salinisation des périmètres irrigués et la vulnérabilité de l'écosystème forestier aux incendies [90].

Les projections modélisées du climat futur, concernant l'Algérie, à propos les risques majeurs et leurs degrés de gravité lancés par la Banque Mondiale à travers l'outil ThinkHazard<sup>8</sup>, déclarent que le degré de gravité est de classe « élevé » pour les risques suivants : Inondation fluviale ; Inondation urbaine ; Inondation côtière ; Glissement de terrain ; Rareté de l'eau ; Chaleur extrême ; Incendie.

Récemment un rapport de synthèse à été réalisé, sous la tutelle du Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables (MEER) avec l'appui de la coopération

---

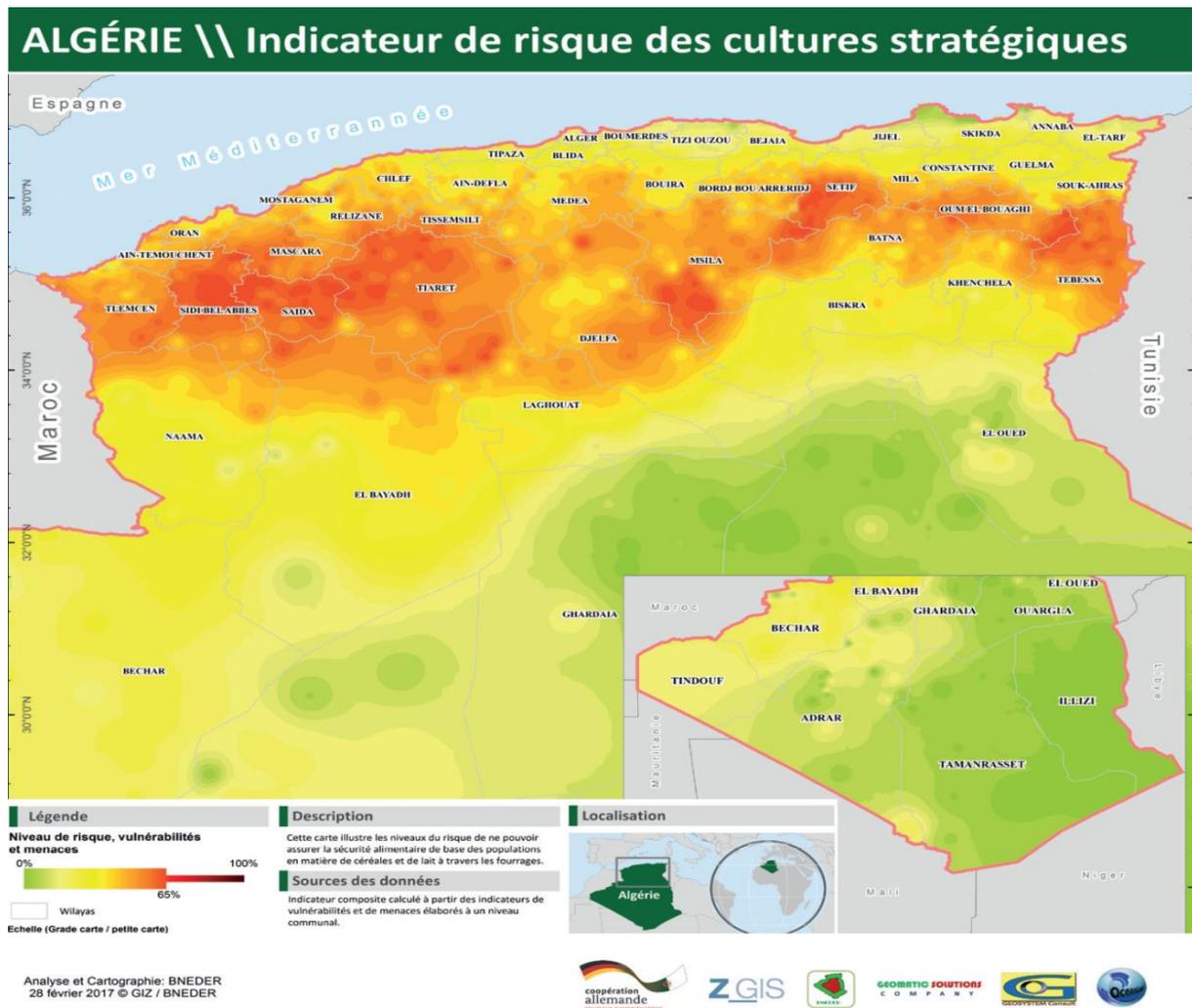
<sup>7</sup> Banque Mondiale (2020) (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country-profiles>).

<sup>8</sup> Banque Mondiale (<https://thinkhazard.org/en/report/4-algeria>). (Accès le 15 Novembre 2020)

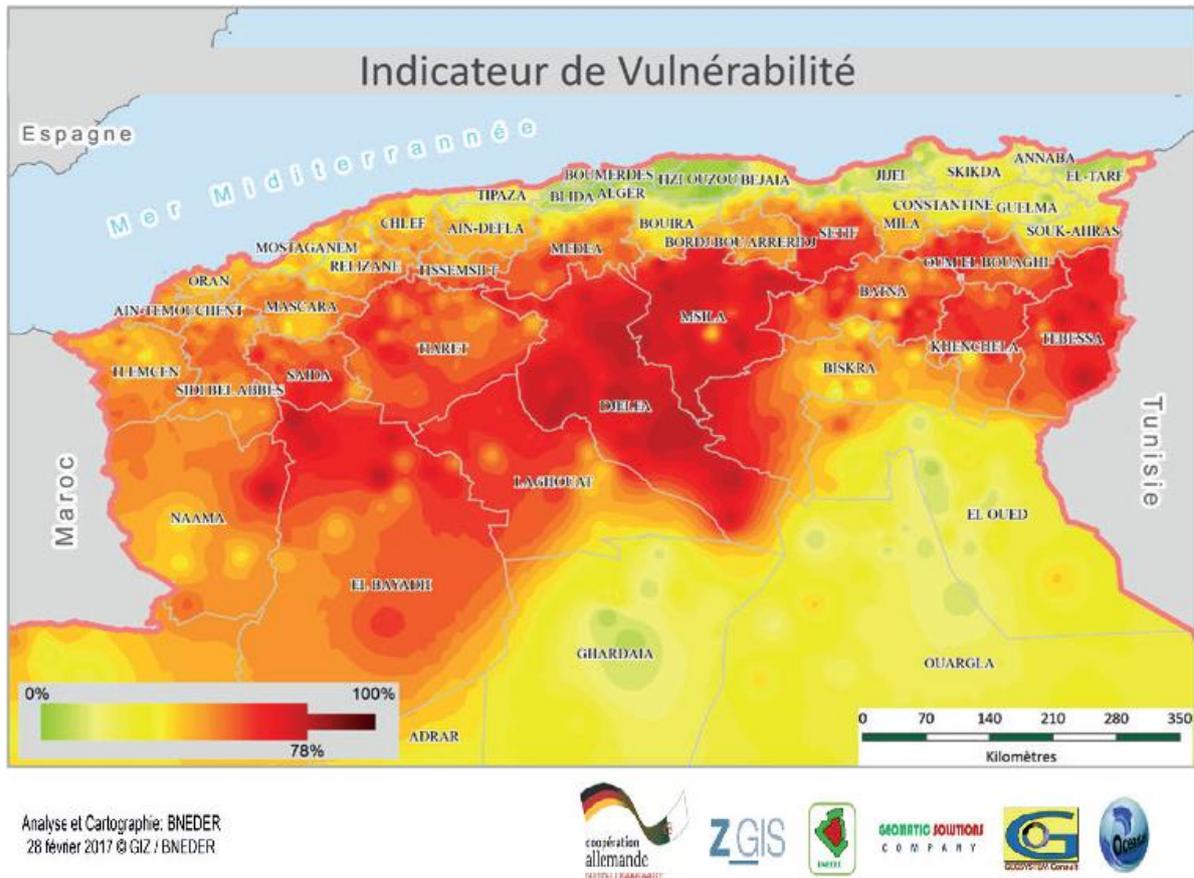
allemande (GIZ), à propos de l'Analyse du Risque et de la Vulnérabilité (ARV) au changement climatique de l'Algérie [91]. Le rapport dans sa section sur l'évaluation des risques et menace due au changement climatique sur la production de cultures stratégiques (céréales-fourrages), l'un des activités capitales à la sécurité alimentaire nationale et qui dépend principalement de précipitation et qui ne supporte pas des longs épisodes de sécheresse, a distingué le risque majeur suivant : « le risque de ne pouvoir assurer la sécurité alimentaire de base en matière de céréales ». Ce risque est fractionné en trois (03) sous-risques (enjeux), qui sont : (1) - la dégradation de la sole céréalière, (2) - la faible disponibilité de l'eau pour les cultures céréalières, et (3) - la perte de production et de productivité, qui peuvent mettre en péril collectivement et/ou individuellement la sécurité alimentaire. Chacun de ces trois sous-risques est exposé à des menaces induit par des facteurs météorologiques et climatiques tels que les niveaux de précipitations, les températures et les vents au cours du cycle de la plante. Pour chaque sous-risque, les menaces suivantes ont été identifiées :

- La sècheresse, l'érosion et la salinisation des sols, pour le sous-risque 1 ;
- L'évapotranspiration, le glissement des étages bioclimatiques et le décalage des précipitations par rapport au cycle des céréales, pour le sous-risque 2 ;
- Les accidents mécaniques et physiologiques, les différents fléaux et maladies cryptogamiques, pour le sous-risque 3.

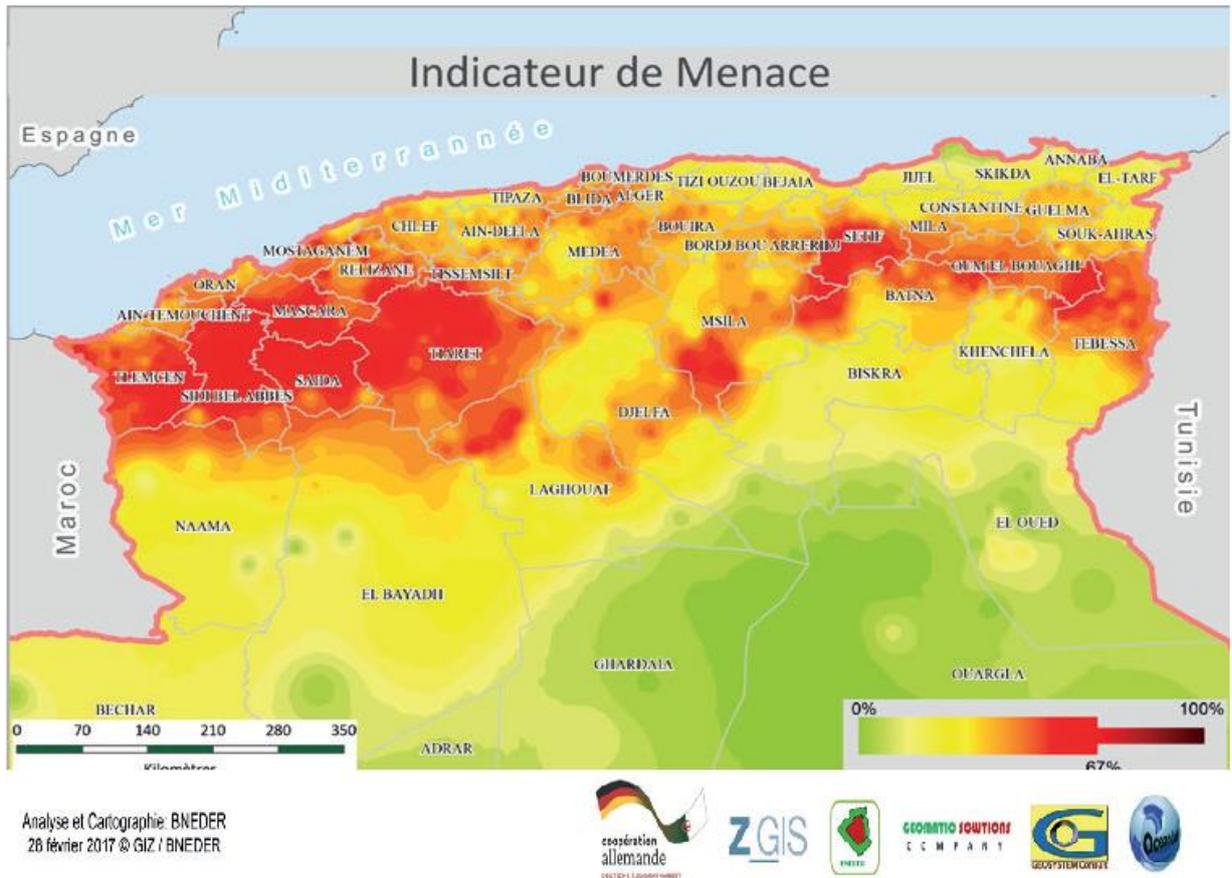
L'indice de risque relatif aux cultures stratégiques à l'échelle spatiale, selon le rapport, est présenté par Figure II.4 suivante. Cet indice est une combinaison des indices de vulnérabilité et des indices de menace. Les indices de vulnérabilité (Figure II.5), reflètent la susceptibilité du système d'être affecté par le changement climatique, tels que la dépendance aux précipitations, les cultures stratégiques potentiellement irriguées, effet des mesures de soutien accordées par le pouvoir public, indice de développement de l'emploi agricole, moyen de communication, et couverture des besoins alimentaire de base à l'alimentation. Cependant l'indice de menace (Figure II.6) reflète l'ampleur du danger induit par le changement climatique tels que disponibilité de l'eau, sécheresse (ou stress hydrique), salinisation de sol, sensibilité à l'érosion, le risque d'événements extrêmes (vague de chaleur, inondation, etc.).



**Figure II.5 :** Carte de risque des cultures stratégiques. L’indice se décline en valeurs élevées principalement sur les zones connaissant des variabilités interannuelles notables de production. Ainsi les zones impactées par des sinistres climatiques sont les plus concernées, à l’image des wilayas de Tébessa et Oum El Bouaki, le sud de Sétif et de M’Sila ainsi que toute la bande céréalière du nord de Tiaret au sud de Tlemcen en passant par les wilayas de Saïda et Sid Bel Abbas. L’indice de risque des cultures stratégiques montre clairement les zones d’occurrence des faibles performances productives liées aux conditions climatiques qui deviennent de moins en moins favorables à une exploitation pluviale des terres, [91].



**Figure II.6:** Carte de la vulnérabilité. L'ensemble de la zone de production des cultures stratégiques (majoritairement steppique), semble être vulnérable aux changements climatiques. Les valeurs maximales sont atteintes au niveau de l'extrême du pays dans la wilaya de Tébessa et des hauts plateaux centre à hauteur de Djelfa et M'Sila. Quelques poches de vulnérabilités notables existent également au nord de la wilaya d'El Bayadh et à l'est de Naâma. Les communes qui ne présentent pas une vulnérabilité élevée se situent du nord-centre du pays à son nord-est [91].



**Figure II.7 :** Carte de l’indice des menaces. La cartographie de l’indice par commune montre une répartition différenciée, avec un bloc qui s’étend sur les hautes plaines céréalières de l’ouest du pays allant de Tiaret jusqu’à Tlemcen et enregistrant des valeurs de menaces assez élevées. Par contre, la structure spatiale de l’indice des menaces à l’est du pays suit les hautes plaines céréalières enlacées par des chaînes de montagnes qui constituent des remparts naturels à la propagation des phénomènes climatiques extrêmes, d’où la forme de couloir des zones à plus ou moins fort indice de menaces climatiques. La zone centre, à contrairement de la vulnérabilité, est épargnée du point de vue de l’indice des menaces qui y est enregistré [91].

La cartographie résultante de l'analyse est un outil important pour appuyer la prise de décision. Elle peut être utilisée pour identifier les « hotspot » les plus vulnérables et pour établir une base de référence permettant l'observation et le suivi des politiques d'adaptation.

## II.3.3 - Stratégie de l'Algérie face au changement climatique

L'Algérie dans ces efforts de lutte contre le changement climatique a signé et ratifié les conventions des Nations Unies sur l'Environnement, à savoir : (i) - la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC/UNFCCC) en 1993, (ii) - la Convention des Nations Unies sur la Diversité Biologique (UNCBD) en 1995, et (iii) - la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (UNCCD) en 1996, [52].

L'objectif ultime de la Convention Cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC) est de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. L'Algérie s'est engagée (Octobre 2016), à la suite de l'Accord de Paris<sup>9</sup> (décembre 2015) sur les changements climatiques, à réduire de 7% ses émissions de gaz à effet de serre avec ses propres moyens à l'horizon 2030, et voire 22% avec un soutien financier et technologique international.

Les émissions totales brutes de l'Algérie se situent, dans une plage de probabilité de 95%, entre 102.17 et 132.434 millions de tonnes Eq.CO<sub>2</sub>/an. Les émissions nettes, quant à elles, se situent entre 89.831 et 116.44 millions de tonnes Eq.CO<sub>2</sub>/an. Le secteur de l'énergie est le plus émetteur avec 74% des émissions totales. Les émissions de ce secteur résultent de la consommation d'énergie (46%), de la production, du traitement et du transport des hydrocarbures (20%) et de la liquéfaction du gaz naturel (8%). L'agriculture, le changement d'affectation des terres et la foresterie génèrent les 11% des émissions totales de GES. Les secteurs des déchets et des procédés industriels représentent quant à eux 10% (95% sont émis sous forme de méthane par les décharges) et 5% (dont 60% sont issues de l'industrie du ciment sous forme de CO<sub>2</sub>) respectivement des émissions totales.

Les pays en développement, dont l'Algérie, malgré leur marginale contribution en termes des émissions des gaz à effet de serre par comparaison avec les pays industrialisés, avaient revendiquaient leurs droits au développement et rappelaient que les pays développés ont une responsabilité historique dans le réchauffement climatique. Ils revendiquaient à ce titre le respect du principe de la Convention Cadre : les responsabilités sont communes mais différenciées, selon les capacités respectives des pays. Ils acceptaient par contre d'agir de manière volontaire, sous

---

<sup>9</sup> L'Accord de Paris (comme e protocole de Kyoto 1997) est un protocole additionnel à la Convention-Cadre des Nations unies (CCNUCC) sur le Changement Climatique (CC).

réserve du respect des engagements des pays développés en matière de financement, de transfert de technologie et de renforcement de capacités.

### II.3.4 - Plan National CLIMAT - PNC

L'Algérie avait commencée, depuis 2011, à élaborer un plan national contre le changement climatique, sous la tutelle de la Ministère de L'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER). Les efforts ont abouti au Plan National CLIMAT<sup>10</sup> (PNC), composé au total de 155 actions. Le PNC a été adopté en Juin 2018. La réalisation du PNC a bénéficié du soutien de la Coopération algéro-allemande (GIZ) en expertise nationale et internationale. Le PNC est l'aboutissement d'une démarche globale portant sur quatre étapes majeures, à savoir diagnostique, stratégie, plan d'action et mise en œuvre [52] :

**(i) - Diagnostique** : le diagnostic vise à identifier les priorités et besoins en termes d'adaptation et d'atténuation. Il est basé sur le bilan des connaissances scientifiques actuelles à l'égard des émissions par source et des absorptions par puits de GES découlant des inventaires. Il repose aussi sur les analyses de vulnérabilité réalisées (et en cours) qui identifient et mesurent les impacts des changements climatiques (CC) en Algérie. Comme résultat à ce point, les principales incidences des CC au niveau de chaque secteur sont énumérées. Les secteurs touchés par le recensement des impacts de CC sont : l'agriculture, la pêche, l'habitat, l'énergie, industriel, transport, l'eau, forêts, environnement et la biodiversité, la santé, les risques majeurs (inondations, sécheresses, feux de forêts, submersion marine et recul des traits de côte, flux migratoires au sud de pays). En conséquence, l'ensemble des secteurs (économiques et environnementaux) et sur tout le territoire sont impactés par le CC. Les secteurs d'activités clefs sur lesquels reposent les objectifs nationaux de développement de l'Algérie, apparaissent comme fortement vulnérables aux CC [52]. L'examen des vulnérabilités de l'Algérie aux CC démontre que les zones de l'Algérie soumises à des aléas climatiques naturels deviennent de plus en plus étendues dans un contexte de dérèglement climatique, comme le-montre les figures citées ci-dessus, de risque des cultures stratégiques (Figure II.4), de vulnérabilité (Figure II.5), et de menace (Figure II.6).

**(ii) - Stratégie** : elle assure le lien étroit entre les objectifs en matière d'atténuation et d'adaptation aux CC avec les axes de la Stratégie Nationale de l'Environnement et du

---

<sup>10</sup> Le Plan National CLIMAT (PNC) est téléchargeable à partir de lien <http://www.meer.gov.dz/a/?wpdmpro=plan-national-climat> (Accès 17 Novembre 2020)

Développement Durable (SNEDD) ; Stratégie Nationale pour la Biodiversité, et les engagements internationaux de l'Algérie.

**(iii) - Plan d'actions :** Le plan des actions est composé de trois volets **(1)** – le premier concerne l'adaptation socioéconomique de l'Algérie au changement climatique (CC) ; **(2)** – le second vise l'atténuation des émissions de GES ; et **(3)** – le troisième porte sur les actions transversales visant la gouvernance de CC, le financement, la sensibilisation, la communication, la formation, le renforcement des capacités et la recherche-développement. Le premier volet comprend des actions à court terme (2020 - 2025) et moyen terme (2020 - 2035), cependant le second et le troisième volet portent des actions à court terme (2020 - 2025).

**(1) - Adaptation :** l'adaptation est un processus évolutif et non un résultat (GIZ/WRI 2011).

On distingue plusieurs sortes d'adaptation : anticipative ou réactive, de caractère privé ou public, autonome ou planifiée. Dans le Plan National CLIMAT, les actions d'adaptation désignent spécifiquement les initiatives et les mesures prioritaires pour réduire les effets néfastes de CC. Les adaptations concernent en priorité les systèmes les plus vulnérables aux impacts de CC. Le PNC considère en conséquence deux phases temporels des actions « adaptation » :

- ➔ Le programme d'actions à court terme (2020 - 2025), qui doit répondre à des urgences et contient des actions qui sont réalisables sur les prochaines années. Ce premier programme comprend 36 actions d'adaptation planifiées. Les thématiques destinés sont la gestion des risques sur le littoral, observation et surveillance de la mer, risque des inondations, ressources en eau, agriculture, santé, érosion, désertification, barrage vert, protection des sols, vulnérabilité des collectivités locales.
- ➔ Le programme d'actions à moyen terme (2020 - 2035), inclut les actions qui nécessitent, d'une part, un temps plus long pour leur réalisation et, d'autre part, le renforcement du cadre d'organisation et des moyens humains et matériels nécessaires à leurs mises en œuvre. Leurs mises en œuvre nécessitent notamment une coordination intersectorielle et la réalisation d'analyses préparatoires. Ce second programme comprend 27 actions d'adaptation. Les thématiques destinées sont les infrastructures, la biodiversité marine, les ressources en eau, l'agriculture, la biodiversité terrestre. Pour les deux programmes d'adaptation, court et moyen terme, les pilotes sont également désignés. Ces derniers sont chargés de suivi de la réalisation des actions d'adaptation de chaque thématique. On cite, le Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche (MADRP), le Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER), Ministère des

Travaux Publics et Transports (MTPT), Ministère des Ressources en Eau (MRE), Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire (MICLAT), Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville (MHUV), Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière (MSPRH), Ministère de l'Industrie et des Mines (MIM), Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherche (IHFR), l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL).

(2) - **Atténuation** : pour ce second volet d'actions, le Plan National CLIMAT suggère 76 actions d'atténuations. Les domaines visés sont de l'industrie (17 actions), des déchets (7), de l'énergie (19), des forêts (3), des transports (15), des collectivités locales (4), des bâtiments et de l'habitat (10) et du tourisme (1). Une activité est classée comme une action d'atténuation des CC, si elle contribue à l'objectif d'atténuation qui vise à stabiliser les concentrations des GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique (CNUCCC, article 2). L'activité est dite d'atténuation si elle contribue directement à la réduction des émissions par l'une des actions suivantes :

- ➔ Réduction ou stabilisation des émissions des GES dans les domaines de l'énergie, des transports, de l'industrie et de l'agriculture par l'utilisation des nouvelles formes d'énergie ou d'énergies renouvelables, de mesures pour améliorer l'efficacité énergétique des générateurs existants, de machines et d'équipements ou d'outils de gestion de la demande d'énergie.
- ➔ Réduction des émissions de méthane par la gestion de déchets et le traitement des eaux usées.
- ➔ Mise au point, transfert et promotion de technologie et de savoir-faire ainsi que développement des capacités permettant de contrôler, de réduire ou de prévenir les émissions anthropiques de GES, en particulier dans les domaines de la gestion des déchets, des transports, de l'énergie, de l'agriculture et de l'industrie.
- ➔ Protection et amélioration des puits et réservoirs de GES par la gestion durable des forêts, la plantation de forêts et le reboisement, la remise en état des zones touchées par la sécheresse et la désertification.

Les ministères et organismes désignés au suivi de la réalisation des actions d'atténuations sont principalement Ministère de l'Énergie (ME), Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER), Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche (MADRP), Ministère des Travaux Publics et

Transports (MTPT), Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire (MICLAT), Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville (MHUV), Ministère du Tourisme et de l'Artisanat (MTA), Organisation Non Gouvernementale (ONG), Secteur privé (SP).

**(3) – Actions transversales :** Une action est qualifiée de « transversale » si elle apporte un soutien à l'adaptation et/ou à l'atténuation même si elle ne réduit pas les émissions de GES ni ne contribue directement à l'adaptation de la société civile au CC. Le volet transversal vise à mettre en place les conditions initiales (tels que renforcement des capacités, recherche, communication) nécessaires à la mise en œuvre du Plan National CLIMAT. Elles portent ainsi exclusivement sur le court terme. Le plan suggère 16 actions transversales, seule la Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER) est désignée comme pilote à ce volet.

**(iv) - Mise en œuvre :** elle spécifie le cadre de gouvernance en matière d'organisation, de moyens de mise en œuvre des activités fixées, de calendrier, de suivi et d'évaluation. Dans le cadre de la formulation de la SNEDD, et du PNAEDD, le MEER (2018) [89] a produit une estimation des coûts de la dégradation de l'environnement en Algérie, y compris celle résultant de l'inaction dans le domaine de CC. Les coûts de CC sont estimés en Algérie entre 181 milliards (1.10% du PIB) et 303 milliards de DA (1.83% du PIB) par année. Selon l'analyse macro-économique utilisée dans le PNAEDD, et compte tenu que le Plan National CLIMAT (PNC), il est établi que le PNC représente à lui seul 40% des efforts devant être consentis pour assurer la résilience face au changement climatique, soit à minima environ 444 millions USD (soit 44.6 milliards de DA) par année ; 62% de ce montant devant être consacrés aux activités d'adaptation climatique, soit 277 millions USD (soit 27.56 milliards de DA).



# Chapitre III

---

## Suivi de la sécheresse par télédétection

---

# Chapitre III

## Suivi de la sécheresse par télédétection

---

### III.1 – Apport de la télédétection au suivi de la sécheresse

La sécheresse est une catastrophe naturelle complexe et récurrente qui se produit dans le monde entier et qui a souvent des répercussions négatives sur de nombreux secteurs de la société. La surveillance de la sécheresse est un défi étant donné les dimensions spatio-temporelles complexes du phénomène et sa gravité [13], [93], [94].

Traditionnellement, la surveillance de la sécheresse s'appuie principalement sur des indicateurs et des indices climatiques tels que l'indice standardisé des précipitations et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer. Ces indices climatiques se sont avérés utiles pour de nombreuses applications. Cependant, la variabilité spatiale des conditions de sécheresse représentée dans les cartes associées est à une échelle relativement large, et contient souvent des informations limitées sur les variations locales de la gravité de la sécheresse dans le paysage. En outre, les cartes des indices de sécheresse basés sur le climat peuvent avoir une valeur limitée car elles fournissent une vue spatiale généralisée des conditions et des variations de la sécheresse sur de grandes zones. Ainsi, des approches de surveillance de la sécheresse améliorées et efficaces sont essentielles pour soutenir les systèmes d'alerte précoce et la planification proactive de la sécheresse.

Au cours des dernières décennies, la télédétection par satellite a permis de réaliser des observations de la Terre à une résolution spatiale relativement élevée (c'est-à-dire de l'échelle locale à l'échelle synoptique) et à une résolution temporelle élevée (c'est-à-dire de quelques fractions d'heure à quelques jours).

La télédétection par satellite désigne un ensemble de méthodes et de techniques permettant d'acquérir à distance des mesures de rayonnement (réfléchi ou émis) d'une cible d'intérêt, et d'interpréter ces mesures en termes de propriétés physiques, chimiques ou biologiques de cette cible [95].

L'imagerie de télédétection fournit des mesures spectrales spatialement continues sur de vastes zones qui reflètent à la fois les caractéristiques de l'atmosphère, de la surface terrestre et d'océans. Par conséquent, les données de télédétection sont de plus en plus utilisées pour la surveillance des sécheresses sur de grandes surfaces. Des paramètres biophysiques liés à la surface terrestre, acquis à distance, sont souvent utilisés pour suivre et montrer la gravité de la sécheresse sur l'environnement, aux échelles locale et planétaire, tels que les indices de végétation, la température de la surface terrestre, l'humidité du sol et l'albédo de surface (ex. ; [96], [97], [98], [99], [100]) ; l'évapotranspiration (ex., [101], [102], [103], [104]). Les instruments micro-ondes et radar embarqués sur les satellites sont également de plus en plus utilisés pour l'estimation de l'humidité du sol et des précipitations (ex., [105], [106], [107]).

## III.2 - Éléments physiques de la télédétection

La télédétection spatiale permet d'observer le système terre / océans / atmosphère en s'appuyant sur des méthodes d'acquisition de l'information à distance basées sur les propriétés du rayonnement électromagnétique. La télédétection passive consiste que les capteurs satellitaires permettent de mesurer l'énergie réfléchie et/ou émise par la surface de la Terre, les océans ou par l'atmosphère et ensuite d'analyser et de suivre l'évolution de ces milieux au cours du temps, voir Figure (III.1), [108]. Cependant la télédétection active consiste que l'énergie reçu par le système capteur est un écho de l'énergie initialement émis par lui-même (système radar ou lidar), voir Figure (III.2).

