

UNIVERSITE HAMMA LAKHDAR D'EL OUED

Faculté des Sciences et Technologie

Département d'Hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme Master (LMD)
en Hydraulique**

Option: Conception et diagnostic des systèmes d'AEP et AEU

THEME

**Etude de la sécheresse climatique dans les hauts plateaux
de l'Algérie, par deux approches : Analyse statistique et
images satellitaires**

Encadré par:

M.: Mega Nabil

M. : Khachana Salim

Réalisé par:

Djouane Souhil

Hagui Abdelatif

Promotion: 2014 / 2015

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Partie I: Sécheresse climatique, concepts théoriques

Chapitre I: Définitions et présentation de la zone d'étude

1. Introduction:	5
1.2. Définitions de la sécheresse:.....	5
1.3. Type de sécheresse	5
1.3.1. Sécheresse météorologique	5
1.3.2. Sécheresse hydraulique.....	5
1.3.3 Sécheresse agricole.....	6
1.3.4 Sécheresse socio-économique.....	6
1.4. Conséquences de la sécheresse.....	6
1.5. Risque de la sécheresse.....	7
2. Présentation de la zone d'étude.....	7
2.1. Situation géographique	7
2.2. Superficie et population.....	8
2.3. Topographie.....	9
2.4. Climat	10
2.4.1. Températures.....	10
2.4.2. Précipitations.....	10
3. Extraction de la zone d'étude.....	11
4. Conclusion.....	11

Chapitre 2: Présentation statistique

1. Introduction	13
2. Indicateurs statistiques.....	13
2.1. Le Pourcentage à la Normale - PN	13
2.2. L'Indice de précipitation standardisé (SPI – Standardized Precipitation Index).....	14

2.3. Autres indicateurs statistiques.....	15
3. Indicateurs météorologiques et hydrologiques.....	16
3.1. L'indice de sécheresse de KeetchByram (KBDI - KeetchByram Drought Index)	16
3.2. Indice de sécheresse de Palmer (PDI - Palmer Drought Index).....	17
3.3. L'Indice d'humidité disponible pour les cultures (CMI - CropMoisture Index).....	18
3.4. L'Indice des réserves en eau de surface (SWSI - Surface Water Supply Index).....	19
4. Sélection de stations météorologiques.....	19
5. Conclusion.....	20

Partie II: Approche satellitaire

Chapitre 3: indicateurs satellitaires

1. Introduction	23
2. Le choix de la source de données satellitaires.....	23
3. Présentation du satellite MODIS	23
4. Caractéristiques techniques du satellite MODIS.....	24
5. Indicateurs de sécheresse à partir des données de télédétection.....	25
5.1. L'indice normalisé de différence de végétation (NormalizedDifference Vegetation Index -NDVI):.....	25
5.2. Température de surface (Ts).....	26
5.3. Vegetation Condition Index – VCI.....	27
5.4. Indice de Végétation Standardisé – SVI.....	28
5.5. L'Indice de Condition de Température (TCI).....	29
5.6. Combinaison de TCI et VCI: Indice de Santé de la Végétation (Végétation Health Index – VHI).....	29
6. Moyens logiciels utilisés.....	30
6.1. MS Office Excel.....	30
6.2. ArcGIS 10.1	31
6.3. ENVI 4.2.....	31
6.4. Le SPI_SL_6.....	32
7. Calcul des indicateurs de sécheresse.....	33
7.1 Description du programme de calcul des indicateurs.....	33

7.2. Calcul du VCI.....	34
7.3. Calcul du TCI.....	34
7.4. Calcul de VHI.....	34
8. Conclusion.....	36

Chapitre 4: Résultats et discussions

1. Introduction.....	38
2. SPI 3 mois (SPI-3).....	38
3. Interpolation des SPI-3.....	40
4. VHI.....	40
4.1. TCI.....	40
4.2. VCI.....	41
4.3. Combinaison de TCI et VCI.....	42
5. Conclusion.....	44
Conclusion Generale.....	46
References Bibliographiques	48

LISTE DES FIGURES

Figure1: Situation géographique de la zone d'étude.....	8
Figure 2: Modèle numérique de terrain de la zone d'étude.....	9
Figure 3: Précipitations des stations météorologiques de Batna et de Mecheria.....	10
Figure 4: Extraction de la zone d'étude.....	11
Figure 5: Sélection des stations météorologiques.....	20
Figure 6: NDVI de la zone d'étude, du 02 au 18 février 2008.....	26
Figure 7: Degré de corrélation entre les données climatologiques et les images MODIS.....	27
Figure 8: Température de surface de la zone d'étude, du 02 au 10 février 2008.....	27
Figure 9: Exemple de l'environnement d'ArcGIS 10.1.....	31
Figure 10: Exemple de visualisation sous ENVI 4.2.....	32
Figure 11: Exécution de SPI_SL_6.exe et résultat sur Excel.....	33
Figure 12: Principe de calcul de l'indice VHI.....	35
Figure 13: Calcul de VHI avec Model Builder.....	35
Figure 14: SPI-3 des stations météorologiques sélectionnées.....	39
Figure 15: Différentes méthodes d'interpolation de SPI-3, périodes: 12/98-01/99 et 02/99	40
Figure 16: TCI,2 à 10 février 2008.....	41
Figure 17: VCI,2 à 18 février 2008.....	41
Figure 18: VHI,2 à 18 février 2008.....	42
Figure 19: Comparaison entre SPI-3, TCI and VCI, station de Tébessa.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les trois régions des hauts plateaux: superficie et population.....	9
Tableau 2: Sévérité du SPI.....	15
Tableau 3: Classifications pour le SVI.....	29
Tableau 4 : Classification pour VHI.....	30

appreviation

PN: Le Pourcentage à la Normale

SPI: L'Indice de précipitation standardisé

KBDI: L'indice de sécheresse de Keetch Byram

PDI: Indice de sécheresse de Palmer

CMI: L'Indice d'humidité disponible pour les cultures

SWSI: L'Indice des réserves en eau de surface

NDVI: L'indice normalisé de différence de végétation

Ts: Température de surface

VCI: Vegetation Condition Index

SVI: Indice de Végétation Standardisé

TCI: L'Indice de Condition de Température

VHI: Indice de Santé de la Vvégétation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La sécheresse est un phénomène universel qui touche plusieurs pays dont l'Algérie en fait partie. Elle a des effets néfastes sur l'ensemble des secteurs, savoir l'environnement, le social et l'économie. Sa gestion nécessite de mettre à la disposition des organes concernés les informations nécessaires de son suivi afin de prendre les mesures d'atténuation et les programmes de réponses qui permettent de minimiser ses impacts. Depuis quelques années, plusieurs études ont porté sur les changements planétaires, dont plusieurs se sont attardées sur les sécheresses.

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir. L'augmentation de la population humaine qui entraîne une pression accrue sur l'environnement y contribue grandement. Dans plusieurs régions du globe, une pratique agricole non-adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinée à la surexploitation des réserves hydriques accélère le processus des sécheresses et entraînent parfois une situation irréversible, la désertification.

Parmi les actions prises pour le suivi de la sécheresse, l'Algérie s'est inscrit dans un projet régional, pour la mise en place d'un Système Maghrébin d'Alerte précoce de la Sécheresse (SMAS) dans trois pays de la rive sud de la Méditerranée dont la coordination est assurée par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Financé par l'Union Européenne, ce projet (SMAS) vise à mettre en place un dispositif de prévention de la dégradation environnementale causée par la sécheresse et à éclairer les stratégies environnementales et de développement durable dans trois pays maghrébins : l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Ainsi, le projet a pour objectif l'élaboration d'un système d'alerte précoce permettant de déclencher un programme d'urgence pour atténuer les effets de la sécheresse à court terme. Il est à noter que la sécheresse est un phénomène naturel complexe et ne dispose pas d'une définition précise. Ainsi, elle se manifeste uniquement par certains indices et paramètres dont plusieurs chercheurs ont essayé de les identifier.

En effet, ces indices permettent d'identifier les différents types de sécheresse (météorologique, agricole et hydrologique), son intensité, sa durée, son étendu spatiale et sa probabilité de récurrence.

La plupart de ces indices sont fondés sur deux concepts à savoir : l'année normale, et le seuil qui indique la sécheresse. Pour permettre de cerner cette problématique, le présent travail essaye d'intégrer le potentiel des données des stations météorologiques ainsi que l'imagerie satellitaire (MODIS) dans le suivi des conditions de sécheresse en Algérie, et de produire un ensemble d'indices préétablis SPI-3, VCI, TCI et VHI.

Nous prenons l'exemple de l'étude du phénomène de la sécheresse sur les hauts plateaux de l'Algérie.

Pour cela, le présent rapport est organisé en deux parties et quatre chapitres :

❖ **Première partie** : recherche bibliographique comprenant la délimitation de la problématique de sécheresse, les études y afférentes, les techniques et les indices de suivi de ce phénomène.

- Chapitre 1: récapitule quelques concepts théoriques touchant la sécheresse climatique;
- Chapitre 2: introduisant les paramètres statistiques de la sécheresse.

❖ **Deuxième partie** : Choix des indices de sécheresse, et développement d'une méthodologie de travail.

- Chapitre 3: présentation de l'outil spatial, dédié pour le suivi de la sécheresse climatique, ainsi que les indicateurs dérivés à partir des images satellitaires.
- Chapitre 4: discussions des résultats obtenus avec des interprétations.

A la fin une conclusion générale avec la proposition des recommandations.

PARTIE I

Sécheresse climatique, concepts théoriques

CHAPITRE I

Définitions et présentation de la zone d'étude

1. Introduction:

A travers cette introduction, nous allons dans ce chapitre présenter quelques définitions en relation avec la sécheresse, dans plusieurs volets, ainsi que la présentation de la zone d'étude en question (les hauts plateaux).

1.2. Définitions de la sécheresse:

La sécheresse est une caractéristique normale et fréquente du climat. Elle touche l'ensemble des zones climatiques. Mais ses caractéristiques varient significativement d'une région à l'autre. La sécheresse ne doit pas être confondue avec l'aridité. La sécheresse se manifeste dans le temps, tandis que l'aridité est un phénomène spatial (elle est limitée dans les régions à faible précipitation).

La sécheresse n'a pas une définition universelle, il y a autant de définitions de la sécheresse qu'il y a d'utilisation de l'eau. Mais, on peut dire que la sécheresse est un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée [1].

1.3. Type de sécheresse [1]:

Il existe plusieurs types de sécheresse, la sécheresse *météorologique, hydrologique, agricole et socio-économique*.

1.3.1. Sécheresse météorologique: basée sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche.

Cette définition doit être considérée spécifique à une région puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre.

1.3.2. Sécheresse hydraulique: un autre type de sécheresse basé sur les eaux souterraines et la gestion des opérations. Les sécheresses en eaux souterraines existent lorsque la recharge des aquifères est inférieure à la recharge annuelle moyenne sur une période de plus d'un an. Puisque peu de données concernant les aquifères sont disponibles, ce type de définition est peu utilisé.

1.3.3 Sécheresse agricole: quant à elle, c'est un rapport entre les caractéristiques des sécheresses météorologiques ou hydrologiques et les impacts sur le milieu agricole.

Elle porte sur l'insuffisance des précipitations, la différence entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, et le manque en eau des sols et des réserves hydriques. Ces sécheresses dépendent grandement des conditions climatiques, des caractéristiques biologiques et phénologiques des cultures ainsi que des propriétés physiques et biologiques des sols.

