

Les écosystèmes naturels de l'Est algérien face au risque du changement climatique

The natural ecosystems of eastern Algeria facing the risk of climate change

Yamna DJELLOULI ^{1*}, Amal LOUAIL ^{1,2}, François MESSNER ¹,
Khaled MISSAOUI ² & Rachid GHARZOULI ²

Abstract: Several forest ecosystems colonize the mountain ranges of eastern Algeria, Setif region, subject to a Mediterranean climate, ranging from humid to semi-arid. A phytoecological study supplemented by a satellite image processing shows a great diversity of forest formations. There are formations to - *Abies numidica* (Numidian fir), *Quercus canariensis* (Zeen oak) and *Cedrus atlantica* (Atlas cedar), subject to a humid climate. - *Quercus ilex* formations (green oak) dominate in the subhumid and semi-arid; - those of *Pinus halepensis* (Aleppo pine) in the semi-arid. Steppe formations occupy the arid southern areas. From a methodological point of view, we carried out a climatological study (on old, current and future series), which shows the potential evolution of the distribution of bioclimates in this territory, sometimes with the shift of a bioclimatic stage. The results seem to indicate pronounced aridification. Jointly, the BFAST method, applied on time series of NDVI of MODIS images, makes it possible to detect large phenological changes, post synchronous of a drought revealed by the SPI. Over a recent period (2000 to 2018), the changes identified reflect the most disturbed areas. Overall, the inclusion of indicators (bioclimatic evolution and phenological disturbances), provides a spatialization of the affected sites, which will have to be the subject of priority management and development.

Keywords: natural ecosystems, risks, climate change, Algeria

Résumé : Plusieurs écosystèmes forestiers colonisent les massifs montagneux de l'Est algérien, région de Sétif, soumis à un climat méditerranéen, allant de l'humide au semi-aride. Une étude phytoécologique complétée par un traitement d'images satellitales montre une grande diversité des formations forestières. On y retrouve des formations à *Abies numidica* (sapin de Numidie), *Quercus canariensis* (chêne zéen) et *Cedrus atlantica* (cèdre de l'Atlas), soumises à un climat humide. Les formations à *Quercus ilex* (chêne vert) dominent dans le subhumide et le semi-aride ; ceux du *Pinus halepensis* (pin d'Alep) dans le semi-aride. Les formations steppiques occupent les zones méridionales arides. Du point de vue méthodologique, nous avons réalisé une étude climatologique (sur des séries anciennes, actuelles et futures), qui montre l'évolution potentielle de la répartition des bioclimats sur ce territoire, avec parfois le décalage d'un étage bioclimatique. Les résultats semblent indiquer une aridification prononcée. Conjointement, la méthode BFAST appliquée à des séries temporelles du NDVI d'images MODIS permet de détecter de grands changements phénologiques, post synchrones d'une sécheresse révélée par le SPI. Sur une période récente (2000 à 2018), les changements repérés reflètent les lieux ayant subi les plus grandes perturbations. Globalement, la prise en compte des indicateurs (évolution bioclimatique et perturbations phénologiques) fournit une spatialisation des sites affectés, qui devront faire l'objet d'une gestion et d'un aménagement prioritaires.

Mots-clefs : écosystèmes naturels, risques, changement climatique, Algérie

INTRODUCTION

Les écosystèmes naturels forestiers et steppiques du Nord-Est algérien, soumis à un climat tempéré méditerranéen dans toute sa diversité, risquent - avec le changement climatique - d'être de plus en plus vulnérables et de se dégrader, voire de disparaître dans les décennies à venir.

Les principales causes sont à la fois physiques et anthropiques. Nous avons utilisé plusieurs indices (climatiques, écologiques et anthropiques) qui permettent de caractériser et de démontrer le devenir de ces écosystèmes fragilisés par ces pressions de plus en plus fortes.

L'objectif est de comprendre comment le climat évolue dans cette région, quelles en sont les conséquences et quel est le devenir de ces écosystèmes naturels ?

¹ Espaces et Sociétés (ESO) - UMR 6590, Le Mans Université. Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France.

² Laboratoire Projet Urbain, Ville et Territoire, Université Ferhat Abbas Sétif 1. El Bez, Sétif 19000, Algérie.

* Auteur correspondant. Email : yamna.djellouli@univ-lemans.fr

PRESENTATION ET CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude s'étend du littoral au Nord-Est algérien (région de Béjaïa), jusqu'au Sahara septentrional au sud (Fig. 1). Au nord, l'Atlas tellien est soumis à un climat méditerranéen subhumide, humide et per-humide (au sens d'EMBERGER, 1971). Au sud, l'Atlas saharien culmine à plus de 2000 mètres où des écosystèmes reliques persistent et où le climat est de type semi-aride, en général.

Entre les deux Atlas, les hautes plaines parsemées de massifs montagneux ont un climat de type semi-aride à subhumide en altitude (à bioclimat sec au sens de RIVAS-MARTINEZ *et al.*, 2011).

Plusieurs choix ont été retenus pour nos travaux au niveau de l'Est algérien, notamment la représentativité du pays par sa diversité des écosystèmes naturels, les différents types de climats et la diversité des paysages et de la topographie.

- La diversité des écosystèmes est notable, surtout sur les massifs montagneux, puisque nous avons plusieurs étages de végétation avec des formations arborescentes. Les formations à sapin de Numidie (*Abies numidica*) sont remarquables par leur endémisme (GHARZOULI & DJELLOULI, 2005a) et les formations à chênes caducifoliés, surtout le chêne zéen (*Quercus canariensis*), sont indicateurs d'ambiance forestière humide. Les cédraies, formations à cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), sont bien installées quoique subissant parfois une dégradation anthropique (YAHY *et al.*, 2008). Les yeuseraies à chêne vert (*Quercus ilex*), en mélange avec les cèdres culminent à environ 1500 mètres d'altitude et occupent une grande surface de ces territoires. Le chêne vert est une espèce rustique, très utile du point de vue économique mais également pour la stabilisation des sols et contre l'érosion (DAHMANI, 1984). Quant aux pinèdes à Pin d'Alep (*Pinus halepensis*), elles colonisent les moyens et bas versants. Dans la partie méridionale, les steppes arborées à Genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*) et les formations steppiques à Alfa (*Stipa tenacissima*), à armoise blanche (*Artemisia herba alba*), à sparte (*Lygeum spartum*) occupent les glacis et bas de versants. Enfin, les formations à remt (*Arthrophytum scoparium*) annoncent une aridité croissante dans l'étage aride inférieur et per-aride du Sahara septentrional.

- Ainsi, ces écosystèmes se répartissent sur la diversité des étages bioclimatiques méditerranéens : per humide, humide, subhumide, semi-aride et aride et per aride au sens d'EMBERGER (1971).