Les régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la Terre sont :

- (1) - Spectre visible (0.4 à 0.7  $\mu\text{m}$ ) : Correspond aux gammes de fréquence de l'œil humain, contient le rayonnement solaire maximal, et il est subdivisé en trois groupes de couleurs : Rouge, Vert et Bleu (Red, Green et Blue ou RGB) ;
- (2) - Infrarouge proche (0.7 à 1.1  $\mu\text{m}$ ), appelé aussi IR réfléchi : Correspond à l'énergie solaire réfléchissants des objets. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible ;
- (3) - Infrarouge moyen (1.1 à 8  $\mu\text{m}$ ) : Mélange de rayonnement solaire (jusqu'au 3  $\mu\text{m}$ ) et d'émission, il affecte de manière significative l'atmosphère, et il est employé pour mesurer les concentrations de vapeur d'eau, ozone, aérosols, etc. ;
- (4) - Infrarouge thermique (8 à 14  $\mu\text{m}$ ) : Rayonnement émis par les objets eux-mêmes, ce qui permet la mesure des leurs températures. Les images peuvent être disponibles à tout moment, le jour comme la nuit ;

(5) - Micro-ondes (1 mm à 1 m), appelé aussi hyperfréquences : Un intérêt croissant de la télédétection dans cette bande. Les perturbations atmosphériques sont mineures et sont transparentes pour les nuages. C'est le domaine spectral préférable pour les capteurs actifs tels que les radars.

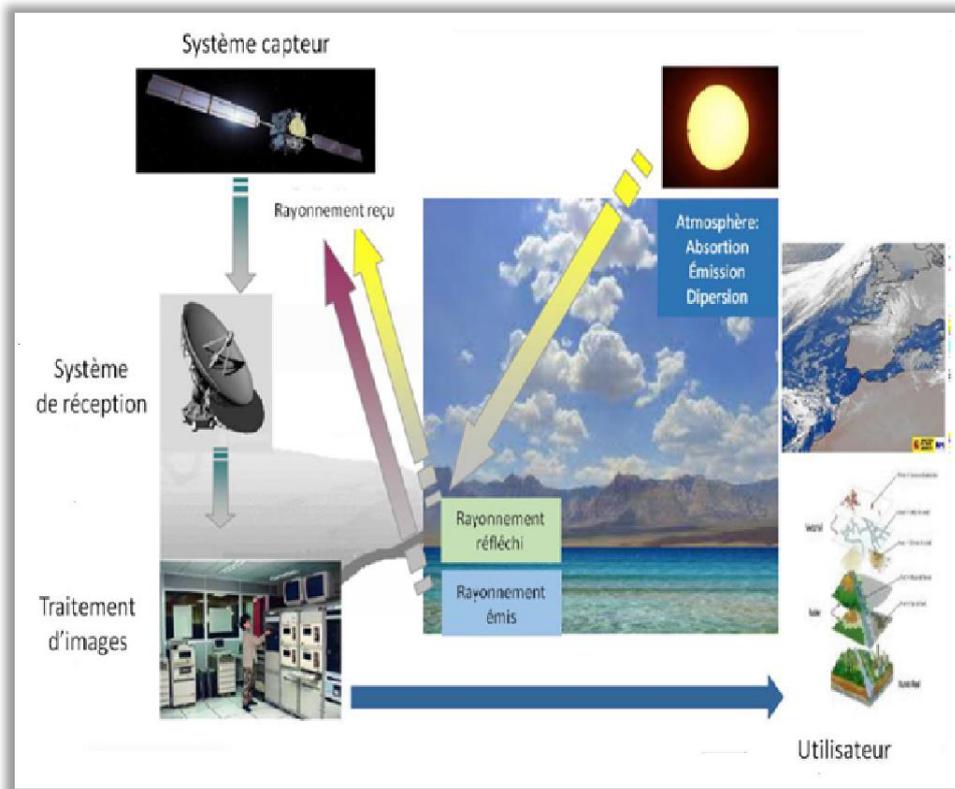


Figure III.1 : Télédétection passive.

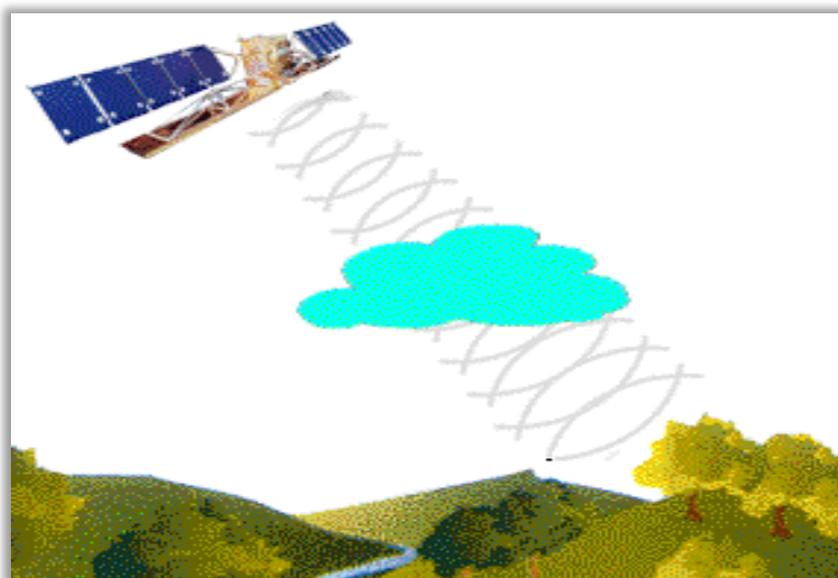


Figure III.2: Télédétection active.

Les plages spectrales utiles en télédétection s'appellent « fenêtres atmosphériques » où la transparence de l'atmosphère vis-à-vis le passage des rayonnements est meilleur, ce qui a rendu l'acquisition des informations sur la nature des objets à distance possible. Cependant, l'atmosphère est considérée comme écran pour certaines longueurs d'ondes, à cause des multiples interactions entre les ondes et les éléments composants l'atmosphère tels que les gaz à effet de serre (comme le CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), et les particules solides en suspension ou les aérosols (comme les sels marines, les particules de poussières, les cendres volcaniques, etc.). Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de **diffusion** et d'**absorption** (Centre Canadien de Cartographie et d'Observation de la Terre)<sup>1</sup>.

La **diffusion** se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir.

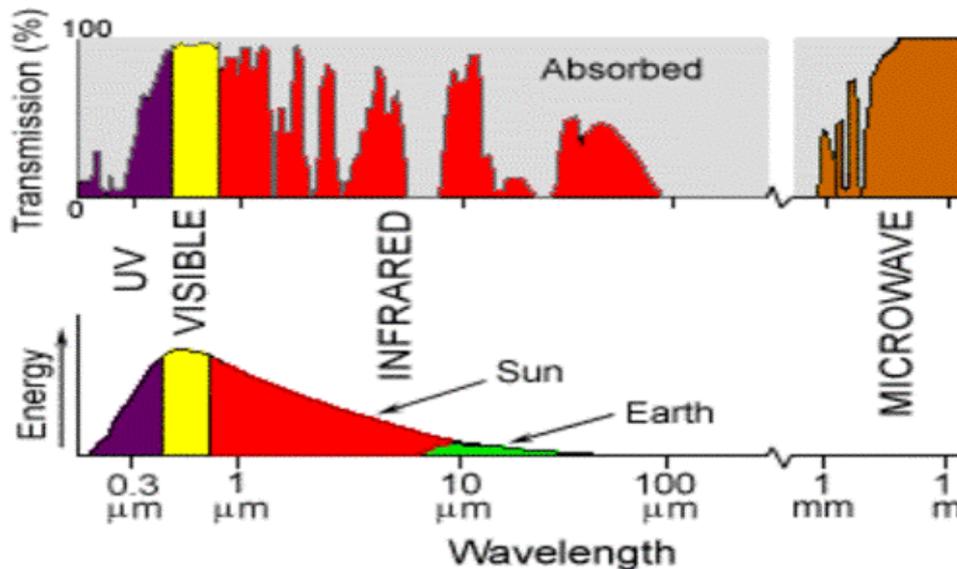
L'**absorption** survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde. L'ozone absorbe les rayons ultraviolets qui sont néfastes aux êtres vivants. La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde et des hyperfréquences de petites longueurs d'onde qui entrent dans l'atmosphère (entre 22µm et 1 mm). La présence d'eau dans la partie inférieure de l'atmosphère varie grandement d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre de l'année. Par exemple, une masse d'air au-dessus d'un désert contient très peu de vapeur d'eau pouvant absorber de l'énergie, tandis qu'une masse d'air au-dessus des tropiques contient une forte concentration de vapeur d'eau.

Parce que ces gaz et ces particules absorbent l'énergie électromagnétique dans des régions spécifiques du spectre, ils influencent le choix de longueurs d'onde utilisées en télédétection. Les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption atmosphérique, sont les régions utiles pour la télédétection. En comparant les caractéristiques des deux sources d'énergie les plus communes (le Soleil et la Terre) avec les fenêtres atmosphériques disponibles, nous pouvons identifier les longueurs d'onde les plus utiles pour la télédétection, voir Figure III.3. La portion visible du spectre correspond à une fenêtre et au niveau maximal d'énergie solaire.

---

<sup>1</sup> <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriel-notions-fondamentales-teleledetection/9310>

L'énergie thermique émise par la Terre correspond à une fenêtre située à près de  $10\ \mu\text{m}$  dans la partie de l'infrarouge thermique du spectre. Dans la partie des hyperfréquences, il existe une grande fenêtre qui correspond aux longueurs d'onde de plus de  $1\ \text{mm}$ .



**Figure III.3 :** Correspondances entre fenêtres atmosphériques et les énergies émises par le Soleil et la Terre (source : **Centre Canadien** de Cartographie et d'Observation de la Terre)

Les particules et les gaz atmosphériques ne constituent pas les seuls atténuateurs du signal arrivé au niveau du détecteur mais la présence des nuages sur son parcours a une influence non négligeable. Les nuages sont blancs, brillants, plutôt hauts dans le ciel. Leur température est en général plus basse que celle de la surface. Ils se déplacent et changent d'aspect, il n'y a donc jamais le même nuage au-dessus du même endroit. Dans les études qui servent de la télédétection et qui s'intéressent au suivi des conditions de l'état de sol, la présence des nuages dans les images satellites constituent un obstacle pour l'étude de la surface terrestre [109]. Dans la chaîne de traitement des images satellites l'identification des pixels nuageux et ensuite leurs éliminations de la scène doit être figurée en première étape. Cette étape permet d'avoir une image « à ciel clair ». En seconde étape, ce sont les corrections atmosphériques qui tiennent en compte les atténuations par diffusion et absorption dues à la présence des aérosols et gaz atmosphériques. Cette dernière étape permet d'avoir une image « propre » après qu'on avait débarrassé des nuages. Ces deux consécutives étapes permettent d'éliminer la contribution de facteur atmosphère dans le signal acheminé vers le détecteur, et qui ne doit comporter que les propres caractéristiques de l'objet détecté, c'est-à-dire sa « signature spectrale ».

### III.3 - Lois fondamentales de rayonnements électromagnétiques

Les lois physiques qui décrivent les caractéristiques des rayonnements électromagnétiques comme le Loi de Planck, Loi de Wien, Loi de Stephan-Boltzmann ainsi loi d'émissivité sont regroupés dans le Tableau 1 suivant.

**Tableau III.1 :** Lois fondamentales de rayonnements électromagnétiques

Loi	Formule	Description
Planck	$M_{\lambda,T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$	Définit la distribution de la luminance énergétique spectrale du corps noir ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) en fonction de la température thermodynamique. → Tout objet avec $T > 0K$ ( $-273.15$ °C) émet de l'énergie. → $T \uparrow \rightarrow$ Énergie $\uparrow$ (rayonnement $\uparrow$ et $\lambda \downarrow$ )
Wien	$\lambda_{max} = \frac{2898(\mu m. K)}{T(K)}$	Pour une température donnée, il existe une longueur d'onde pour laquelle l'énergie électromagnétique est maximale
Stephan-Boltzmann	$M = \sigma \cdot T^4$	Établit la puissance totale ( $W m^{-2}$ ) rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir, avec $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2. K^4$ , constante de Stefan-Boltzmann
Émissivité	$M_{real} = \varepsilon \cdot M_{BB}$	Les corps réels ne sont pas des corps noirs, elles sont caractérisées par un facteur d'émissivité $\varepsilon$ .

### III.4 - Programme mondiale d'observation de la Terre

La principale activité de l'OMM est la Veille météorologique mondiale (VMM), un programme lancé en 1963 et qui fournit des informations à l'échelle planétaire constamment mises à jour sur l'état de l'atmosphère / terre / océans, à travers des systèmes d'observation exploités par les pays membres et les réseaux de télécommunication, comprenant des satellites en orbites polaire et géostationnaire. Actuellement, 16 satellites météorologiques, 50 satellites de recherche, plus de 10000 stations météorologiques en surface, automatiques ou dotées de personnel, 1000 stations aérologiques, 7000 navires, 100 bouées ancrées et 1000 bouées dérivantes, des centaines de radars météorologiques ainsi que 3000 avions commerciaux spécialement équipés mesurent au fil de l'heure des paramètres clés relatifs à l'atmosphère, aux terres émergées et à la surface

des océans [110]. Ce programme a pour vocation première de fournir aux pays membres (actuellement 193 états-membre), en conjuguant les moyens, installations et services de ces mêmes pays, l'information météorologique et les données géophysiques et environnementales dont chacun d'entre eux a besoin pour assurer des prestations météorologiques efficaces. Les principaux satellites météorologiques contributeurs au programme VMM sont montrés par Figure (III.4) avec leurs vues aérospatiales.



**Figure III.4 :** Principaux satellites météorologiques du programme VMM.

Les séries des satellites géostationnaires comme le système METEOSAT, administré par EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, siège en Allemagne) placé au-dessus du Golfe de Guinée en Afrique depuis la fin des années 1970, sont un outil important qui facilite l'observation des conditions de la surface terrestre à de multiples échelles de temps.

## III.5 - Programme METEOSAT

Le programme METEOSAT comprend trois générations à savoir, METEOSAT FIRST GENERATION (MFG), METEOSAT SECOND GENERATION (MSG) et METEOSAT THIRD GENERATION (MTG). La position nominale principale est située à la verticale de l'équateur à la longitude 0°E, à presque 36 000 km d'altitude. Ainsi, ils observent en permanence un disque terrestre comprenant principalement l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique. L'objectif principal du programme METEOSAT est la fourniture de données satellitaires et de services annexes correspondant aux besoins des États membres d'EUMETSAT, et à la communauté météorologique mondiale.

### (1) - METEOSAT FIRST GENERATION (MFG)

Sept satellites de la première génération du programme METEOSAT (MFG) ont été lancés, le premier en novembre 1977, le septième en septembre 1997. METEOSAT-7 est le dernier de la première génération des satellites METEOSAT MFG. Il a été lancé le 2 septembre 1997 et a été déclaré satellite primaire à la position nominale 0°E le 3 juin 1998, avant d'être remplacé par METEOSAT-8, premier satellite du programme METEOSAT MSG. METEOSAT-7 fut alors déplacé à la position nominale 57°E pour assurer la couverture de l'océan Indien du 5 décembre 2006 au 1<sup>er</sup> février 2017. Cette première série du programme METEOSAT avait soutenu le développement des sciences météorologiques, environnementales et océanographiques près de 40 années des services (1977 à 2017)

### (2) - METEOSAT SECOND GENERATION (MSG)

Le premier exemplaire de la deuxième série de satellites METEOSAT de veille météorologique MSG-1 a été mis en orbite le 28 août 2002. Ce satellite, devenu opérationnel à la position nominale de 0°E le 9 janvier 2004, et prend alors le nom de METEOSAT-8. Puis c'est au tour de MSG-2 d'être lancé le 22 décembre 2005, avant d'être déclaré en service en juillet 2006 sous le nom de METEOSAT-9. Le lancement des deux derniers satellites du programme METEOSAT seconde génération a eu lieu le 5 juillet 2012 (METEOSAT-10) et le 15 juillet 2015 (METEOSAT-11). Ces satellites sont développés par l'Agence spatiale européenne ESA (European Space Agency) pour le compte d'EUMETSAT. Les satellites MSG, équipés de nouveaux capteurs plus puissants et plus précis pour l'observation en continu de l'atmosphère terrestre, accumulent jusqu'à l'horizon 2025 une multitude de données indispensables à la compréhension et à la modélisation des activités climatiques de notre planète.

**(3) - METEOSAT THIRD GENERATION (MTG)**

EUMETSAT et ESA préparent ce que seront les successeurs des satellites MSG, les satellites de la troisième génération MTG. Le lancement du premier exemplaire est planifié en 2021. Ce nouveau programme comprend six satellites géostationnaires : quatre satellites pour l'imagerie, MTG-I, et deux satellites de sondage, MTG-S, qui seront placés entre 10°E et 10°W de longitude. Outre une imagerie de pointe grâce à l'imageur FCI (*Flexible Combined Imager*), les satellites MTG disposeront de toutes nouvelles capacités de sondage infrarouge et de détection des éclairs afin de déclencher une alerte en cas de développement d'orages violents. Les satellites MTG-S emporteront également la charge utile « Sentinel-4 ». Sentinel-4 est un instrument dédié à la surveillance de la qualité de l'air du programme européen « Copernicus » qui a pour objectif de rassembler l'ensemble des données obtenues à partir de satellites environnementaux et d'instruments de mesure *in situ* afin de produire une vue globale et complète de l'état de notre planète. Cela confèrera aux satellites METEOSAT MTG une capacité nouvelle d'analyse de la chimie atmosphérique et d'identification des concentrations de gaz. Le programme MTG bénéficie d'une coopération internationale, de la part de la Chine et de l'Inde.

Le Tableau (III.2) suivant compare les caractéristiques des satellites METEOSAT 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération.

**Tableau III.2 :** Comparaison des caractéristiques des satellites METEOSAT 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération.

Caractéristique	MFG	MSG	MTG
Cycle de prise de vue (plein disque)	30 min	15 min	10 min
Nombre de canaux	3	12	16
Résolution spatiale dans le visible	2.5 km	1 km	500 m
Résolution dans l'infrarouge	5 km	3 km	2 km

## III.6 - Construction d'une image METEOSAT à ciel clair

Pour pouvoir remonter aux caractéristiques de l'état de surface terrestre (mers et sol) à partir des mesures radiométriques, il est essentiel d'aménager la scène terre-atmosphère en écartant l'élément atmosphère. L'atmosphère avec ces composantes permanentes (gaz à effet de serre) et les composantes temporaires (aérosols, nuages), participe à la dégradation de la vision de la surface terrestre à partir d'un détecteur placé en orbite. Le problème ne se pose pas quand on

détecte la surface terrestre dans le domaine des micro-ondes (domaine des hyperfréquences), mais c'est un vrai problème dans le domaine visible (solaire) et le domaine de l'infrarouge (partie émission thermique). Il est donc nécessaire de procéder à créer une image satellite à ciel clair, au moins sans nuage en premier temps, pour pouvoir identifier les objets par la suite à travers leurs albédo (pouvoir de réfléchissement) dans la bande visible (VIS) ou à travers la température de brillance (pouvoir d'émission) des surfaces dans la bande infrarouge (IR). Concernant les autres composantes atmosphériques comme les aérosols (sels marines, poussières, cendres volcaniques, etc.), ou encore les gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.), l'élimination de leurs contributions dans la luminance (on dit aussi brillance) mesurée nécessite des techniques appropriées. La construction d'une image à ciel clair à partir de l'imagerie METEOSAT est possible avec les données de la bande visible (0.4 à 1.1  $\mu\text{m}$ ) et ceux de la bande infrarouge thermique (10.5 à 12.5  $\mu\text{m}$ ). L'image à ciel clair ou l'image de référence servira par la suite comme état de référence pour les images journalières brutes. Dans la bande visible, l'image référence est souvent construite à partir des images de au moins dix journées successives choisies à la même heure (souvent c'est 12h00 UTC qui est choisie). Dans la bande infrarouge, l'image référence peut être construite soit à partir des images de au moins dix journées successives, par exemple [111], avec les données de la bande 10.5  $\mu\text{m}$  de satellite MSG. Comme aussi peut être construite à partir d'un jeu d'images de quinze jours autour de jour J [J-7, J+7], c'est le cas de l'imagerie de l'indice de poussières IDDI (Infrared Difference Dust Index), avec les données de la bande infrarouge (10.5 à 12.5  $\mu\text{m}$ ) de satellite MFG, Legrand et al. (2001) [112] ; Legrand et al. (2009) [113].

Dans le domaine VIS (solaire), la création d'image en ciel clair repose sur la technique de la brillance minimale enregistrée pour un pixel donné sur une période bien déterminée. En effet, les pixels pour lesquels la brillance est forte sont ceux formant les masses nuageuses en particulier, tandis que, les pixels à faible brillance sont représentatifs aux objets de la surface terrestre. Mais cette image de minimum de brillance, a l'inconvénient de faire apparaître les effets d'ombres de nuages, de montagnes, et de vallées profondes [109]. Des techniques de la brillance minimale sont développées pour éliminer l'effet d'ombre des objets sur la surface terrestre, tels que la méthode du minimum absolu ; la méthode du maximum des minima ; la méthode des minima successifs croissants ; et la méthode du minimum qui apparaît au moins deux fois. Selon Drif et al. (2009) [109], il s'avère que la méthode qui a donné de meilleurs résultats est celle basée sur la création d'une suite d'images où les valeurs des pixels sont classées dans l'ordre croissant, c'est-à-dire la

méthode des minima successifs croissants. Sachant que la deuxième et la troisième image obtenue dans l'ordre croissant des comptes numériques, donnent de bons résultats.

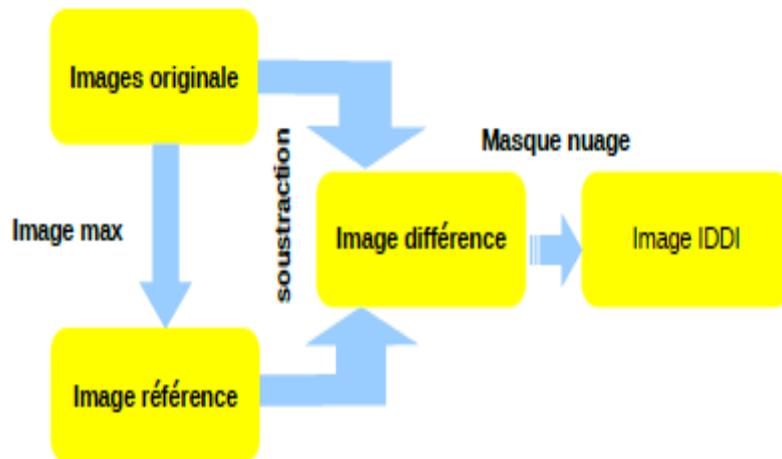
Les nuages dans le domaine visible, cas de l'imagerie METEOSAT par exemple, sont des bons réflecteurs. Ils prennent des teintes allant de gris sombre au blanc. Divers facteurs la font varier tels que (i) - l'état de l'eau dans les nuages (liquide ou glace), (ii) - dimension des gouttes d'eau ou des cristaux de glace, (iii) - l'étendu vertical ou l'épaisseur du nuage, (iv) - régularité de la surface supérieure du nuage. Cependant, dans la bande infrarouge la teinte prise par le nuage dépend de sa température, c'est-à-dire de l'altitude du sommet du nuage. Ainsi les nuages bas comme les Stratus paraissent gris alors que le Cumulonimbus s'étalant sous la tropopause à plus de 10 km d'altitude sera très sombre. Le canal IR permet mieux la localisation des principales formations en altitude. En plus la distinction entre masse nuageuse et objets de la surface terrestre (sols et mers) est beaucoup mieux avec le canal IR qu'avec le canal VIS. Dans le canal IR la détection est basée sur l'émission thermique des objets, qui dépende de leurs températures. Les objets terrestres sont plus chauds que les nuages en altitude, et l'énergie émise vers le détecteur est plus importante, d'où ils paraissent plus brillants que les nuages.

## III.7 - Image à ciel clair de l'imagerie IDDI

### III.7.1 – Principe de l'imagerie IDDI

Les images de l'indice de poussière IDDI sont construites à partir de données de canal IR (Satellite MFG), Legrand et al. (2001) [112]. L'indice IDDI a permis la détection des poussières au-dessus de terres. L'indice résulte de l'impact radiatif des poussières dans la fenêtre (10.5 – 12.5  $\mu\text{m}$ ), l'impact (dégradation de l'intensité de signal) est exprimé soit en luminance ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ ) soit en Kelvin (K). L'indice IDDI est construit à midi UTC, où l'émissivité des objets terrestres est maximale. Le pixel IDDI est obtenu par différence entre les valeurs de pixel référence (Ref) et celui journalier (J). Le pixel référence aura la valeur maximale en luminance ou en température de brillance sélectionnée parmi quinze valeurs autour de la valeur journalière J (J-7, J+7), enregistrée entre 11h30 et 12h00 UTC (slot 24). Idéalement, l'image référence IR est composée uniquement de pixels clairs (sans nuages) et propre (sans poussières), elle caractérise donc que l'état de la surface terrestre. Le pixel différence (Ref minus J), représente que l'état de l'atmosphère après élimination du facteur sol par différence, il est donc soit nuageux ou poussiéreux. Un algorithme, permettant de détecter et de masquer les nuages, est intégré dans le

processus de fabrication de l'indice de poussière IDDI. Le principe de base est indiqué par Figure (III.5).



**Figure III.5 :** Principe de fabrication de l'indice de poussière IDDI

L'indice IDDI est progressé à travers deux versions (V1) et (V2), Legrand et al. (2009) [113]. Les principales améliorations de l'indice IDDI (V2) par rapport à l'indice IDDI (V1) sont résumées par Tableau III.1. Le principe de base n'a pas changé entre les deux versions. Les améliorations sont touchées principalement le format et la résolution des images utilisées, le nombre et la fréquence de l'image référence IR, l'image référence VIS (pour la première fois), la nature de produit IDDI (en luminance et en température de brillance), le masque nuage appliqué, et la période couverte.

**Tableau III.1 :** Améliorations de l'indice IDDI (V2) par rapport à l'indice IDDI (V1).

Caractéristiques	IDDI (V1)	IDDI (V2)
Format	METEOSAT (format B2)	METEOSAT (Plein résolution)
Résolution (Au nadir)	30 km	5 km
Ligne/Pixels	416/416	2500/2500
Image référence IR	2 par mois (Chaque quinzaine)	Une par jour (Glissante)
Images référence VIS	-	Une par jour (Glissante)

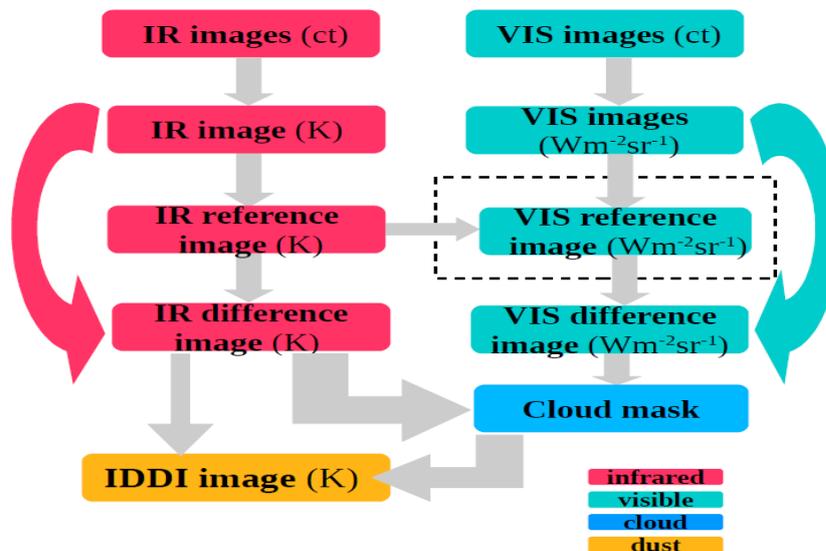
Unités	Count [ct]	[K] et [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ]
Masque nuage	Méthode d'Arche	Méthode de la fonction de structure
Période archivée	1983 - 1998 (16 ans)	1982 - 2006 (25 ans)

### III.7.2 - Image référence ou image à ciel clair de l'imagerie IDDI

Le choix de la longueur de la période de référence a été parmi les difficultés de la construction de l'IDDI (V1), Legrand et N'Doumé (1992) [114]. Normalement plus la période est longue, plus l'image référence est propre. Cependant, cette procédure ne peut être pleinement appliquée en raison de la variation continue de niveau radiométrique des images IR brutes au cours de l'année, ceci à cause (i) - des changements dans les positions relatives du Soleil et la Terre, (ii) - des changements saisonniers de la surface de la terre, notamment en termes de couvert végétal, et (iii) - de l'évolution saisonnière de l'atmosphère. Si la période est trop courte, l'image référence risque d'être fortement contaminé par des quantités appréciables de résidus de nuage et des amas de poussière [115]. D'autre part, si la période est trop longue, l'image référence peut être affectée par l'effet intersaison. Le meilleur résultat sera obtenu en utilisant une période d'une certaine longueur intermédiaire, période de 15 jours, sept jours avant et sept autres après le jour J. La période de quinze jours elle est considérée dans l'IDDI (V1) comme dans l'IDDI (V2).

La construction de l'image de référence à ciel clair et propre directement de l'unique canal VIS, n'était pas la meilleure solution. D'un côté, la question des ombres des nuages particulièrement, d'autres coté les contrastes voisines de différents objets qui forment la scène terre-atmosphère. La question est beaucoup plus nette quand le sol est très réfléchissant (très brillant), comme les déserts et les soles calcaires ou à végétations dispersées, la différenciation entre sol et nuage bas ou fin ou amas de sable est délicate. Ces questions ne se posent pas quand on détecte les océans et mers, l'eau est plutôt absorbante et moins réfléchissante des rayonnements, et la détection des nuages et amas de sable est moins délicate. Dans le domaine infrarouge, où la télédétection elle est basée sur l'émission thermique des objets, la différenciation entre les acteurs formant la scène terre-atmosphère est moins délicate. Chaque élément est distingué par sa propre émissivité thermique, c'est-à-dire sa propre température de brillance.

Dans notre étude la luminance VIS, principale donnée pour remonter à l'albédo de surface, est extraite de l'image référence à ciel clair du canal VIS. Cette dernière n'est pas construite directement à partir des données VIS, mais elle est déduite de son homologue du canal IR (image référence IR). On retient la date du pixel IR le plus chaud (pixel de référence IR) enregistré entre 11h30 et 12h00 UTC, et nous cherchons la luminance VIS qui correspond à cette date. L'image référence VIS à ciel clair est glissante, au nombre égal au nombre de jour. La méthode de préparation de l'image référence VIS est indiquée dans l'organigramme IDDI (V.2), Figure (III.6), où cet élément est entouré d'un cadre en pointillés.