1.3.4 Sécheresse socio-économique: définit le lien entre l'offre et la demande d'un bien économique et certains éléments des sécheresses météorologiques, hydrologiques ou agricoles. L'occurrence d'un tel type de sécheresse dépend de la variation temporelle et spatiale de l'offre et de la demande de ce bien économique. Ce bien dépend toujours des conditions climatiques et peut tout aussi bien être l'eau, une récolte ou de l'électricité. Il y a sécheresse socio-économique lorsque la demande pour un bien excède l'offre à cause d'un manque hydrique relié au climat.

1.4. Conséquences de la sécheresse [1]:

La sécheresse joue un rôle perturbateur et pour conséquences:

- Le manque d'eau pour les cultures vivrières, la diminution du rendement des cultures et des prairies;
- L'augmentation des disettes et des famines et surcroît des épidémies en raison de la malnutrition;
- Les troubles sociaux et les conflits pour les ressources naturelles (eau et nourriture);
- Migration de la population, l'augmentation des réfugiés climatiques;
- Des problèmes avec certaines espèces comme des invasions;
- Réduction de la production d'électricité;
- La pénurie d'eau pour les industries;
- La modification, les perturbations voire la destruction des écosystèmes en particulier des zones humides.

1.5. Risque de la sécheresse [1]:

La différence des risques associés aux cyclones tropicaux et aux inondations, vulnérabilité et l'exposition transforment l'aléa de sécheresse en risque. Les impacts et les facteurs peuvent être étroitement liés, mais comme bon nombre d'entre eux touchent des ménages pauvres des zones rurales, à l'heure actuelle, il n'existe guère d'incitation politique ou économique à s'attaquer au risque. Pourtant, le renforcement de la gestion du risque de sécheresse, comme partie intégrante de la gouvernance des risques, sera fondamental pour maintenir la qualité de vie dans nombre de pays durant les décennies à venir. Ce chapitre n'est qu'une première étape dans la présentation des questions complexes qui gravitent autour du risque mondial de sécheresse. Comprendre et révéler tout l'éventail de ce risque est un défi qu'il va falloir relever dans les années à venir qui sont associés à la sécheresse restent moins bien compris.

Conséquent, la sécheresse est souvent un risque moins visible. Les pertes et les impacts ne sont pas enregistrés systématiquement, les normes mondiales pour mesurer l'aléa de sécheresse ne sont introduites qu'avec beaucoup de lenteur et la collecte des données soulève maintes difficultés.

De ce fait, les évaluations détaillées des risques de sécheresse commencent tout juste à voir le jour et, à ce stade, il n'existe pas de modèle crédible du risque mondial de sécheresse. Il ressort des études de cas que les impacts de la sécheresse ne peuvent être qu'en partie attribués à une pluviosité déficitaire ou capricieuse, car le risque de sécheresse semble se construire au fil du temps sous l'effet d'une multitude de facteurs. Parmi ceux-ci figurent la pauvreté et la vulnérabilité rurale; l'accroissement de la demande d'eau en raison de l'urbanisation, de l'industrialisation et de la croissance de l'agro-industrie; une gestion du sol et de l'eau insuffisante; la faiblesse ou l'inefficacité de la gouvernance; et enfin la variabilité et l'évolution du climat. Ces facteurs augmentent la venir.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1. Situation géographique (site net1):

Sur le plan administratif, l'ensemble territorial des hauts plateaux est constitué en 14 wilayas sur le total de 48 Wilayas algériennes (figure 1), réparties à travers trois espaces (hauts plateaux-Ouest, hauts plateaux-Centre, hauts plateaux-Est):

Partie I: Sécheresse climatique, concepts théoriques

Chapitre I: Définitions et présentation de la zone d'étude

- L'Est : ce territoire est constitué par les wilayas de Sétif, Bordj Bou Arreridj, Batna, Khenchela, Tébessa et Oum El Bouaghi ;
- Le Centre : ce territoire est constitué par les wilayas de Djelfa, Laghouat, M'Sila et Tissemsilt ;
- L'Ouest : ce territoire est constitué par les wilayas de Tiaret, Saida, Naâma et El Bayadh.

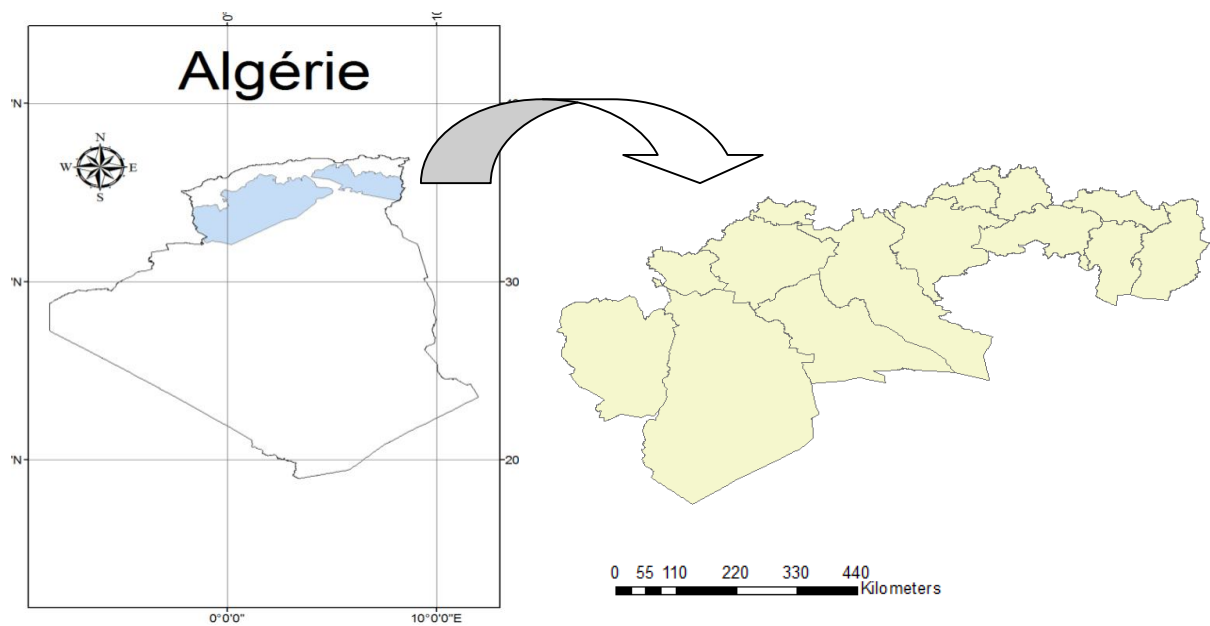


Figure1: Situation géographique de la zone d'étude

2.2. Superficie et population (site net1):

Le tableau 1 récapitule la superficie des trois régions des hauts plateaux, ainsi que le taux de population pour chaque région.

Tableau 1: Les trois régions des hauts plateaux: superficie et population.(site net1)

Région	Superficie	Population (2008)
2008Hauts plateaux Ouest 5 wilayas	139.409 Km ²	2.571.887
Hauts plateaux Centre 3 wilayas	110.190 Km ²	2.884.155
Hauts plateaux Est 6 wilayas	54.487 Km ²	5.556.075
Région des hauts plateaux 14 wilayas	304.086 Km ²	11.012.117

2.3. Topographie (site net1):

Les hauts plateaux sont situées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1 200 m. Elles sont constituées de dépressions salées, chotts ou sebkhas et elles sont séparées du Sahara par l'Atlas saharien, qui forme une succession de chaînes au caractère aride (figure 2).

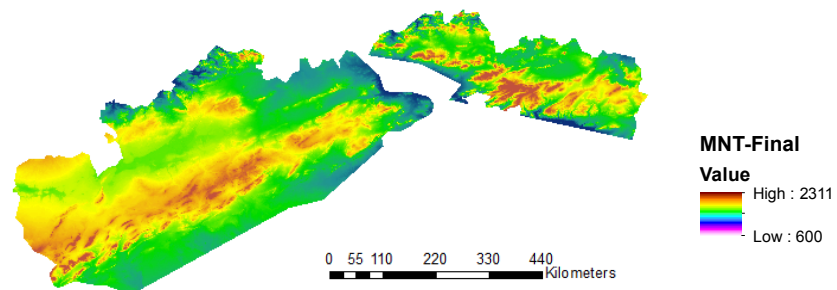


Figure 2: Modèle numérique de terrain de la zone d'étude
(site net 1)

Deux grands ensembles sont distingués3:

- Les steppes occidentales, qui sont situées dans le Sud Oranais et le Sud Algérois. L'altitude de ces Hautes Plaines décroît du Djebel Mzi à l'Ouest à la dépression salée du Hodna au centre.
- Les steppes orientales à l'Est du Hodna, qui sont situées dans le Sud Constantinois. Elles sont bordées par le Massif des Aurès et des Némemchas.

2.4. Climat (site net2):

2.4.1. Températures: Au centre et à l'ouest, dans les hauts plateaux de la région de Djelfa, la température estivale varie de 30 °C à 38 °C.

Dans l'est, la zone des Aurès, les hivers sont très froids, la température atteint parfois les - 18 °C sous abri. Les étés sont très chauds. Le thermomètre affiche parfois 50 °C à l'ombre. Les variations de température sont très importantes dans cette région du monde. La température estivale varie de 30 °C à 38 °C.

2.4.2. Précipitations: Dans les Aurès, la quantité de pluie indique 100 mm de moyenne annuelle. Cependant, des pluies diluviennes sont constatées dans les Aurès. Les dégâts causés par des crues peuvent être considérables surtout dans la Wilaya de Batna.

Les deux figures ci-dessous, comme exemples, illustrent une climatologie de précipitations pour les deux stations météorologiques de Batna et de Mecheria (figure 3).