- Par ailleurs, la diversité topographique se distingue par une altitude qui culmine à près de 1800 mètres dans l'Atlas tellien, au nord, et au niveau de l'Atlas saharien, au sud, où l'influence saharienne est présente. Entre les Atlas tellien et saharien, les hautes plaines (appelés aussi Hauts plateaux) varient de 800 à 1000 m d'altitude où la partie nord est à vocation céréalière (avec le blé dur comme principale culture) et une vocation pastorale où dominent les ovins et les caprins et, depuis ces dernières années, l'élevage de bovins qui a connu une forte augmentation. Des terres à vocation agricole pluviale ont été remplacées par des cultures maraichères souvent irriguées qui se sont développées avec l'augmentation de la population et l'étalement urbain. Enfin, le Sahara septentrional demeure à vocation pastorale.

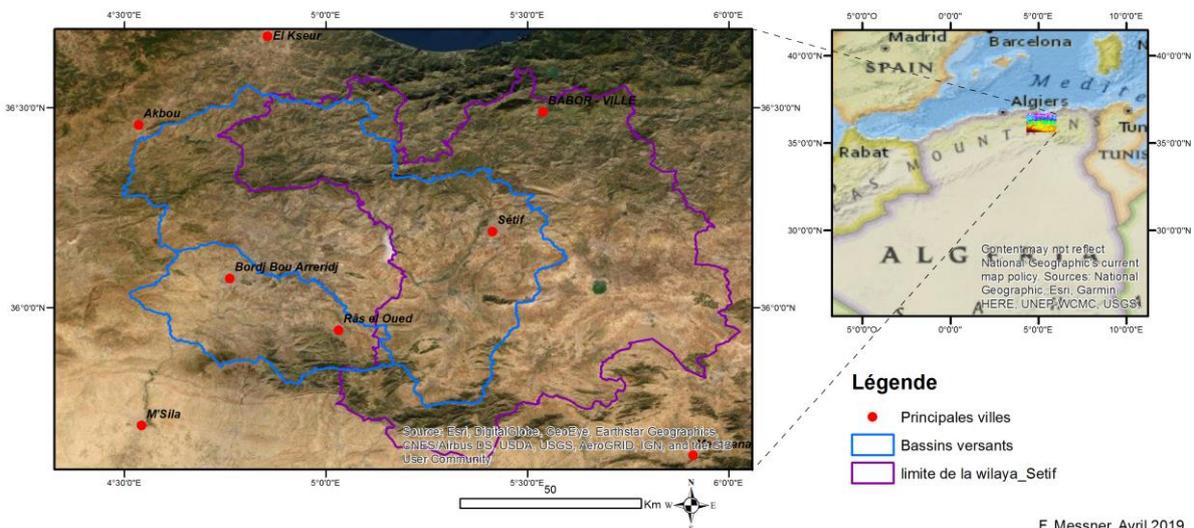


Figure 1 : Localisation du territoire d'étude dans le Nord-Est algérien.

METHODOLOGIE

Du point de vue méthodologique, nous avons utilisé des méthodes spécifiques pour la végétation et pour l'étude du climat.

Données empiriques de végétation

Pour les données de végétation, nous nous sommes appuyés sur des travaux d'écologie réalisés par plusieurs auteurs (GHARZOULI & DJELLOULI, 2005b ; CHERMAT *et al.*, 2013 ; YAHYI *et al.*, 2008 ; ZERROUG, 2012 ; LOUAIL, 2015 ; MISSAOUI, 2015). Nous avons effectué des investigations récentes sur le terrain et nous nous sommes basés sur nos expériences et connaissances pour vérifier certaines données écologiques.

Données géomatiques pour la végétation

Données MODIS TERRA 13Q

Le suivi de la dynamique de la végétation nécessite l'emploi d'un indicateur reflétant l'activité photosynthétique selon une répétitivité temporelle relativement fréquente. Les séries temporelles de l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) issues de données MODIS TERRA 13Q, bien que de moyenne résolution spatiale (250 m), sont adaptées pour répondre à ce type de travail. Le NDVI est l'indice de végétation le plus couramment employé. Il se base sur les écarts de réflectance dans les bandes du Rouge et du Proche Infrarouge. Les séries MOD13Q, ayant une fréquence temporelle de 16 jours, ont subi un filtrage par la méthode de Whittaker (ATZBERGER & EILERS, 2011) pour éliminer les principaux artefacts. Leur période d'acquisition s'étale du 18/02/2000 au 25/05/2018. Sur une période d'une telle durée, elles représentent à la fois la variation phénologique intra-annuelle et les tendances inter-annuelles parfois entrecoupées d'abrupts changements reflétant des perturbations d'origine climatique, anthropique et/ou biologique sur la végétation.

Méthode BFAST

VERBESSELT *et al.* (2010) ont développé la méthode BFAST (Breaks for Additive Seasonal and Trend) qui permet d'identifier les tendances à long terme et les changements brusques (ruptures) dans les séries chronologiques tout en tenant compte explicitement de la composante saisonnière. BFAST repose sur l'approche STL (Seasonal-Trend decomposition procedure) basée sur le principe de la régression locale LOESS (LOcally wEighted regreSsion Smoother) (CLEVELAND *et al.* 1990) qui décompose le signal temporel en trois composantes : saisonnière, tendancielle et le bruit non explicité par les deux précédentes. Les variations brusques des composantes saisonnières ou tendanciennes peuvent être détectées si la somme mobile des résidus de la régression des moindres carrés ordinaires (OLS-MOSUM) dépasse un certain seuil statistique significatif. Elles correspondent le plus souvent à des changements majeurs affectant les écosystèmes, appelés « breaks » ou ruptures, dont on peut connaître le nombre, la date, et la magnitude, c'est à dire la valeur de l'évolution du NDVI en un lieu géographique défini par les dimensions du pixel. BFAST a été appliquée avec succès sur des images MODIS pour la surveillance de la dynamique de la végétation d'une grande variété d'écosystèmes, notamment les zones arides éthiopiennes (ZEWDIE *et al.*, 2017), les forêts québécoises (FANG *et al.*, 2018), ou les forêts d'Amazonie brésilienne (LU *et al.*, 2016).

Dans ce travail, d'après les recommandations de VERBESSELT *et al.* (2010), un modèle harmonique a été choisi pour ajuster les variations saisonnières, tandis qu'une tendance linéaire ajuste la composante tendancielle. Le nombre maximal de ruptures détectables sur la série temporelle a été fixé à quatre, tandis que l'intervalle de temps entre deux breaks successifs a été fixé à deux ans minimum.

Indice des conditions de végétation (VCI)

Dans le but d'étudier l'impact du climat sur la végétation, KOGAN (1995) a élaboré le VCI comme une mesure d'anomalie normalisée, pour chaque pixel, de la valeur momentanée du NDVI par rapport aux extrêmes des valeurs de l'indice sur toute la durée de la série temporelle. Cet indice révèle les fluctuations à court terme de l'indice NDVI, liées à la météo par rapport aux variations à long terme

dues aux changements écologiques (KOGAN, 1995). Dans ce sens, il s'avère être un meilleur indicateur du stress hydrique de la végétation que ne l'est le NDVI seul.