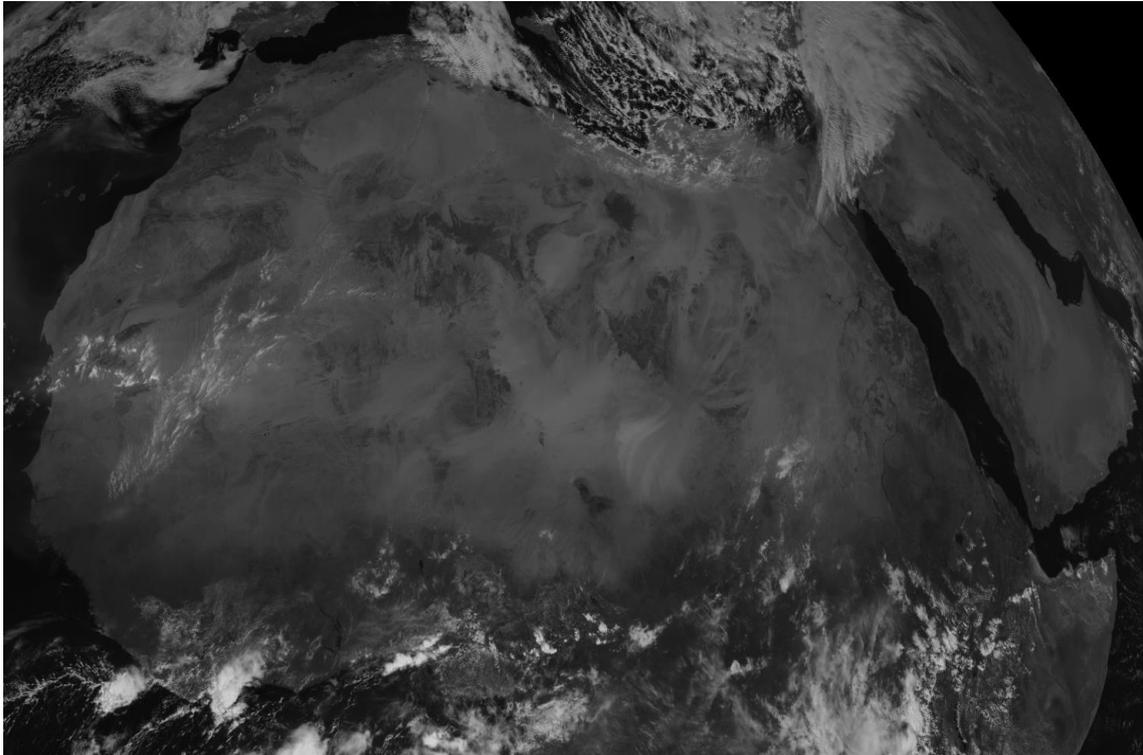
**Figure III.6 :** Processus de construction de l'image de référence du canal VIS dans l'algorithme IDDI (V.2)

### III.7.3 - Galerie de principaux produits de l'imagerie

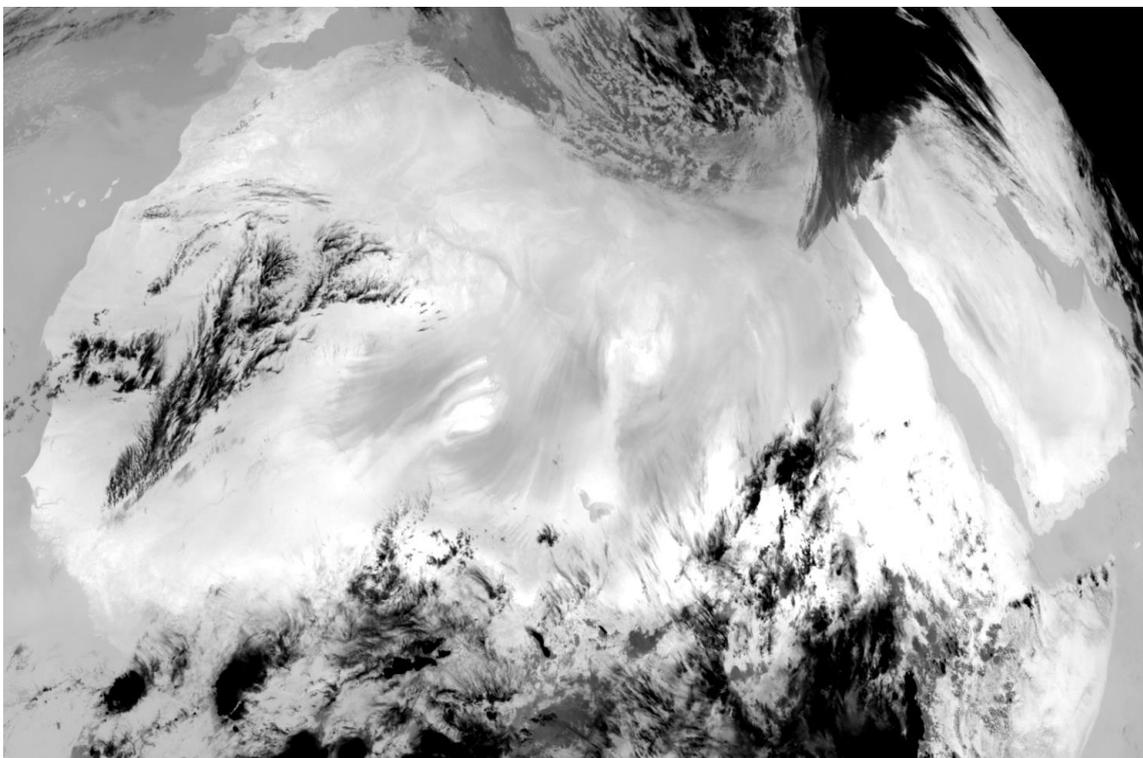
#### IDDI (Journée 08 Mars 2006 à 12h00 UTC)

Une galerie d'images de principaux produits de l'imagerie IDDI est présentée par Figure III.7-(a), (b), (c), (d), (e), (f). La galerie concerne la journée de 08 Mars 2006 à 12h00 UTC. Cette journée est spectaculaire en termes de présence d'un intense événement de poussière, qui avait marqué les aires d'une bonne partie de l'Afrique du Nord. Les images sont concentrées sur la partie nord-africaine et la péninsule arabique. La galerie présente les images calibrées des deux canaux METEOSAT (VIS et IR), et qui concernent l'état journalière brute, l'état de référence du sol à ciel clair, l'état différence IR (atmosphère sans sol), et enfin l'image poussières (indice IDDI), avec un masque mer (Magenta) et un masque nuage (blanc). L'indice IDDI est présenté en température de brillance, et les valeurs s'étalent de 0 à 48 K. Il est important de signaler que le

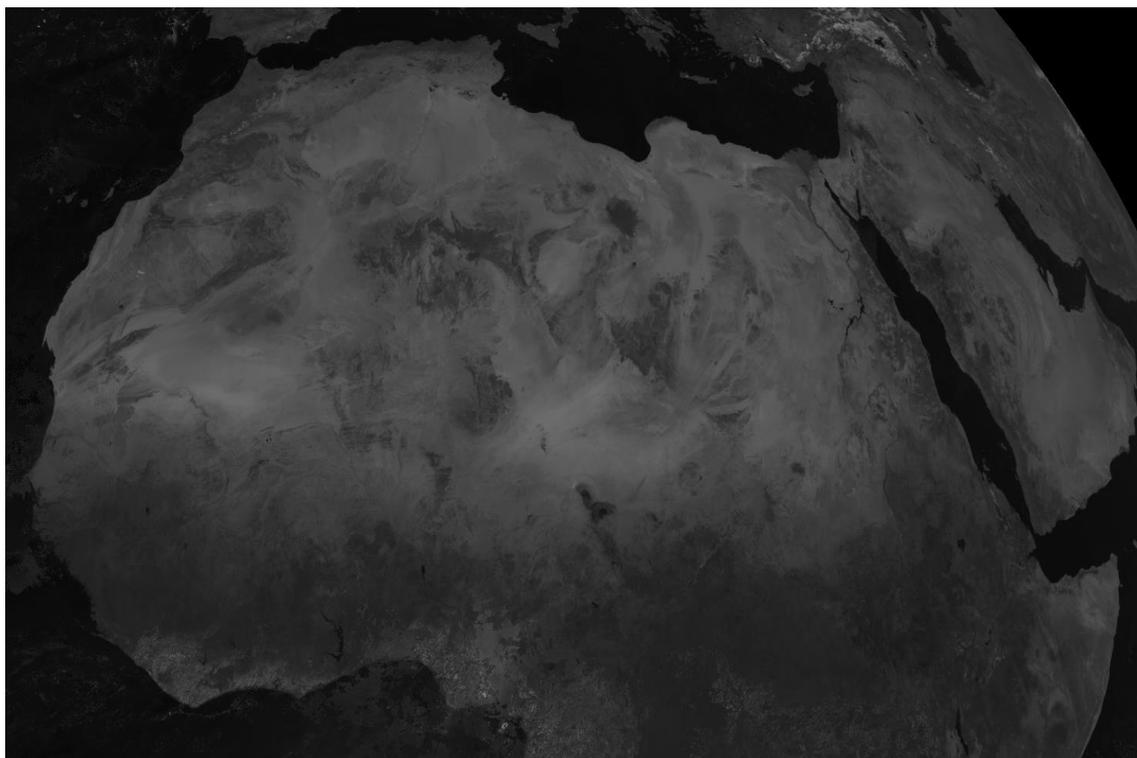
canal infrarouge est le plus approprié pour percevoir les différentes structures atmosphériques (nuage et amas de sable).



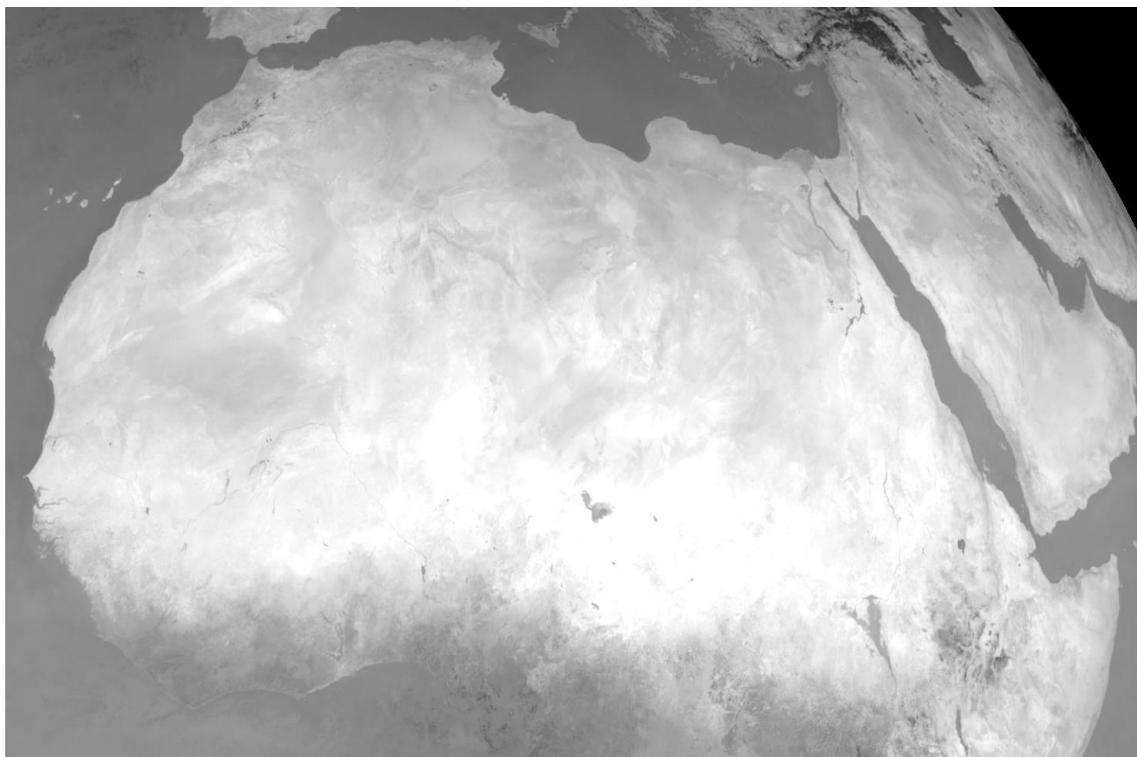
**(a)** - Image canal VIS, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.



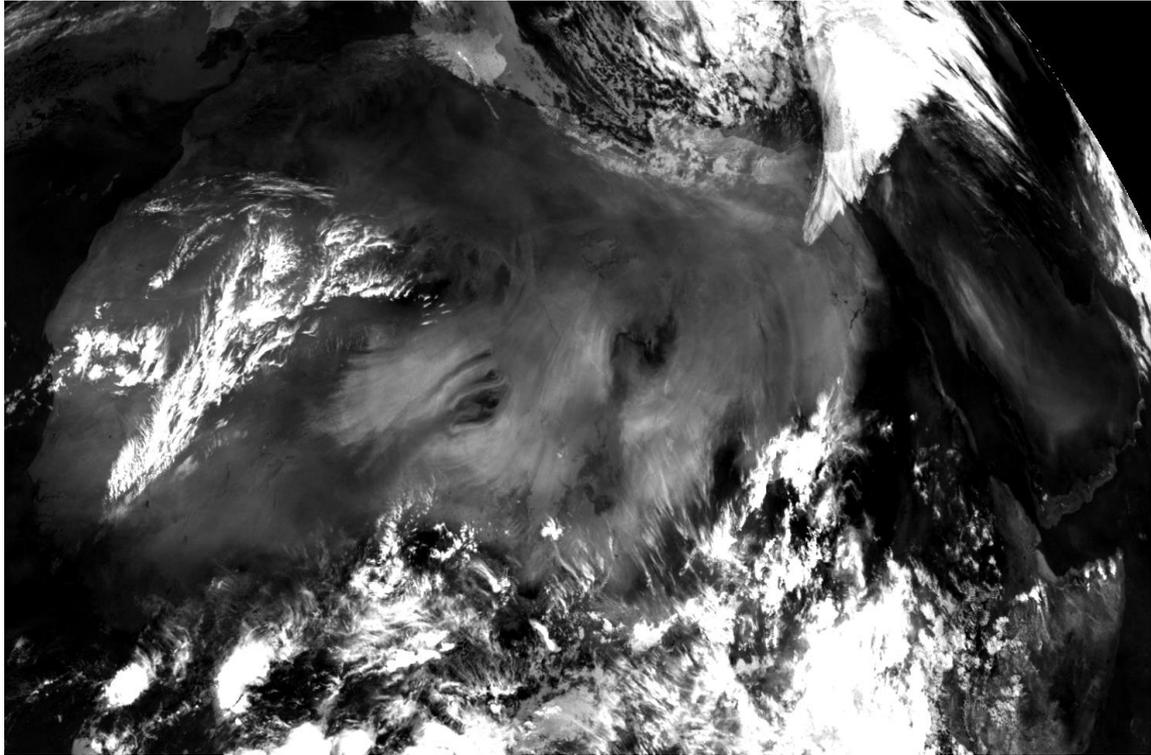
**(b)** - Image canal IR, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.



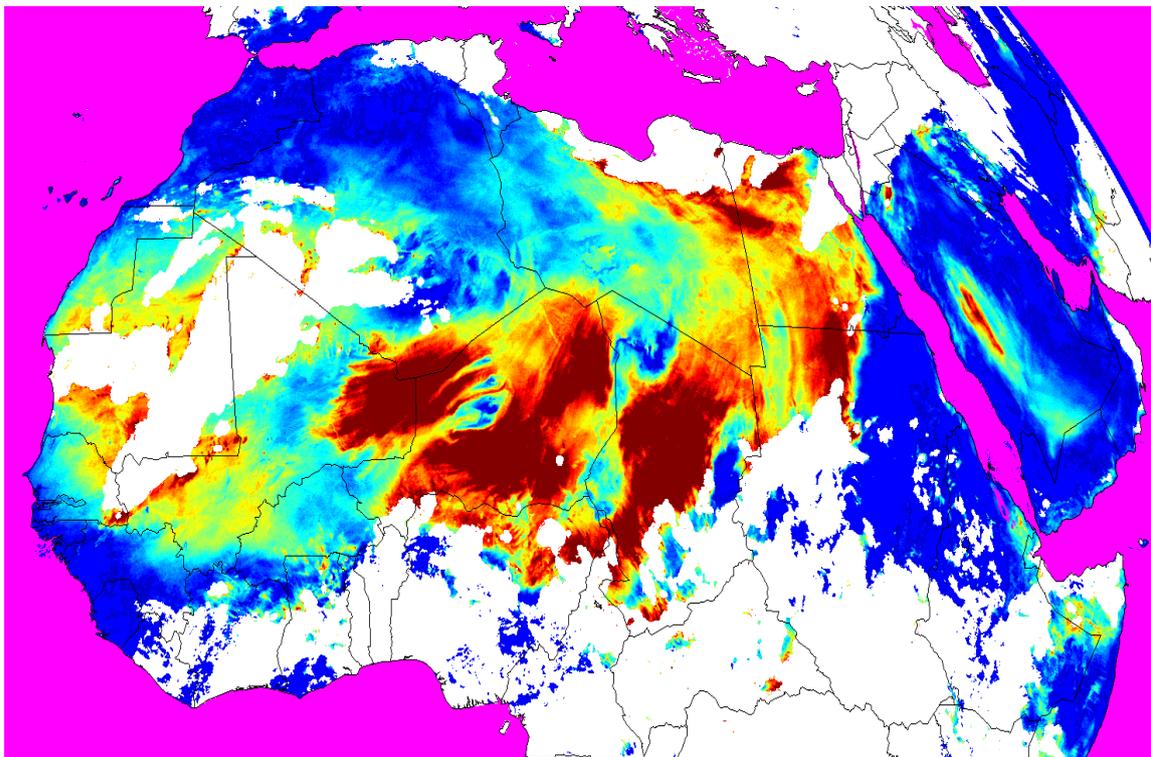
(c) - Image référence VIS, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.



(d) - Image référence IR, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.



(e) - Image différence IR, le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.



(f) - Image poussières (Indice IDDI), le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.

**Figure III.7 :** Galerie des produits IDDI (V2), le 08 Mars 2006 à 12h00 UTC.

## III.8 - Albédo de surface comme indicateur de la dynamique de l'état de sol

La série de satellites géostationnaires, tel que METEOSAT (MFG) à la position nominale (0°E) au-dessus du golfe de Guinée en Afrique depuis la fin des années 1970, sont un outil important qui facilite l'observation des conditions de la surface terrestre à de multiples échelles de temps. L'albédo de surface, qui est le rapport entre le rayonnement réfléchi par la surface et le rayonnement solaire incident, peut révéler la dynamique de la surface terrestre qui s'est façonnée au fil des années ([71], [116], [117]). Plusieurs études ont utilisé l'albédo de surface, déduit des mesures MFG, dans de nombreux domaines tels que le transfert radiatif surface-atmosphère et la charge de l'atmosphère en aérosols [118], la surveillance des activités des feux de la biomasse au continent africain ([119], [120]). Loew et Govaerts (2010) [121] ont implanté une série chronologique sur plusieurs décennies de l'albédo de surface METEOSAT (MSA) pour la surveillance de la dynamique de l'albédo de la surface terrestre. L'albédo de surface est également compté parmi les données climatique (Climate Data Record - CDR) pour la surveillance et la compréhension du changement climatique de la Terre ([122], [123], [124]). Dans les études climatiques, certains modèles impliquent l'albédo de surface avec les anomalies de précipitations et l'apparition de sécheresse. Les changements d'albédo liés à la sécheresse sont étudiés depuis les années 1970 [100]. Le mécanisme de Charney ([64], [65]) stipule l'effet de rétroaction positif de l'albédo de surface, causé par le changement anthropogénique d'utilisation des terres, pour réduire et raréfier les précipitations dans l'environnement sahélien. Cependant, d'autres études ne sont pas convaincues par le mécanisme de Charney ([73], [74], [77], [125]). Ces dernières études révèlent que les causes principales de la sécheresse, et par la suite les changements d'albédo de surface, sont davantage liées à la variabilité des précipitations qui est en relation avec les oscillations de la circulation atmosphérique à grande échelle.

L'albédo de surface envisagé dans cette étude est obtenu à partir de la luminance calibrée (en  $W m^{-2} sr^{-1}$ ) extraite de l'image référence du canal VIS. La luminance est corrigée des atténuations atmosphériques, par le code de transfert radiatif 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum). Les atténuations atmosphériques par absorption diffusion provoqués par la présence des gaz atmosphérique ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ), par la vapeur d'eau, et par les aérosols.

### III.9 - Code de transfert radiatif 6S

Le code de simulation 6S, est une succession du code 5S. La fonction de base du code est de simuler à ciel clair le signal qu'un satellite peut mesurer dans le domaine solaire, entre 0.25 et 4.0  $\mu\text{m}$ . Le code tient en compte les différentes atténuations atmosphériques, tels que absorption et diffusion par les gaz atmosphériques ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ), par la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et par les aérosols. Différents types d'atmosphères sont intégrés dans le code, à moins que l'utilisateur défini son propre type d'atmosphère, où il doit introduire le contenu en vapeur d'eau en ( $g\text{ cm}^{-2}$ ) et le contenu en ozone en (cm-atm). Le code 6S fonctionne aussi en mode inverse, ceci par l'intermédiaire d'un module complémentaire « Atmospheric Correction ». Le module est intégré en dernier étape de compilation du code. Pour ce module et dans les conditions atmosphériques décrites par l'utilisateur, on peut :

(i) - introduire une valeur de réflectance apparente (c'est l'albédo à la limite supérieure de l'atmosphère, Top Of Atmosphere ou TOA) et avoir en sortie une luminance normalisée en ( $W\text{ m}^{-2}\text{ sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ), de système Sol- Atmosphère ; ou

(ii) - introduire une luminance normalisée en ( $W\text{ m}^{-2}\text{ sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) et avoir en sortie la réflectance apparente.

Pour ce code, nous avons utilisés : (i) - certaines paramètre climatiques telles que la température de l'air, l'humidité relative, et la vitesse et direction du vent. Paramètres nécessaires à la formulation de type d'atmosphère et de type d'aérosol, en introduisons la teneur en vapeur d'eau  $w$  et le type d'aérosol ; et (ii) - la luminance référence du canal VIS  $L^*$  en ( $W\text{ m}^{-2}\text{ sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ).

### III.10 - Méthodologie de calcul de l'albédo de surface

La base de données brute METEOSAT archivée chez le centre ICARE (Université des Sciences Technologiques, Lille1, France), de 1981 à 2006 nous a permis de choisir la période entre 1994 à 2006, soit 13 ans d'archive. Les données satellitaires de cette période, sont fournies par la succession de trois satellites METEOSAT-5, -6 et -7. Plusieurs auteurs, tels que Govaerts (1999, 2004a) ([127], [128]) ; Govaerts et Lattanzio (2007) [129], Loew et Govaerts (2010) [121], utilisent les données de satellite METEOSAT-7 comme référence par rapport aux autres satellites de la série METEOSAT Premier Génération.

L'inter-calibration des données des satellites METEOSAT-5 et -6 par rapport à METEOSAT-7 était initialisée par Govaerts (1999) [127]. Govaerts a trouvé par l'étude des surfaces océanique et

des cibles désertiques brillantes, que lorsque les réponses spectrales des satellites d'origines sont utilisées, l'erreur entre les coefficients de calibrations au-dessus d'océan et de désert est de l'ordre de 20 %. Cette différence se réduit à 1 %, quand la réponse spectrale de METEOSAT-7 est utilisée pour calibrer les radiomètres des satellites METEOSAT-5 et -6. Ces travaux d'inter-calibration, ont permis d'avoir une période relativement longue, entre Février (1994) jusqu'au Juillet (2006), avec des données à des niveaux radiométriques homogènes, du fait que les mesures radiométriques de trois satellites semblent issues d'un même instrument.

La luminance référence VIS,  $L^*(w', \delta')$ , principale entrée pour remonter à l'albédo de surface, elle est choisie parmi les luminances journalières VIS,  $L(w, \delta)$ , les plus claires (sans nuage) et les plus propre (sans poussières), dans la période de référence de 15 jours (J-7, J+7). Cette luminance VIS, mesurée dans le plan satellite défini par les angles solaire et de visé ( $\theta_s, \theta_v$ ), est calibrée par la relation de Koepke (1983) [130], on utilisant les coefficients d'étalonnage  $C_f(W m^{-2} sr^{-1} / DC)$  et du compte d'offset  $DC_0(count)$ , décrites dans les travaux de Govaerts et Clerici (2004a) [128] et Govaerts et al. (2004b) [131], comme suite :

$$L(\theta_s, \theta_v) = C_f(t) \times (DC - DC_0) \quad (\text{III.1})$$

Avec  $DC$  la luminance en compte numérique (count). Le coefficient  $C_f(t)$  est donné par une relation linéaire au cours du temps  $t$  ([132]) :

$$C_f(t) = C_{f0} + (D_f \times N_t \times 10^{-5}) \quad (\text{III.2})$$

Pour METEOSAT-7,  $C_{f0}$  est le coefficient d'étalonnage (égale à  $0.9184 W m^{-2} sr^{-1} / DC$ ) à la date du lancement  $t_0$  (2 septembre 1997),  $D_f$  est la dérive ( $5.3507 W m^{-2} sr^{-1} DC^{-1} DAY^{-1} \times 10^{-5}$ ) et  $N_t$  est le numéro de jour (DAY), en prenant la date de lancement pour origine ( $N_t = 0$ ).

La luminance référence VIS,  $L(w', \delta', \theta_s, \theta_v)$  ou  $L^*$ , à introduire dans le code 6S en mode inverse, où nous allons obtenir une réflectance apparente, elle est normalisée par la valeur de l'intégral  $(f(\lambda) \times d\lambda) \mu m$ ,  $f(\lambda)$  est la fonction filtre commune entre les satellites METEOSAT-5, -6 et -7, intégrée sur l'intervalle spectral (0.4 - 1.1  $\mu m$ ). La valeur de cet intégral pour METEOSAT-7 est égale à 0.49.

La réflectance apparente est obtenue quand nous rapportant la luminance effective  $L^*$  du rayonnement renvoyé vers l'espace par le système Sol-Atmosphère, à l'exitance radiative solaire  $E_S(d)$  incidente au sommet l'atmosphère, où  $d$  est la distance Terre-Soleil. Ce terme d'exitance radiative solaire est filtré à travers la fonction de transfert  $f(\lambda)$ . On calcule  $E_S(d_0)$  à partir du tableau

des exitances radiatives solaires  $I_{S\lambda}$  à une distance Terre-Soleil moyenne  $d_0=1.496 10^8 km$  et de la fonction de transfert  $f(\lambda)$ , tel que :

$$E_S(d_0) = \int_0^{\infty} I_{S\lambda}(d_0, \lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (\text{III.3})$$

La distance Terre-Soleil  $d$  dépend du jour de l'année [133], et  $E_S(d)$  sera déduite par :

$$E_S(d) = E_S(d_0) \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (\text{III.4})$$

Enfin, on calcul la réflectance apparente de système Sol-Atmosphère par :

$$\rho_0(\theta_S, \theta_V) = \frac{\pi \times L^*}{E_S(d) \times \cos(\theta_S)} \quad (\text{III.5})$$

La réflectance ( $\rho_0$ ), obtenue ainsi en mode inverse, elle est contaminée des atténuations atmosphériques (absorption et diffusion) causées par les gaz atmosphériques, vapeur d'eau et aérosols. L'albédo de surface  $\rho$  est enfin retrouvé par l'Équation (6), après correction de la réflectance apparente ( $\rho_0$ ) des atténuations atmosphériques ([134], [135], [136], [137]), comme suite :

$$\rho = \frac{[A \times \rho_0 + B]}{[1 + (\gamma \times (A \times \rho_0 + B))]} \quad (\text{III.6})$$

Avec,  $A=1/(\alpha \times \beta)$ ,  $B= -(\rho_{atm}/\beta)$  et  $\rho_0$  = réflectance hors atmosphère,  $\alpha$  est la transmittance gazeuse globale (downward, upward),  $\beta$  est la transmittance de diffusion total (Rayleigh + aérosol),  $\gamma$  est l'albédo sphérique (Rayleigh + aérosol) et  $\rho_{atm}$  est la réflectance atmosphérique intrinsèque. Les paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho_{atm}$  et  $\gamma$  sont tous calculés par le code 6S selon le modèle d'atmosphère défini.

L'albédo de surface dépend aussi de façon significative de l'angle solaire zénithal (ASZ), fort (quand ASZ est fort) en hiver est faible (quand ASZ est faible) en été ([138], [139], [140]). Dickinson (1983) [141] avait proposé une approche qui consiste à ramener l'albédo de surface à un angle de référence ( $\theta_S = 60^\circ$ ), par l'équation suivante :

$$\rho(\theta_S) = \rho(60^\circ) \frac{(1+C)}{(1+2 \times C \times \cos(\theta_S))} \quad (\text{III.7})$$

$\theta_S=ASZ$ ,  $\rho(\theta_S)$  est l'albédo de surface à un angle  $\theta_S$ ,  $\rho(60^\circ)$  est l'albédo à  $\cos(ASZ=60^\circ) = 0.5$ , et  $(C)$  est un constant égal à 0.4, selon Briegleb et al. (1986) [142].