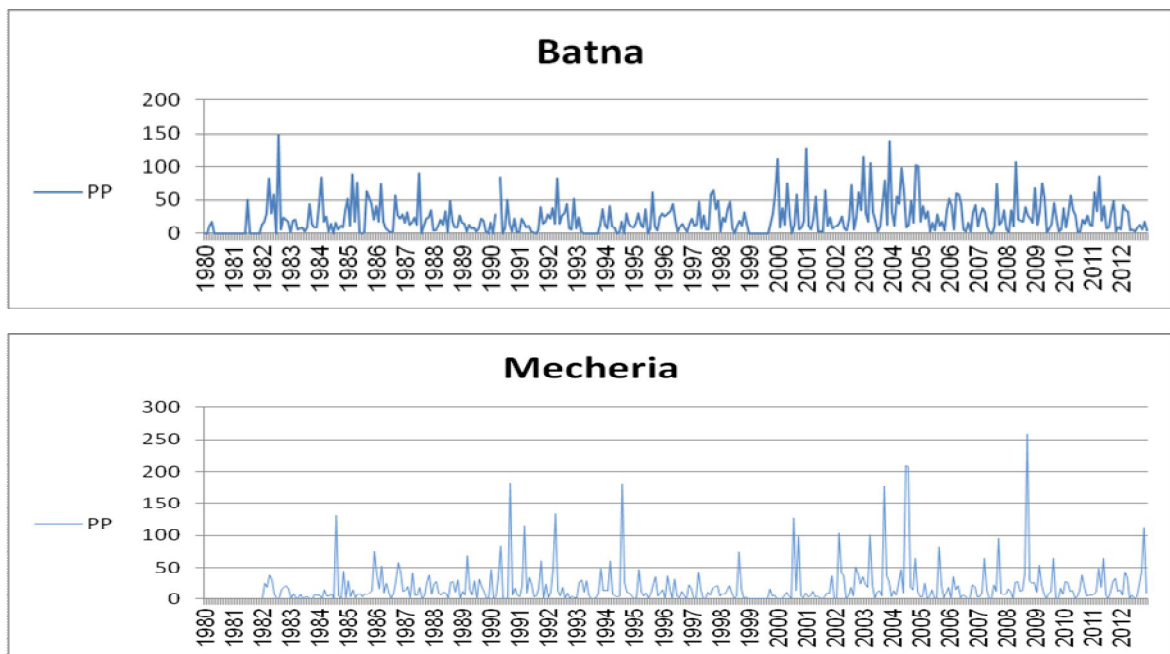
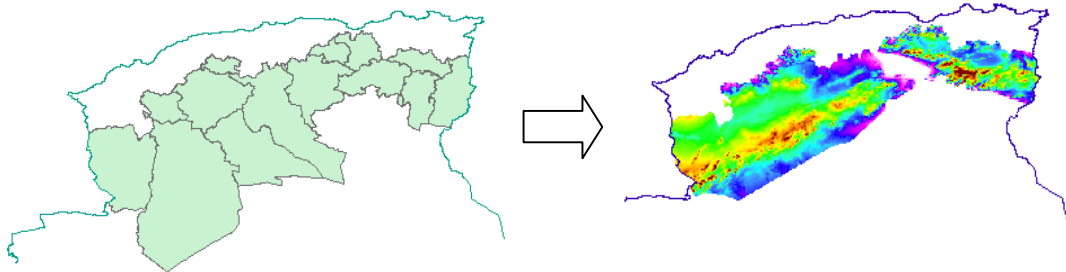


Figure 3: Précipitations des stations météorologiques de Batna et de Mecheria.

3. Extraction de la zone d'étude:

Sachant que la définition administrative de la zone d'étude, prescrite en haut, ne reflète pas la géographie réelle des hauts plateaux (extensions sahariennes pour les wilayas d'El Bayadh et de Khenchela), et faible altitude topographique, comme celle de M'sila. Pour cela, et pour délimiter la zone d'étude, d'une manière précise, deux critères ont été retenus (figure 4):

1. Admettre les quatorze wilayas, définis préalablement par un texte administratif, comme région hauts plateaux, et
2. Sélectionner l'altitude topographique à partir de 600 mètres.(site net2)



1. **Figure 4:** Extraction de la zone d'étude (site net2)

4. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a entamé le côté théorique de notre sujet, précisément quelques définitions et présentation de la zone d'étude. Dans le chapitre suivant nous allons présenter l'aspect statistique de la sécheresse climatique.

CHAPITRE 2

Présentation statistique

1. Introduction:

Dans ce chapitre on va exposer quelques indicateurs statistiques caractérisant la sécheresse climatique. Passant par les avantages et limites de chaque indicateur, nous allons présenter notre justification pour le choix porté sur un indicateur spécifique.

2. Indicateurs statistiques:

Les approches traditionnelles font appel à des données directement accessibles, habituellement enregistrées aux stations météorologiques (température, vents, précipitation, etc.) ou à des données pédologiques (type de sol, contenu en eau, etc.).

Les plus simples de tous ces indicateurs de sécheresse sont les tests statistiques. Ceux-ci ne font appel qu'à une seule variable. Ils utilisent généralement les mesures de précipitation recueillies aux stations météorologiques pour décrire les conditions de sécheresse. Ils ont pour but de comparer les valeurs actuelles à la tendance historique. Ils sont simples, faciles et rapides à utiliser. Ce ne sont pas formellement des indicateurs de sécheresse mais leur valeur donne une bonne indication des conditions climatiques régnant dans la région autour de la station.

2.1. Le Pourcentage à la Normale - PN [3]:

Est sûrement le plus simple de tous. Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur (formule 1) est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année.

$$PN = (P / P_m) * 100 \quad [\%] \quad (1)$$

où :

P	Précipitation totale d'une période (mm)
P _m	Précipitation moyenne historique d'une période (mm)

Une condition nécessaire à l'application de cette méthode est la normalité de la distribution des données de précipitation. En réalité, cette distribution est rarement normale pour les périodes de temps de quelques mois ou moins. La moyenne et la valeur médiane sont alors différentes et il faut alors faire un choix quant à la donnée à utiliser comme référence historique.

Le PN est un indicateur très efficace lorsqu'il est utilisé pour comparer une seule région ou une seule saison. En région hétérogène ou pour différentes saisons, il existe une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, son interprétation devient plus difficile. Par exemple, 10 % de 150 mm n'a pas la même signification que 10 % de 500 mm. Cette variabilité fait également en sorte qu'il est difficile de calculer la fréquence des écarts à la normale et donc de connaître la fréquence des sécheresses et de comparer les effets entre différentes régions. Cet indicateur est souvent incompris et donc parfois mal interprété.

2.2. L'Indice de précipitation standardisé (SPI – *Standardized Precipitation Index*) [4]:

Est un autre indicateur statistique communément utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Basé sur un historique de précipitation de longue durée, le SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cette période varie généralement de 3 mois à 2 ans, selon le type de sécheresse que l'on désire suivre (formule 2).

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_p} \quad (2)$$

où :

P	Précipitation totale d'une période (mm)
P _m	Précipitation moyenne historique de la période (mm)
σ _p	Écart-type historique des précipitations de la période (mm)

McKee *et al.* (1993) ont développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux ou les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, la période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable. Une valeur négative, donc un déficit, ne représente pas pour autant une situation de sécheresse mais serait plutôt représentatif d'une situation de stress hydrique temporaire de la végétation. Des déficits

hydriques de plus longues durées (3, 6 mois, 1 an, etc.) sont par contre nécessaires pour avoir un impact sur les ressources hydriques du sol ou sur les ressources en eau de surface (sécheresse hydrologiques).

Tableau 2: Sévérité du SPI

SPI	Catégorie de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,50 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Humide
-0,99 à 0,99	Normal
-1,00 à -1,49	Modérément sec
-1,50 à -1,99	Sévèrement sec
-2,00 et moins	Extrêmement sec

McKee *et al.* (1993) utilisent la classification retrouvée au tableau 2 afin de définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI. Selon l'auteur, une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. La magnitude de la sécheresse est obtenue en additionnant toutes les valeurs du SPI d'une période sèche.

2.3. Autres indicateurs statistiques:

Il existe bien sûr d'autres indicateurs de sécheresse basés sur différentes relations statistiques. Par exemple, il est possible de normaliser les précipitations, de manière similaire à la normalisation des indicateurs satellitaires comme le NDVI [5]. Ainsi, la différence entre les précipitations d'une période et les précipitations moyennes historiques de cette période est divisée par la différence maximale des précipitations historiques de cette période. Le résultat est un indicateur qui varie de 0 à 1. Cet indicateur est alors plus facilement comparable aux indicateurs satellitaires. Quiring et Papakryakkou (2003) mentionnent aussi l'**Indice de sécheresse de NOAA (NDI - NOAA Drought Index)** [6] qui compare les précipitations mensuelles moyennes à la moyenne historique des huit semaines qui précèdent.

Tous ces indicateurs ont cependant la faiblesse de ne tenir compte que des précipitations. Certes, la pluviométrie est le facteur le plus important dans la caractérisation des sécheresses

mais d'autres facteurs climatiques (température, vent, etc.) ou pédologiques, comme le contenu en eau du sol, sont aussi importants. Les indicateurs météorologiques et hydrologiques sont des outils qui font intervenir ce genre d'information.

3. Indicateurs météorologiques et hydrologiques:

3.1. L'indice de sécheresse de Keetch Byram (KBDI - Keetch Byram Drought Index) [7]:

C'est un des indicateurs météorologiques. Un indicateur journalier cumulatif qui décrit la quantité d'humidité manquante dans les sols. Il a été développé pour le Sud-Est américain. Il est utilisé localement pour le contrôle des incendies en milieux forestiers ou en régions naturelles où il estime le déficit cumulatif en humidité des humus profonds et des couches supérieures du sol. C'est un indicateur dont le calcul est relativement simple et qui est basé sur la capacité en eau d'un sol de 20mm (8 pouces).

$$dQ = \frac{[203,2 - Q][0,968 \exp(0,0875 T + 1,5552) - 8,3]dt * 10^{-3}}{1 + 10,88 \exp(-0,001736 P)} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

où :

dQ	Facteur de sécheresse (mm)
Q	Déficit en humidité du sol (mm)
T	Température maximale journalière (°C)
P	Précipitation moyenne annuelle (mm)
dt	Temps depuis lequel le sol perd son humidité (d)

Son calcul débute à partir d'une journée où le sol est saturé en eau. Il est donc parfois nécessaire de revoir l'historique des conditions climatiques pour trouver le dernier jour où le sol était à saturation. De plus, afin de calculer les facteurs de sécheresse du KBDI, une série temporelle des valeurs de précipitation doit être disponible pour une longue période. Plusieurs tableaux de facteurs de sécheresse sont créés en fonction de la valeur moyenne des précipitations locales.

3.2. Indice de sécheresse de Palmer (PDSI - Palmer Drought Index) [8]:

Cet indicateur fut modifié afin de pouvoir caractériser le début, la fin et la sévérité des périodes de sécheresse. Les PDI, sont des indicateurs qui mesurent la différence d’approvisionnement en humidité pour les phases sèches autant que pour les phases humides. Ils sont calculés pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales. Parce que ce sont des indicateurs normalisés, il est possible de comparer différentes régions (formules 4, 5 et 6).

$$PDSI = X(i) = 0,897X(i-1) + Z(i)/3 \quad [--] \quad (4)$$

où :

$X(i-1)$	PDSI de la période précédente (--)
$Z(i)$	“Moisture Anomaly Index” ou Indice de l’anomalie en humidité (--)
i	Mois de l’année (--)

et

$$Z(i) = K(P - P_c) \quad [--] \quad (5)$$

Où :

K	Facteur de poids (voir Alley, 1984) (--)
P	Précipitation actuelle (mm)
P_c	Précipitation CAFEC (mm)
$P_c = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL$	[mm] (6)

Où :

CAFEC	“Climatically Appropriate for Existing Conditions” ou approprié pour les conditions climatiques existantes
$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ et δ_j	Coefficients climatiques mensuels
j	Mois de l’année (--)
PE	Évapotranspiration potentielle (mm)
PR	Recharge du sol potentielle (mm)
PRO	Ruissellement potentiel (mm)
PL	Perte potentielle dans le sol (mm)

Le PDSI utilise, en plus des précipitations et de la température de l’air, l’humidité contenu dans le sol. Il ne tient toutefois pas compte des ressources hydrologiques de surface pouvant influencer les conditions de sécheresse, comme les cours d’eau, les réservoirs, la couverture neigeuse ou le gel du sol. Il ne tient pas compte non plus des changements pouvant survenir dans l’utilisation des ressources en eau.

Cet indicateur ignore le temps de propagation de l'eau dans le sol. Il en résulte donc une surestimation de l'approvisionnement en eau du sol, ce qui introduit un biais dans l'estimation des conditions de sécheresse. De plus, les valeurs représentant le début, la fin et l'intensité d'une période de sécheresse sont arbitrairement choisies.