Son équation se formule comme suit :

$$VCI_{ijk} = \frac{VI_{ijk} - VI_{i,min}}{VI_{i,max} - VI_{i,min}} * 100$$

où VCI_{ijk} est la valeur VCI du pixel i pour la date j de l'année k , VI_{ijk} est la valeur de l'indice de végétation (ici le NDVI) du pixel i pour la date j de l'année k , $VI_{i,min}$ et $VI_{i,max}$ sont respectivement le minimum et le maximum interannuels de l'indice de végétation pour le pixel i . Le VCI est mesuré en pourcentage variant de 0 à 100 (Tab. 1). La gamme de valeurs comprise entre 40 et 100 % indique un état de végétation supérieur ou proche de la normale, tandis que les valeurs de 40 à 20 % indiquent un état de sécheresse légère à modérée, et les valeurs inférieures à 20 % indiquent un état de sécheresse sévère et extrême.

Tableau 1 : Valeurs du VCI avec le type de sécheresse.

Value	Category
90 - 100 %	No Drought
80 - 90 %	No Drought
70 - 80 %	No Drought
60 - 70 %	No Drought
50 - 60 %	No Drought
40 - 50 %	No Drought
30 - 40 %	Light Drought
20 - 30 %	Moderate Drought
10 - 20 %	Severe Drought
0 - 10 %	Extreme Drought

Etude du climat

Données utilisées

Les données utilisées sont des rasters à haute résolution spatiale (1 km) de séries temporelles climatiques CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas) (KARGER *et al.*, 2017). Les données CHELSA sont issues d'un redimensionnement spatial (downscaling) des estimations des températures et des précipitations à partir des ré-analyses climatiques ERA-INTERIM. L'algorithme d'estimation des températures est basé sur la réduction d'échelle statistique des températures atmosphériques. Celui pour les précipitations incorpore des prédicteurs orographiques, y compris les champs de vent, l'exposition des vallées et la hauteur de la couche limite, avec une correction de biais ultérieure. Ces données sont fournies sous forme de séries temporelles de quatre variables climatiques mensuelles, qui sont la température moyenne (Tm), la température moyenne minimale (Tmin), la température moyenne maximale (Tmax) et la somme des précipitations moyennes (Pm).

Les périodes considérées sont modélisées pour trois périodes :

- la période ancienne, au dernier maximum glaciaire (21000 ans BP) à l'aide du programme PMIP3 (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) dérivé du modèle de circulation générale,
- la période considérée comme actuelle, allant de 1979 à 2013,
- la période future à l'horizon 2041-2060, à l'aide du programme CMIP5 de comparaison (Coupled Model Intercomparison Project) de modèles de circulation générale.

Classification bioclimatique

Plusieurs auteurs ont proposé des classifications bioclimatiques et de végétations basées à la fois sur les données climatiques, (le plus souvent la pluviométrie et les températures minimale, maximale et moyenne) et les données de distribution spatiale des êtres vivants, plus particulièrement la végétation (EMBERGER, 1971 ; OZENDA, 1985 ; RIVAS-MARTINEZ *et al.*, 2011).

Dans le cadre de notre étude, nous avons testé la classification bioclimatique WBCS (Worldwide Bioclimatic Classification System) de RIVAS-MARTINEZ *et al.* (2011). Elle consiste à appliquer des

seuils hiérarchisés, par traitements d’algèbre spatiale conditionnelle sur des indices bioclimatiques, pour définir quatre unités bioclimatiques. Ces unités sont le macrobioclimat, le bioclimat, le thermotype et l’ombrotype. Les trois dernières unités peuvent être regroupées pour former une synthèse bioclimatique définissant une combinaison unique : l’isobioclimat (RIVAS-MARTINEZ *et al.*, 2011 ; PESARESI *et al.*, 2014 ; TORREGROSSA *et al.*, 2013).

L’indice de sécheresse (SPI)

L’indice de sécheresse (Standardized Precipitation Index, SPI) de MCKEE *et al.* (1993) a été retenu pour déterminer les successions de sécheresses au cours des périodes considérées.

Le SPI est un indice de sécheresse météorologique, recommandé par l’Organisation météorologique mondiale (OMM), basé uniquement sur les précipitations. C’est un indice normalisé représentant la probabilité d’occurrence d’une quantité de pluie observée par rapport à la climatologie des précipitations obtenue sur une longue période de référence (30 ans minimum) et en un certain lieu géographique.

Pour chaque lieu et chaque intervalle de temps choisi (1 mois, 3 mois, 6 mois, 12 mois, 24 mois, ...), le SPI ajuste une fonction de densité de probabilité de répartition gamma aux distributions de précipitations. Une fois que la relation entre la probabilité et les précipitations est établie à partir des enregistrements historiques, la probabilité de tout point de données de précipitation observée est calculée puis ajustée vers une loi normale ayant une moyenne de 0 et un écart-type de valeurs unitaires afin d’estimer l’écart de précipitations standardisé. La valeur du SPI correspond à la valeur du score Z (Tab. 2) de cet écart de précipitations estimé (OMM, 2017). L’indice SPI a été conçu pour quantifier le déficit de précipitations à de multiples échelles de temps, dont la durée dépend du type de sécheresse analysé et de l’application envisagée. L’OMM préconise ainsi de calculer le SPI sur 1 à 2 mois pour une sécheresse météorologique, sur 1 à 6 mois pour une sécheresse agricole et sur 6 à 24 mois, voire plus, pour une sécheresse hydrologique (SVOBODA *et al.*, 2012). Dans notre cas, nous avons calculé le SPI sur 12 mois.

Tableau 2 : Valeurs du SPI et typologie.

Valeur du SPI	Typologie
≥ 2	Extrêmement humide
$[1,5 \text{ à } 2,0[$	Très humide
$[1,0 \text{ à } 1,5[$	Modérément humide
$] -1,0 \text{ à } +1,0[$	Proche de la normale
$] -1,5 \text{ à } -1,0]$	Modérément sec
$] -2,0 \text{ à } -1,5]$	Très sec
$\leq -2,0$	Extrêmement sec

RESULTATS ET DISCUSSION

Du point de vue écologique, les formations végétales à *Cedrus atlantica* se développent en hautes altitudes à partir de 1600 m, sous un climat humide au niveau de l’Atlas tellien et subhumide à semi-aride de l’Atlas saharien (YAHY *et al.*, 2008 ; MEDDOUR, 2010 ; ABDESSEMED, 1981). Les formations à *Quercus ilex* se développent en moyennes montagnes, sous un climat subhumide au nord et semi-aride au sud (DAHMANI, 1984). Les formations à *Pinus halepensis* sont à grande amplitude dans l’étage semi-aride (KADIK & GODRON, 2004). Les formations steppiques colonisent l’étage semi-aride inférieur à aride dans la partie méridionale de la zone d’étude (DJEBAILI, 1978 ; DJELLOULI, 1990). On y trouve des steppes à alfa (*Stipa tenacissima*) sur les glaciers, des steppes à armoise blanche (*Artemisia herba alba*) sur des sols limoneux-sableux, steppes à sparte (*Lygeum spartum*) surtout sur des sols à dominance sableuse. Enfin les formations claires à remt (*Arthrophytum scoparium*) colonisent l’étage per-aride.