### III.11 - Potentielles et limites de l'image référence VIS

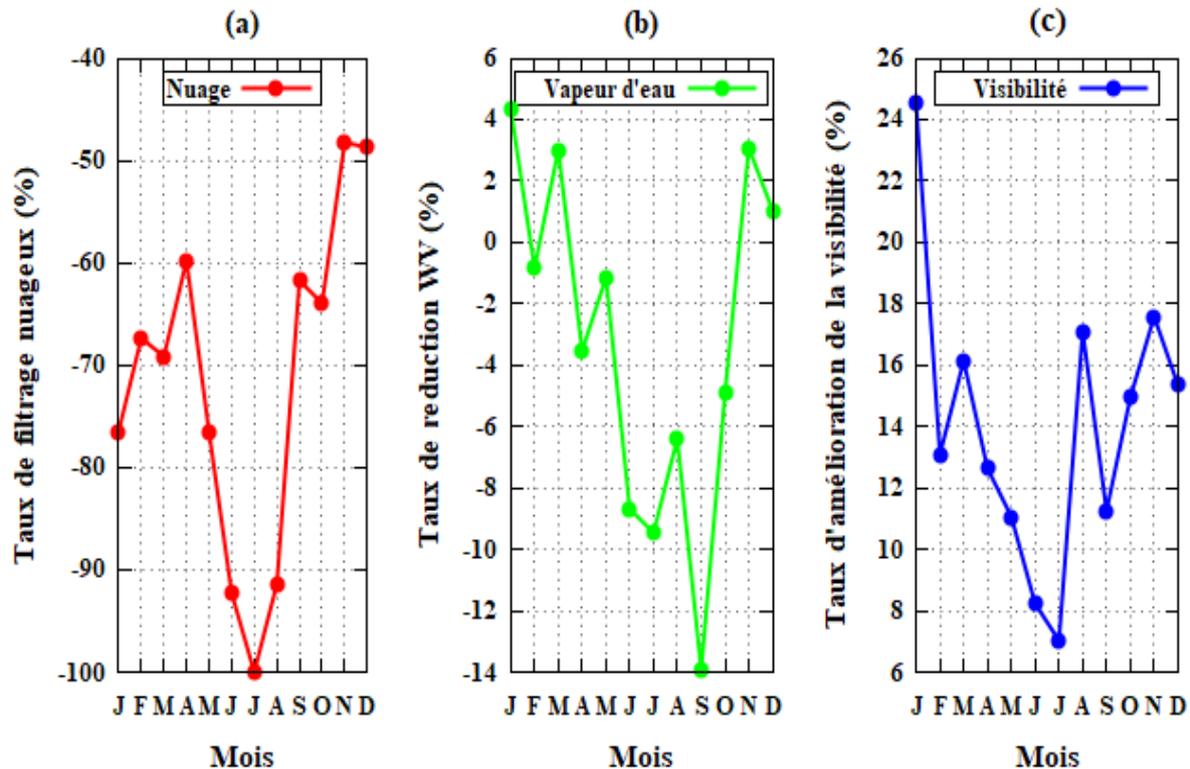
Théoriquement l'image référence VIS (déduite de l'image référence IR), elle est composée uniquement des pixels les plus clairs (sans nuage), et les plus propre (sans poussières), dans une période de référence de 15 jours autour du jour J (J-7, J+7). La vapeur d'eau n'est pas prise en considération.

En pratique les **nuages** dans l'image référence VIS sont considérablement filtrés. A travers la période d'étude, entre Février 1994 et Juillet 2006, soit 4518 jours, on note que 98 % des pixels sont déclarés « clair » par le masque nuage IDDI. Cependant, vue la résolution relativement basse des canaux METEOSAT (principalement le canal IR), 5 km à l'équateur, les résidus des nuages et amas de poussières peuvent existées sans qu'ils soient aperçus. Les résidus des nuages sont fréquents particulièrement en saisons tempérées (automne et hiver). Pour tenir en compte de ces résidus de nuage, qui peuvent être une source d'erreur affectant la luminance VIS (principale source de l'albédo de surface), nous avons envisagés de tenir en compte la nébulosité du ciel, une observation sol du couvert nuageux à 12h00 UTC en (octas). Pour le cas de M'Sila, l'erreur relative (l'erreur qui représente le taux des cas nuageux filtrés) entre la nébulosité du jour de référence ( $N'$ ) et celle journalière ( $N$ ), est différente d'une saison à un autre. Le taux de filtrage est égal, en hiver à -64 %, en printemps à -69 %, en été à -95 %, et en automne à -58%. Figure III. 8-(a), montre le taux de filtrage pour chaque mois. On note que Novembre et de Décembre le filtrage est de l'ordre de -50%, cependant pour Juin, Juillet et Août c'est pratiquement le quasi filtrage (plus de -90% des situations nuageuses sont filtrées). Le taux de filtrage dépend donc des périodes de circulation des masses nuageuses (fréquentes en hiver et en automne). Ces taux s'améliorent certainement, si nous avons étendu la période de référence au plus de 15 jours, par exemple 21 ou 30 jours, mais ceci risquerait de ce confronté avec l'effet d'intersaisons [115].

La **vapeur d'eau**, malgré que le procédé de fabrication de l'image référence IR (et VIS) ne prend pas ce paramètre en considération, au cours de la période entre 1994 à 2006, on trouve que en général, le contenu en vapeur d'eau (ou contenu d'eau précipitable) du jour de référence  $w'$  est inférieur au contenu en vapeur d'eau journalier  $w$ , dont le taux de réduction (erreur relative en %) est entre -5 à -12 %, pour les mois entre Juin et Octobre où les valeurs  $w$  dépassent 2.5 (g/cm<sup>2</sup>). Le taux de réduction est entre -5 à +5 %, pour le reste des mois de l'année, voir Figure III. 8-(b).

Quant aux **aérosols**, et en utilisant l'épaisseur optique  $\delta$  (déduit de la visibilité horizontale en km), on constate que la visibilité moyenne mensuelle de référence  $\delta'$  est meilleur que la visibilité

moyenne mensuelle  $\delta$ , de (15 à 20 km) contre de (14 à 17 km) en moyenne mensuelle. Le taux d'amélioration (erreur relative en %) de  $\delta'$  par rapport à  $\delta$  est entre 7 à 25 %, amélioration minimale en Juillet et maximale en Janvier. La référence VIS avait réduit de 50 % le nombre des jours à visibilité réduite [0.4 - 10] km, avait augmenté de 10 % le nombre des jours à visibilité clair ]10 - 20] km, et avait doublé de 100 % le nombre des jours à visibilité très clair ]20 - 30] km, voir Figure III.8 –(c).



**Figure III.8:** Potentiels et limites de l'image référence VIS, (a) - taux de filtrage des nuages, (b) - taux de réduction de la vapeur d'eau et (c) - taux d'amélioration de la visibilité horizontale, pour M'Sila (Algérie), au cours de la période entre 1994 et 2006.

En résumé, on peut dire que l'image référence VIS, avait éliminée de façon considérable les principaux perturbateurs atmosphériques, en particulier nuages et poussières, et de façon moins importante la vapeur d'eau. Après les corrections qu'on devrait apportés sur la luminance VIS calibrée en ( $W m^{-2} sr^{-1}$ ), pour éliminer les atténuations atmosphériques dues à la présence de la vapeur d'eau et des aérosols, par un code approprié, les incertitudes qui résident concernent seulement les nuages, dont les erreurs relatives montrés par Figure III.8, donnent une idée sur l'ordre et les mois les plus affectés.

Pour corriger la luminance VIS des atténuations atmosphériques, nous avons utilisés le code de transfert radiatif 6S, développé par Vermote et al. (1997) [126]. Le code utilisé porte le nom de « Msixs », installé sous une plateforme Linux. Le logiciel « Msixs » présente les avantages suivants : (i) - intégration du signal sur le filtre du capteur (prévu pour METEOSAT Premier Génération, avec la possibilité d'introduire une fonction filtre) ; (ii) - choix de différents types d'atmosphères et de surfaces (Lambertienne ou BRDF) ; (iii) - prise en compte des absorptions gazeuses ; (iv) - possibilité d'inversion ; (v) - convivialité (menu à l'écran, aide, et rapidité).



# Chapitre IV

---

Variabilité pluviométrique  
en Algérie – Évaluation de  
la sécheresse

---

# Chapitre IV

## Variabilité pluviométrique en Algérie – Evaluation de la sécheresse

---

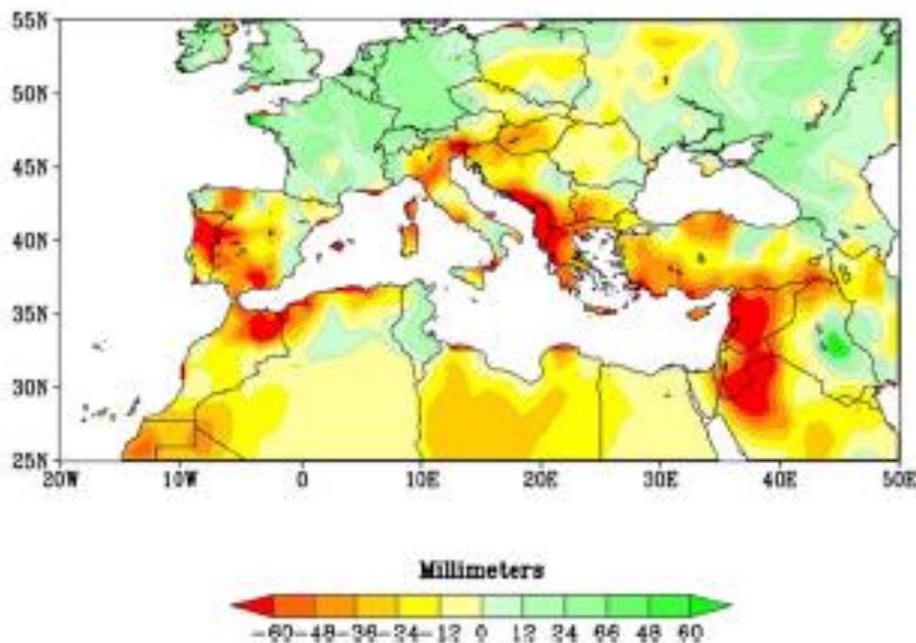
### IV.1 - Variabilité pluviométrique en Algérie

Au niveau mondial, aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique que l'eau [143]. Son utilisation est essentielle pour chaque habitant et pour un large éventail d'activités du secteur socio-économique. Elle est vitale pour la santé, l'agriculture, l'industrie et l'hydroélectricité. L'eau fait également partie de l'environnement et abrite de nombreuses formes de vie, dont le bien-être humain dépend en fin de compte. Compte tenu de la demande croissante d'eau, tant en termes de quantité que de gamme d'utilisation, la variabilité des précipitations est une question plus sensible et plus importante aujourd'hui qu'à tout autre moment dans le passé.

Les précipitations sont très variables particulièrement en zones semi-aride ; cette variabilité se manifeste à la fois dans le temps et dans l'espace ; elle est inversement liée aux cumules moyennes, autrement dit, elle croît avec l'aridité [144]. Toutefois, le degré de variabilité ne dépend pas seulement des précipitations moyennes annuelles, mais aussi du type de climat considéré, c'est-à-dire du régime saisonnier des précipitations et des températures et aussi des conditions atmosphériques et géographiques (générales et locales). Les conditions atmosphériques se résument par les anomalies de la circulation atmosphérique générale, liée aux anomalies de la température de surface des océans, connus communément par la téléconnexion. Cependant les conditions géographiques, se résument par l'altitude des lieux, le relief, et l'exposer aux courants d'air humides.

La variabilité de pluviométrie du Nord de l'Algérie, à l'échelle local et régional, était le sujet de plusieurs études. La plupart de ces études ont montré la portée de la variabilité spatiale des précipitations d'Est en Ouest ([145], [146], [147], [148]). Les montagnes algériennes sont le prolongement des montagnes de l'Atlas Marocain, et toute la chaîne de montagnes, qui s'étend du Sud - Ouest au Nord - Est du Maghreb, réduit considérablement les précipitations provenant

de l'Atlantique vers l'Est de l'Algérie. Les pentes de la région Nord - Est de l'Algérie sont généralement bien exposés aux pluies en provenance d'Europe [149]. D'autre part, les sécheresses qu'a l'Algérie connue depuis 1975 ont considérablement empruntés la variabilité des précipitations dans l'Ouest de l'Algérie, tandis que l'Est montre une distribution stable des précipitations ([149], [150], [151]). La variabilité des précipitations des années 1970 (en particulier les pluies d'hiver), n'a pas concernées seulement l'Algérie mais pratiquement des bonnes parties du bassin de méditerranéen, selon Gleick (2014) [152], voir Figure IV.1.



**Figure IV.1 :** Zones du pourtour méditerranéen qui ont connu des hivers nettement plus secs au cours de la période 1971-2010 par comparaison de la période 1902-2010, [152].

Taibi et al. (2017) [149], à propos de la variabilité pluviométrique du Nord de l'Algérie au cours de la période 1936 – 2016, ont observés à l'Ouest un déficit pluviométrique de 18 à 29% au cours des décennies 70 et 80, et à l'Est aucun changement n'est observé. Cette même étude, et au cours de la sous-période 1961 – 2016, avait noté un déficit pluviométrique plus excédentaire pendant les années 60 et début des années 70. Enfin, une stabilité de régime pluviométrique est notée au cours de la sous-période 1986 – 2016, avec augmentation significative depuis 2002.

Une seconde étude, menée par Nouaceur et Murărescu (2016) [153], sur la variabilité des précipitations et l'analyse des tendances des précipitations annuelles des trois pays du Maghreb (Algérie, Tunisie et Maroc) au cours de la période de (1970 – 2013), et dans sa partie concernant l'Algérie, avait distinguée, selon les cumuls pluviométriques, trois périodes caractéristiques :

1 – Une première période de forte variabilité au cours de 1970-1986. Aucune véritable tendance climatique ne se dégage de cette période. Toutes les stations étudiées sont caractérisées par une répartition presque égale des classes extrêmes de précipitations annuelles, pluvieuses et très pluvieuses (40%), sèches et très sèches (39,50%), et normales (20,5%). L'indice régional est négatif pendant plus de 47 % des années, contre 52,94 % pour les valeurs positives. Une puissante oscillation interannuelle était remarquée entre l'année sèche et l'année humide. Une séquence de trois années pluvieuses (1971-1973) peut être notée au début de la série, tandis que, pour le reste de la période, les inversions de tendance (année sèche, année pluvieuse) sont pour deux années successives au maximum.

2 - Une deuxième période commence en 1987 et se termine en 2002. Elle est marquée par une tendance à l'assèchement car 55,60 % des années sont considéré comme sec et très sec, alors que pluvieux et très pluvieux années ne totalisent pas plus 26,58%. Dans le même temps, l'indice régional est négatif pendant près de 68% de cette période contre 31,25 % pour les valeurs positives. La persistance des conditions de sécheresse ne dépasse jamais trois années consécutives. Des valeurs extrêmement négatives pour cette phase de sécheresse sont enregistrées en 1989 (-1,68), 2000 (-1,87) et 2001 (-1,49). Les constatations sur cette deuxième période concordes avec ceux de Nouaceur et al. (2013) [89].

3 - La dernière période de cette série de précipitations (2003-2013), au cours de laquelle 82 % des années ont un indice régional positif, est décrite comme pluvieuse. Dans l'ensemble, cette dernière étape se distingue par une séquence ininterrompue de 7 années (2007- 2013) avec des indices régionaux positifs. Le pourcentage d'années pluvieuses et très pluvieuses enregistrées dans toutes les stations (55,72%) est en nette augmentation, tandis que les années sèches et très sèches, avec 20,61%, sont en nette diminution par rapport à la période précédente. Au cours de cette troisième période, la campagne agricole 2008/2009 a été décrite comme très satisfaisante et la production céréalière enregistrée l'année suivante (2009/2010) est un record de 61.2 millions de quintaux qui n'a jamais été égalé. La situation est pareille au Maroc, par contre au Tunisie cette année est marquée par un retour des conditions de sécheresse. Des séquences sévères ont également caractérisé cette période, des épisodes pluvieux extrêmes (perturbations pluvio-orageuses sévères). Les pluies, qui avaient été tant attendues, étaient bénéfiques pour les agricultures mais dramatique pour les citadines [86]. Les inondations de Bab El Oued (Alger) en 2001 et de Ghardaïa en 2008, ont fait respectivement 800 et 43 morts [154], [155]. En 2011, c'est toute la partie nord-saharienne (Wilayas d'El Bayad, M'Sila, Djelfa, Biskra, Laghouat et El Oued) qui a été le théâtre de crues violentes et d'inondations urbaines, qui ont causé plusieurs

victimes et de gros dégâts matériels. Enfin, un épisode tragique (mai 2013) a fait près de 20 morts et 56 blessés suite à un épisode pluvio-orageux ayant touché tout le littoral d'ouest en est. Les pluies en 24 h (du mardi 21 à 8 heures au mercredi 22 à la même heure) enregistrées à Bouzaréah (Alger), s'élèvent à 195 mm, valeur supérieure à celle observée lors de la catastrophe des 9 et 10 novembre 2001 (159,4 mm), qui était considérée à l'époque comme un record.

Ces deux études exemplaires, à propos de la variabilité pluviométrique du Nord de l'Algérie, s'accordent avec d'autres sur la question de la persistance des conditions de sécheresse observées particulièrement au cours des décennies 70 et 80 (ex., [148], [156]). Conditions qui n'étaient pas spécifique à l'Algérie, mais qui avaient aussi touchées des bonnes parties du bassin méditerranéen et les pays de Sahel.

## IV.2 - Téléconnexions et variabilité pluviométrique – cas de l'Algérie

Plusieurs études récentes ont établi un lien entre la variabilité des précipitations dans le nord de l'Algérie, notamment pluies d'hiver, et les variables climatiques liées à la circulation atmosphérique générale, c'est la téléconnexion. À l'échelle annuelle, une interannuel variabilité était perçue avec la phase chaude de l'Oscillation australe (ENSO) et l'Oscillation atlantique orientale (EA). De fortes anomalies d'El Niño affectent le climat mondial et entraînent une réduction des précipitations dans le bassin méditerranéen. Ce mode de circulation est en partie responsable des longues périodes de sécheresse observées dans notamment la région nord-ouest de l'Algérie. La phase positive d'EA correspond à une tendance négative des précipitations annuelles, Taibi et al. (2019) [17] au cours de la période 1950–2017 ; et Zeroual et al. (2017) [157] au cours de la période 1972 -2013. Meddi et al. (2014) [158], au cours de la période 1930 – 2007, ont trouvés que les précipitations sont fortement liées à Oscillation Atlantique Multi-décennale (AMO) et à l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). Les indices ENSO et NAO sont négativement corrélés avec les précipitations. La période de déficit à partir de 1975 correspond à une période d'augmentation de l'indice AMO pour atteindre une phase positive. La réponse de la pluviométrie du littoral algérien à l'indice NAO, à était étudiée par Nouaceur et al. (2013) [89] au cours de la période 1970 - 2012. Il s'avère que la période de forte sécheresse correspond à des indices NAO positifs de forte intensité, qui témoignent d'un renforcement de l'anticyclone des Açores et d'un creusement de la dépression d'Islande. Dans ces conditions, le rail des dépressions s'exile vers les latitudes septentrionales, ce qui favorise

la mise en place d'un temps sec et doux sur le pourtour du bassin méditerranéen, notamment au Maghreb.

A l'échelle saisonnière, des corrélations significatives ont été observées avec les phases positives des indices NAO et EA, ainsi avec l'Oscillation méditerranéenne (MO), [17]. La variabilité saisonnière des précipitations est affectée plus par l'EA et la MO qui sont considérées comme des modes régionaux de circulation atmosphérique. Meddi et al. (2014) [158], constatent que l'évolution de l'indice AMO est similaire à celui de l'échelle annuelle. Le positif de cet indice peut donc expliquer l'apparition de la sécheresse. Cet indice peut également être utilisé pour prévoir les précipitations hivernales, printanières et annuelles.

Le nord de l'Algérie est considéré comme une région semi-aride et la disponibilité de l'eau est de plus en plus irrégulière. L'évaluation et le suivi de la variabilité des précipitations sont donc importants. Les liens avec les modèles de téléconnexions permettent de prévoir la variabilité des précipitations en fonction du mode de circulation atmosphérique le plus dominant [17].

### IV.3 – Bassin versant de Hodna

Le site de notre étude est M'Sila, lieu situé dans la région du Hodna (Nord centre de l'Algérie), aux coordonnées 35°40'N - 4°30'E, et à 441 m d'altitude du niveau de la mer. Figure IV.2, montre le lieu d'étude de M'Sila sur une carte d'altitude. La structure physique de la région est très hétérogène. La région se trouve au contact de quatre ensembles structuraux : l'Atlas Tellien au Nord, les Hautes Plaines steppiques Algéro-Oranaises à l'Ouest et l'Atlas Saharien au Sud et à l'Est. Ces ensembles déterminent en leur sein une dépression fermée, la dépression du Chott-El-Hodna de 400 m d'altitude [159]. La région se caractérise par trois régions naturelles bien distinctes (DSA<sup>1</sup> 2008) [160]: - Zone de steppe couvre la plus grande partie du territoire et se caractérise par un couvert végétal clairsemé, traduisant le degré de dégradation des parcours ; - Zone de la plaine du Hodna où se concentre la grande part de l'activité agricole de la wilaya (céréales, maraîchage, arboriculture) ; - Zone de montagnes, réservée à une agriculture de montagne de type extensif avec quelques massifs forestiers [161]. En outre, la région est soumise à un stress humain important en raison du surpâturage et de l'augmentation de la surface d'agglomération. La région est comptée parmi les zones fragiles exposées à la vulnérabilité à la sécheresse [162].

---

<sup>1</sup> DSA – Direction des Services Agricoles (M'Sila)

Du nord au sud, les grandes zones pédologiques se caractérisent par (DSA 2008) [160] :

- Zone de montagne xérique avec des reliefs qui dépassent parfois 1900 m. Les sols sont des minéraux bruts d'érosion en association avec des sols bruns calcaires ;
- Zone steppique de dépôts quaternaires anciens et moyens avec des reliefs compris entre 400 et 1000 m d'altitude avec succession de glacis à composition granulométrique et chimiques différentes. Les sols sont de groupe sierozems sur croûte calcaire. Il se trouve également des sols gypseux, minéraux bruts d'érosion et peu évolués ;
- Zone steppique de dépôts alluviaux récents avec passage plat et une altitude de 400 à 500 m. Les sols sont peu évolués, d'apport alluvial en différentes degrés affectés par des sels ;
- Zone subdésertique sableuse avec des dunes de sable. Elle est située au sud du Chott-El-Hodna ;
- Zone subdésertique sablo-caillouteuse qui comprend la partie septentrionale de l'Atlas Saharien, les reliefs sont compris entre 600 et 1000 m.

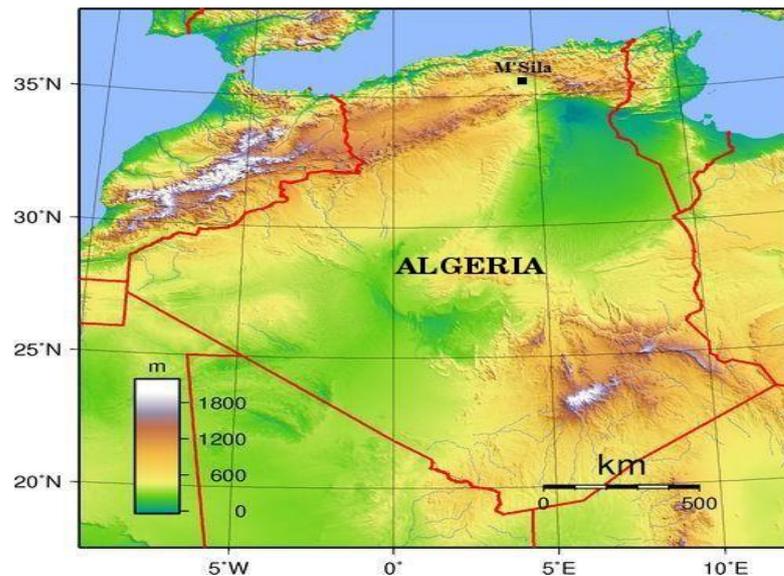


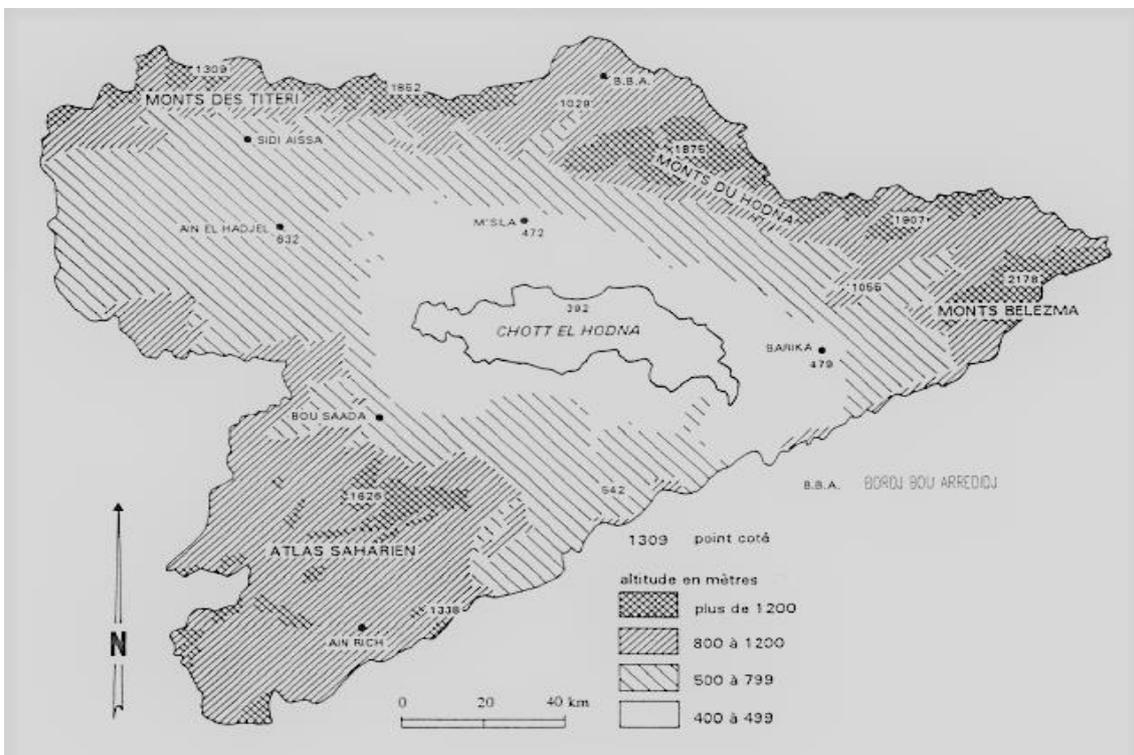
Figure IV.2 : Location du lieu d'étude de M'Sila sur une carte d'altitude.

### IV.3.1 – Caractéristiques pluviométriques du bassin versant de Hodna

Le bassin versant du Hodna, d'une superficie de 26 000 km<sup>2</sup>, est marqué par un climat à tendance aride mis en évidence par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations. La chaîne montagneuse El Hodna (région du Bordj Bou Arreridj) et les sommets de Titeri (1810 m)

forment une barrière face aux perturbations venant du nord, empêchant ainsi la progression des vents chargés d'humidité. Les variations spatiales des précipitations oscillent entre 19% et 70% avec une moyenne de 44% [163]. Cette situation est souvent aggravée par une évaporation élevée et une faible couverture végétale favorisant l'action de l'érosion [164]. Cette tendance à l'aridité du climat n'exclut pas la présence de ressources en eau. Les Hodnéens ont depuis longtemps ce basent sur l'irrigation dirigée. Les précipitations bien que faibles, tombent sous forme d'averses, se traduisant par des écoulements en crues. Les oueds enrichis par les nombreuses sources qui prennent naissance aux pieds des montagnes ont des apports non négligeables. Ce paradoxe : climat aride - richesse en eau, est confirmé par les grandes potentialités offertes par les aquifères en place de la région.

Vue l'entourage montagneux, le bassin de Hodna est souvent cité comme un territoire dont l'accès est difficile, notamment par le nord. Au nord du bassin, l'écran montagneux formé par la chaîne El-Hodna et des monts du Titeri forment en effet une véritable barrière naturelle [163]. Figure IV.3, montre les grands ensembles du relief du bassin. Entre les massifs montagneux et la plaine centrale, le piedmont est constitué par de vastes glacis d'érosion parsemés et des Sebkhhas.



**Figure IV.3 :** Le bassin versant de Hodna - Les grands ensembles du relief, [164].

Vue la disposition des reliefs montagneux du nord et du sud, les écoulements des eaux superficielles et souterraines ont une allure endoréique, organisent ainsi le bassin versant de Hodna autour d'une cuvette fermée, située à 400 m d'altitude. Au fond de la cuvette, le Chott El Hodna a une superficie de 1150 km<sup>2</sup>.

Les oueds provenant des régions telliennes (nord) sont à l'origine de la richesse du Hodna. Le plus important est Oued Ksob. Il se distingue par sa longueur (environ 200 km), la superficie de son bassin-versant (1480 km<sup>2</sup> dont 1330 dans le domaine tellien), et par un écoulement qui se maintient même en période estivale [164]. Oued Barika est plus "hodnéen" : seules ses parties supérieures qui traversent les régions telliennes ont un écoulement permanent. Les Oueds Berhoun, Enfida, Soubella et Nakbar doivent leur débit relativement régulier à de nombreuses sources situées au pied des reliefs.

Au nord-ouest, Oued El Leham a un bassin-versant de 5460 km<sup>2</sup>. Il s'étend sur le piedmont et la plaine du Hodna. Son écoulement est irrégulier.

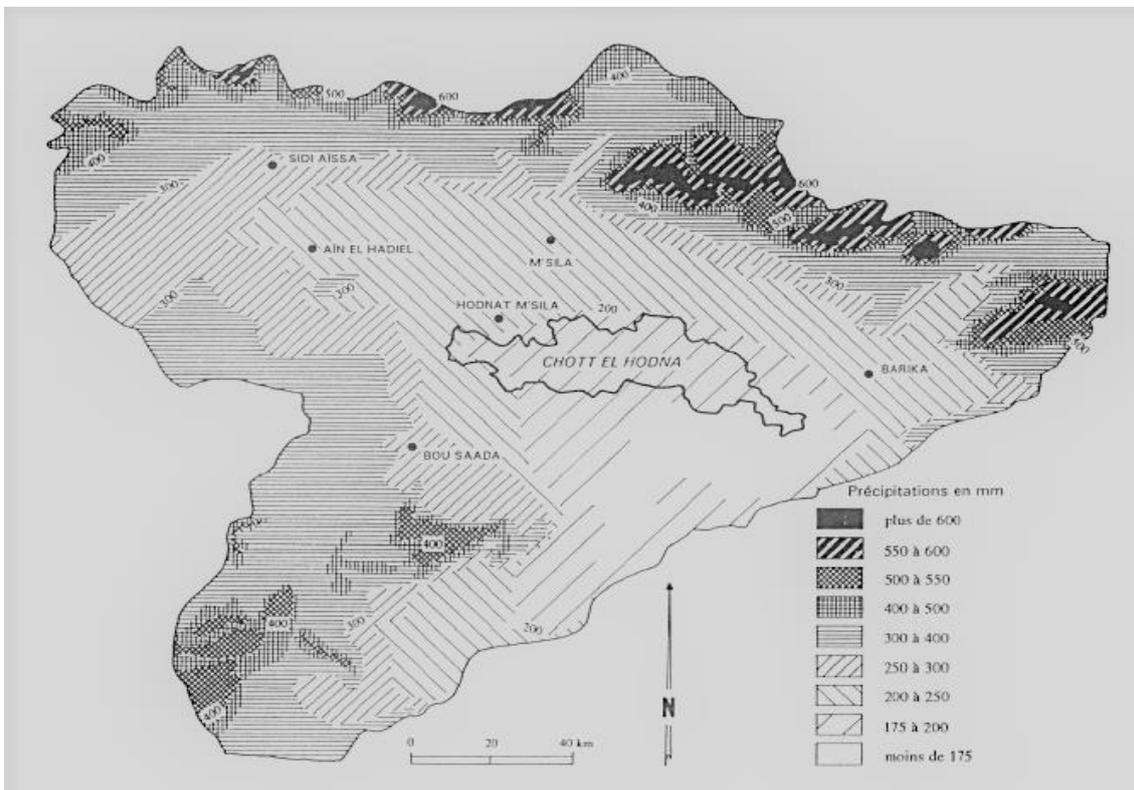
Au sud, Oued Bou Saada ne coule qu'une partie de l'année. Il est alimenté par des sources qui sourdent des grès albiens à 7 km en amont de la ville de Bou Saada. Oued M'Lif, tronçon inférieur de l'immense Oued Melah a un écoulement rarement continu de bout en bout de son cours.