3.3. L'Indice d'humidité disponible pour les cultures (CMI - Crop Moisture Index) [9]:

Créé pour surveiller les conditions hydriques hebdomadaires des cultures à l'échelle régionale est un indicateur météorologique (Palmer, 1968) qui donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité. Développé à partir des procédures du PDSI, cet indice définit les sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration (formules 7, 8 et 9).

$$CMI = EAI + WI \quad [--] \quad (7)$$

Où :

(WI) « Wetness Index » :

Recharge du sol (Précipitation) combinée au ruissellement (mm)

(EAI) « Evapotranspiration Anomaly Index » :

$$EAI = 0,67Y_{i-1} + 1,8 \frac{ET - ET_c}{\sqrt{\alpha}} \quad [--] \quad (8)$$

Où :

Y_{i-1}	CMI de la semaine précédente (--)	(9)
ET	Évapotranspiration (mm)	
ET _c	Évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent (mm)	
α	Coefficient d'évapotranspiration (évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle) (--)	

Il utilise la température moyenne et les précipitations totales hebdomadaires comme intrants, en plus de la valeur du CMI de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles. Le cumul des CMI des semaines précédentes engendre donc une erreur cumulative dans le calcul du CMI de la semaine.

3.4. L'Indice des réserves en eau de surface (SWSI - Surface Water Supply Index):

Un autre indicateur intéressant pour la caractérisation de la sécheresse. Cet indicateur hydrologique, créé par Shafer et Dezman (1982), est un complément au PDSI qui incorpore des éléments d'hydrologie et de climatologie (formule 10).

$$SWSI = \frac{[(a * PN_{sp}) + (b * PN_{pcp}) + (c * PN_{rs}) - 50]}{12} \quad [--] \quad (10)$$

Où :

a, b, c sont les poids associés à chaque composante
et $a+b+c=1$
sp Couverture neigeuse équivalente en eau (mm)
pcp Précipitation (mm)
rs Réservoir (mm)
PN Probabilité de ne pas excéder (%)

Tout comme le PDSI, le SWSI est un indicateur normalisé qui permet de comparer différentes régions, généralement pour des périodes mensuelles. C'est un indicateur des conditions hydriques spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il incorpore la couverture neigeuse, les précipitations en montagne, les cours d'eau, le contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Il ne tient toutefois pas compte des écoulements dus à la fonte d'une accumulation antérieure de neige. C'est un indicateur des conditions de surface calibré pour une région homogène et il n'est pas conçu pour de grandes variations topographiques.

4. Sélection de stations météorologiques:

La source des données climatologiques est l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), avec les paramètres utilisés: températures, précipitations et humidité. Le choix s'est porté sur 13 stations météorologiques réparties sur la région d'étude, en garantissant en même temps l'homogénéité et la continuité des données collectées. La figure 5 présente les stations météorologiques retenues dans notre étude.

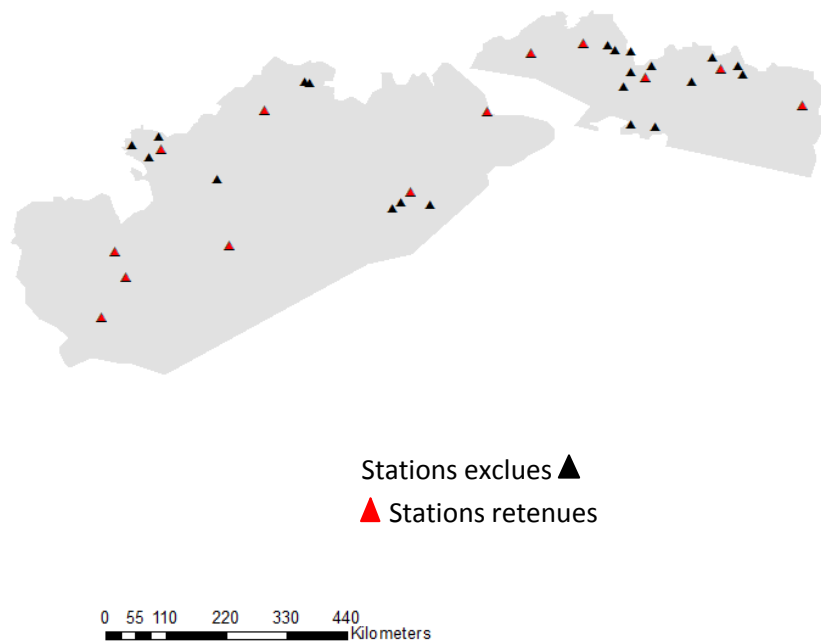


Figure 5: Sélection des stations météorologiques.

5. Conclusion:

Après avoir cité quelques indicateurs d'ordre statistiques, on a opté l'utilisation de l'indice normalisé de précipitation, vu sa simplicité et sa dépendance d'un seul paramètre météorologique qui est la précipitation.

Le chapitre suivant de la partie II, nous allons présenter l'approche satellitaire dans le suivi de la sécheresse climatique.

PARTIE II

Approche satellitaire

CHAPITRE 3

indicateurs satellitaires

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter, la source des données satellitaires (MODIS) et d'une manière brève, quelques indicateurs basés sur le traitement des images satellitaire, permettant le suivi spatio-temporel de la sécheresse climatique.

2. Le choix de la source de données satellitaires:

Tout simplement, le choix s'est porté sur le satellite américain MODIS pour plusieurs raisons. On peut citer:

- La gratuité des données satellitaires;
- L'accès direct aux données.
- La large couverture spatiale, réalisée par l'imageur du satellite;
- La périodicité importante du satellite. 1 image à 2, par jour.

L'accès aux données est assuré par plusieurs portails web. Dans notre cas, les produits sont disponibles sur le lien suivant: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

3. Présentation du satellite MODIS [site net3]:

Le spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (MODIS) a été installé à bord des satellites Terra et Aqua. Fréquemment utilisés comme source de données environnementales dans nombre des régions du monde, les divers produits issus de MODIS décrivent les caractéristiques terrestres, océaniques et atmosphériques. Les satellites tournent continuellement autour de la Terre et servent à étudier les processus et tendances à toutes les échelles, du local au global. Les produits MODIS de niveau 1 et les données atmosphériques sont disponibles au centre de distribution des données archivées du Goddard Space Flight Center (GSFC) à Greenbelt, au Maryland. Les images terrestres sont distribuées par le centre d'acquisition des données sur les processus terrestres du Centre de données EROS (EDC) du USGS. On peut se procurer les images sur la cryosphère (neiges et glaces terrestres) auprès du National Snow and Ice Data Center de Boulder, au Colorado.

MODIS, possède une trace au sol et une fréquence de passage qui permet une couverture journalière d'une zone avec une résolution radiométrique plus fine. Ce capteur possède 36 bandes spectrales étroites qui permettent une caractérisation plus précise des surfaces. De plus, le nombre important de bandes spectrales permet une utilisation optimale des longueurs d'onde.

Par exemple certaines bandes réflectives de MODIS sont bien adaptées pour la caractérisation de la chlorophylle (1, 8, 9, 10, 11), d'autres sont plus appropriées pour la détection de la neige et des nuages (6) ou sensibles aux propriétés des aérosols (15,16) qui affectent les lectures. De plus, la résolution spatiale de MODIS (250 - 1000 m) est meilleure que celle de NOAA AVHRR.

4. Caractéristiques techniques du satellite MODIS [site net3]:

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un radiomètre imageur dont deux exemplaires sont actuellement en orbite. Le premier sur la plate forme Terra passe à l'équateur à 10h30 locales sur un nœud descendant (il a été mis en orbite en décembre 1999), le second sur Aqua passe à l'équateur à 13h30 en nœud ascendant.

MODIS possède un demi-angle d'ouverture de 55° d'où une fauchée de 2 330 km et une couverture journalière globale. Il effectue les différentes mesures grâce à un ensemble de barrettes CCD. Ils possèdent 36 canaux spectraux répartis du violet (405 nm) à l'infrarouge thermique (14,385 μ m). Ces canaux ont été choisis pour répondre aux différentes missions :

- étude des gaz.
- étude des aérosols.
- étude des nuages.
- étude de la surface terrestre (végétation).

La résolution spatiale de MODIS dépend des canaux utilisés, elle varie entre :

- 250 $\times$ 250 m².
- 500 $\times$ 500 m².
- 1 $\times$ 1 km².

Pour notre projet d'étude, on a utilisé les images de résolution spatiale de 1km x 1km.

5. Indicateurs de sécheresse à partir des données de télédétection:

Dans le domaine de la télédétection, de nombreux chercheurs ont examiné la possibilité d'évaluer et suivre la sécheresse en utilisant soit la Réflection, soit les données thermiques ou des réponses combinées, provenant du capteur Advanced Very High Resolution Radiometer à bord du satellite National Oceanic and Atmospheric (NOAA).

Ci-dessous une liste d'indices basés sur la réflexion :

5.1. L'indice normalisé de différence de végétation (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI):

Mis au point par Rouse *et al.* (1973) [5], le NDVI est élaboré à partir de la différence entre la Réflectance de la végétation fournie par le capteur AVHRR dans le proche infrarouge (canal 2 : 0,73-1,1 μm) et de celle obtenue dans le rouge (canal 1 : 0,55-0,68 μm), divisée par leur somme (formule 10).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \quad (10)$$

Où:

PIR: le canal proche infrarouge.

R: le canal rouge.

Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel étant comprise entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal maximal). C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui va renseigner l'observateur sur la densité de couvert et la quantité de biomasse verte. Cet indice est très utilisé pour le suivi du couvert végétal à cause de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal et la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse.

Comme cet indice est normalisé, les effets de l'angle d'illumination et de l'angle de vue sont réduits. La normalisation permet aussi de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie.

La figure 6 présente l'indice de végétation réalisé pour la période du 02 au 18 février 2008.

On constate une faible apparence végétative dans les régions ouest des hauts plateaux.

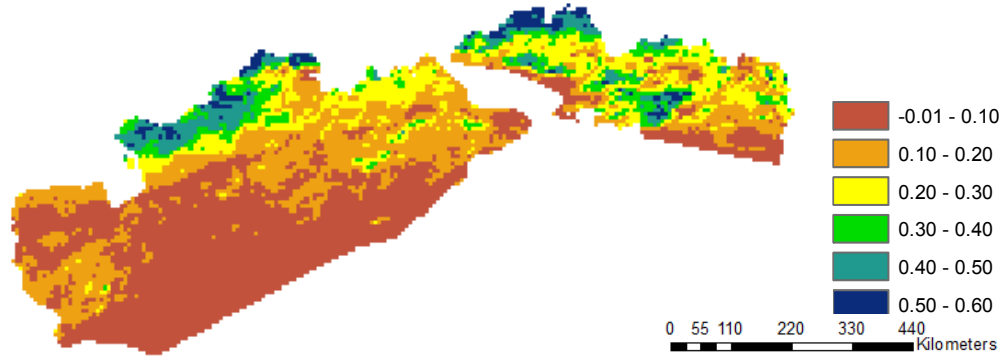


Figure 6: NDVI de la zone d'étude, du 02 au 18 février 2008

5.2. Température de surface (Ts):

La température de surface (Ts) est obtenue par conversion de la luminance, suivant la loi de Planck, dans l'infrarouge thermique qui est ensuite corrigée des effets de l'émissivité par utilisation du modèle Split Window [10]. D'après la formule 11:

$$T_s = (A1 + A2((1-\epsilon)/\epsilon) + A3 (\Delta\epsilon/\epsilon^2)) (T31 + T32)/2 + (B1 + B2((1-\epsilon)/\epsilon) + B3(\Delta\epsilon/\epsilon^2))(T31 - T32) + C \quad (11)$$

Où:

$$\epsilon = 0.5 (\epsilon_{31} + \epsilon_{32})$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{31} - \epsilon_{32}$$

ϵ_{31} : émissivité de la bande 31

ϵ_{32} : émissivité de la bande 32

A1, A2, A3, B1, B2, B3 et C: coefficients de l'algorithme Split-Window, obtenus par simulation.