Interprétation et résultats bioclimatiques

Nos résultats montrent qu’il y a 45 isobioclimats précis pour les périodes périglaciaire 21000 BP (Fig. 2.1), actuelle de 1979-2013 (Fig. 2.2), et future 2041-2060 (Fig. 2.3).

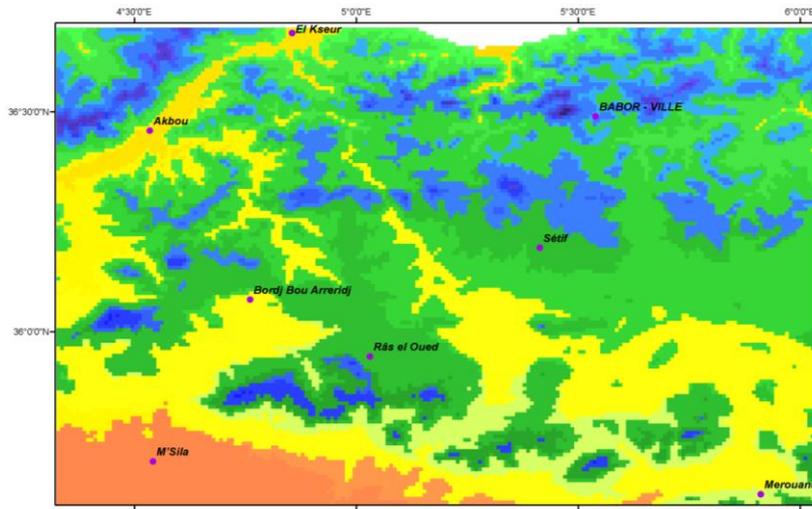


Figure 2.1 : Isobioclimats.
PMIP
Dernier maximum glaciaire

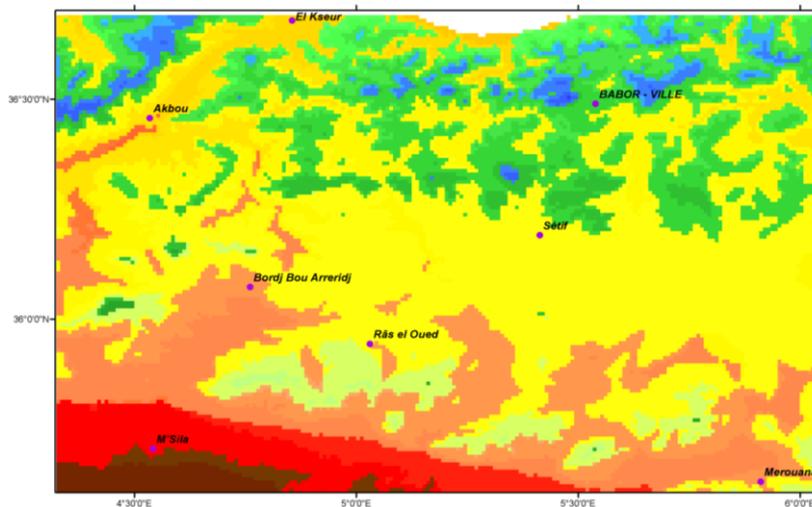


Figure 2.2 : Isobioclimats.
Actuel
(1979-2013)

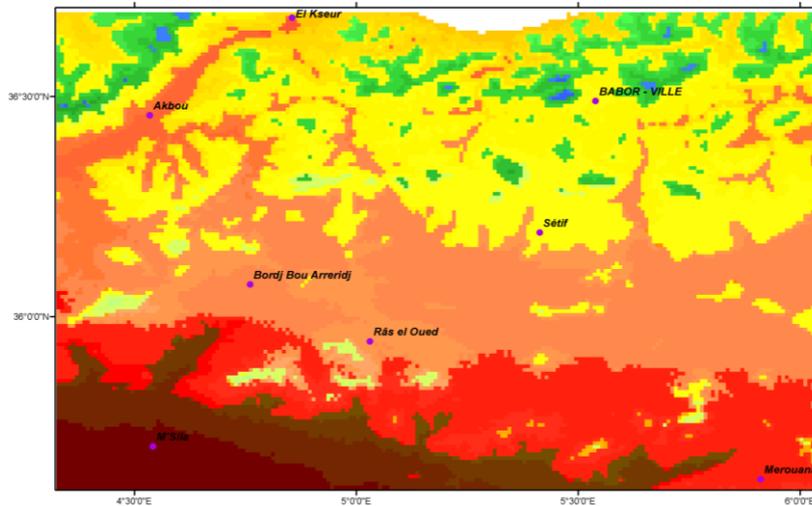


Figure 2.3 : Isobioclimats
CMIP RCP4S
(2041-2060)

Légende

imesdcari	mmeixcsar	tmesxosar	mmeixosec	imesposec	smeiposec	mmeiposhu	mmeipohum	omespohum
tmeidcari	mmeixcsar	mmeixosar	mmeixosec	tmeiposec	smeiposec	mmeiposhu	mmeipohum	omespohum
tmesdcari	smeixcsar	mmeixosar	smeixosec	imesposec	imesposhu	smeiposhu	smeipohum	omespohum
mmeidcari	imesxosar	smeixosar	mmeiposec	mmeiposec	tmeiposhu	smeiposhu	smeipohum	omespohum
tmesxcsar	tmeixosar	tmesxosec	smeiposec	mmeiposec	tmesposhu	omeiposhu	omeipohum	otesohuhu

Interprétation des isobioclimats WBCS: combinaison des thermotypes, bioclimats et ombrotypes.

Thermotypes:

imes: inframéditerranéen; tmei: thermoméditerranéen inférieur; tmes: thermoméditerranéen supérieur; mmei: mesoméditerranéen inférieur; mmes: mesoméditerranéen supérieur; smei: supraméditerranéen inférieur; smes: supraméditerranéen supérieur; omei: oroméditerranéen inférieur; omes: oroméditerranéen supérieur; otes: orotempéré supérieur.

Bioclimats:

dc: désertique-continentale; xc: xérique-continentale; xo: xérique-océanique; pc: pluvaisonnière continentale; po: pluvaisonnière océanique; ho: hyperocéanique.

Ombrotypes:

ari: aride; sar: semi-aride; sec: sec; shu: sub-humide; hum: humide; hhum: hyperhumide.

La figure 2.1 indique que, à l'époque 21000 BP, les isobioclimats arides étaient pratiquement inexistants. Par contre, la présence des isobioclimats hyper humides et humides se localisaient au niveau des hautes montagnes.