Toutes ces ressources hydriques, desquelles le bassin versant Hodna en bénéficie, explique le paradoxe de climat aride – richesse en eau. L'amélioration de la situation hydrique réside dans la récupération des eaux de pluie et les cours des eaux par des retenues et l'exploitation rationnelle des eaux souterraines [164].

Le début de l'automne voit l'anticyclone des Açores redescendre sensiblement vers le sud. Il ouvre ainsi la voie de la Méditerranée à des perturbations originaires du front polaire localisé sur l'Atlantique Nord. Dans le Hodna (à l'instar des Hautes Plaines steppiques de l'Ouest Algérien), ces perturbations n'arrivent pas à pénétrer car une dorsale de hautes pressions prolonge l'anticyclone des Açores, et limite les influences méditerranéennes [164]. Ainsi, la saison des pluies dans le bassin de Hodna commence à partir de fin septembre et jusque début mai. L'Afrique du Nord est sous l'influence du front polaire dont les perturbations arrivent jusqu'en Méditerranée. Toutefois, le Hodna reste en position d'abri derrière l'écran montagneux des reliefs septentrionaux, sauf quelques rares perturbations à trajectoire subméridienne qui pénètrent dans le Bassin Méditerranéen par le sud-ouest de l'Europe occidentale et arrivent dans le bassin du Hodna.

Cependant l'été dans le bassin, il arrive que des cyclones du front polaire venus de l'Europe de l'ouest pénètrent dans le bassin méditerranéen occidental, sont nettement affaiblis, ils sont régénérés par les basses pressions du front des alizés et causent des perturbations de courte durée. Dans le bassin du Hodna, cela se traduit par une rotation brutale des courants aériens, qui soulève ainsi des tempêtes de sables et de poussières et amènent exceptionnellement de petites pluies.

De ce fait, et selon la classification climatique de Gaussen, pratiquement toutes les stations du bassin-versant du Hodna sont de type aride. Ainsi, Barika présente 9 mois secs, M'Sila et Bou Saada en comptent 10. Seule la station de Bordj Bou Arreridj dans le haut-bassin de l'Oued Ksob présente un caractère méditerranéen. Figure IV.4, montre la répartition spatiale de la pluviométrie du bassin de Hodna.

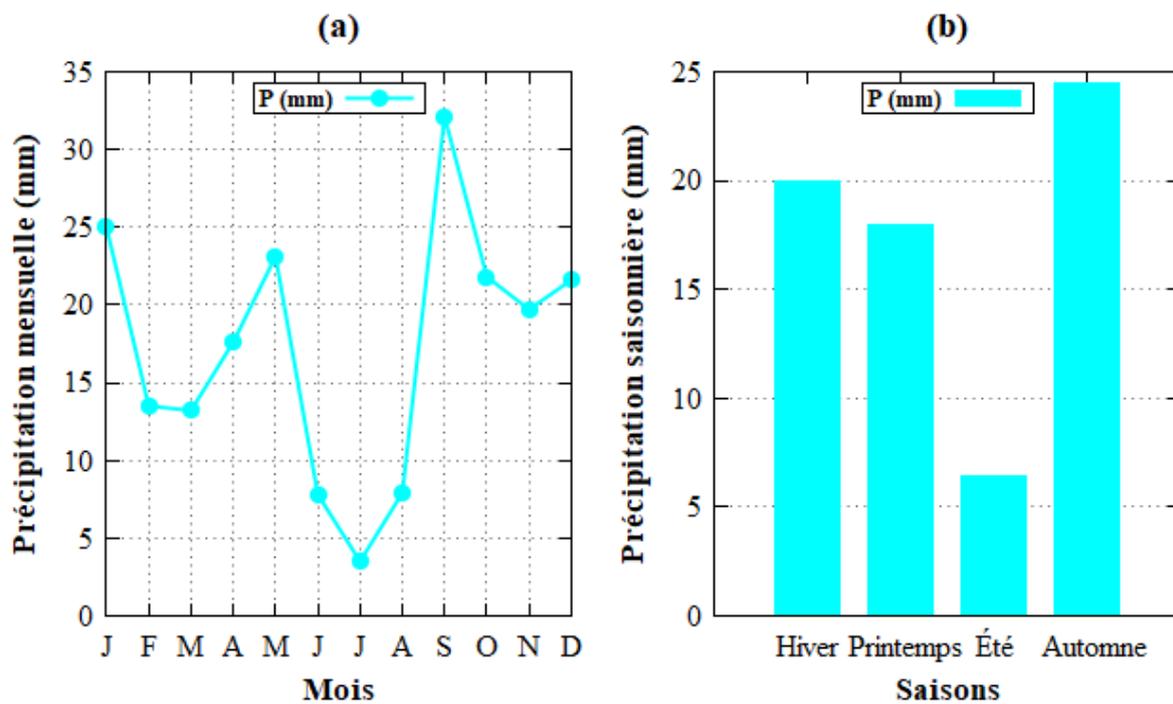


**Figure IV.4 :** Carte pluviométrique Hodna, [164].

Une forte variabilité qui est due au contraste Nord-Sud du bassin. Les pluies importantes de ce bassin sont enregistrées au niveau des sommets de Tetri et Djebel El-Hodna, et les plus faibles dans la région Sud du bassin (Boussaâda et Ain Rich) et la région qui succède aux Djebels El-Biban (entre Ain El-Hadjal et M'Sila).

### IV.3.2 – Lieu d'étude de M'Sila

L'analyse des données des précipitations mensuelles moyennes ( $P$ ) de M'Sila, nous amène à identifier les régimes de précipitations durant la période d'étude, entre 1994 et 2006. Le régime des précipitations mensuelles montre que le mois de Septembre est le plus pluvieux tandis que le mois de Juillet est le plus sec. De plus, le régime saisonnier indique que l'Automne est la saison la plus arrosée avec un taux proche de 25 mm, par contre l'Été est le moins arrosé avec un taux un peu plus de 5 mm, voir Figures IV.5-(a) et -(b). La moyenne annuelle des précipitations sur 13 ans est  $206.7 \text{ mm an}^{-1}$ , soit  $0,56 \text{ mm jour}^{-1}$ .



**Figure IV.5 :** Régimes pluviométrique (a)- mensuel et (b) - saisonnier, pour M'Sila (Algérie), de 1994 à 2006.

Le diagramme Ombrothermique de GAUSSEN permet déterminer les périodes sèches et humides de la région de M'Sila. Ceci est à partir des séries de précipitation et de température, grandeurs en valeurs moyennes mensuelles. L'échelle de l'axe des précipitations est égale au double de l'axe de température, tel que :

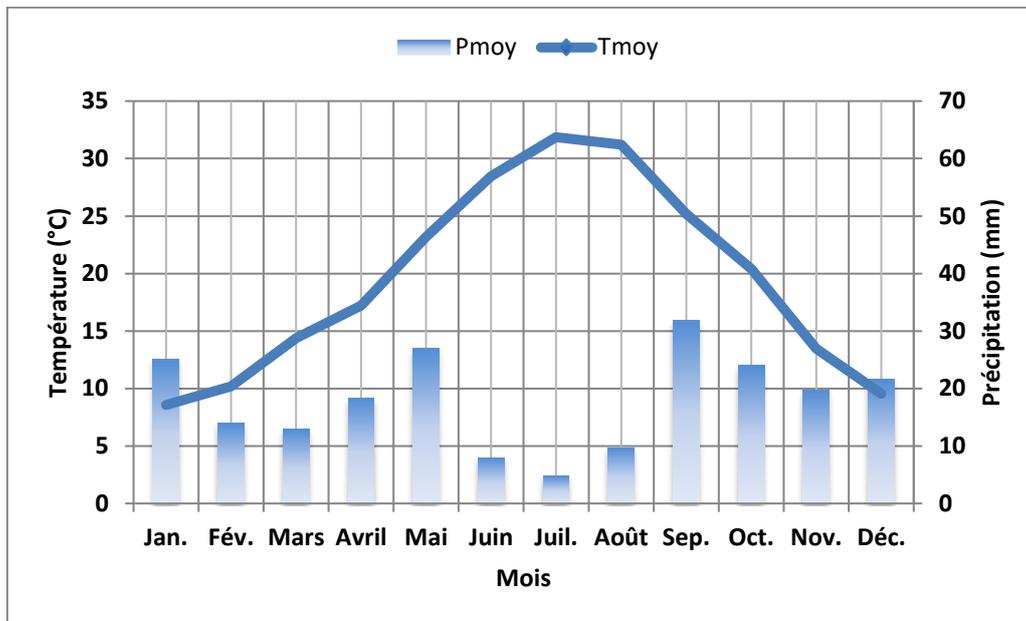
$$P = 2T \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

**P:** Précipitation moyenne mensuelle (mm) ;

**T:** Température moyenne mensuelle (°C).

En général, une période est déclarée sèche si la courbe des précipitations est au-dessous de celle de la température, et c'est l'inverse pour une période humide. D'après le diagramme Ombrothermique de M'Sila, Figure IV.6. On note que le site M'Sila, au cours de la période d'étude entre 1994 à 2006, est pratiquement sèche pendant la majorité des mois de l'année (10 mois), à l'exception de Décembre et de Janvier qui sont normale à humide.



**Figure IV.6 :** Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour M'Sila, au cours de la période 1994 à 2006.

Les vents dominants dans la région soufflent globalement du Sud (Sud - Est, Sud et Sud - Ouest) pendant l'Été, du Nord-Ouest pendant le reste de l'année, surtout au milieu et à la fin de la journée, avec une fréquence dépassant les 40 %. Ces vents agissent avec une vitesse variable dans le temps et dans l'espace, plus forte en période sèche qu'en période humide [162]. Selon Le Houérou (1995) [166] et Guettouche and Guendouz (2007) [165], les sols gypseux et salés, ce sont les sols dominant dans la région de Hodna. Ces types de sols, est une caractéristique des régions aride dont l'apport pluvial est faible, contre un potentiel d'évaporation considérable. On peut imaginer que l'aérosol dans la région est soit des sels minéraux bruts (NaCl) ; soit de sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) - connu sous le nom de gypse (en anglais : gypsum) mais parfois sous forme d'anhydrides ( $\text{CaSO}_4$ ) ; soit de calcaire (carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ )) ; soit encore des amas de sable quartzeux souvent riche en matériel argileux [159].

## IV.4 - Quantification de la sécheresse par les indices normalisés

Les indices de sécheresse sont souvent employés pour identifier les principales caractéristiques des sécheresses (déclenchement, fin, gravité, étendue spatiale) ; pour décrire et de cartographier les épisodes de sécheresse ; pour comparer les épisodes de sécheresse dans l'espace et le temps (l'anomalie de 60 mm de pluie n'est pas la même partout et à chaque fois) ; pour quantifier les sécheresses et simplifier un phénomène complexe ; pour fournir une base pour la gestion de la sécheresse ; pour aider à définir les seuils, les déclencheurs, les niveaux d'alarme ; pour définir les conditions de catastrophe qui donnent droit à une aide gouvernementale et pour déterminer ou et quand des restrictions d'eau d'urgence peuvent être nécessaires ; pour , encore, représenter une anomalie en termes de climat passé (à partir des observations ou modèles) [22], [167], [168].

Étant donné que les caractéristiques de différentes formes de sécheresse ne semblent pas les mêmes, il est convenable de mentionner qu'il n'existe pas une technique unique et unifiée pour quantifier la gravité de la sécheresse. Pour juger de l'utilité globale des indices, Keyantash et Dracup (2002) [169] ont construit un ensemble de six critères de décision pondérés. Les critères ont été établis sur la base des propriétés souhaitables qu'un indice devrait idéalement posséder. Ces critères sont classés, selon l'ordre d'importance, comme suite : robustesse, traçabilité, transparence, sophistication, extensibilité et dimensionnalité. Les détails de ces six critères sont exposés dans le document de [169].

Parmi les indices de sécheresse exposés dans la littérature, nous avons choisis deux indices normalisés multi-échelles, SPI et SPEI. L'indice SPI (Standardized Precipitation Index), proposé par McKee et al. (1993) [6], qui est un indice de sécheresse reconnu par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) comme un outil de référence dans le suivi et la prévision des épisodes de sécheresse et des risques climatiques [170], [171]. Cependant, l'indice SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) développé par Vicente-Serrano et al. (2010) [169], est un indice de sécheresse récent utilisé dans les domaines de l'hydrologie, de l'écologie et de l'agriculture [173].

### IV.3.1 - Indice de précipitation normalisé – SPI

L'indice de précipitation normalisé SPI, est basé sur la transformation de données de précipitation en une densité de probabilité [172]. Les relevés de précipitation doivent être à long terme, au minimum de 30 ans, et de préférence entre 50 à 60 ans ou plus [174]. L'indice SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période (déficit ou excédent), par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période.

La série de données de longue durée, est ajustée à une distribution de probabilité transformée ensuite en une distribution normale, pour que l'indice SPI moyen soit égal à zéro et un écart-type égale à 1 [175]. McKee et al. (1993) [6] utilise une distribution gamma à deux paramètres, pour transformer la série de précipitation à une série normalisée. L'approche mathématique de l'indice SPI est détaillée dans plusieurs études tels que [6], [175], [176], [177], [178]. Le principal avantage de SPI est son pouvoir d'identifier les différents types de sécheresses et d'analyser ces impacts à différentes échelles de temps (de 1 à 24 mois), avec seulement les mesures des précipitations (P). L'inconvénient majeur de l'indice SPI est que son concept est basé uniquement sur les mesures de précipitation, il suppose que la sécheresse est contrôlée uniquement par la variabilité temporelle de précipitation. Cet indice ne considère pas d'autres variables qui peuvent aggraver l'intensité des épisodes de sécheresses, tels que la température et ses effets sur les ressources hydrique, à travers le mécanisme de l'évaporation. L'indice SPI est présenté mathématiquement par [179] :

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma} \quad (IV.2)$$

Pour une échelle de temps de 1 à 24 mois, on a :

P : Cumule des précipitations (mm).

$P_m$  : Moyenne des cumules des précipitations (mm).

$\sigma$ : Écart-type des cumules des précipitations (mm).

### IV.3.2 - Indice de Précipitation – Evapotranspiration normalisé - SPEI

L'indice SPEI, proposé par Vicente-Serrano et al. (2010) [172], est un indice qui avait apporté une solution à la limitation de l'indice SPI, tout en conservant ses avantages. L'indice SPEI, basé sur la précipitation (P) et l'évapotranspiration potentielle (PET), combine entre la

sensitivité des indices de Palmer (dernière version est sc-PDSI : self-calibrated Palmer Drought Severity Index, [180]) au processus d'évaporation, causé par les fluctuations et les tendances de la température, avec la simplicité de calcul et le caractère spatio-temporel de SPI. L'indice SPEI est basé sur le bilan hydrique du sol (Précipitation minus PET), mathématiquement il s'écrit comme suite :

$$D = P - PET \quad (IV.3)$$

Pour une échelle de temps, de 1 à 24 mois, on désigne :

D : Bilan hydrique (mm)

P : Cumule des précipitations (mm)

PET : Évapotranspiration potentielle (mm), évaluée dans ce travail par la formule de Thornthwaite (1948) [181]. La formule de Thornthwaite (1948), a été la première équation publiée permettant d'estimer l'évapotranspiration (sol et plantes) ; appliquée au départ aux USA, et elle exposée ainsi :

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I}\right)^{\alpha} \cdot f(h) \quad (IV.4)$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ;

I : indice thermique annuelle ; c'est la somme de douze indices mensuels :

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad , \quad i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (IV.5)$$

T : température moyenne mensuelle °C.

$\alpha$  : fonction complexe de l'indice I.

$$\alpha = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 777 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0.49239 \quad (IV.6)$$

$f(h)$  : Terme correctif qui tiens compte de nombre des jours ( $d$ ) d'un mois et de la durée du jour théorique ( $N$ ) [182].

$$f(h) = \frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \quad (IV.7)$$

La série de donnée est ajustée à une distribution de probabilité à trois paramètres log-logistique [172]. Mathématiquement SPEI suit la même approche utilisée par SPI, la transformation de la série de bilan hydrique de sol à une série normalisée avec une moyenne égale à zéro et un écart-type égale à 1. Une valeur de SPI (ou SPEI) égale à zéro, signifiée une probabilité de 50%. Ainsi les deux indices ont la même classification [183], voir Tableau (IV.1) suivant :

**Tableau IV.1** : Classification des indices de sécheresse SPI et SPEI

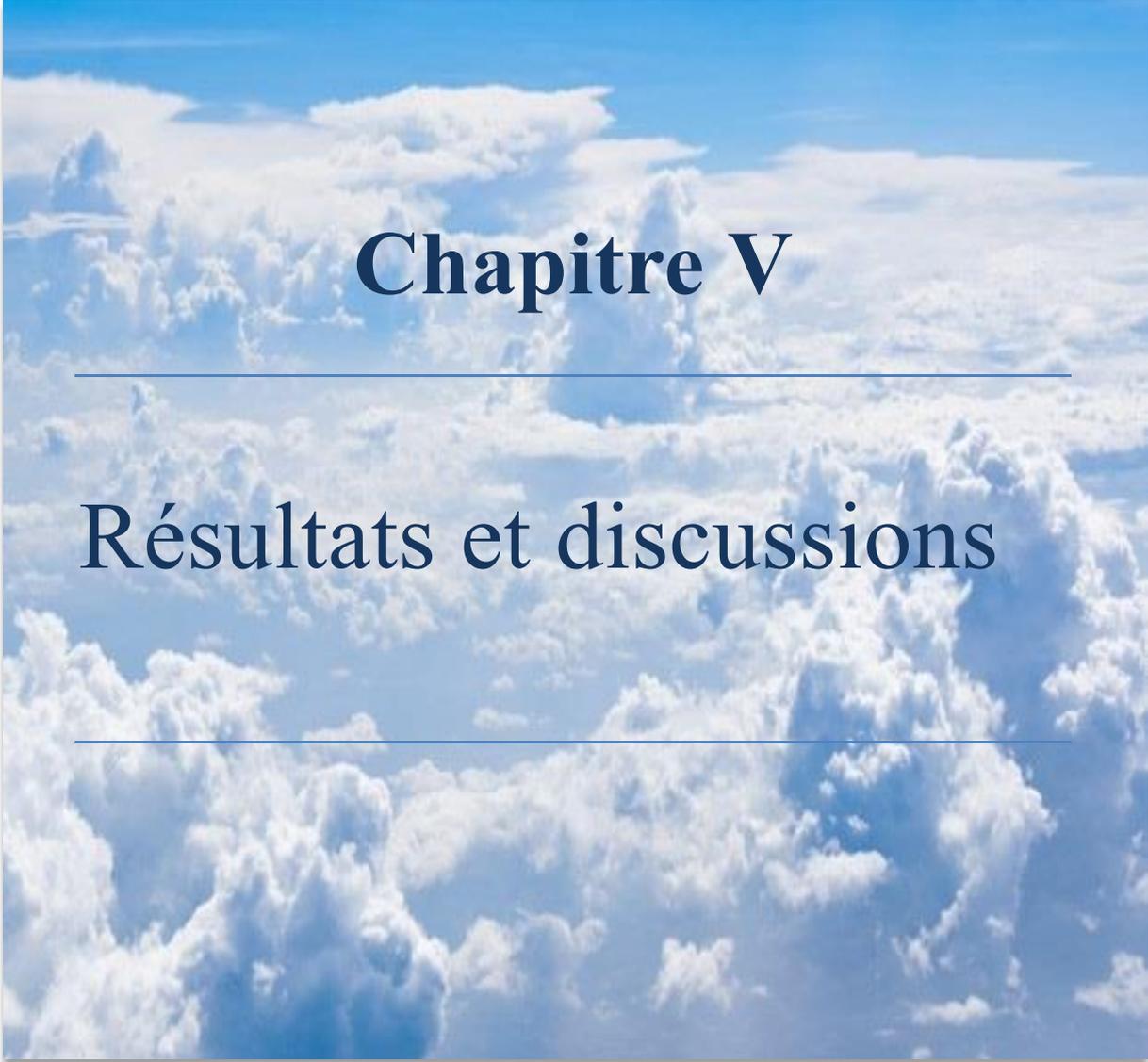
SPI (SPEI)	Category
2.0 et plus	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Sévèrement humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
0 à 0.99	Proche de la normale
0 à -0.99	Sécheresse légère
-1.0 à -1.49	Sécheresse modérée
-1.5 à -1.99	Sécheresse sévère
-2.0 et moins	Sécheresse extrême

Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la moyenne et les valeurs négatives indiquent des précipitations inférieures à la moyenne. Les valeurs positives de l'indice SPEI indique que les ressources hydriques sont suffisamment disponibles et que l'effet de l'évaporation est minimal ou négligeable, et d'où la balance hydrique se trouve en excès, cependant les valeurs négative de SPEI indique que l'évaporation, contrôlée principalement par la température, est supérieure à la précipitation, d'où le bilan hydrique se trouve est en déficit. Un épisode de sécheresse peut être déclenché quand les ressources hydriques sont insuffisantes ( $SPI < -1$ ), et peut être aussi déclenché quand le l'évaporation est considérable ( $SPEI < -1$ ), sous l'influence de l'accroissement de la température ou des vagues de chaleur, même si les ressources hydriques étaient suffisantes ( $SPI > 1$ ). D'où, il est préférable d'examiner les deux indices conjointement.

En cas de déficit, les échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau. L'humidité du sol réagit relativement rapide aux anomalies des précipitations aux courtes échelles de temps. Tandis-que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies des précipitations aux longues échelles de temps. En général, une sécheresse météorologique sévit de 1 à 3 mois, une sécheresse agricole de 1 à 6 mois, et une sécheresse hydrologique ou socio-économique de 6 à 24 mois [174]. Ces échelles sont réduites d'avantage avec un excès de température qui accentuera le potentiel de l'évapotranspiration.

Les études sur la vulnérabilité à la sécheresse dans le nord de l'Algérie ont principalement considéré l'indice SPI comme un indicateur de la gravité du phénomène, compte tenu de sa simplicité d'utilisation (par exemple [148], [158], [184], [185], [186]). Cependant, l'indice SPEI

a rarement été utilisé dans cette région, malgré sa similaire simplicité et sa capacité à identifier les épisodes de sécheresse en incluant l'effet de la température (c'est-à-dire le mécanisme d'évaporation) sur les ressources en eau, par exemple Berhail (2019) [47] pour l'échelle de temps annuelle de 12 mois.



# Chapitre V

---

## Résultats et discussions

---

# Chapitre V

## Résultats et discussions

---

### V.1 – Résumé de la démarche de l'étude

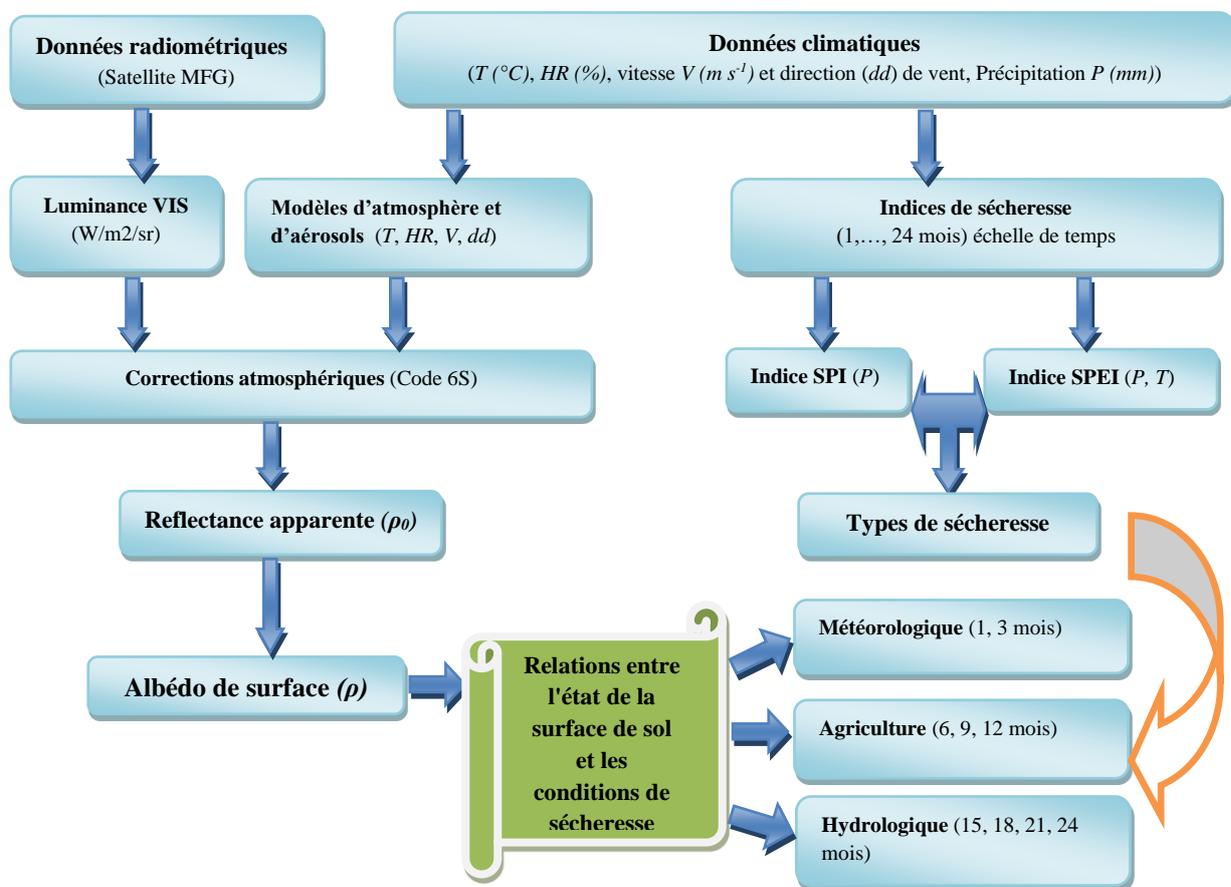
Afin de suivre l'impact de la sécheresse sur la dynamique de l'état de sol à travers les changements d'albédo de surface, nous avons exploités l'image référence de canal VIS du satellite METEOSAT, un produit associé à la nouvelle version de l'indice de poussières (IDDI). L'image référence VIS reflète uniquement l'état de sol, et où la situation atmosphérique est dans les meilleures conditions (sans nuage et sans poussières). L'albédo de surface est obtenu à partir de la luminance VIS de référence, calibrée (en  $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$ ) et corrigée des atténuations atmosphériques. L'albédo de surface est évalué pendant la période couverte par la succession de trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7). Cette étude de suivi de la dynamique de l'état de sol, au moyen de l'albédo de surface, concerne le site semi-aride de M'Sila (région de Hodna, centre du Nord de l'Algérie).

Dans cette étude, nous contenterions d'examiner la sensibilité de l'albédo de surface aux épisodes de sécheresse. Nous supposons que la variation de l'albédo de surface pour la localité désignée est principalement contrôlée par son bilan hydrique défini par la disponibilité des précipitations [162]. L'étude de sensibilité de l'albédo de surface aux épisodes de sécheresse, est abouti après confrontation de l'albédo à deux indices de sécheresse normalisés SPI et SPEI. Les valeurs mensuelles de l'albédo sont corrélées avec ceux de deux indices pendant une période plus d'une décennie, de 1994 (Février) jusqu'à 2006 (Juillet), qui est la date de fin du programme des satellites MFG à la position nominale.

Les indices de sécheresse SPI et SPEI, sont évalués au cours d'une période de référence de 34 ans, de 1980 à 2013, et aux échelles de temps de 1 à 24 mois (l'échelle de temps de 1 mois reflète les conditions de sécheresse du mois en cours ; cependant l'échelle de 6 mois pour Juin reflète les conditions de sécheresse des mois de Janvier jusqu'au Juin, etc.). Pour les deux indices, les échelles de temps de 1 à 24 mois, sont regroupés dans trois classes, tel que chaque classe corresponde à un type de sécheresse. La sécheresse météorologique est représentée par les

échelles de temps de 1 à 3 mois. La sécheresse d'agriculture, échelles de temps de 6 à 12 mois. La sécheresse hydrologique, échelles de temps de 15 à 24 mois. L'albédo de surface est corrélé ainsi avec chaque classe, afin d'examiner sa sensibilité aux trois types de sécheresse, selon les indications de SPI et de SPEI.

La démarche suivie, et qui a conduit aux résultats et conclusions ci-après, est exposée par Figure V.1 suivante. Figure V.1 résume la manière dont nous avons opéré pour caractériser les éventuelles relations entre l'état de la surface terrestre par le biais de l'albédo et les conditions de sécheresse.



**Figure V.1 :** Résumé de la méthode d'étude de la sensibilité de l'albédo de surface aux conditions de sécheresse.

Les résultats de l'étude se résument par (i) - la caractérisation des régimes mensuels et annuels de l'albédo de surface pour le site de M'Sila (au cours de la période 1994 – 2006), et (ii) – l'étude de la sévérité de la sécheresse au cours de la période de référence de 34 ans (1980 à 2013), et enfin (iii) - l'étude de la sensibilité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse SPI et SPEI, aux multiples échelles de temps.