Les images de température obtenues nécessitent un ajustement avec les valeurs de température des stations climatologiques. La figure 7 présente le degré de corrélation entre les deux valeurs. Station climatologique D'Oum El Bouaghi (année 2010), comme exemple, et l'image de température de surface correspondante.

La figure 8 expose le résultat de température après ajustement.

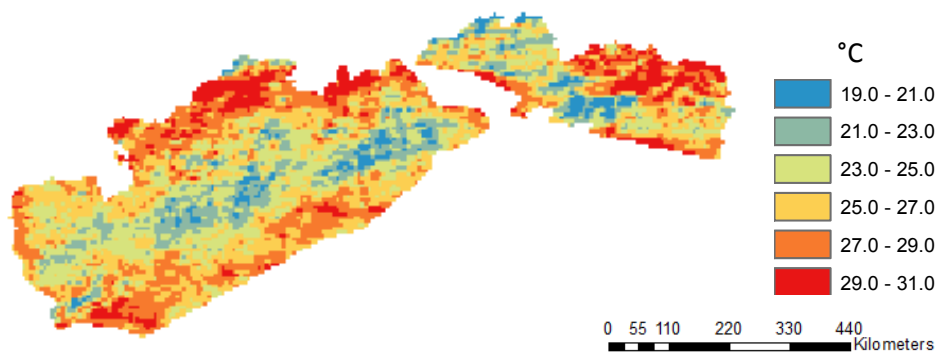


Figure 8: Température de surface de la zone d'étude, du 02 au 10 février 2008

5.3. Vegetation Condition Index – VCI [11]

Cet indice utilise comme intrants les valeurs minimales, maximales et courantes du NDVI de la même décade sur plusieurs années. Il nous renseigne sur les conditions de la végétation pour la décade étudiée par rapport aux situations extrêmes (Min et Max). Il est calculé par la formule 12 suivante :

$$VCI(i) = \frac{NDVI(i) - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \quad (12)$$

Où:

NDVI (i)	NDVI de la période étudié
NDVI _{min}	NDVI minimum de la période étudié
NDVI _{max}	NDVI maximum de la période étudié

Le VCI tente de séparer le signal climatique à court terme du signal écologique à long terme. Il reflète donc la distribution climatique et non les différences de végétation dues aux différents écosystèmes. Il permet aussi de comparer l'effet du climat sur des aires d'études différentes. Le VCI apporte donc une amélioration dans l'analyse de la condition de la végétation pour des aires non homogènes.

Le VCI a été utilisé sur plusieurs continents afin de détecter les situations de sécheresses à grande échelle, mais aussi les conditions d'humidité excessive.

5.4. Indice de Végétation Standardisé – SVI [11]:

Cet indice permet de comparer les conditions de végétation sur des périodes de temps. Il présente la différence entre l'indice de végétation standardisé et la moyenne sur la période étudiée. Le SVI est donnée par (formule 13):

$$SVI_1(i) = \frac{NDVI(i) - \overline{NDVI}}{\sigma} * 1000 \quad (13)$$

Où :

$$\sigma(i) = \frac{\sum_{(i)} (NDVI(i) - \overline{NDVI(i)})^2}{N(i) - 1} \quad \text{Et} \quad \overline{NDVI(i)} = \frac{\sum_{(i)} NDVI(i)}{N(i)}$$

Avec :

$NDVI$	NDVI de la période étudié
$\overline{NDVI}$	NDVI Moyenne de la période étudié
$\sigma(i)$	Ecart type
$N(i)$	Degré de liberté

Cet indice est utilisé souvent pour mesurer les effets du climat sur la végétation sur des courtes périodes de temps. La classification faite pour cet indice est la suivante (tableau 3):

Tableau 3: Classifications pour le SVI [11]

SVI Classifications	
0.975 - 1.0	Very Good
0.75 - 0.975	Good
0.25 - 0.75	Average
0.025 - 0.25	Poor
0 - 0.025	Very Poor

5.5. L'Indice de Condition de Température (TCI) [11]:

Cet indicateur est basé sur la température de surface. Il est applicable à l'échelle régionale ou continentale, de manière instantanée ou pour des périodes allant jusqu'à une année. Le TCI donne aussi une information utile concernant le stress de la végétation dû à une saturation du sol en eau.

La formule 14 donnée par Kogan est :

$$TCI(i) = \frac{T_B^{Max} - T_B^{(i)}}{T_B^{Max} - T_B^{min}} * 100 \quad (14)$$

Ts représente la température de surface dérivée de la bande 4 du capteur AVHRR.

La valeur faible de TCI indique une condition climatique difficile (la température élevée) par rapport à la période étudiée, quant aux valeurs élevées, ils reflètent principalement des conditions favorables.

5.6. Combinaison de TCI et VCI: Indice de Santé de la Végétation (*Vegetation Health Index – VHI*) [11]:

Selon Kogan (1997), le TCI combiné au VCI constitue une source utile d'informations sur le stress causé à la végétation par la sécheresse. C'est aussi un outil utile afin de surveiller presque en temps réel les conditions de la végétation et l'impact du climat sur celle-ci. Combinés aux données recueillies sur le terrain, ces indices semblent être d'excellents outils pour la surveillance des conditions de sécheresse, plus spécialement en agriculture.

Le VHI est définie par la formule 15 :

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI \quad (15)$$

Où α est la contribution relative de VCI et TCI dans le VHI. D'après la plupart des publications, $\alpha = 0.5$, en supposant une même contribution des deux indices et aussi en raison d'absence d'informations plus précises.

Le VHI est utilisé pour différentes applications telles que la détection de la sécheresse, la durée de la sécheresse, le rendement des cultures et la production au cours de la période de végétation.

Le tableau 4 illustre les classifications de VHI.

Tableau 4 : Classification pour VHI [11].

VHI Classification	
Extreme drought	0 - 10
Severe drought	10 - 20
Moderate drought	20 - 30
Mild drought	30 - 40
No drought	>40

6. Moyens logiciels utilisés:

On utilisé plusieurs logiciels indispensables pour la finalisation de notre projet. Parmi ces logiciels, on cite:

6.1. MS Office Excel:

Pour le traitement statistique des données climatologiques des stations météorologiques sélectionnées. Les graphes de températures de précipitations et même de l'humidité ont été réalisés sous environnement MS Office à Excel.

6.2. ArcGIS 10.1 [site net4]:

ArcGIS (figure 9) compte parmi les logiciels des systèmes d'information géographique (SIG), de la firme ESRI (Etats Unis), vous permet d'utiliser l'information géographique pour effectuer des analyses approfondies, avoir une meilleure compréhension de vos données, et prendre des décisions éclairées.

Le SIG permet de concevoir et gérer des solutions exploitant l'information géographique.

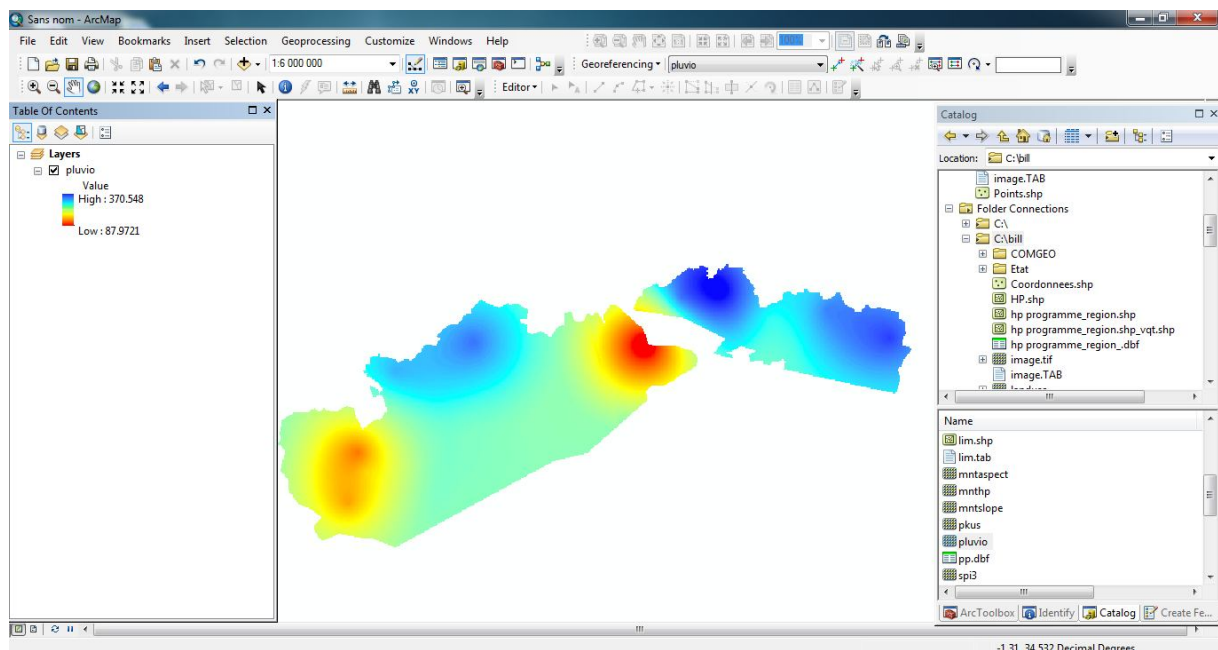


Figure 9: Exemple de l'environnement d'ArcGIS 10.1.

6.3. ENVI 4.2 [site net5]:

Un logiciel de la firme EXELIS – Visual Information Solutions (Etats-Unis), dédié au traitement des images satellitaires. ENVI est la solution logicielle idéale pour traiter et analyser vos données géospatiales. ENVI offre à la fois des solutions de traitement spectral et des techniques de traitements d'images avancées (figure 10).