La figure 2.2 montre que, pour la période 1979-2013, les isobioclimats hyper humides ont disparu, les isobioclimats humides ont diminué, les subhumide et semi-aride persistent, tandis que l'aride s'étend et apparait dans la partie méridionale. La comparaison de l'ensemble de ces isobioclimats indique une bonne corrélation avec la répartition des formations végétales existantes sur le terrain.

La figure 2.3 montre l'apparition des isobioclimats per aride, plus étendus dans la partie moyenne et méridionale. On remarque un décalage de plusieurs isobioclimats, par rapport à la figure 2.2, où l'aridité est très marquée.

Indice de sécheresse (SPI)

L'analyse réalisée sur la base du SPI de MCKEE *et al.* (1993), pour trois sites (du nord au sud de la zone d'étude) occupés par des écosystèmes forestiers à cèdre aux djebels Babors, Ouled Hanneche et Bou Taleb, montre des épisodes de successions de sécheresses et de périodes humides (Fig. 3). Durant la période 1979-2013, les années de sécheresse sont plus longues au niveau des sites méridionaux (1993 à 2002), ce qui confirme que dans les années à venir, ceux-ci, plus vulnérables, seront touchés par une diminution drastique, voire la disparition du cèdre des massifs de l'Atlas saharien.

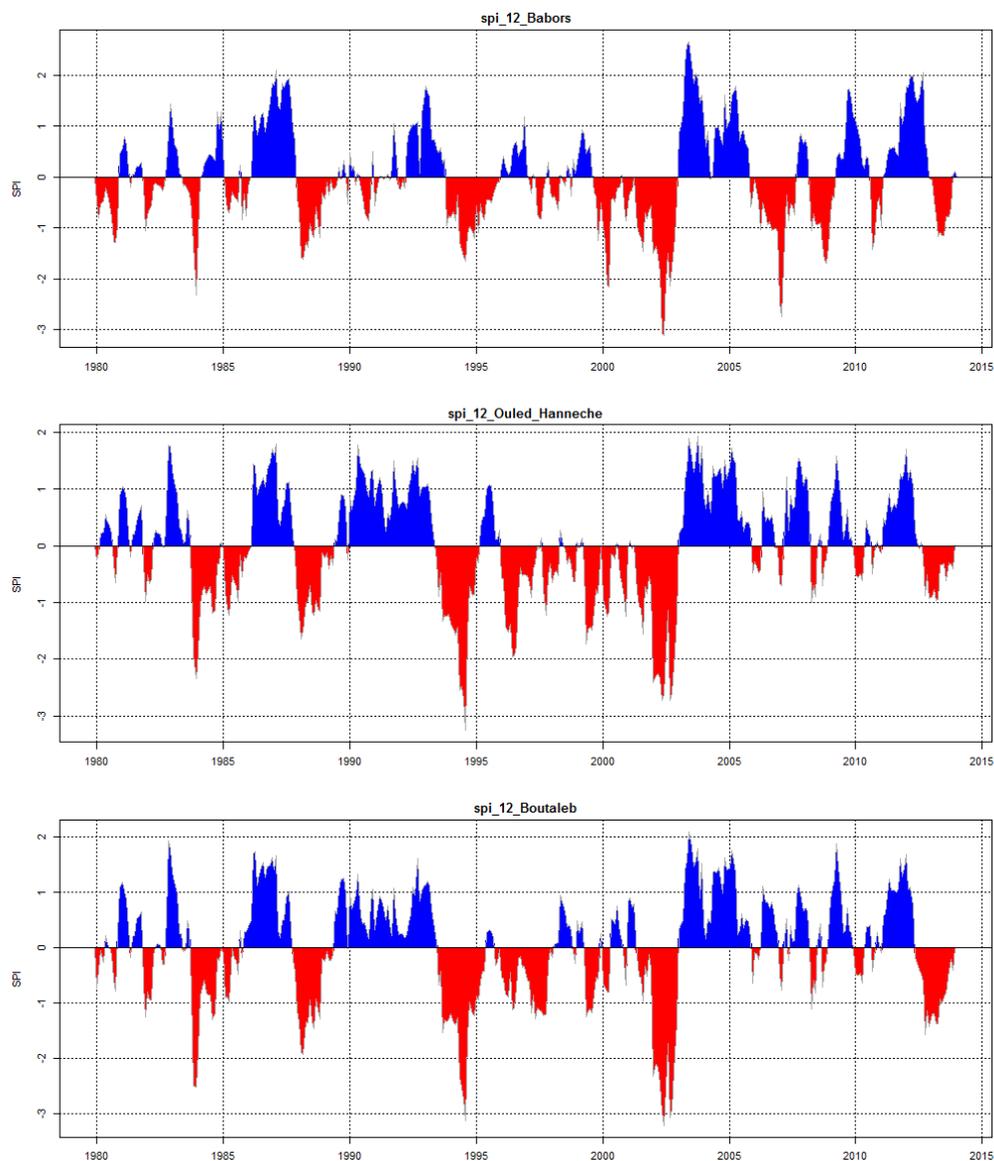


Figure 3 : Evolution du SPI sur trois sites entre 1979 et 2003.

Méthode BFAST

Nous avons également utilisé la méthode BFAST qui permet de détecter plusieurs ruptures. Par exemple, sur le massif d'Ouled Hannèche, au niveau de l'écosystème forestier à chêne vert, la figure 4 indique une rupture de grande magnitude, sur un court laps de temps, durant l'année 2003. Avant cette date, une tendance à la baisse du NDVI est observée. En relation avec le SPI, cette baisse de productivité végétale est associée à la longue période de sécheresse (précédemment décrite). Le BFAST montre bien une réelle remontée biologique en 2003, synchronisée de l'humidité en excès après la sécheresse de 2002.