## V.2 - Albédo de surface

Les entrées nécessaires pour exécuter le code 6S sont les conditions géométriques (date, heure d'acquisition de l'image et coordonnées du site) ; le modèle d'atmosphère et celui d'aérosol (contenu en ozone, contenu en vapeur d'eau, et type d'aérosol) ; le type de capteur ; l'altitude de la cible et de capteur ; et enfin la luminance de référence calibrée du canal VIS pour le module complémentaire "Atmospheric Correction". Le modèle d'atmosphère est défini en introduisant la teneur en gaz d'ozone (valeur fixée à 0.3 cm-atm) et le contenu en vapeur d'eau précipitable  $w$ , paramètre calculé selon l'équation de Reitan (1963) [187] :

$$w = e^{(0.1102+0.0614 \times T_d)} \quad (\text{V.1})$$

$T_d$  est la température de point de rosé, calculée par l'équation suivante [188]:

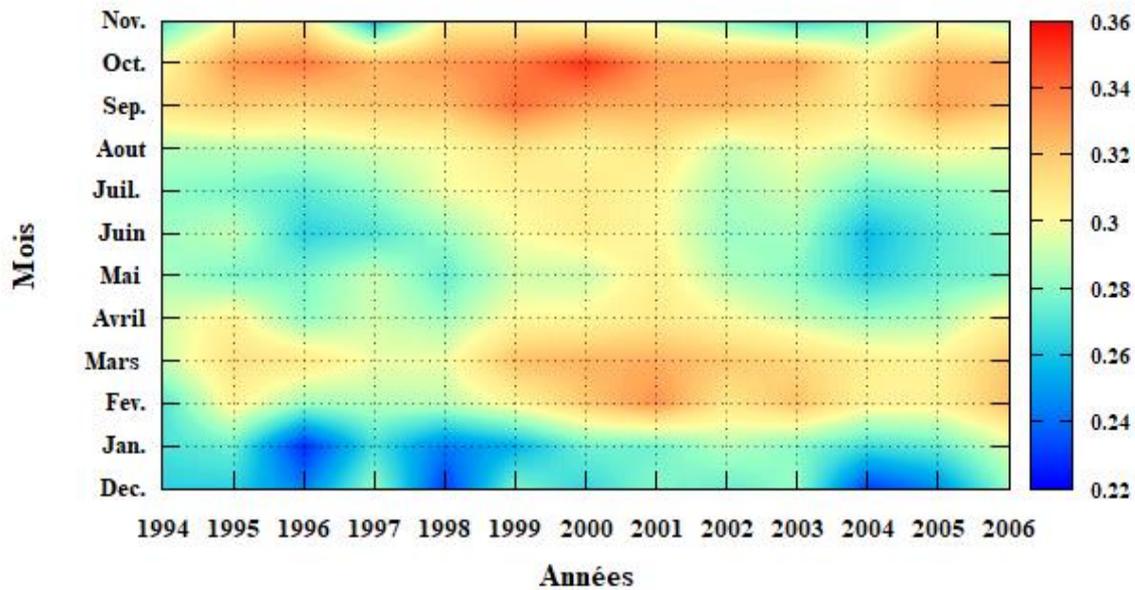
$$T_d = \left[ \left( \frac{H_r}{100} \right)^{1/8} \times (112 + 0.9 \times T_a) + 0.1 \times T_a - 112 \right] \quad (\text{V.2})$$

$H_r$  et  $T_a$  sont respectivement l'humidité relative en (%) et température de l'air en (°C).

En ce qui concerne le modèle d'aérosol, le modèle choisi est le type « Continental ». Selon Hess et al. (1998) [189], à propos des propriétés optiques des aérosols et des nuages (OPAC), les composants du modèle continental sont Dust-Like (*DL*), Water Soluble (*WS*), Soot (*SO*), et Oceanic (*OC*). Leur pourcentage volumique (%) dépend du type de matériau formant le sol frictionné par le vent venant de différentes directions. Pour M'Sila, les vents d'Été (principalement du Sud, du Sud - Est et du Sud - Ouest) sont chargés de sable riche en argile ; tandis que les vents du reste de l'année (principalement du Nord - Ouest) sont chargés des minéraux bruts tels que le sel, le gypse et le calcaire [162]. Pendant l'Été, le modèle d'aérosol présente les caractéristiques suivantes : **DL=0.583**, WS=0.396, SO=0.021 et OC=0. Toutefois, pour le reste de l'année, les caractéristiques suivantes sont prises en compte : DL=0.396, **WS=0.583**, SO=0.021 et OC=0. Avec le code 6S, la concentration de ces aérosols est représentée par l'épaisseur optique  $\delta$  à 550 nm, obtenue lorsque l'on introduit la visibilité horizontale en km (observation quotidienne au sol à 12h00 UTC). Tous les paramètres atmosphériques utilisés dans ce travail correspondent à la date du jour de référence.

Après les corrections atmosphériques et astronomiques, respectivement par les équations (III.6) et (III.7), Figure V.2 montre une carte de l'albédo de surface mensuel de M'Sila pendant la période comprise entre 1994 et 2006, soit 13×12 mois. Chaque mois manquant, comme

Décembre 1993, Janvier 1994 et Août à Décembre 2006, est remplacé par la valeur interannuelle du mois correspondant. La série mensuelle d'albédo de surface de chaque année commence par celle de mois de Décembre (début de l'année météorologique). Ceci permet de placer les saisons dans un ordre chronologique naturel : Hiver, Printemps, Été et Automne.



**Figure V.2 :** Carte de l'albédo de surface mensuel de M'Sila (Algérie), au cours de la période 1994 – 2006, [190].

Le régime saisonnier de l'albédo de surface est caractérisé par deux plages extrêmes (des pics représentés par deux grands axes prolongés selon l'axe des années). Le premier pic se situe autour de Mars et le second autour de Septembre - Octobre. Une plage intermédiaire, concentrée principalement sur les mois d'été. Enfin, une faible plage, caractérise principalement les mois d'hiver. On remarque que l'albédo de surface est plus intense pour les années successives 1999, 2000, 2001 et 2002, presque toutes les saisons étant affectées. Cela correspond au rapport de l'Organisation de l'Alimentation et de l'Agriculture FAO [191] à propos d'une sécheresse générale au Nord de l'Algérie et en Tunisie. Ça correspond aussi à la fin d'une longue période de sécheresse qui a affecté le Nord de l'Algérie (plus intense à l'Ouest qu'aux centre et l'Est) à partir de milieu des années 1970 jusqu'au début des années 2000 [149], [89], [153]. En général, l'état de la surface du sol en termes de présence ou d'absence de couvert végétal ou d'activités agricoles dépend de son bilan hydrique au cours de la période précédente (un mois ou plus). Ce bilan peut être excédentaire ou déficitaire, en fonction de l'apport pluviométrique et aux effets de mécanisme d'évaporation sur ces ressources hydriques.

### V.3 - Sévérité des épisodes de sécheresse

Les indices de sécheresses SPI et SPEI, pour M'Sila, sont calculés pour une période de référence de 34 ans, de 1980 à 2013, aux échelles de temps de 1 à 24 mois. Les corrélations entre les indications SPEI et SPI, au cours de la période de référence aux échelles de temps de 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 et 24 mois, sont montrées par Tableau V.1.

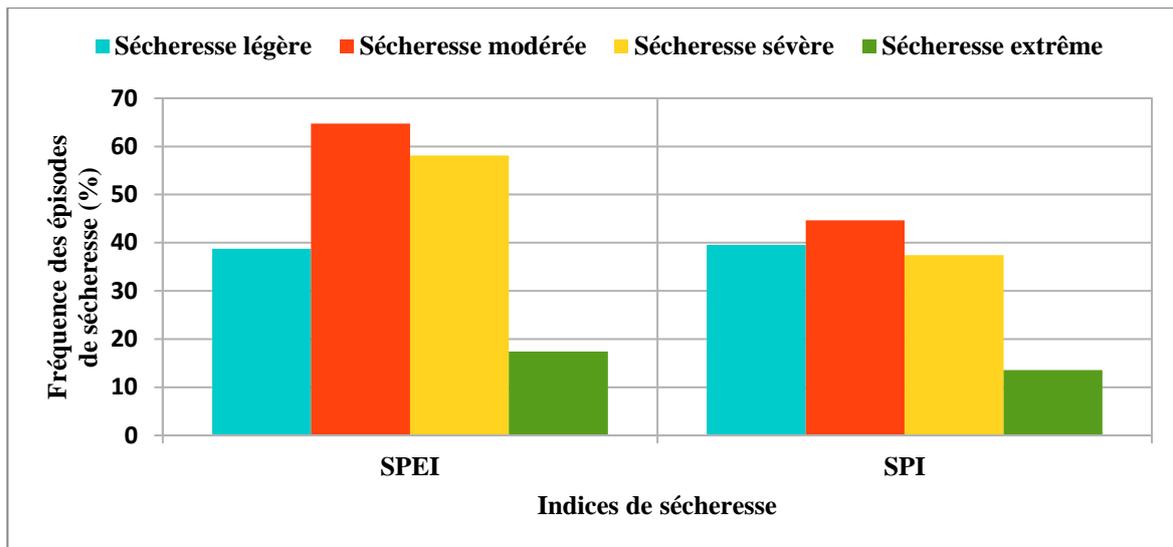
**Tableau V.1:** Corrélations entre les indications SPEI et SPI.

Échelle de temps (mois)	1	3	6	9	12	15	18	21	24
<b>Corrélation</b>	<b>0.76</b>	<b>0.72</b>	<b>0.69</b>	<b>0.64</b>	<b>0.63</b>	<b>0.63</b>	<b>0.63</b>	<b>0.62</b>	<b>0.61</b>

Les deux indices SPEI et SPI sont en bon accord aux échelles de 1 à 6 mois, qu'aux échelles de 9 mois et plus.

Notre étude concerne la période couverte par les trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7), entre Février 1994 et Juillet 2006. Les valeurs négatives de SPEI ou de SPI, indiquées par le Tableau IV.1, permettent de classer les types de sécheresse en quatre classes [171] : (a) - sécheresse légère, (b) - sécheresse modérée, (c) - sécheresse sévère, et (d) - sécheresse extrême. Pour M'Sila, Figure V.3 illustre, pour les quatre classes de sécheresse, la fréquence en (%) des épisodes de sécheresse détectés par SPEI et SPI au cours de la période d'étude (1984 – 2006), par comparaison à ceux de toute la période de référence (1980 – 2013).

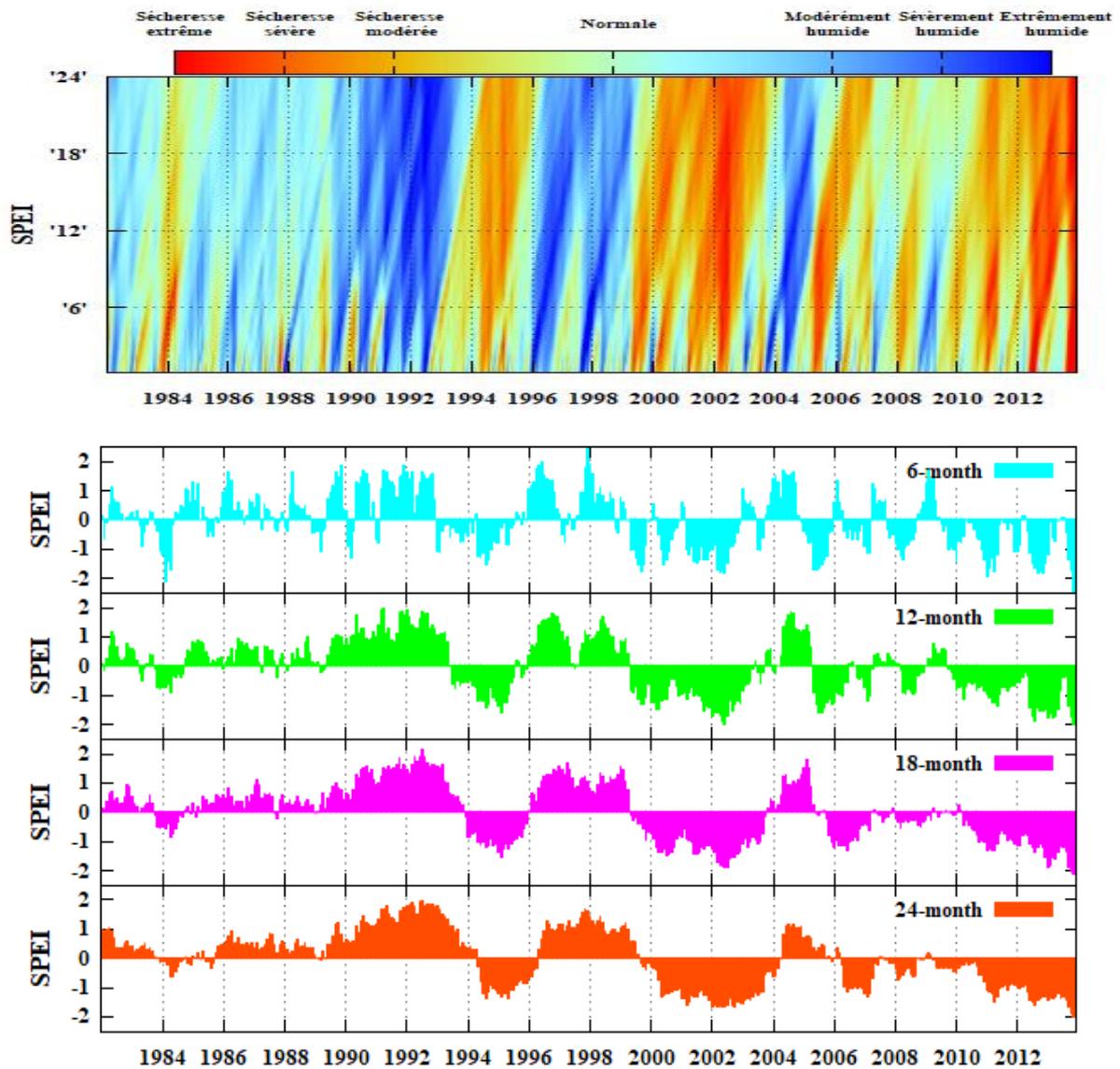
On remarque que pendant la période 1994 - 2006, les deux indices ont indiqués une fréquence presque identique (~ 40%) pour la sécheresse légère. Pour la sécheresse modérée, l'indice SPEI a indiqué 65% contre 45% indiqué par SPI, soit 30% d'indications en plus. Quant à la sécheresse sévère, l'indice SPEI a indiqué 58% contre 37% pour SPI, soit 36% d'indications en plus. En revanche, pour la sécheresse extrême, l'indice SPEI a indiqué 17% contre 13% pour SPI, soit 23.5% d'indications en plus. Il est clair que l'indice SPEI est plus sensible aux épisodes de sécheresse que l'indice SPI, notamment les classes de sécheresse modérée et sévère. Des résultats similaires ont été trouvés par Gurrupu et al. (2014) [192] ; Tan et al. (2015) [193]; Tirivarombo et al. (2018) [194].



**Figure V.3 :** Fréquence des épisodes de sécheresse pour M'Sila, selon SPEI et SPI, pendant la période d'étude (1994 – 2006), par rapport à la période de référence (1980 – 2013).

La Figure V.4, montre une carte de l'indice SPEI (en haut) aux échelles de temps de 1 à 24 mois (avec 6 mois d'unité), au cours de la période de 1982 - 2013 (avec 2 ans d'unité). Selon le Tableau IV.1, les classes de sécheresse de type proche à la normale et légère peuvent être regroupés en une seule classe légère [180]. Au bas de la Figure V.4, des représentations individuelles de l'indice SPEI sont exposées, aux échelles de temps de 6, 12, 18 et 24 mois.

On note que la période avant 1993 en général est nettement riche en ressources en eau et limitée en séquences de sécheresse par rapport à la période totale, particulièrement aux échelles de temps de 12, 18 et 24 mois. Nous notons également que la séquence de 1990 à la fin de 1992 est fortement humide, en particulier pour l'échelle de 12 mois et plus. Cependant, quelques séquences de sécheresse sont identifiées, aux échelles de temps entre 6 et 12 mois, par exemple au début de 1984. Par la suite, entre 1993 et 1996, une période faiblement à modérément sèche est enregistrée, l'indice SPEI se situant autour de -1.5. Cette période de faiblement à modérément sèche a duré près de 3 ans. Une nouvelle période humide s'est produite entre 1996 et 1999, sévèrement humide dans certaines séquences (par exemple avec l'échelle de temps de 6 mois : Avril à Juin 1996, Novembre 1997 à Février 1998) et modérément humide aux échelles de temps de 18 et 24 mois ( $1.0 < \text{SPEI} < 1.5$ ). Enfin, une longue période sèche est étendue de Mai 1999 à Décembre 2013. Cette période contient une seule remarquable séquence modérément humide, commencée en Septembre 2003 et terminée en Août 2004, ce qui se voit clairement avec l'échelle de temps de 12 mois et plus.



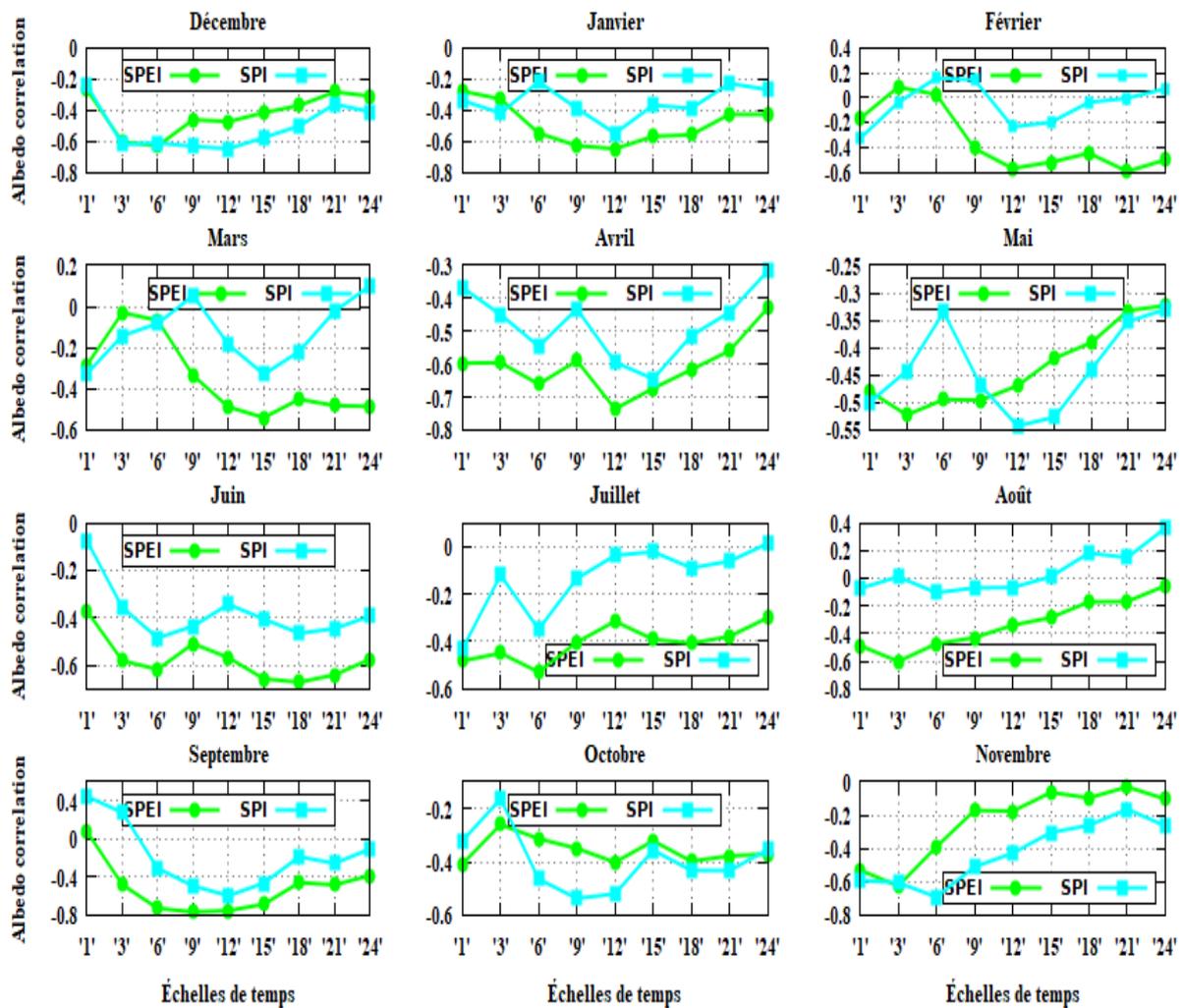
**Figure V.4 :** Carte de l'indice de sécheresse SPEI de 1982 à 2013 (en haut), pour M'Sila (Algérie), aux échelles de temps de 1 à 24 mois. En bas, individuelles présentations de l'indice SPEI aux échelles de temps "6" (cyan), "12" (vert), "18" (rose), et "24" mois (rouge), [190].

## V.4 - Sensitivité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse

Cette discussion porte sur la sensibilité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse à multiple échelles de temps. La question qui se pose est la suivante : lequel des deux indices de sécheresse est le mieux adapté pour montrer l'impact de phénomène de sécheresse sur l'albédo de surface, puis sur la dynamique de l'état du sol ? Évidemment, la réponse sera en faveur de l'indice le mieux corrélé avec l'albédo de surface. Dans tous les cas, la relation entre l'albédo de surface

et les indices de sécheresse est négative ([97], [72], [195]). L'augmentation de l'albédo, sauf pour un sol recouvert de la neige, indique un sol sec dépourvu d'humidité et de toute activité végétale, le sol renvoie plus de rayonnement qu'il en absorbe. La dépendance de l'albédo de surface à l'humidité du sol a été étudiée dans plusieurs études dans lesquelles une corrélation négative entre les deux variables a été trouvée ([196], [197], [198]). He et al. (2019) [199] ont démontré une diminution de l'albédo du sol avec une augmentation de l'humidité du sol à partir des données de l'AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth), où une relation exponentielle négative a été trouvée pour différentes périodes et différents endroits.

La Figure V.5, rassemble les coefficients de corrélation mensuels entre l'albédo de surface  $\rho$  et les deux indices de sécheresse (SPEI et SPI) aux échelles de temps "1", "3", "6", "9", "12", "15", "18", "21" et "24" mois, pendant la période comprise entre février 1994 et juillet 2006.



**Figure V.5 :** Corrélations mensuelles entre l'albédo de surface, pour M'Sila (Algérie), et les indices de sécheresse SPEI et SPI, aux échelles de temps "1", "3", "6", "9", "12", "15", "18", "21" et "24" mois, pendant la période comprise entre février 1994 et juillet 2006, [190].

Nous remarquons que :

(i) - la corrélation de l'albédo de surface avec les deux indices de sécheresse à l'échelle de temps de 1 mois (mois courant) n'est pas nécessairement le meilleur indicateur d'un épisode de sécheresse (donc d'une variation de l'albédo). Cela montre l'utilité de l'étude aux échelles de temps plus longues ;

(ii) - la corrélation de l'albédo de surface avec SPEI et SPI suit généralement la même allure, mais à des intensités différentes. Pour les groupes de mois suivants, la corrélation est d'ordre décroissant :

- ✓ de l'ordre de 0.9, pour les mois d'Avril, Juin, Juillet, Août, Septembre, Novembre et Décembre ;
- ✓ de l'ordre de 0.4, pour les mois de Janvier, Mai et Octobre ;
- ✓ de l'ordre de 0.1, pour les mois de Février et Mars.

Les deux indices sont en meilleure concordance avec l'albédo de la surface pour le premier groupe des mois que pour le deuxième et troisième groupe de mois.

(iii) - l'indice SPI est mieux corrélé avec l'albédo de surface uniquement pour les mois d'octobre, novembre et décembre (début de la période pluviométrique pour M'Sila). Pour le reste des mois, l'indice SPEI est le mieux corrélé avec l'albédo de surface, ceci pour la majorité des échelles de temps.

Pour mieux caractériser la sensibilité de l'albédo de surface aux indices de sécheresse aux échelles de temps, leurs coefficients de corrélation avec l'albédo de surface sont regroupés en trois classes. Ces classes correspondent à trois catégories de sécheresse : météorologique, agricole et hydrologique [200], [201]. Ces classes sont :

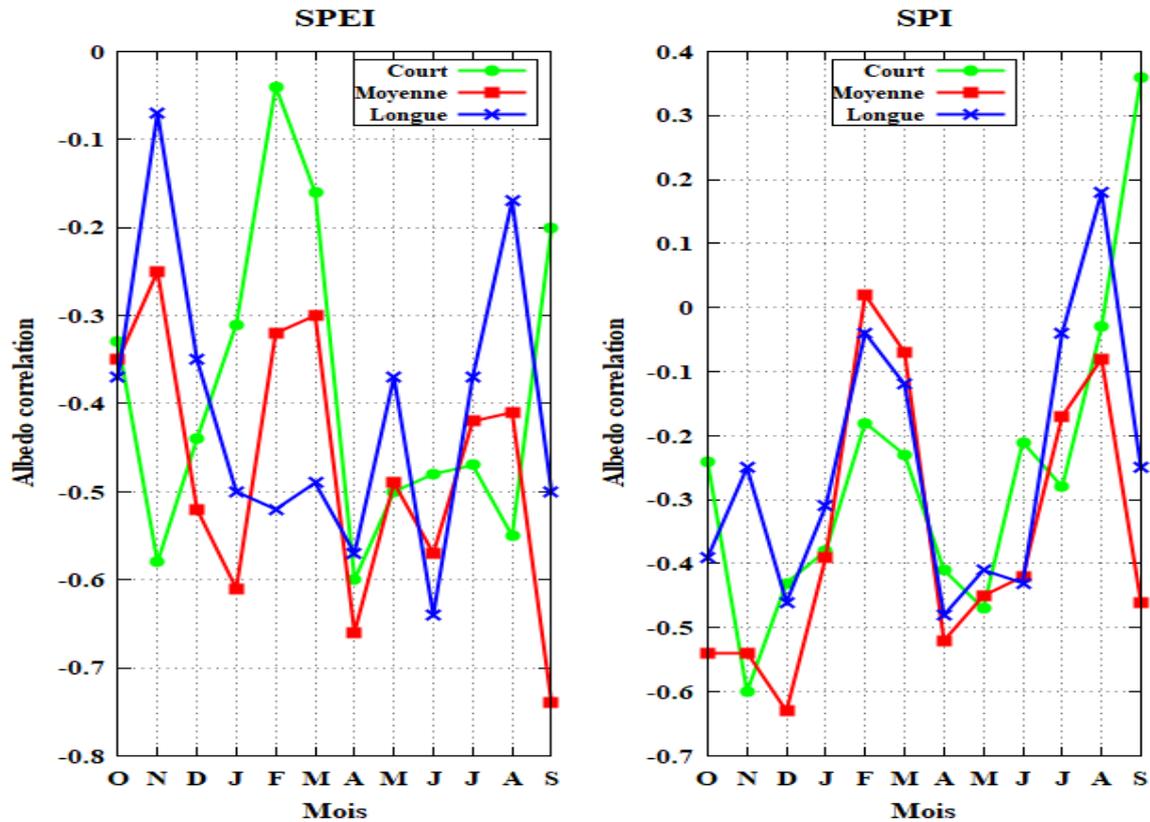
(i) – Courte échelle (C) : correspond à la moyenne des coefficients de corrélation de 1 et 3 mois, échelles de temps qui correspondent à la sécheresse de type météorologique ;

(ii) - Moyenne (ou modérée) (M) : correspond à la moyenne des coefficients de corrélation de 6, 9 et 12 mois, échelles de temps qui correspondent à la sécheresse de type agriculture ;

(iii) - Longue échelle (L) : correspond à la moyenne des coefficients de corrélation de 15, 18, 21 et 24 mois, échelles de temps qui correspondent à la sécheresse de type hydrologique.

La Figure V.6, montre les corrélations mensuelles de l'albédo de surface avec les trois classes d'échelles de temps, pour chacun des indices SPEI et SPI. Sur l'axe X, les mois sont classés selon

la notion d'année hydrologique, qui commence généralement en Octobre et se termine en Septembre.



**Figure V.6 :** Corrélations mensuelles de l'albédo de surface avec les trois classes d'échelles de temps, M'Sila (Algérie), pour chacun d'indices SPEI et SPI, [190].

Nous remarquons que :

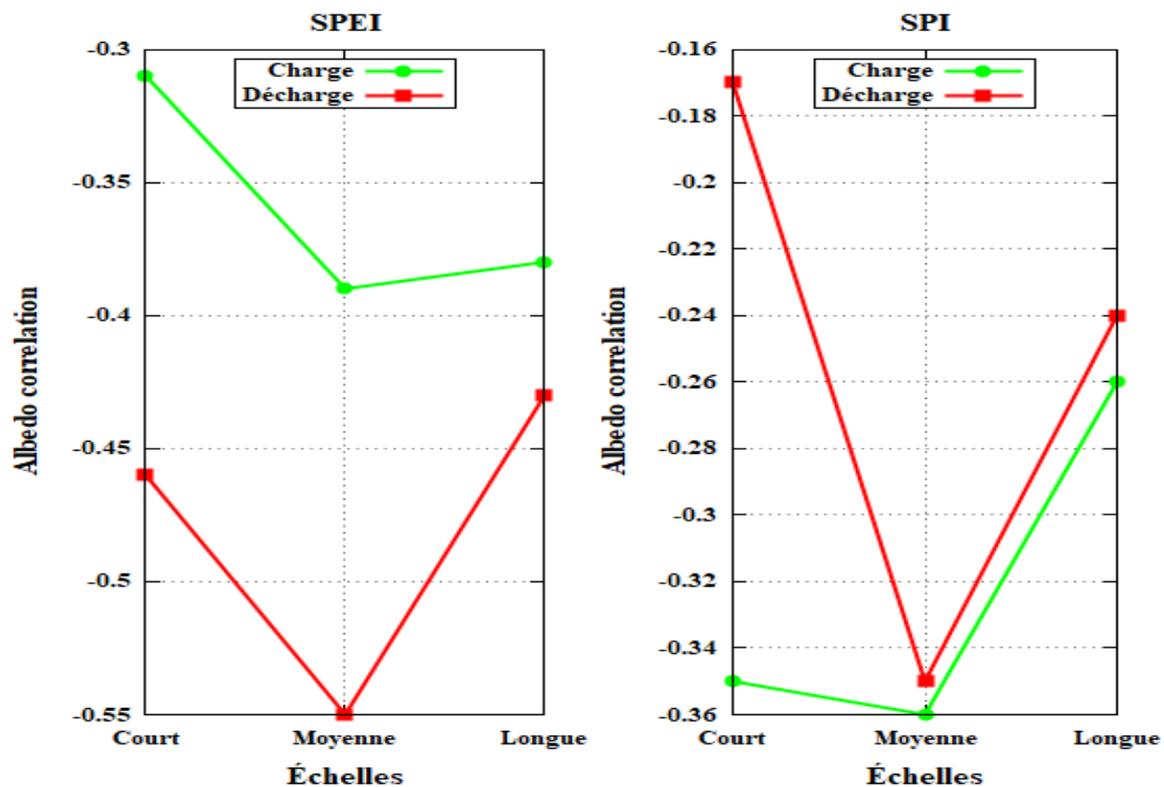
- (i) - Le profil des corrélations mensuelles, pour les trois classes d'échelles de temps, est plus ordonné avec l'indice SPI qu'avec l'indice SPEI. L'indice SPI dépend que de la précipitation (P), alors que l'indice SPEI dépend de deux variables : précipitation (P) et l'évaporation (ETP). L'évaporation dépend à leur tour de plusieurs facteurs climatiques, les plus importants étant l'ensoleillement et vagues de chaleur [8], les forts vents et la faible humidité relative [9] ;
- (ii) - Pour les indices SPI et SPEI, la relation est meilleure entre les deux classes d'échelles de temps Moyenne (M) et Longue (L), ce qui montre que les conditions se stabilisent et se ressemblent aux moyenne et longue échelle pour le même indice. Les coefficients de corrélation, entre la moyenne et longue échelle, étant de 0.85 avec SPI et de 0.54 avec SPEI.
- (iii) - L'albédo de surface est mieux corrélé (plus sensible) à l'indice SPEI plutôt vers la fin de l'année hydrologique, en particulier avec la moyenne et longue échelle de temps ;

(iv) - L'albédo de surface est mieux corrélé (plus sensible) à l'indice SPI plutôt à partir de début de l'année hydrologique, en particulier avec la moyenne et longue échelle de temps.