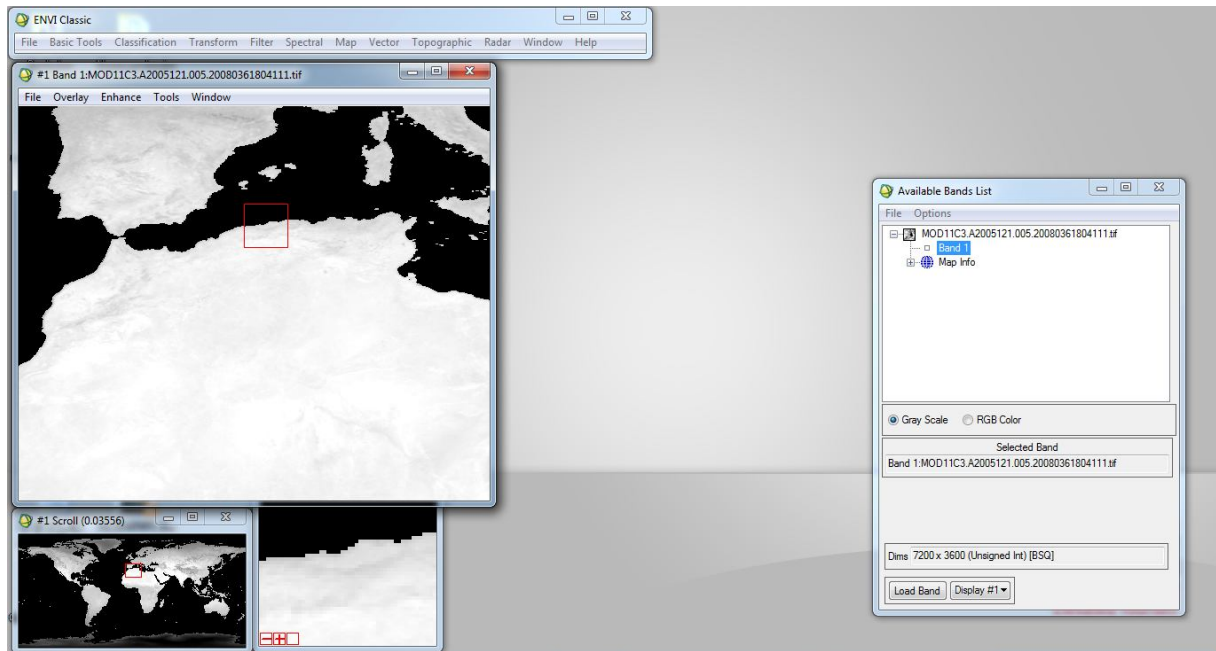


Figure 10: Exemple de visualisation sous ENVI 4.2

6.4. Le SPI_SL_6:

Le calcul du SPI a été effectué avec le programme SPI_SL_6.exe, téléchargeable sur Internet, préparé par l'Organisation Internationale de Météorologie (WMO). Grâce à ce programme, il est possible de calculer l'indice SPI pour un lieu donné et sur un nombre de fenêtres temporelles pouvant aller jusqu'à six simultanément. Le programme a été compilé en C++ pour PC et toutes les bibliothèques sont incluses.

Il suffit de définir un nom de fichier d'entrée (extension .cor), et un nom de fichier de sortie (extension .dat). Ensuite, visualiser le résultat dans Excel.

La figure 11 présente un exemple de calcul de SPI de 3 mois, de 6 mois et de 12 mois.

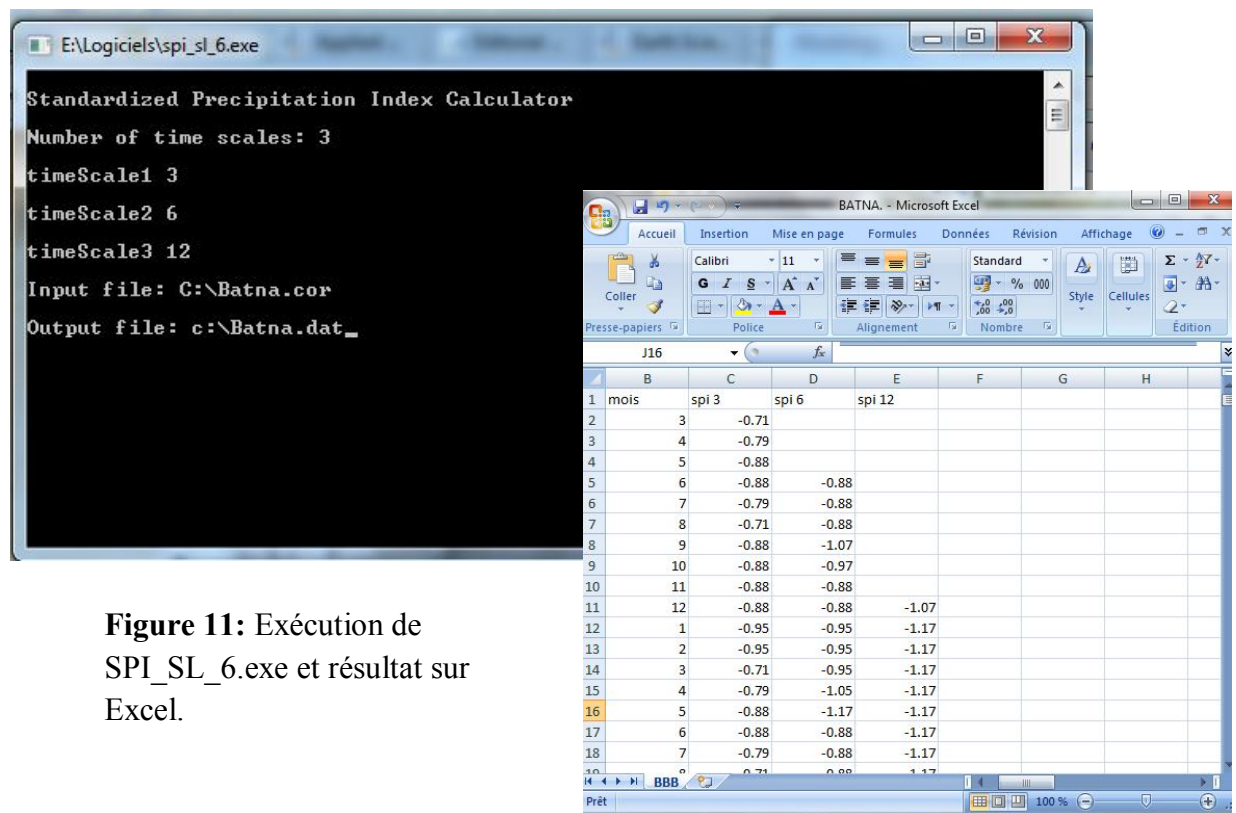


Figure 11: Exécution de SPI_SL_6.exe et résultat sur Excel.

7. Calcul des indicateurs de sécheresse:

Le calcul des indicateurs est fait avec le Model Builder d'ArcGIS. Pour une année et une décennie donnée, le programme calcule les trois indicateurs (VCI, TCI et VHI).

7.1 Description du programme de calcul des indicateurs:

Le programme de calcul des indicateurs est développé avec Model Builder de ArcGIS 10.1. A partir des images décennales historiques sur la période jusqu'à 2008, ce programme permet d'avoir un ensemble d'images temporaires qui sont celles relatives au minimum, au maximum d'NDVI et de la température de surface, à la différence maximale du NDVI et de Ts et à l'écart type d'NDVI pour chaque décennie. Pour une année donnée, le calcul de ces images n'intègre pas les images de l'année en question. Les images intermédiaires obtenues à l'aide du programme seront utilisées pour le calcul du VCI, TCI.

7.2. Calcul du VCI:

Le VCI est un indice de végétation dérivé des valeurs maximale et minimale du NDVI. Les valeurs historiques (NDVImin et NDVImax) de la décade sont tirées des 36 images décadaires. Les valeurs du VCI sont sauvegardées en 8 bits signés.

Un VCI très faible reflète un NDVI qui se rapproche du NDVI minimum. Un VCI élevé reflète un NDVI qui se rapproche du NDVI maximal. En d'autres termes, les valeurs basses du VCI représentent des conditions de stress hydrique alors que les valeurs élevées du VCI représentent des conditions favorables. Plusieurs auteurs ayant utilisé le VCI pour le suivi des sécheresses ont conclu que les conditions de sécheresse sont remplies lorsque le VCI est inférieur à 35 [12].

7.3. Calcul du TCI:

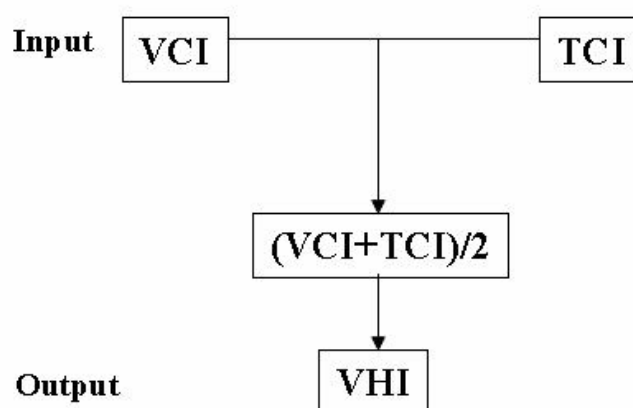
De manière similaire au VCI, le TCI est un indicateur dérivé de la température de surface (bande 4 du capteur MODIS).

Les images du TCI sont sauvegardées en 8 bits signés. Un TCI faible reflète une Ts qui se rapproche de la Ts maximum et un TCI fort reflète un Ts qui se rapproche de la Ts minimum. En d'autres termes, les valeurs basses du TCI représentent des conditions de stress en eau alors que les valeurs élevées du TCI représentent des conditions où il n'y a pas de stress hydrique. Dans la formulation de cet indicateur, les valeurs de Ts et Tsmax sont inversées par rapport à NDVI et NDVImax dans la formulation du VCI. La raison est que les deux indicateurs évaluent la situation (NDVI ou Ts) par rapport à la situation qui représente les conditions sèches. Dans le cas du NDVI, c'est la valeur minimale qui indique un état de la végétation moins favorable alors que pour la température, ce sont les températures maximales qui indiquent les conditions de stress hydriques.

7.4. Calcul de VHI:

Le calcul de l'indicateur VHI est réalisé avec un programme développé sous le Model Builder d'ArcGIS 10.1. Le coefficient α est fixé à 0.5, le VHI devient la moitié de la somme de VCI et TCI (figure 12).

Figure 12: Principe de calcul de l'indice VHI.



La figure 12 présente un exemple de calcul de VHI, effectué avec Model Builder de ArcGIS 10.1.

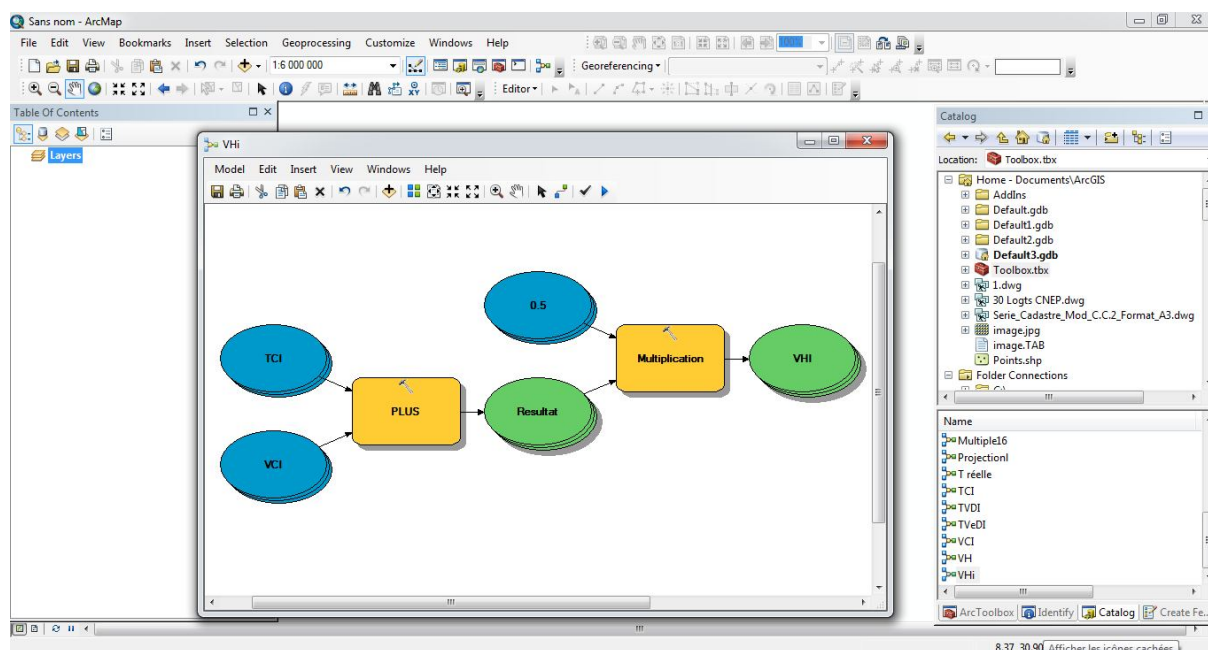


Figure 13: Calcul de VHI avec Model Builder.