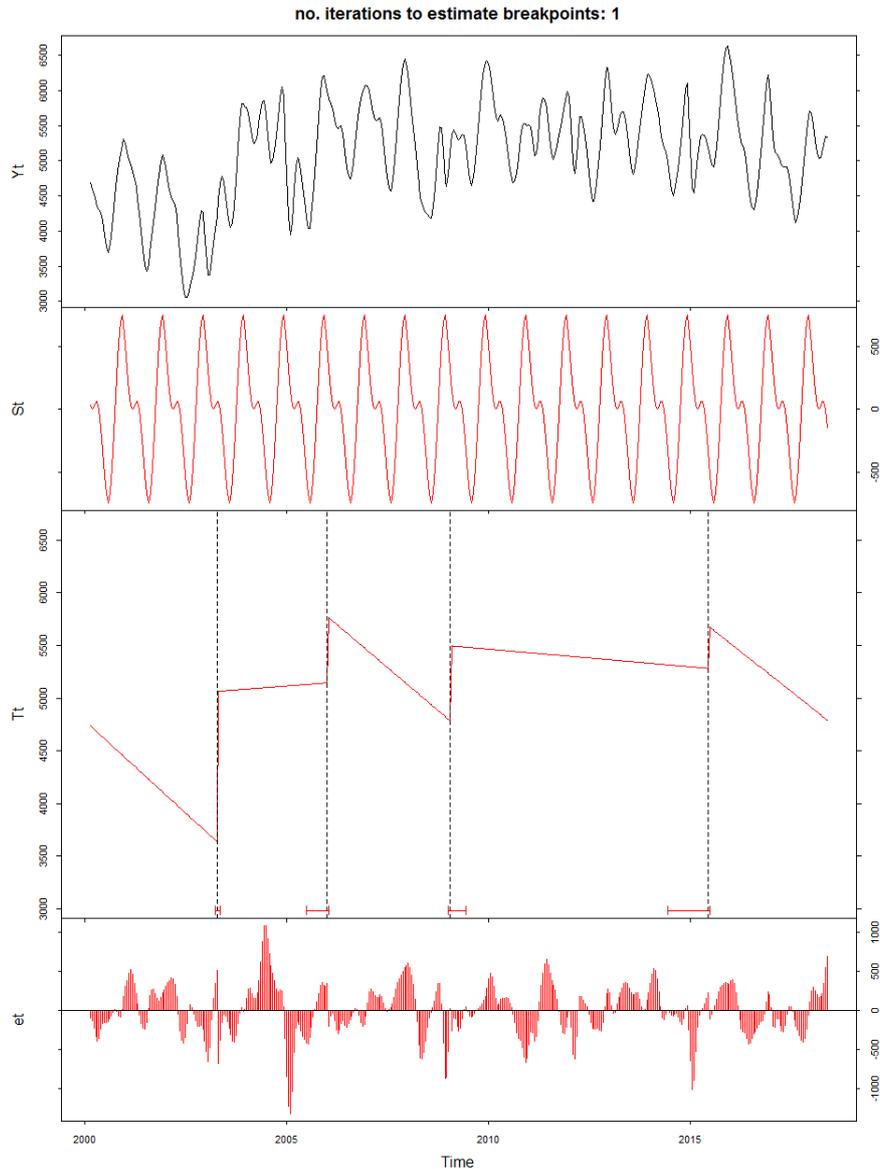


Figure 4 : Détection des ruptures du NDVI au niveau de l'écosystème à chêne vert de Ouled Hannèche. *Yt* : série temporelle du NDVI ; *St* : Saisonnalité ou périodicité ; *Tt* : tendance générale entre les ruptures ; *et* : bruit résultant de l'absence de modélisation par les deux composantes précédentes.

L'intérêt de BFAST est de pouvoir spatialiser, à savoir représenter les différents types d'événements exceptionnels sous forme de graphique et/ou de représentation cartographique. Par exemple, pour la remontée biologique, les figures 5 et 6 montrent la magnitude de la rupture du NDVI en 2003 et la période de cette rupture la même année. Ainsi, la figure 6 montre que les mois de mai et juin sont les plus représentatifs de cette remontée pour Ouled Hannèche. Nous avons également la possibilité avec cette méthode d'y détecter d'autres événements comme les feux de forêts, l'enneigement, le changement de pratiques agricoles, ...).

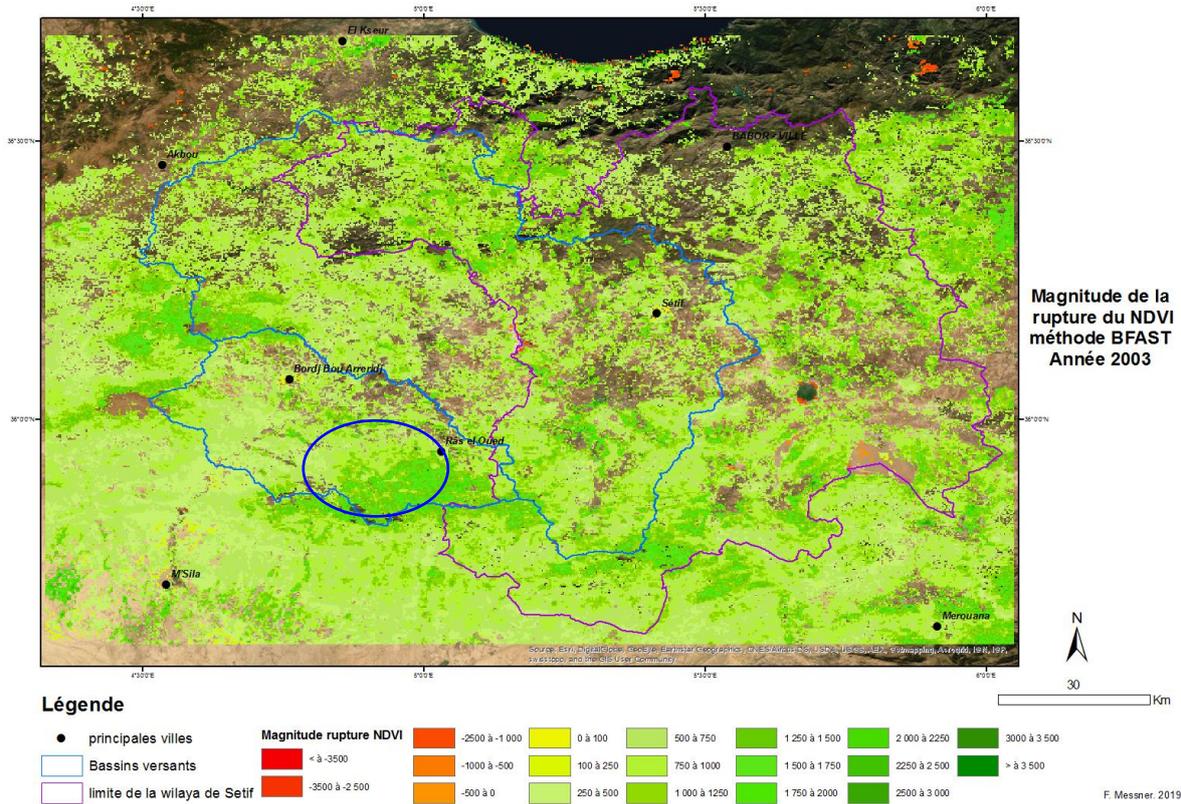


Figure 5 : Magnitude de rupture du NDVI en 2003.