L'année hydrologique comprend généralement deux périodes [183] :

- (i) - une période de recharge et d'alimentation en ressources d'eau, d'Octobre à Mars ;
- (ii) - une période de drainage et de consommation de ces ressources hydrique (période de croissance de végétations), d'Avril à Septembre.

La Figure V.7, montre, pour SPEI et SPI, la sensibilité de l'albédo de surface à la période de charge et de décharge les ressources d'eau, selon les trois classes d'échelle de temps : courte, moyenne et longue.



**Figure V.7 :** Sensitivité de l'albédo de surface mensuel aux périodes de recharge et de décharge des ressources d'eau, M'Sila (Algérie), selon les trois classes d'échelle de temps, [190].

Les sensibilités de l'albédo de surface, selon SPEI et SPI, aux périodes de charge et de décharge sont opposées. Selon l'indice SPEI, l'albédo de la surface est plus sensible à la période de décharge (période de croissance des végétaux). Cependant, selon l'indice SPI, l'albédo de la surface est plus sensible à la période de charge et d'alimentation (période des pluies). Pour les

deux indices, la sensibilité est meilleure avec la classe d'échelle de temps moyenne (ou modérée), qui est la moyenne des corrélations des échelles de temps de 6, 9 et 12 mois.

Parmi les trois échelles de temps de la classe modérée (6, 9 et 12 mois), on constate pour l'indice SPEI que l'échelle de 6 mois est plus appropriée pour la période de décharge. SPEI-6 est classé en première position pendant quatre mois successifs (Mai, Juin, Juillet et Août), tels que les coefficients de corrélation sont égaux à 0.58 pour SPEI-6, à 0.53 pour SPEI-9 et à 0.52 pour SPEI-12. Toutefois, pour l'indice SPI, toujours pour la même classe modérée (6, 9 et 12 mois), mais pendant la période de charge et d'alimentation d'eau, l'échelle de temps de 12 mois est plus appropriée. Le SPI-12 est classé en première position pendant les quatre derniers mois de la période de charge (Décembre, Janvier, Février et Mars), tels que les coefficients de corrélation sont égaux à 0.43 pour le SPI-12, à 0.32 pour le SPI-6 et à 0.31 pour le SPI-9.

Nos résultats concernant l'intérêt de considérer une classe d'échelle de temps modérée (6, 9 et 12 mois, ensemble ou séparément) dans la surveillance et le suivi de l'état de sécheresse des surfaces terrestre sont cohérentes avec une multitude d'études qui avaient généralement considérée SPI et SPEI.

Pour la région du fleuve Jourdain, Törnros et Menzel (2014) [200] ont constatés qu'une échelle de temps trop courte ne permet pas de reconnaître les périodes les plus longues de conditions anormalement humides ou sèches. Ils ont également constaté qu'une échelle de temps trop longue inclut des informations redondantes. Cette étude a identifié le SPEI-6 (échelle de temps de 6 mois) comme l'indice le plus approprié quand on s'intéresse à la sécheresse agricole.

Des tendances significatives à des conditions plus sèches sont observées, à l'échelle temporelle annuelle SPEI-12 (échelle de temps de 12 mois) en particulier au printemps et en été dans la région autonome de Ningxia Hui en Chine [193], et avec l'indice SPI (uniquement) à l'échelle temporelle de 9 et 12 mois dans les plaines du nord-ouest de l'Algérie [186]. En outre, dans les prairies canadiennes, Gurrapu et al. (2014) [192] ont conclu que le débit des cours d'eau à la fin du printemps, en été et au début de l'automne est fortement influencé par l'indice SPEI à l'échelle de 6 et 9 mois.

Vicente-Serrano et López-Moreno (2005) [202] ont utilisé l'indice SPI (avant de proposer l'indice SPEI en 2010), ont constatés que les réservoirs de stockage répondent généralement à des échelles de temps SPI plus longues (7 à 10 mois). En été (période de décharge), les réservoirs de stockage ne présentent pas de corrélation supérieure à 0.55 avec l'indice SPI. Au contraire, pendant l'automne et l'hiver (période de charge), les corrélations entre l'indice SPI et les variables hydrologiques sont plus robustes et même supérieures à 0.8.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique et vitale que l'eau. Compte tenu de la demande croissante d'eau, tant en termes de quantité que de gamme d'utilisation, la variabilité des précipitations est une question plus sensible et plus importante aujourd'hui qu'à tout autre moment dans le passé. La pénurie de l'eau ou la diminution des niveaux de ses réserves, conduira à l'apparition et l'installation de la sécheresse. La sécheresse peut se produire dans pratiquement tous les régimes climatiques, dans les zones à forte comme à faible pluviométrie. Les conséquences sont dramatiques, particulièrement pour les sociétés vulnérables. Les causes de la sécheresse sont notamment naturelles et/ou anthropiques. Les causes naturelles sont proclamées principalement aux variabilités des facteurs climatiques naturels. Les causes anthropiques, quant-à-eux, s'adressent aux effets néfastes de l'homme sur l'environnement suite aux mauvaises pratiques dans la gestion des terres et les ressources hydriques ; suite aussi aux changements climatiques récentes observée depuis mi-siècle dernier, et dont les activités industrielles sont le premier responsable. Cela indique que les humains participent à la cause des sécheresses, ils souffrent de leurs impacts et ils font face à leurs effets.

La surveillance de la sécheresse est un défi, étant donné les dimensions spatio-temporelles complexes du phénomène et sa gravité. Traditionnellement, la surveillance de la sécheresse s'appuie principalement sur des indicateurs et des indices climatiques. Les cartes des indices de sécheresse basés sur le climat peuvent avoir une valeur limitée car elles fournissent une vue spatiale généralisée des conditions et des variations de la sécheresse sur de grandes zones. Ainsi, des approches de surveillance de la sécheresse améliorées et efficaces sont essentielles pour soutenir les systèmes d'alerte précoce et la planification proactive de la sécheresse. La télédétection par satellite a permis, ces dernières décennies, de réaliser des observations de la Terre à une résolution spatiale et temporelle élevée. L'imagerie de télédétection fournit des mesures spectrales spatialement continues sur de vastes zones qui reflètent à la fois les caractéristiques de l'atmosphère, de la surface terrestre et d'océans. Par conséquent, les données de télédétection sont de plus en plus utilisées pour la surveillance des sécheresses sur de grandes surfaces. Des paramètres biophysiques liés à la surface terrestre, acquis à distance, sont souvent utilisés pour suivre et montrer la gravité de la sécheresse sur l'environnement, aux échelles locale et planétaire, tels que les indices de végétation, la température de la surface terrestre, l'humidité du sol et l'albédo de surface. La série des satellites géostationnaires METEOSAT de

première génération (MFG), à la position nominale (0°E) au-dessus du golfe de Guinée en Afrique depuis la fin des années 1970, sont un outil important qui facilite l'observation des conditions de la surface terrestre à multiples échelles de temps. L'albédo de la surface déduit des mesures de ces satellites, et qui est le rapport entre le rayonnement réfléchi par la surface et le rayonnement solaire incident, peut révéler la dynamique de la surface terrestre qui s'est produite au fil des ans.

Grâce à l'utilisation de l'image référence du canal VIS (un sous-produit de la base de données IDDI), il a été possible de récupérer l'albédo de surface pour la localité semi-aride de M'Sila (centre du nord de l'Algérie). Cela a été possible après correction de la luminance de référence du canal VIS, en particulier des atténuations atmosphériques, par le code transfert radiative 6S. Nous avons constaté que le régime saisonnier de l'albédo de surface est caractérisé par deux plages des valeurs extrêmes (des pics). Le premier pic autour de Mars et le second autour de Septembre - Octobre. Une plage des valeurs intermédiaire, concentrée principalement sur les mois d'été. Enfin, une plage des faibles valeurs, caractérisant les mois d'hiver. L'albédo de surface pour M'Sila était plus intense pour les années successives 1999, 2000, 2001 et 2002, presque toutes les saisons étant affectées. Ceci correspond aux conditions de sécheresse qui ont marqués, pendant cette période, non seulement le nord de l'Algérie mais aussi les pays de Maghreb voisins.

L'albédo de surface établi a été corrélé avec deux indices de sécheresse fréquemment utilisés dans les domaines de l'hydrologie et de l'agronomie, les indices SPI et SPEI. L'indice SPI dépend que de la précipitation (P), alors que l'indice SPEI dépend de deux variables : précipitation (P) et l'évaporation (ETP). L'évaporation dépend à leur tour de plusieurs facteurs climatiques, les plus importants étant l'ensoleillement, vagues de chaleur, vents forts, et humidité relative faible.

Le lieu de M'Sila fait partie de bassin versant de Hodna. Au nord du bassin, l'écran montagneux formé par la chaîne Hodna et les monts du Tetri forment en effet une véritable barrière naturelle contre les perturbations venant particulièrement de direction de la méditerranée, empêchant ainsi la progression des vents chargés d'humidité. Les ressources hydriques de la région proviennent principalement des eaux transportées par l'écoulement des Oueds de domaine tellien (nord), tels que l'Oued Ksob, Oued Barika, Oueds Berhoun, Oued El Leham, et bien d'autres. Ces conditions fait de lieu d'étude de M'Sila, un lieu sensible à la sécheresse, en cas

ou les débits des cours d'eau diminuent suite à l'irrégularité de la pluviométrie dans les régions voisines.

Les résultats d'application des indices de sécheresse normalisés à la situation de M'Sila, montrent que la détection des épisodes de sécheresse est meilleure avec l'indice SPEI qu'avec l'indice SPI. Pour les deux indices, la sensibilité de l'albédo de surface aux épisodes de sécheresse à l'échelle d'un mois (mois en cours) ne semble pas être nécessairement un indicateur approprié pour témoigner l'installation d'un épisode de sécheresse. Cela montre l'utilité de l'étude à des échelles de temps plus longues. Pour les deux indices, l'albédo de surface semble plus sensible aux épisodes de sécheresse à une classe d'échelle de temps moyenne (moyenne des coefficients de corrélation à 6, 9 et 12 mois), qui correspond à la sécheresse de type agricole. L'albédo de surface à cette classe d'échelles moyenne semble plus sensible, selon l'indice SPEI (principalement l'échelle de 6 mois), pendant la période de consommation des ressources d'eau et de croissance des plantes (Avril à Septembre), et selon l'indice SPI (principalement l'échelle de 12 mois), pendant la période de chargement et d'approvisionnement en ressources d'eau (Octobre à Mars).

L'association de l'indice multi-scalaire SPEI dans les études d'anomalies pluviométriques et de la vulnérabilité à la sécheresse en Algérie est malheureusement très limitée, malgré le potentiel de l'indice à détecter, à suivre et même à prévoir le phénomène de sécheresse par comparaison avec l'indice multi-scalaire SPI. Nous considérons que cette étude fonde les bonnes bases et fournit les outils nécessaires pour caractériser le phénomène de la sécheresse en Algérie.

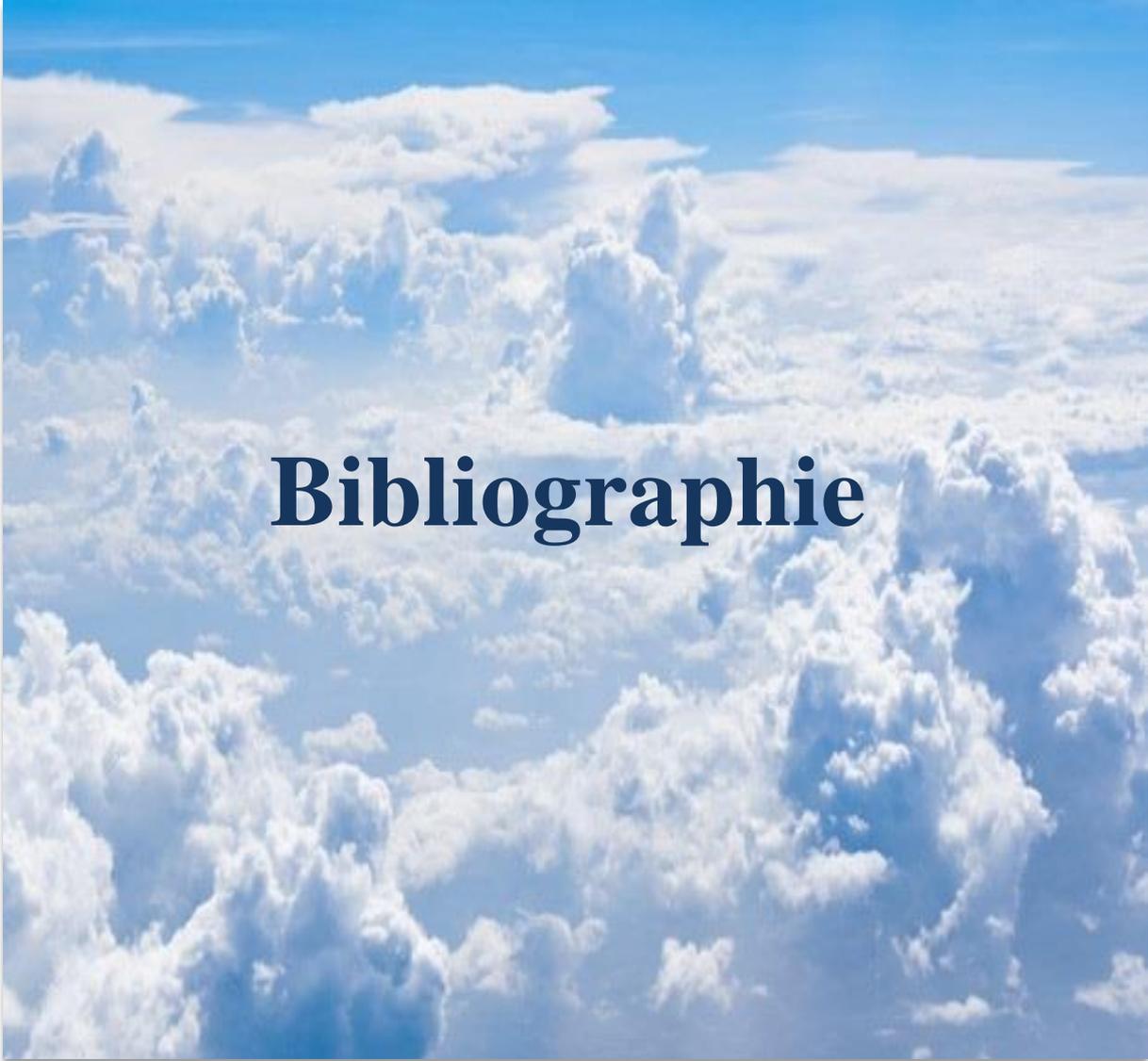
En cas de généralisation dans l'espace et le temps, c'est-à-dire étendre l'étude aux données de METEOSAT deuxième génération (MSG) à la position nominale, ce travail peut contribuer à identifier les zones sujettes à la désertification qui peuvent être causées par des périodes de sécheresse prolongées (aridité). Dans ce domaine et avec les données MSG, nous ne nous limiterons pas à l'albédo de surface, mais nous pourrions également inclure les indices de végétation et l'humidité du sol ; des paramètres sont maintenant obtenus à distance.

Nous suggérons aussi la nécessité de mener des études approfondies sur :

1 - L'impact de changement climatique sur les écosystèmes régionaux, afin de prévoir les mesures d'adaptation et d'atténuation nécessaires ;

2 – Généralisé l'application des indices normalisés dans le domaine de suivi de la sécheresse, particulièrement l'indice SPEI, sur tout le territoire national, afin de supporter les systèmes d'alerte précoce et la planification proactive de la sécheresse. L'utilisation des méthodes de généralisation, comme la méthode d'interpolation de Krigeage, s'avère très pratique. Le Krigeage est une méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le Krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire ; il s'applique parfaitement sur les mesures de la pluviométrie ;

3 – Supporter les études qui s'intéressent à la classification des zones du nord de l'Algérie, selon les origines et type des précipitations. Ceci s'avère nécessaire dans les planifications des infrastructures hydrauliques (barrages, puits, aménagement des parcours des Oueds et des Deltas, etc.).



# **Bibliographie**

- [1] . Nédjraoui D, Bédrani S. La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. Article in *VertigO*. DOI: 10.4000/vertigo.5375. (2008).
- [2] . The European Commission's science and knowledge service (2019).  
<https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/desertification-and-drought> (Accès 01 mars 2021)
- [3] . UNECA. Africa Review Report on Drought and Desertification. Fifth Meeting of the Africa Committee on Sustainable Development (ACSD-5) Regional Implementation Meeting (RIM) for CSD-16. Addis Ababa, l'Éthiopie. 71 pp. (2007).
- [4] . Lake PS. Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshw Biol* 48:1161–1172. (2003). <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x>.
- [5] . Crausbay SD, Ramirez AR, Carter SL, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bull Am Meteorol Soc.*, (2017). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0292.1>
- [6] . McKee TB, Nolan J, Kleist J The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Prepr Eighth Conf Appl Climatol Amer Meteor, Soc*, 179-184, (1993).
- [7] . Ten Broek J, Teuling AJ, Van Loon AF Comparison of Drought Indices for the Province of Gelderland, the Netherlands. *Wageningen Univ Wageningen, Netherlands*: 1–83, ( 2014).
- [8] . Teuling AJ, Van Loon AF, Seneviratne SI, et al. Evapotranspiration amplifies European summer drought. *Geophys Res Lett*. (2013). <https://doi.org/10.1002/grl.50495>
- [9] . Sönmez FK, Kömüscü AÜ, Erkan A, Turgu E An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Nat Hazards*. (2005). <https://doi.org/10.1007/s11069-004-5704-7>
- [10] . Safar-Zitoun M PLAN NATIONAL SECHERESSE ALGERIE - LIGNES DIRECTRICES EN VUE DE SON OPERATIONNALISATION. MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DU DEVELOPPEMENT RURALET DE LA PECHE - DIRECTION GENERALE DES FORETS, Algérie, (2019).
- [11] . Wilhite DA, Glantz MH Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. 20, (1985).  
<http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20>
- [12] . Wilhite DA Understanding the Phenomenon of Drought. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. 50, (1993). <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/50>).
- [13] . OMM Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs. OMM-N° 1006, (2006).

- [14] . Sattar MN, Kim TW Probabilistic characteristics of lag time between meteorological and hydrological droughts using a Bayesian model. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 29, 709-720, (2018). doi: 10.3319/TAO.2018.07.01.01.
- [15] . Wang W, Ertsen M W, Svoboda M D, Hafeez M Propagation of Drought: From Meteorological Drought to Agricultural and Hydrological Drought. *Advances in Meteorology*. (2016). <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6547209>
- [16] . Haile GG, Tang Q, Sun S, Huang Z, Zhang X, Liu X. Droughts in East Africa: Causes, impacts and resilience. *Earth-science reviews*, 193, 146-161. (2019).
- [17] . Taibi S, Messelmi I, Meddi M, Feddal MA Recent Rainfall Variability in the South-West Mediterranean Region and Links with Teleconnection Patterns. In: *Patterns and Mechanisms of Climate, Paleoclimate and Paleoenvironmental Changes from Low-Latitude Regions*. (Zhang Z., Khélifi N., Mezghani A., Heggy E. ) (eds) CAJG 2018. *Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sus.* pp 111–114. (2019).
- [18] . Zerouali B, Mesbah M, Chettih M, Djemai M Contribution of cross time-frequency analysis in assessment of possible relationships between large-scale climatic fluctuations and rainfall of northern central Algeria. *Arab J Geosci*. (2018).  
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3728-7>
- [19] . Massei N, Durand A, Deloffre J, Dupont JP, Valdes D, Laignel B Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in Northwestern France over the past 35 years. *J Geophys Res*. (2007). 112:D09121.  
doi:10.1029/2005JD007000
- [20] . Pomposi C, Giannini A, Kushnir Y, Lee DE Understanding Pacific Ocean influence on interannual precipitation variability in the Sahel. *Geophys Res Lett* 43(17):9234–9242, (2016). <https://doi.org/10.1002/2016GL069980>.
- [21] . Martín-Vide J, Sanchez-Lorenzo A, Lopez-Bustins JA, Cordobilla MJ, Garcia-Manuel A, Raso JM Torrential rainfall in northeast of the Iberian Peninsula: synoptic patterns and WeMO influence. *Adv Sci Res* 2:99–105, (2008).
- [22] . Maliva R., Missimer T. Aridity and Drought. In: *Arid Lands Water Evaluation and Management*. Environmental Science and Engineering (Environmental Engineering). Springer, Berlin, Heidelberg. (2012). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2)
- [23] . Van Loon AF, Gleeson T, Clark J, et al. Drought in the anthropocene. *Nat. Geosci.* 9 (2), 89. (2016a).

- [24] . Van Loon AF Hydrological drought explained. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 2 (4), 359–392. (2015).
- [25] . Huang Z, Hejazi M, Li X, Tang Q., et al. Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971–2010 and analysis of their spatiotemporal patterns. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (4), 2117–2133. (2018).
- [26] . Wada, Y., van Beek, L.P.H., Wanders, N., Bierkens, M.F.P.. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environ. Res. Lett.* 8 (3), 034036, (2013).
- [27] . Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540 (7633), 418–422, (2016).
- [28] . FAO Proactive approaches to drought preparedness – Where are we now and where do we go from here? Rome. (2019). 51 pp.
- [29] . Pandey DN, Gupta AK, Anderson DM Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Curr. Sci. India*, 85, 46-59. (2003).
- [30] . GIEC Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. (2014a).
- [31] . FAO/IFAD/UNICEF/WFP/WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2018: building climate resilience for food security and nutrition. Rome. (2018). <http://www.fao.org/3/i9553en/i9553en.pdf>
- [32] . FAO The elimination of food insecurity in the Horn of Africa – summary report. Rome. (2000). <http://www.fao.org/docrep/003/x8530e/x8530e00.htm>
- [33] . UNOCHA. Horn of Africa: humanitarian impacts of drought. Issue 11, 3 (2017a). <https://reliefweb.int/report/somalia/hornofafrica-humanitarian-impacts-drought-issue-11-3-november-2017>.
- [34] . Masih I, Maskey S, Mussá FEF, Trambauer P. A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3635. (2014). <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>

- [35] . Oxfam Food crisis in the Sahel. Joint Agency Issue Briefing. (2012).  
[https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/file\\_attachments/ibfood-crisis-sahel-09042012-en\\_4.pdf](https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/file_attachments/ibfood-crisis-sahel-09042012-en_4.pdf)
- [36] . UNOCHA Sahel crisis: 2011-2017. (2017b). Relief web.  
<https://reliefweb.int/disaster/ot-2011-000205-ner>
- [37] . UNOCHA Southern Africa: food insecurity – 2015-2017. (2017c).
- [38] . FAO Disasters causing billions in agricultural losses, with drought leading the way. Rome/Hanoi. Rome. (2018). <http://www.fao.org/news/story/en/item/1106977/icode/>
- [39] . OMM/GWP. Manuel des indicateurs et indices de sécheresse (M. Svoboda et B.A. Fuchs), Programme de gestion intégrée des sécheresses, Integrated Drought Management Programme Tools and Guidelines Series 2, Genève. (2016).
- [40] . Walker GT, Bliss EW World weather. V Mem Roy Meteor Soc 4:53–84. (1932).
- [41] . Power, S. B., & Kociuba, G. The impact of global warming on the Southern Oscillation Index. *Climate dynamics*, 37(9-10), 1745-1754. (2011).
- [42] . Hurrell J, Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim Change* 36:301–326. (1997).
- [43] . Rossi A, Massei N, Laignel B. A synthesis of the time-scale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transform. *Glob Planet Change* 78(1):1–13. (2011). <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.04.008>.
- [44] . Conte M, Giuffrida S, Tedesco S. The Mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy. *Proc. conference on climate and water*, vol. 1. Academy Finland 9:121–137. (1989).
- [45] . Palutikof JP, Conte M, Mendes JC, Goodess CM, Espírito Santo F. Climate and climatic change. In: Bolle HJ (ed) *In Mediterranean climate-variability and Trends*. Springer Verlag, Berlin, pp 133–153. (1996). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55657-9>.
- [46] . Martin-Vide J, Lopez-Bustins JA. The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int J Climatol* 26(11): 1455–1475. (2006).  
<https://doi.org/10.1002/joc.1388>
- [47] . Berhail S The impact of climate change on groundwater resources in northwestern Algeria. *Arab J Geosci*. (2019) . <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4776-3>
- [48] . Conway E.  
[https://www.nasa.gov/topics/earth/features/climate\\_by\\_any\\_other\\_name.html](https://www.nasa.gov/topics/earth/features/climate_by_any_other_name.html) (Accès 25 Novembre 2020)

- [49] . Glossary of Environmental Protection Agency (USA).  
[https://ofmpub.epa.gov/sor\\_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do](https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do) (Accès 25 Novembre 2020)
- [50] . GIEC. Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. 41 pp. (2019).
- [51] . GIEC. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on the Climate Change, Cambridge University Press, 104 pp. (2007).
- [52] . MEER. Plan National Climat de l'Algérie. 64 pp. (2019).
- [53] . Pozo-Vázquez D, Esteban-Parra MJ, Rodrigo FS, Castro-Díez Y. A study of NAO variability and its possible nonlinear influences on European surface temperature. *Clim. Dyn.* 17, 701–715. (2001).
- [54] . Mühlbauer, S., Costa, A.C. & Caetano, M. A spatiotemporal analysis of droughts and the influence of North Atlantic Oscillation in the Iberian Peninsula based on MODIS imagery. *Theor Appl Climatol* 124, 703–721. (2016). <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1451-9>.
- [55] . CRED/UNISDR (2018) Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998-2017, Brussels/Geneva, available at: [www.unisdr.org/files/61119\\_credeconomiclosses.pdf](http://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf)
- [56] . Achberger C.A. Climate Change and Droughts: Effects on Migration within Africa. Doctoral dissertation. Université de Graz (Karl-Franzens-Universität Graz), Autriche. (2020).
- [57] . Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 1-2, pp. 202-216. (2010). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- [58] . Cook BI, Anchukaitis KJ, Touchan R, Meko DM, Cook ER. Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 2060–2074. (2016). <https://doi.org/10.1002/2015JD023929>.
- [59] . Mukherjee S, Mishra A, Trenberth K. E. Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 145-163. (2018).

- [60] . Arnell N.W. Climate change and drought. In : López-Francos A. (ed.). Drought management: scientific and technological innovations. Zaragoza : CIHEAM. p. 13-19. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 80). 1. International Conference Drought Management: Scientific and Technological Innovations, 2008/06/12-14, Zaragoza (Spain). (2008) . <http://om.ciheam.org/om/pdf/a80/00800414.pdf>
- [61] . Trenberth KE, Shea DJ. Relationships between precipitation and surface temperature. Geophys Res Lett., 32. (2005). <https://reliefweb.int/disaster/dr-2015-000137-mwi>
- [62] . Seneviratne SI, Corti T, Davin E L, Hirschi et al. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 99(3-4), 125-161. (2010)
- [63] . Laval K. La sécheresse au Sahel : première interrogation sur le rôle de l’homme sur le climat, Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED). (2016). [https://www.uved.fr/fileadmin/user\\_upload/Documents/pdf/Transcriptions/MOOC\\_UVE\\_D\\_Climat\\_Transcription\\_Laval.pdf](https://www.uved.fr/fileadmin/user_upload/Documents/pdf/Transcriptions/MOOC_UVE_D_Climat_Transcription_Laval.pdf) (Accès 20 Décembre 2020)
- [64] . Charney JG (1975) Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Q J R Meteorol Soc. <https://doi.org/10.1002/qj.49710142802>
- [65] . Charney J, Quirk WJ, Chow SH, Kornfield J (1977) COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECTS OF ALBEDO CHANGE ON DROUGHT IN SEMI-ARID REGIONS. J Atmos Sci. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2)
- [66] . Otterman J, Fraser RS. Earth atmosphere system and surface reflectivities in arid regions from Landsat MSS data. Remote Sensing of Environment, 5 : 247-266. (1976).
- [67] . Courel M. F. Albédo et pluviométrie dans le Sahel. L'aridité: une contrainte au développement: caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés, 95. (1992).
- [68] . Sud YC, Fennessy M. A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the glas GCM. J Climatol. (1982). <https://doi.org/10.1002/joc.3370020202>
- [69] . Laval K, Picon L. Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on climate. J Atmos Sci. (1986). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<2418:EOACOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<2418:EOACOT>2.0.CO;2)
- [70] . Meng XH, Evans JP, McCabe MF. The impact of observed vegetation changes on land-atmosphere feedbacks during drought. J Hydrometeorol. (2014a). <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0130.1>
- [71] . Meng XH, Evans JP, McCabe MF. The influence of inter-annually varying albedo on

- regional climate and drought. *Clim Dyn* 42:787–803. (2014b).  
<https://doi.org/10.1007/s00382-013-1790-0>
- [72] . Evans JP, Meng X, McCabe MF. Land surface albedo and vegetation feedbacks enhanced the millennium drought in south-east Australia. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:409–422. (2017). <https://doi.org/10.5194/hess-21-409-2017>
- [73] . Courel MF, Kandel RS, Rasool SI. Surface albedo and the sahel drought. *Nature*. (1984) . <https://doi.org/10.1038/307528a0>
- [74] . Zeng N, Neelin JD, Lau KM, Tucker CJ. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science* , 286, 5444, pp. 1537-1540. (1999). <https://doi.org/10.1126/science.286.5444.1537>
- [75] . Zeng N. Drought in the Sahel. *Science*, 302(5647), 999-1000. (2003).
- [76] . Lu J, Delworth T L. Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought *Geophys. Res. Lett.* 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL023316>
- [77] . Govaerts YM, Lattanzio A. Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. *Glob Planet Change*. (2008).  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.04.004>
- [78] . Diffenbaugh NS, Giorgi F. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Clim Chang* 114:813–822. (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- [79] . Lelieveld J, Proestos Y, Hadjinicolaou P, Tanarhte M, Tyrllis E, Zittis G. Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21<sup>st</sup> century. *Clim. Chang.*, 137, 245–260. (2016). <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1665-6>.
- [80] . Schmitz C, Lotze-Campen H, Gerten D, Dietrich JP, Bodirsky B, Biewald A, Popp A. Blue water scarcity and the economic impacts of future agricultural trade and demand. *Water Resour Res* 49:3601–3617. (2013). <https://doi.org/10.1002/wrcr.20188>.
- [81] . Alboghdady M, El-Hendawy SE. Economic impacts of climate change and variability on agricultural production in the Middle East and North Africa region. *Int J Clim Change Str* 8:463–472. (2016). <https://doi.org/10.1108/ijccsm-07-2015-0100>.
- [82] . Radhouane L. Climate change impacts on North African countries and on some Tunisian economic sectors. *Journal of Agriculture and Environment for International Development – JAEID*, 107 (1): 101 – 113. (2013).
- [83] . Haddadin MJ. Water scarcity impacts and potential conflicts in the MENA region. *Water Int* 26:460–470. (2001). <https://doi.org/10.1080/02508060108686947>.