8. Conclusion:

A travers ce chapitre on a présenté quelques indicateurs dérivés des images satellitaires (MODIS), les logiciels utilisés ainsi que la démarche de calcul de ces indicateurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats obtenus et de les commenter soigneusement.

CHAPITRE 4

Résultats et discussions

1. Introduction:

Le présent chapitre expose les différents résultats obtenus des analyses statistiques, et produits dérivés des images satellitaires, accompagnés avec des commentaires et interprétations.

2. SPI 3 mois (SPI-3):

Après avoir réalisé les séries de SPI-3, pour les différentes stations climatologiques de l'étude (exemples de calcul de SPI-3, de six stations sont présentés dans la figure 7), la première remarque qui nous a tiré attention c'est la valeur de SPI-3 enregistrée pour les trois mois décembre 1998, janvier et février 1999, et ça pour toutes les stations. On parle de SPI-3 des stations: Mecheria: -1.77, El Bayadh: -1.66, Tiaret: -1.79, Djelfa: -1.66, Sétif: -1.84, Tébessa: -1.8. On a enregistré aussi des valeurs de SPI-3 pour d'autres stations non présentées ici, comme station de Naama: 0 et station de Ain Safra: 0.34. Ce qui explique qu'une sécheresse climatique a presque touché toute la zone d'étude, dans la même période. D'après la classification de McKee *et al.*, (1993) de degré de sévérité de sécheresse, et à l'exception des stations de Naama et de Ain Safra, on peut dire que la sécheresse enregistrée était entre modérée et sévère.

Partie II: Approche satellitaire

Chapitre 4: Résultats et discussions

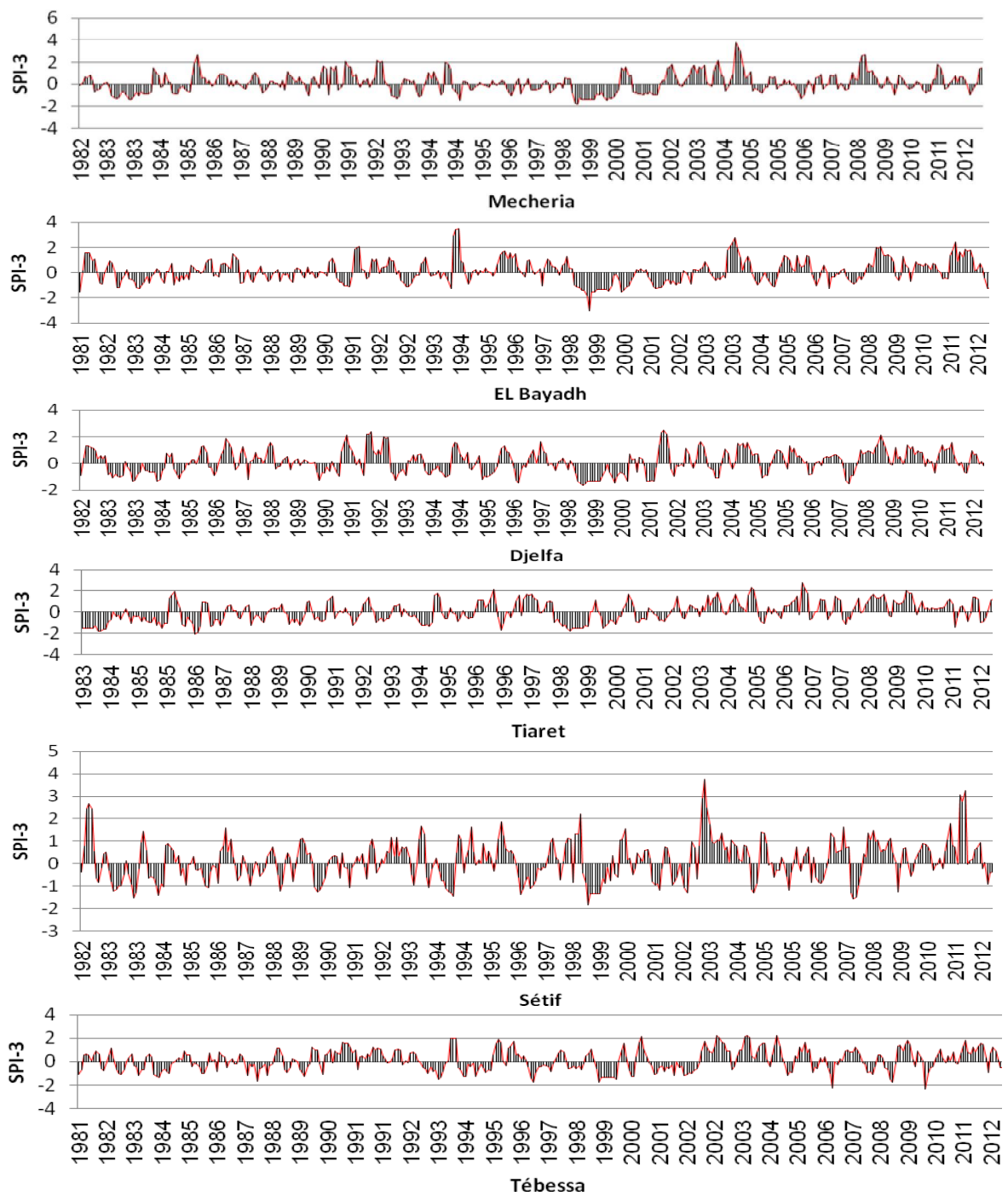


Figure 14: SPI-3 des stations météorologiques sélectionnées.

3. Interpolation des SPI-3:

La figure 15 présente les différentes méthodes d'interpolation exécutées (pour définir l'interpolation optimale): Spline, IDW et Krigeage.

Les résultats obtenus des SPI-3, de la période décembre 1998, janvier et février 1999 peut être cartographié, sous ArcGIS 10.1. La figure 15 présente les différentes méthodes d'interpolation exécutées (pour définir l'interpolation optimale):

D'après les trois interpolations, de la figure 15, il nous semble que l'interpolation du SPI-3 IDW (fig. 15.b) est l'interpolation optimale, qui reflète le maximum de réalité, vis-à-vis des valeurs de SPI-3 obtenues. Raisons: valeur de la station de Mecheria (-1.77), qui n'apparaît pas dans Spline (fig 15.a) ou Kriging (fig 15.c). Autre cas est celui de la station d'Oum El Bouaghi (non présentée dans ici), mal présentée dans Krigeage et surestimé dans Spline.

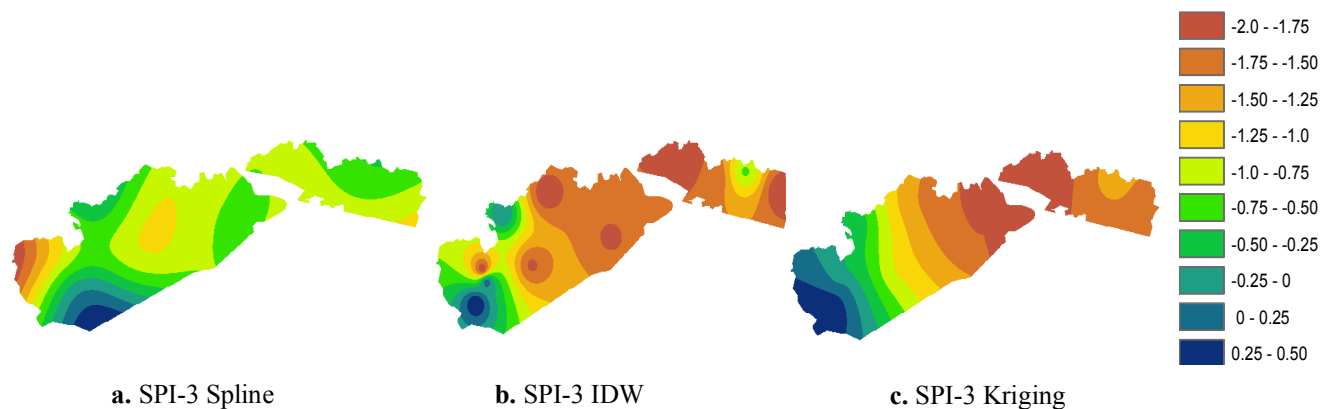


Figure 15: Différentes méthodes d'interpolation de SPI-3, périodes: 12/98-01/99 et 02/99

4. VHI:

4.1. TCI:

Le calcul de l'indice de santé de la végétation (VHI), passe par le calcul des indices de condition de température (TCI) et la condition de la végétation (VCI).

Le TCI est présenté dans la figure 16. Les valeurs faibles de TCI indiquent des régions de températures de sol élevées, par contre, les TCI élevés indiquent des températures modérées et période normale.

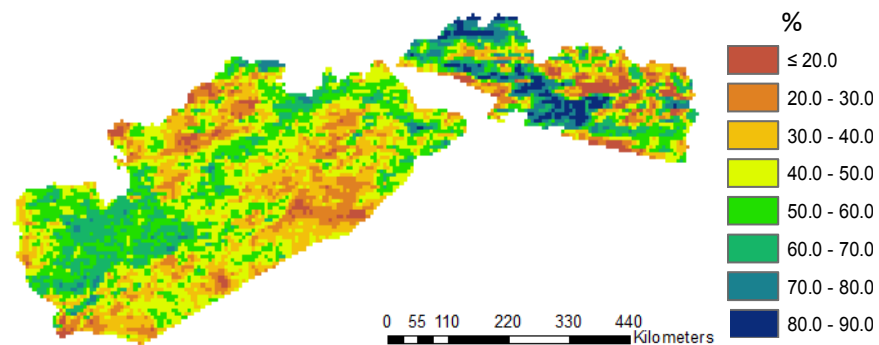


Figure 16: TCI, 2 à 10 février 2008.

4.2. VCI:

L'image de VCI, illustrée dans la figure 17 nous renseigne sur la présence de grande classe de végétation. La partie sud indique des valeurs faibles de VCI (moins de 20.0), donc faibles végétation ce qui implique un stress hydrique considérable.

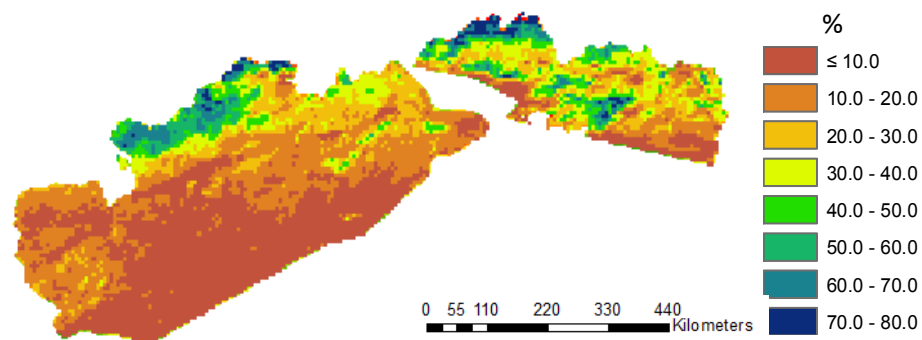


Figure 17: VCI, 2 à 18 février 2008.