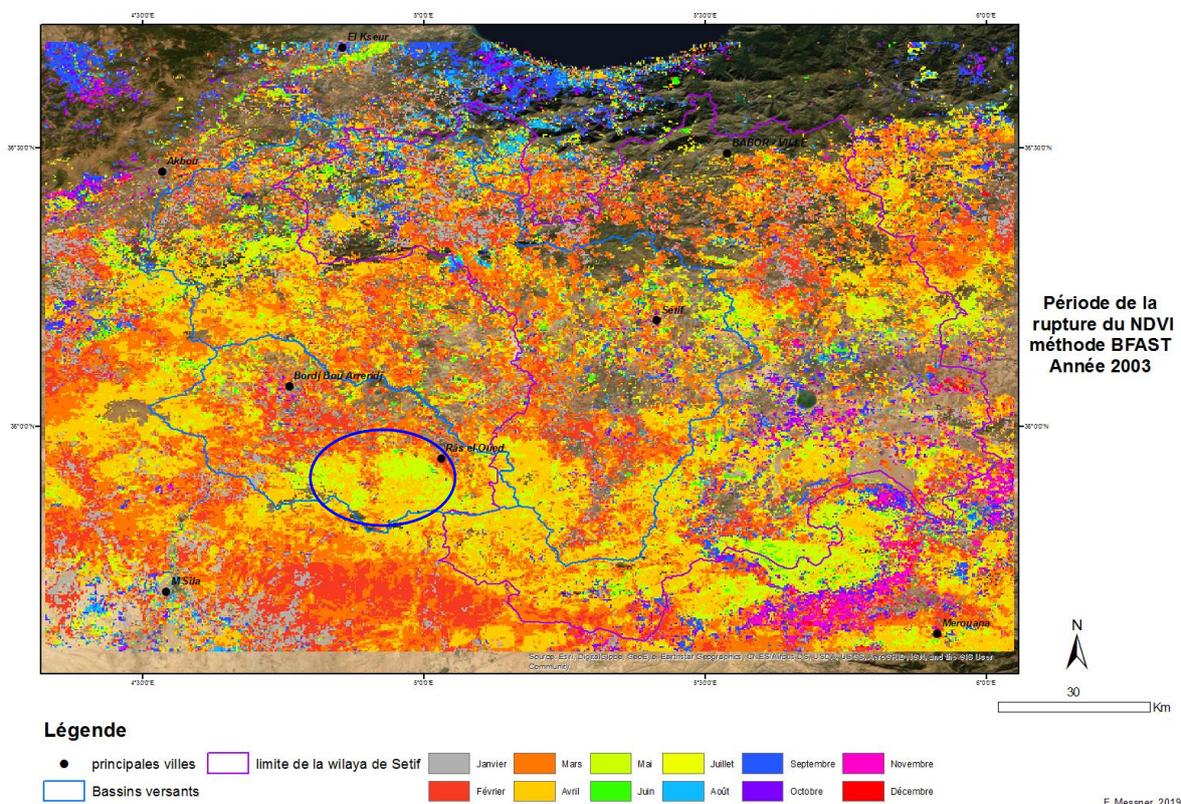


Figure 6 : Dates de rupture du NDVI en 2003.

Interprétation obtenue à partir de la méthode VCI pour 2002 et 2003

Par ailleurs, les anomalies du NDVI obtenues par le VCI, représentées sur les figures 7 et 8, montrent que par exemple au niveau du massif d'Ouled Hannèche, en 2002 il y a une activité photosynthétique faible alors qu'en 2003, avec une meilleure pluviosité, la remontée biologique et la production végétale ont été très élevées. Cette méthode corrobore la précédente.

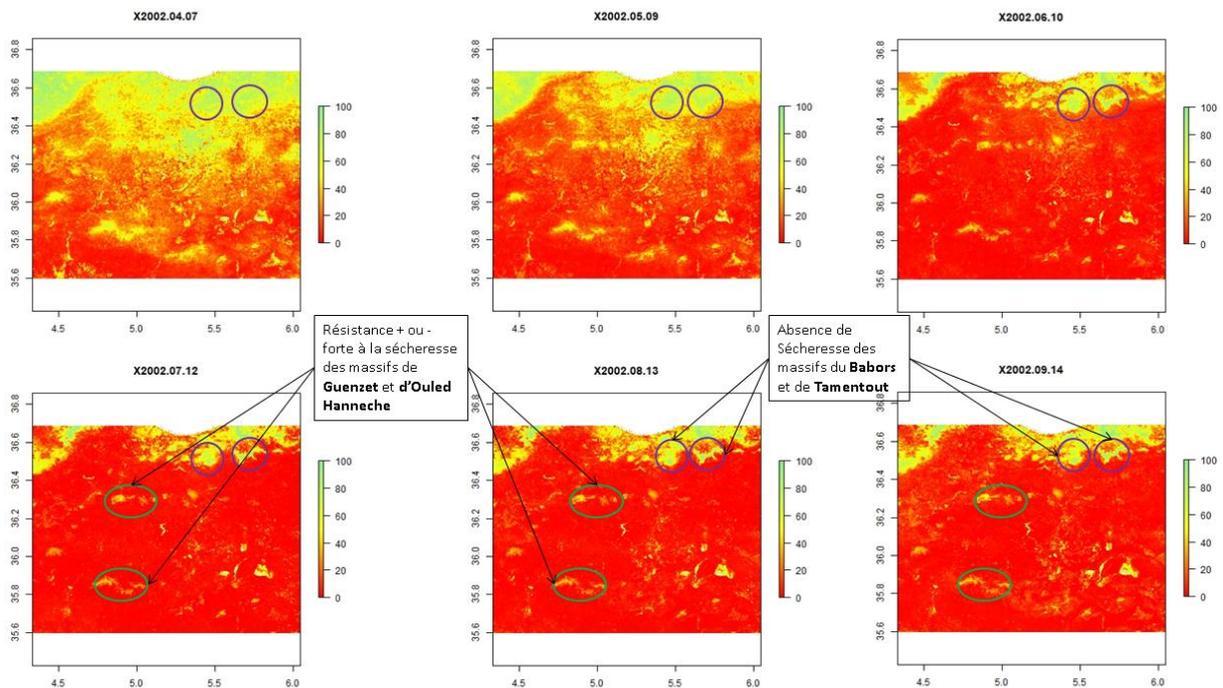


Figure 7 : Evolution du VCI d'avril à septembre 2002.