- [84] . Thomas RJ. Opportunities to reduce the vulnerability of dryland farmers in central and West Asia and North Africa to climate change. *Agric Ecosyst Environ* 126:36–45. (2008). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.011>.
- [85] . Scheffran J, Link PM, Schilling J. Climate and conflict in Africa. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. (2019). <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.557>
- [86] . Schilling J, Krause L. Climate change and conflict in northern Africa. In: Wohl E (ed) *Oxford bibliographies in environmental science*. Oxford University press. (2018).
- [87] . Schilling J, Hertig E, Trambly Y et al. Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Reg Environ Change* **20**, 15. (2020). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7>.
- [88] . Adger WN, Agrawala S, Mirza MMQ, Conde C, O'Brien K, Pulhin J, Pulwarty R, Smit B, Takahashi K. Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. In: *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability* (M.L. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds)). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 717–743. (2007).
- [89] . Nouaceur Z, Laignel B, Turki I. Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? », *Physio-Géo*, Volume 7 | -1, 307-323. (2013). <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>
- [90] . Abdelguerfi A, Abbas K, Lakhdari F, Mefedjehk A, Aït Yahia K, Harik H. Rapport de Synthèse du Workshop « Plan Stratégique Algérien de la Recherche et de l'Innovation sur la Sécurité Alimentaire 2020-2030 » et annexes. CRSTRA (Biskra). MESRS-DGRSDT, Alger (Algérie). (2020).
- [91] . MEER & GIZ. Analyse de Risque et de Vulnérabilité au Changement Climatique en Algérie, (Borderon M, Bennohammed K, Kienberger S, d'Oleire-Oltmanns S), Rapport de synthèse, Projet ANPC N° : 14.2468.8-001.00. (2017).
- [92] . MEER & GIZ Analyse de Risque et de Vulnérabilité au Changement Climatique. Rapport de synthèse. (2018). 76 pages.
- [93] . Liu X, Zhu X, Pan Y et al. Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *J. Geogr. Sci.* **26**, 750–767 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>
- [94] . Tadesse T, Wardlow BD. Remote Sensing of Drought Monitoring. Special Issue. *Remote Sensing*. (2019). (ISSN 2072-4292)

- [95] . Verstraete MM, Pinty B. Satellite remote sensing project. (2019).  
<https://www.researchgate.net/project/Satellite-remote-sensing>. (Accès 17 Février 2020)
- [96] . Shahabfar A, Ghulam A, Eitzinger J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 119-127. (2012).
- [97] . Ghulam A, Qin Q, Teyip T, Li ZL. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* (2007).  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.03.002>
- [98] . Malik MS, Shukla JP. Estimation of Soil Moisture By Remote Sensing and Field Methods: a Review. *Int J Remote Sens & Geosci*, 3, 4, pp. 21-27, ISSN No: 2319-3484. (2014).
- [99] . Borges CK, Medeiros RM, Ribeiro REP, et al. Study of biophysical parameters using remote sensing techniques to Quixeré-CE region. *J Hyperspectral Remote Sens.* (2016).  
10.5935/2237-2202.20160028
- [100] .Abera TA, Heiskanen J, Pellikka PKE, Maeda EE. Impact of rainfall extremes on energy exchange and surface temperature anomalies across biomes in the Horn of Africa. *Agric For Meteorol.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107779>
- [101] .McCabe MF, Wood EF. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105(4), 271-285. (2006).
- [102] .Hamimed A, Zaagane M, Oualid A, Teffahi M, Bakhtiar D. Monitoring daily actual evapotranspiration and surface water status over an agricultural area in western Algeria using remote sensing data. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (29), 45-59. (2017).
- [103] . Barrios JM, Ghilain N, Arboleda A, Sachs T, Gellens-Meulenberghs F. Daily evapotranspiration at sub-kilometre spatial resolution by combining observations from geostationary and polar-orbit satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 39(23), 8984-9003. (2018).
- [104] . Bouznad IE, Guastaldi E, Zirulia A, Brancale M, Barbagli A, Bengusmia D. Trend analysis and spatiotemporal prediction of precipitation, temperature, and evapotranspiration values using the ARIMA models: case of the Algerian Highlands. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(24), 1-17. (2020).  
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-06330-6>

- [105] . Jobard I, Chopin F, Bergès JC, Roca R. An intercomparison of 10-day satellite precipitation products during West African monsoon. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9), 2353-2376. (2011).
- [106] . Serrat-Capdevila A, Merino M, Valdes JB, Durcik M (2016) Evaluation of the performance of three satellite precipitation products over Africa. *Remote Sensing*, 8(10), 836.
- [107] . Babaousmail H, Hou R, Ayugi B, Gnitou GT. Evaluation of satellite-based precipitation estimates over Algeria during 1998–2016. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 195, 105139. (2019).
- [108] . Gonzalez FE, Ruiz JM, Acosta FM. Manuel de télédétection spatiale TELECAN, Université Las Palmas, Iles des Canaries, 337p. (2013).
- [109] . Drif N, Adane AH, Ameer Z, Ameer S. Construction d'une image Météosat en ciel clair. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF, Alger. (2009).
- [110] . OMM. L'OMM s'inquiète des répercussions de la COVID-19 sur le système d'observation. Press Release Number: 01042020. (2020).  
<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WMO%20FR.pdf> (Accès 25 Décembre 2020).
- [111] . Razagui A. Développement d'une méthodologie pour l'exploitation des images MSG pour le suivi des paramètres physiques du sol et la prévision météorologique. Thèse doctorat. Rayonnement et matière, U.S.T.O.M-B, Algérie. (2013).
- [112] . Legrand M, Plana-Fattori A, N'Doumé C. Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat 1. Infrared difference dust index. *J Geophys Res Atmos*. (2001).  
<https://doi.org/10.1029/2000JD900749>
- [113] . Legrand M, Nakes MT, François P. Upgraded version of the Infrared Difference Dust Index: application in the framework of AMMA. In: Third International AMMA Conference, 20 - 24 July 2009, at Ouagadougou, Burkina Faso. (2009).  
[http://biblio.amma-international.org/index.php?action=fileDownload&resourceId=500&hash=9f8ead8eb0fb9d5511858b3b5b473cef67b7889&filename=AMMA\\_3rd\\_Int\\_Conf\\_3MB.pdf](http://biblio.amma-international.org/index.php?action=fileDownload&resourceId=500&hash=9f8ead8eb0fb9d5511858b3b5b473cef67b7889&filename=AMMA_3rd_Int_Conf_3MB.pdf). (Accès 12 Janvier 2020)
- [114] . Legrand M, N'Doumé C. Tracking the dust clouds over Africa by means of the Meteosat thermal IR imagery, in *IRS'92: Currents Problems in Atmospheric Radiation*, edited by S. Keevalik and O. Karner, 342-344, A. Deepak, Hampton, Va. (1992).

- [115] . N'Doumé C. Traitement de l'imagerie Meteosat IR pour l'observation des aérosols désertiques au dessus de l'Afrique: Optimisation, validation et application à l'établissement des distributions spatio-temporelles, doctorale thesis UST-Lille, Villeneuve d'Ascq, France. (1994).
- [116] . Pinty B, Verstraete MM, Gobron N, et al. Exploitation of surface albedo derived from the Meteosat data to characterize land surface changes. In: IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217). IEEE, pp 2250–2252. (2001).
- [117] . De Faria TO, Rodrigues TR, Curado LFA et al. Surface albedo in different land-use and cover types in Amazon forest region. *Rev Ambient e Agua*. (2018).  
<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2120>
- [118] . Pinty B, Roveda F, Verstraete MM et al. Surface albedo retrieval from Meteosat 1. Theory. *J Geophys Res Atmos* 105(D14):18099–18112. (2000a).  
<https://doi.org/10.1029/2000JD900113>
- [119] . Pinty B, Roveda F, Verstraete MM et al. Surface albedo retrieval from Meteosat: 2. Applications. *J Geophys Res Atmos* 105(D14):18113–18134. (2000b).  
<https://doi.org/10.1029/2000JD900114>
- [120] . Govaerts YM, Pinty B, Lattanzio A. Impact of Vegetation Fires on Surface Albedo Dynamics and Absorbed Solar Radiation over the African Continent. *Int Geosci Remote Sens. Symp.* 3:1576–1578. (2003).
- [121] . Loew A, Govaerts YM. Towards multidecadal consistent meteosat surface albedo time series. *Remote Sens.* (2010). <https://doi.org/10.3390/rs2040957>
- [122] . Govaerts YM, Quast R, Ruethrich F, et al. Proceedings for the 2016 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference , RECOVERY OF MVIRI / VIS BAND SPECTRAL RESPONSE. 26–30 September, Darmstadt, Germany. (2016).
- [123] . Govaerts YM, Rüthrich F, John VO, Quast R. Climate data records from meteosat first generation part I: Simulation of accurate top-of-atmosphere spectral radiance over pseudo-invariant calibration sites for the retrieval of the in-flight visible spectral response. *Remote Sens.* (2018). <https://doi.org/10.3390/rs10121959>
- [124] . Quast R, Giering R, Govaerts Y, et al. Climate data records from meteosat first generation Part II: Retrieval of the in-flight visible spectral response. *Remote Sens.* (2019). <https://doi.org/10.3390/rs11050480>

- [125] . Teuling AJ, Seneviratne SI. Contrasting spectral changes limit albedo impact on land-atmosphere coupling during the 2003 European heat wave. *Geophys Res Lett.* (2008).  
<https://doi.org/10.1029/2007GL032778>
- [126] . Vermote EF, Tanré D, Deuzé JL et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6 s: an overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens.* (1997).  
<https://doi.org/10.1109/36.581987>
- [127] . Govaerts YM. Correction of the Meteosat-5 and -6 VIS band relative spectral response with Meteosat-7 characteristics. *Int. J. Remote Sens.* 20, 3677–3682. (1999).
- [128] . Govaerts YM, Clerici M. Evaluation of radiative transfer simulations over bright desert calibration sites, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42,176-187. (2004a).
- [129] . Govaerts YM, Lattanzio A. Retrieval error estimation of surface albedo derived from geostationary large band satellite observations: Application to Meteosat-2 and -7 data. *Journal of Geophysical Research*, 112(D05102). (2007). doi:10.1029/2006JD007313.
- [130] . Koepke P. Calibration of the Vis-channel of Meteosat-2. *Advances in Space Research*, 2, 93–96. (1983).
- [131] . Govaerts YM, Clerici M, Clerbaux N. Operational Calibration of the Meteosat Radiometer VIS Band, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1900-1914. (2004b).
- [132] . Govaerts YM. Operational vicarious calibration of MFG/MVIRI and MSG/SEVIRI solar channels, in *The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, vol. XXXVI, edited by S. Liang et al., pp. 446 – 448, ISPRS Working Groups VII/1, Beijing, China. (2005).
- [133] . Lenoble J. *Radiative Transfert in Scattering and Absorbing Atmospher: Standard computational Procedures*. Hampton, VA: A. Deepak, pp. 300. (1985).
- [134] . Stroeve J, Nolin A, Steffen K. Comparison of AVHRR-derived and in situ surface albedo over the Greenland ice sheet. *Remote Sens Environ.* (1997).  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00107-7)
- [135] . Mahiny AS, Turner BJ. A Comparison of Four Common Atmospheric Correction Methods. *Photogramm Eng Remote Sens* 73:361–368. (2007) .  
<https://doi.org/10.14358/PERS.73.4.361>
- [136] . Sharma AR, Badarinath KVS, Roy PS. Comparison of ground reflectance measurement with satellite derived atmospherically corrected reflectance: A case study over semi-arid landscape. *Adv Sp Res.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.010>

- [137] . Sriwongsitanon N, Surakit K, Thianpopirug S. Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application. *J Hydrol* 401:203–220. (2011).  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.023>
- [138] . Wang Z, Barlage M, Zeng X et al. The Solar zenith angle dependence of desert albedo. *Geophys Res Lett.* (2005). <https://doi.org/10.1029/2004GL021835>
- [139] . Wang Z, Zeng X, Barlage M. Moderate resolution imaging spectroradiometer bidirectional reflectance distribution function based albedo parameterization for weather and climate models. *J Geophys Res Atmos.* (2007).  
<https://doi.org/10.1029/2005JD006736>
- [140] . Yang F, Mitchell K, Hou YT et al. Dependence of land surface albedo on solar zenith angle: Observations and model parameterization. *J Appl Meteorol Climatol.* (2008).  
<https://doi.org/10.1175/2008JAMC1843.1>
- [141] . Dickinson RE. Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance. *Adv Geophys.* (1983). [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60176-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60176-4)
- [142] . Briegleb, BP, Minnis P, Ramanathan V, Harrison E. Comparison of regional clear sky albedos inferred from satellite observations and model calculations, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25, 214 – 226. (1986).
- [143] . Ward MN, Lamb PJ, Portis DH, El Hamly M, Sebbari R. Climate variability in northern Africa: Understanding droughts in the Sahel and the Maghreb. In *Beyond el Niño* (pp. 119-140). Springer, Berlin, Heidelberg. (1999).
- [144] . Le Houérou H N Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. Paris: ORSTOM, 197-220. ISBN 2-7099-1068-3. (1992).
- [145] . Laborde J. Rainfall maps of Northern Algeria at the scale of 1/500 000. Sheet memoir. National Agency of Hydraulic Resources, project PNUD/ALG/88/021. (1998).
- [146] . Meddi M. and Hubert P. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions.* IAHS Publ. 278, 1-7. (2003).
- [147] . Meddi H. and Meddi M. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse* 20, 57-65. (2009).
- [148] . Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahe G. Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936-2009). In: *Climate and land surface changes in hydrology* (Boegh E, Blyth E, Hannah DM, Hisdal H, Kunstmann H, Su B, Yilmaz KK).

- Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly. Wallingford : IAHS, (359), 191-197. (IAHS Publication ; 359). IAHS-IAPSO-IASPEI Joint asse. (2013).
- [149] . Taibi S, Meddi M, Mahé G, Assani A. Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theor Appl Climatol*. (2017). <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4>
- [150] . Bekkoussa B., Meddi M., Jourde H. Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sècheresse*, vol.18, n.3, p. 173-184. (2008).
- [151] . Meddi M., Assani A.A. and Meddi H. Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Res. Manage*. 24, 3817-3833. DOI: 10.1007/s11269-010-9635-7. (2010).
- [152] . Gleick PH. Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria. American Meteorological Society. (2014). <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1>
- [153] . Nouaceur Z and Murărescu O. Rainfall Variability and Trend Analysis of Annual Rainfall in North Africa. *International Journal of Atmospheric Sciences*. (2016). <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7230450>
- [154] . Djellouli Y, Saci A. Catastrophe "naturelle" : les inondations dévastatrices du 9 et 10 novembre 2001 à Beb El Oued (Alger, Algérie). In : Publications de l'Association Internationale de Climatologie, n° 23, p. 236-242. (2003).
- [155] . ONM - Un résumé de la situation météorologique exceptionnelle ayant affecté le centre et l'ouest du nord Algérie, et en particulier la zone urbaine d'Alger, les 9 et 10 novembre 2001. Office National de Météorologie, Alger, note technique, n° 001, 6 p. (2002).
- [156] . Hireche A, Boughani A, Salamani M. Evolution of the annual rainfall in some Algerian arid stations. *Sechress* 18 (4):314-320. (2007).
- [157] . Zeroual A, Assani AA, Meddi M. Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrol Res* 48:584–595. (2017). <https://doi.org/10.2166/nh.2016.244>.
- [158] . Meddi H, Meddi M, Assani AA. Study of Drought in Seven Algerian Plains. *Arab J Sci Eng*. (2014). <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0827-3>
- [159] . Kaabeche M. Les relations climat-végétation dans le bassin du Hodna (Algérie). *Acta Bot Gall*. (1996). <https://doi.org/10.1080/12538078.1996.10515321>
- [160] . DSA. Direction des Services Agricoles de la Wilaya de M'Sila Rapport sur la wilaya de M'Sila, 12 p. (2008).

- [161] . Hadbaoui I, Senoussi A. Les parcours steppiques dans la région de M'Sila : quelle gestion pour quel devenir?. Thèse de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla. 139 pages. (2013).
- [162] . Boultif M, Benmessaoud H. Using climate-soil-socioeconomic parameters for a drought vulnerability assessment in a semi-arid region: Application at the region of El Hodna, (M'sila, Algeria). *Geogr Pannonica*. (2017).  
<https://doi.org/10.5937/GeoPan1703142B>
- [163] . Meddi M. Étude de la variabilité interannuelle des pluies dans le Nord de l'Algérie. *Hydrologie*. Algérie Equipement. 5 pages. (2005).
- [164] . Kebiche M. Le bassin versant du Hodna (Algérie) : Ressources en eau et possibilités d'aménagement. In: *Travaux de l'Institut Géographique de Reims, n°85-86. Etudes algériennes*. pp. 25-34. (1994). doi : <https://doi.org/10.3406/tigr.1994.1298>
- [165] . Guettouche M, Guendouz M. Modélisation et évaluation de l'érosion éolienne potentielle des sols cultivables dans le Hodna (Nord-Est algérien). *Sécheresse (Montrouge)* 18:254–262. (2007). <https://doi.org/10.1684/sec.2007.0097>
- [166] . Le Houérou H-N. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique: diversité biologique, développement durable et désertisation. Montpellier : CIHEAM. p 1-396 (Options Méditerranéennes: Série B. Études et Recherches: n° 10). (1995).
- [167] . Niemeyer S. New Drought Indices –Introduction to Drought Products 1st Joint EARS/IES International Drought Workshop. Ljubljana (Slovénie), 21.-25. September. 44 pages. (2009).
- [168] . Dutra E. Applications of the EPS: Droughts. Predictability training course, EPS applications: Droughts. ECMWF. 32 pages. (2014).
- [169] . Keyantash J, Dracup JA. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180. (2002).
- [170] . Hayes M, Svoboda M, Wall N, Widhalm M. The lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. In: *Bulletin of the American Meteorological Societ*. 92, 485–488. (2011).
- [171] . Dutra E, Giuseppe FDi, Wetterhall F, Pappenberger F. Seasonal forecasts of droughts in African basins using the Standardized Precipitation Index . *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2359–2373. (2013).

- [172] . Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim.* (2010). <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- [173] . Vicente-Serrano SM, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interact* 16:1–27. (2012). <https://doi.org/10.1175/2012EI000434.1>
- [174] . OMM. Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). - World Meteorological Organization - WMO-No. 1090. Geneva. ISBN 978-92-63-11091-6. 16p. (2012). [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=7768/](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768/)
- [175] . Edwards DC, McKee TB. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2.4* - Eumetsat. Eumetsat Satellites History, EUM/OPS/DOC/08/4698, V2N, January 30. (1997)
- [176] . Guttman NB. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *J Am Water Resour Assoc.* (1999). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- [177] . Lloyd-Hughes B, Saunders MA. A drought climatology for Europe. *Int J Climatol.* (2002). <https://doi.org/10.1002/joc.846>
- [178] . Shah R, Bharadiya N, Manekar V. Drought Index Computation Using Standardized Precipitation Index (SPI) Method For Surat District, Gujarat. *Aquat Procedia.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.162>
- [179] . Hina S, Saleem F. Historical analysis (1981–2017) of drought severity and magnitude over a predominantly arid region of Pakistan. *Clim Res.* (2019). <https://doi.org/10.3354/cr01568>
- [180] . Wells N, Goddard S, Hayes MJ. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17, 2335–2351. (2004).
- [181] . Thornthwaite CW. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geogr Rev.* (1948). <https://doi.org/10.2307/210739>
- [182] . Ferrer JP and Candela L. Water balance on the central rift valley in Case studies for developing globally responsible engineers. Appendix 1: *Thornthwaite method*. GDEE (eds), *Global Dimension in Engineering Education*, Barcelona, Spain. ISBN 978-84-606-7546-4. (2015).
- [183] . Potop V, Boroneanț C, Možný M, et al. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theor Appl Climatol.* (2014). <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0908-y>

- [184] . Khezazna A, Amarchi H, Derdous O, Bousakhria F. Drought monitoring in the Seybouse basin (Algeria) over the last decades. *J Water L Dev.* (2017).  
<https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0022>
- [185] . Abbes M, Hamimed A, Lafrid A, et al. Use of high spatial resolution satellite data for monitoring and characterization of drought conditions in the Northwestern Algeria. *Min Sci.* (2018). <https://doi.org/10.5277/msc182507>
- [186] . Achour K, Meddi M, Zeroual A, et al. Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. *J Earth Syst Sci.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1306-3>
- [187] . Reitan CH. Surface Dew Point and Water Vapor Aloft. *J Appl Meteorol.* (1963).  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1963\)002<0776:sdpawv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1963)002<0776:sdpawv>2.0.co;2)
- [188] . Wanielista M, Kersten R, Eaglin R. *Hydrology Water Quantity and Quality Control.* John Wiley & Sons. 2nd ed. ISBN: 0471072591. 567 p. (1997).
- [189] . Hess M, Koepke P, Schult I. Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bull Am Meteorol Soc.* (1998). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2)
- [190] . Nakes MT, Mokhnache A. Sensitivity of surface albedo derived from METEOSAT data to drought episodes in a semi-arid region (M'Sila, north center of Algeria). *Arab J Geosci* **14**, 137. (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06431-2>
- [191] . Bazza M, Kay M, Knutson C. Drought characteristics and management in North Africa and the Near East. *FAO, FAO Water Reports*, 45. (2018).  
<http://www.fao.org/3/CA0034EN/ca0034en.pdf> (accès le 12 Janvier 2020).
- [192] . Gurrupu S, Chipanshi A, Sauchyn D, Howard A. Comparison of the SPI and SPEI on predicting drought conditions and streamflow in the Canadian prairies. In *Proceedings of the 28th Conference on Hydrology.* American Meteorological Society, Atlanta (USA), pp. 2-6. (2014).
- [193] . Tan C, Yang J, Li M. Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Atmosphere (Basel).* (2015).  
<https://doi.org/10.3390/atmos6101399>
- [194] . Tirivarombo S, Osupile D, Eliasson P. Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Phys Chem Earth* ,106. (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>
- [195] . Huang J, Li Y, Fu C, et al. Dryland climate change: Recent progress and challenges.

- Rev Geophys. (2017). <https://doi.org/10.1002/2016RG000550>
- [196] . Gascoïn S, Duchame A, Ribstein P, et al. Sensitivity of bare soil albedo to surface soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia). *Geophys Res Lett.* (2009). <https://doi.org/10.1029/2008GL036377>
- [197] . Roxy MS, Sumithranand VB, Renuka G. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at Astronomical Observatory, Thiruvananthapuram, south Kerala. *J Earth Syst Sci* 119:507–517. (2010). <https://doi.org/10.1007/s12040-010-0038-1>
- [198] . Sugathan N, Biju V, Renuka G. Influence of soil moisture content on surface albedo and soil thermal parameters at a tropical station. *J Earth Syst Sci.* (2014). <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0452-x>
- [199] . He T, Gao F, Liang S, Peng Y. Mapping Climatological Bare Soil Albedos over the Contiguous United States Using MODIS Data. *Remote Sens.* (2019). <https://doi.org/10.3390/rs11060666>
- [200] . Törnros T, Menzel L. Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrol Earth Syst Sci.* (2014). <https://doi.org/10.5194/hess-18-305-2014>
- [201] . Pei Z, Fang S, Wang L, Yang W. Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. *Water (Switzerland)*. (2020). <https://doi.org/10.3390/w12071925>
- [202] . Vicente-Serrano SM, López-Moreno JI. Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrol Earth Syst Sci.* (2005). <https://doi.org/10.5194/hess-9-523-2005>.

## تحديد المناطق المعرضة للتصحّر باستخدام صور الأقمار الصناعية

لا يمكن اعتبار أي مورد أكثر إستراتيجية وحيوية من المياه. فبالنظر إلى الطلب المتزايد على المياه، فإن تذبذب هطول الأمطار مسألة حساسة للغاية. يمكن أن يحدث الجفاف في جميع أنماط المناخ. و عواقب ندرته وخيمة في المجالات الإستراتيجية. يعد وجود نظام إنذار مبكر وتخطيط استباقي للجفاف أكثر من ضروري.

الهدف من هذه الدراسة هو المساهمة في رصد ومراقبة مخاطر الجفاف باستخدام بيانات الأقمار الصناعية والمؤشرات المعيارية. موقع الدراسة هي "المسيلة" (منطقة الحضنة)، وهي منطقة هشة معرضة للتأثر بالجفاف. تم حساب مؤشرات الجفاف SPI و SPEI في الأزمنة من 1 إلى 24 شهر. البياض السطحي، المستخلص من البيانات المأخوذة من ثلاثة أقمار METEOSAT (5، 6، و7) تم تصحيحه بواسطة برنامج 6S، ثم قورن مع ثلاثة أنواع من الجفاف (الجوية، الزراعية والهيدرولوجية)، من أجل فحص حساسيته لظروف الجفاف، حسب إشارات كل مؤشر.

أظهرت النتائج أن البياض السطحي أكثر حساسية لنوبات الجفاف في النوبة المتوسطة للأزمنة (6 و9 و12 شهرًا)، مما يتناسب مع الجفاف الزراعي. وفقًا للمؤشر SPEI، فإن البياض السطحي هو أكثر حساسية خلال الفترة من أبريل إلى سبتمبر (فترة استهلاك الموارد المائية ونمو النبات)، و وفقًا للمؤشر SPI، فإن البياض السطحي أكثر حساسية خلال الفترة من أكتوبر إلى مارس (فترة التزود بالموارد المائية بواسطة الأمطار).

الكلمات المفتاحية: البياض السطحي؛ أقمار METEOSAT؛ جفاف؛ مؤشرات SPI و SPEI؛ برنامج 6S.

### Identification des zones qui ont tendance à la désertification à l'aide de l'imagerie satellitaire.

Aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique et vitale comme l'eau. Compte tenu de la demande croissante d'eau, la variabilité des précipitations est une question très sensible. La sécheresse peut se produire dans tous les régimes climatiques. Les conséquences sont dramatiques sur les domaines stratégiques. Un système d'alerte précoce et la planification proactive de la sécheresse s'avère plus que nécessaire.

L'objectif de la présente étude est de contribuer à la surveillance et au contrôle des risques de la sécheresse, au moyen des données de satellite et des indices normalisés. Le site d'étude est M'Sila (région de Hodna), zones fragile exposée à la vulnérabilité à la sécheresse. Les indices de sécheresse SPI et SPEI, sont évalués aux multiples échelles de temps (de 1 à 24 mois). L'albédo de surface, déduit de données de trois satellites METEOSAT (5, 6 et 7) et corrigé par le code 6S, est corrélé avec trois types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique), afin d'examiner sa sensibilité aux conditions de sécheresse, selon les indications de chaque indice.

Les résultats montrent que l'albédo de surface semble plus sensible aux épisodes de sécheresse à une classe d'échelle de temps moyenne (6, 9 et 12 mois), qui correspond à la sécheresse de type agricole. Selon l'indice SPEI l'albédo de surface est plus sensible pendant la période d'Avril à Septembre (période de consommation des ressources d'eau et de croissance des plantes). Selon l'indice SPI, l'albédo de surface est plus sensible pendant la période d'Octobre à Mars (période de chargement et d'approvisionnement en ressources d'eau).

**Mots clés :** Albédo de la surface ; satellites METEOSAT ; sécheresse ; indices SPI et SPEI ; code 6S.

### Identification of areas prone to desertification using satellite imagery.

No resource can be considered more strategic and vital than water. Given the growing demand for water, the variability of precipitation is a very sensitive question. Drought can occur in all climatic regimes. The consequences are dramatic in many strategic areas. An early warning system and proactive drought planning is more than necessary.

The objective of this study is to contribute to the monitoring and control of drought risks, using satellite data and standardized indices. The study site is M'Sila (Hodna region), a fragile area exposed to drought vulnerability. The SPI and SPEI drought indices are evaluated on multiple time scales (from 1- to 24-month). The surface albedo, derived from the data of three METEOSAT satellites (5, 6 and 7) and corrected by 6S code, is correlated with three types of drought (meteorological, agricultural and hydrological), in order to examine its sensitivity to drought conditions, with regard the indication of each index.

The results show that the surface albedo appears to be more sensitive to drought events at a medium time scale class (6-, 9- and 12-month), that corresponds to the agricultural type of drought. According to the SPEI index, the surface albedo is most sensitive during the period from April to September (period of water resource consumption and plant growth). According to the SPI index, the surface albedo is most sensitive during the period from October to March (period of water resource loading and supply).

**Key word:** Surface albedo; METEOSAT satellites; Drought; SPI and SPEI indices; 6S code.