4.3. Combinaison de TCI et VCI:

Une fois les deux indices TCI et VCI sont calculés, l'obtention de l'indice de santé de la végétation (VHI) devient simple. Le résultat de la combinaison TCI et VCI est illustré dans la figure 18. D'après la classification de Kogan et al., (2004) [11], les régions sud ouest et sud est sont exposées à des sécheresses sévères (de 10 à 20) et modérées (de 20 à 30).

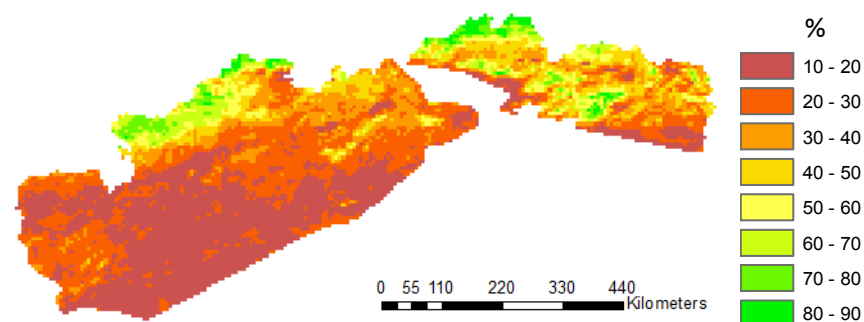


Figure 18: VHI, 2 à 18 février 2008.

Les indices issus de la télédétection sont souvent utilisés pour le suivi de la sécheresse. Il est intéressant de procéder à la comparaison avec d'autres sources d'indices (météorologiques, comme le SPI-3). Ceci constituera une étape d'évaluation des possibilités de la télédétection pour le suivi des conditions de sécheresse quant aux autres sources (TCI, VCI,...).

La figure 19 illustre une comparaison entre les indices SPI-3, TCI et VCI, pour la station de Tébessa. Des moyennes mensuelles de TCI et de VCI ont été calculées afin d'assurer une cohérence dans cette comparaison.

D'après les courbes de la figure 19, on comprend que lorsque les trois indices SPI-3, TCI et VCI fluctuent ensemble vers le bas, cela nous renseigne sur la présence d'une sécheresse d'ordre climatique.

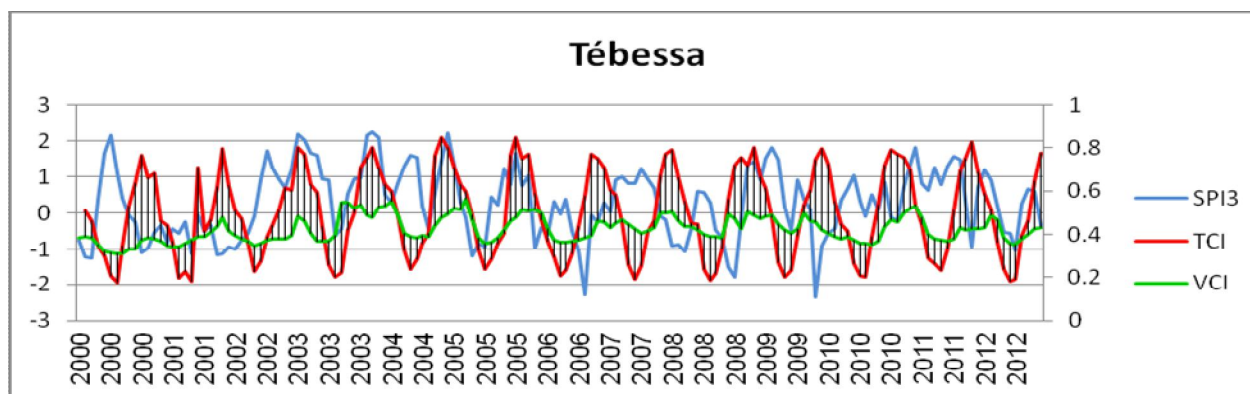


Figure 19: Comparaison entre SPI-3, TCI and VCI, station de Tébessa.

La relation entre le VCI, le TCI et le SPI-3, quoique parfois difficile à percevoir graphiquement, est toutefois incontestable. Durant les périodes octobre-novembre-décembre 2006, et octobre-novembre-décembre 2009, les trois indicateurs varient sensiblement dans le même sens et quand le SPI indique une période extrêmement sèche ($\text{SPI-3} < -2,0$, entre novembre et décembre 2009), le VCI atteint aussi des valeurs indicatrices de conditions de stress hydrique important ($\text{VCI} \approx 0,35$ en avril 2010). Toujours en période considérée normale, mais en été, c'est surtout le TCI et le SPI qui varient dans le même sens.

De manière générale, l'utilisation combinée des indices SPI-3, VCI et TCI semble importante pour le suivi des conditions de sécheresse dans la région des hauts plateaux de l'Algérie. Toutefois, leur interprétation est plus compliquée en zone où la végétation est naturelle et où les précipitations sont de moyennes à abondantes. En période de sécheresse, les 3 indices fluctuent dans le même sens. Par contre, en période considérée normale, on peut remarquer une meilleure relation entre le TCI et le VCI pendant les étés secs, alors que pendant les hivers plus humides, c'est la relation SPI-3/VCI qui est meilleure.

5. Conclusion:

A travers ce chapitre, on a pu calculer quelques indicateurs satellitaires, dérivés des images satellitaires MODIS, ce qui nous a permis de déceler les périodes de sécheresse climatique d'une manière claire, et en confrontant les résultats à des données des stations météorologiques.

D'un autre côté, on suggère d'introduire d'autres indicateurs soit satellitaires ou mixtes (satellitaire et données stations), afin de chercher un moyen optimal pour le suivi de la sécheresse climatique.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La sécheresse est un phénomène naturel, avant tout, mondial qui touche plusieurs pays dont l'Algérie en fait partie. Elle touche d'une manière néfaste, directe ou indirecte, plusieurs domaines et secteurs, comme l'agriculture, la santé, l'environnement, le socio-économique, et même les réserves et ressources naturelles.

Notre étude a porté sur la sécheresse, dans son volet climatique, dans la région des hauts plateaux de l'Algérie. Le choix s'est porté sur cette région pour plusieurs raisons. Tout d'abord, c'est une région assez étendue de climat semi aride, donc fortement exposée à ce genre de phénomènes (pluviométrie ne dépassant pas les 400 mm, par an). En plus, c'est une région de transition entre un système climatique d'origine méditerranéenne au nord et un autre aride-désertique au sud.

En plus de l'analyse statistique, pour le suivi de la sécheresse climatique, l'avènement de la télédétection spatiale nous a permis d'introduire de nouveaux concepts et indices pour mieux comprendre et étudier ce phénomène climatique.

L'utilisation du SPI-3 comme paramètre présente un avantage, d'où on utilise que la précipitation seule dans son calcul. On pense que la sécheresse climatique nécessite l'ajout d'autres paramètres dans le but de mieux cerner le phénomène.

Les résultats obtenus à partir des images satellitaires, comme le TCI, VCI et le VHI présentent des résultats encourageants, mais ça n'empêche de signaler quelques limites concernant l'outil spatial et ses produits. La multi date présente un problème pour le niveau de gris ou la réflectance des images, ce qui introduit un bruit se traduit par décalage de valeurs radiométriques. En plus, la région des hauts plateaux est une région de faible densité végétale, ce qui pose un problème pour le calcul de NDVI.

La chose qui nous ramène à penser d'introduire, dans le futur, un autre indicateur comme le EVI (*Enhanced Vegetation Index*) ou l'indice amélioré de végétation, cet indice qui prend en compte la faible densité du couvert végétal et reflète une réalité meilleure.

De cela, on recommande dans les travaux futurs d'introduire d'autres paramètres météorologiques et satellitaires pour affiner les résultats et mieux comprendre et prédire ce phénomène de sécheresse climatique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Réduction des risques de catastrophe : Bilan mondial 2011 Révéler le risque, redéfinir le développement. Chapitre 3: Risques de sécheresse. Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Désastre - UNISDR.
- [2] Mohammed Layelmam, 2008: Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. Projet de Mise en place d'un Système d'Alerte précoce à la Sécheresse dans trois pays de la rive Sud de la Méditerranée: Algérie, Maroc, et Tunisie LIFE05 TCY/TN/000150, septembre 2008.
- [3] National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne: <http://www.drought.unl.edu/enigma/indices.htm> , 1998.
- [4] McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale. 8th Conference on Applied Climatology, pp.179-184.
- [5] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
- [6] Strommen, N. & Motha, R.P., 1987. An operational early warning agricultural wather system. Dans: Wilhite, D.A., Easterlings, W.E. & Woods, D.A. (Eds.), Planning for drought: Toward a reduction of societal vulnerability. Westview Press, Boulder, CO. États-Unis.
- [7] Keetch, J.J. & Byram, G.M., 1968. A Drought Index for Forest Fire Control. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper SE-38, 1-32.
- [8] Palmer, W., 1965. Meteorological Drought. Research Paper NO. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58p.
- [9] Palmer, W., 1968. Keeping track of the Crop Moisture Conditions, Nationwide: The new crop Moisture Index. *Weatherwise* , 21, 156-161.
- [10] Wan Z., 1999: MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Version 3.3. Contract Number: NAS5-31370. Institute for Computational Earth System Science University of California, Santa Barbara

[11] Singh, R.P., Roy, S. & Kogan, F., 2003: Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*, 24-22, 4393-4402.

[12] Kogan, F.N., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C. & Tsooj, S., 2004: Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25-14, 2889-2896.

Sites Internet:

Site net 1: http://fr.wikipedia.org/wiki/Hauts_Plateaux_%28Alg%C3%A9rie%29

Site net 2: http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_l%27Alg%C3%A9rie#Climats_r.C3.A9gionaux

Site net 3: http://fr.wikipedia.org/wiki/Aqua_%28satellite%29

Site net 4: www.esrifrance.fr

Site net 5: <http://www.exelisvis.fr/Accueil.aspx>

Résumé

La sécheresse est un phénomène universel qui touche plusieurs pays dont l'Algérie en fait partie. Elle a des effets néfastes sur l'ensemble des secteurs, savoir l'environnement, le social et l'économie.

La plupart de ces indices sont fondés sur deux concepts à savoir : l'année normale, et le seuil qui indique la sécheresse. Pour permettre de cerner cette problématique, le présent travail essaye d'intégrer le potentiel des données des stations météorologiques ainsi que l'imagerie satellitaire (MODIS) dans le suivi des conditions de sécheresse en Algérie, et de produire un ensemble d'indices préétablis SPI-3, VCI, TCI et VHI.

Les résultats obtenus à partir des images satellitaires, comme le TCI, VCI et le VHI présentent des résultats encourageants, mais ça n'empêche de signaler quelques limites concernant l'outil spatial et ses produits.

on recommande dans les travaux futurs d'introduire d'autres paramètres météorologiques et satellitaires pour affiner les résultats et mieux comprendre et prédire ce phénomène de sécheresse climatique.