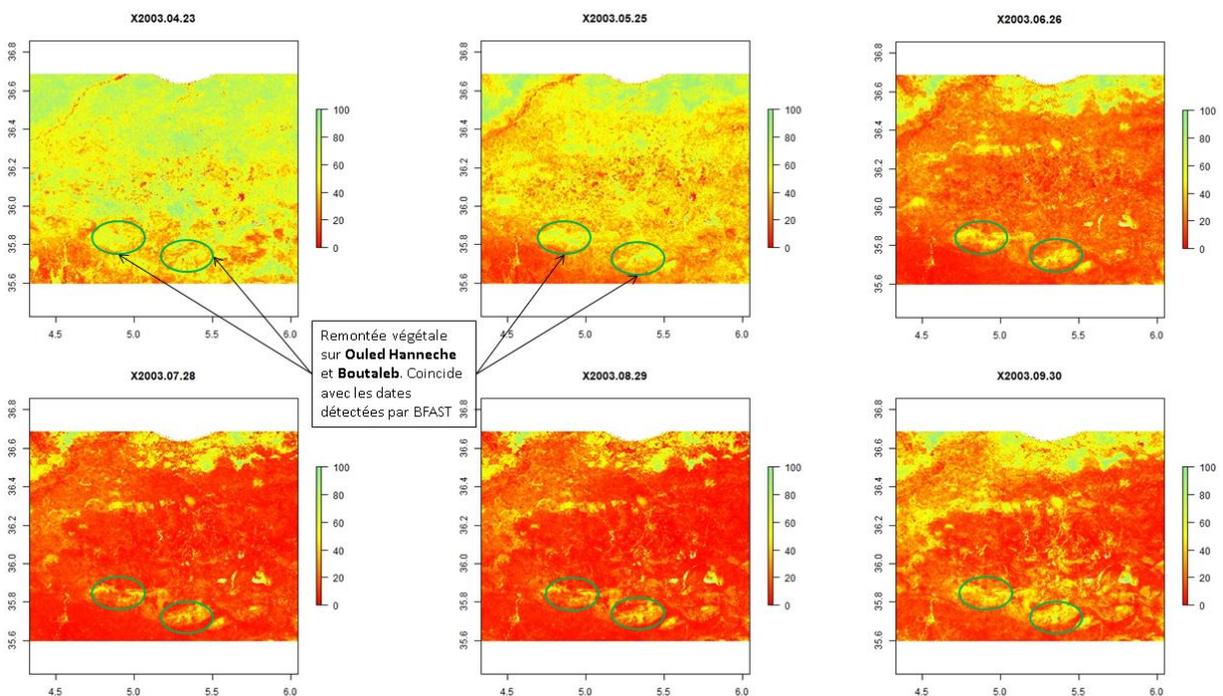


Figure 8 : Evolution du VCI d'avril à septembre 2003.

Evolution des surfaces pour les différents bioclimats

A partir de la classification de RIVAS-MARTINEZ *et al.* (2011), nous avons calculé l'évolution spatiale pour chaque ombrotype (Fig. 9). Nos résultats montrent que, de la période actuelle vers le futur, une augmentation pour l'ombrotype semi-aride, passant de 444 000 ha à 874 000 ha, soit une superficie quasiment multipliée par deux. Pour l'ombrotype sec, on passe de 942 000 ha à 630 000 ha, soit une diminution de 33 %. Cette diminution est apparente également pour l'ombrotype subhumide passant de 374 000 à 131 500 ha, soit une diminution de 65 %. L'ombrotype humide disparaîtra complètement dans le futur, alors que l'aride progressera de 357 %. Globalement, le principal ombrotype était le subhumide par le passé, est devenu le sec actuellement et sera le semi-aride vers la moitié du 21^e siècle.

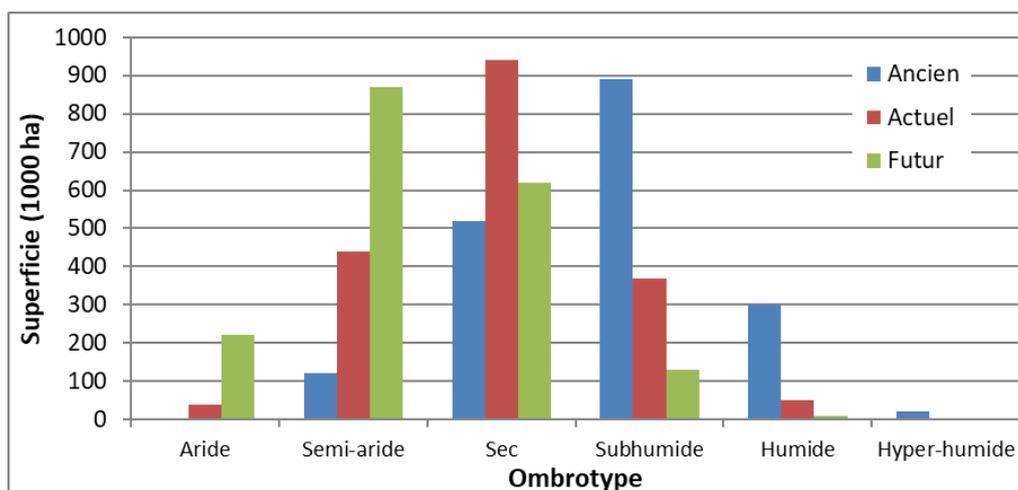


Figure 9 : Evolution des surfaces d'ombrotypes selon les trois périodes considérées (ancienne, actuelle et future).

En ce qui concerne le thermotype, basé les températures, la figure 10 indique qu'entre l'époque actuelle et le futur, on devrait observer pour le mesoméditerranéen (le plus étendu dans la zone d'étude) une diminution relativement limitée (4,7 %) passant de 1410 800 ha à 1343 900 ha. Pour le thermoméditerranéen, une augmentation de 29 % est prévue, passant de 287 300 ha à 370 400 ha, alors que pour le supraméditerranéen, la surface devrait diminuer de 59,5 %. Si on considère la différence entre la période ancienne et le futur, une diminution drastique (88 %) du thermotype supraméditerranéen apparaît. Ainsi, les écosystèmes à cèdre et à chêne zéen devraient être réduits, voire disparaître en certains endroits.

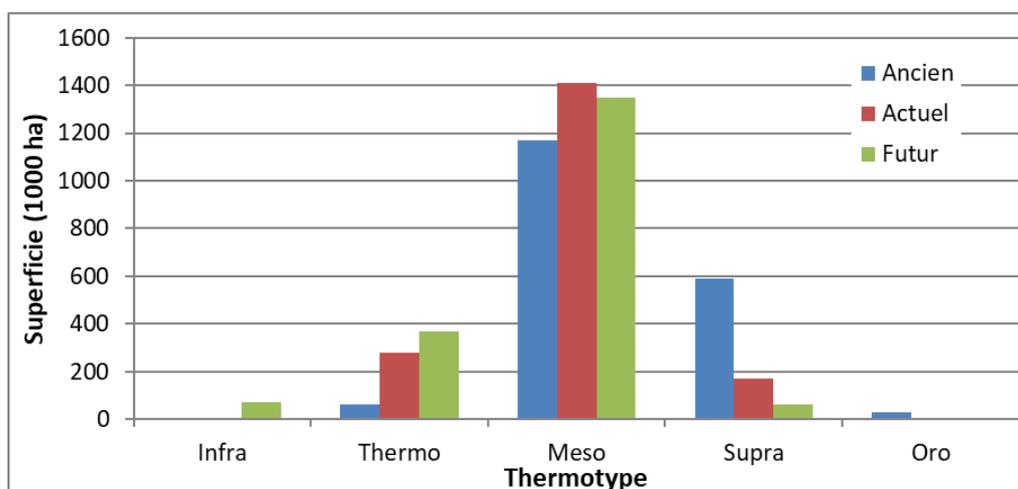


Figure 10 : Evolution des surfaces de thermotypes selon les trois périodes considérées (ancienne, actuelle et future).

Enfin, si on examine l'évolution des bioclimats au sens de RIVAS-MARTINEZ *et al.* (2011) en prenant en considération la continentalité, la xéricité est et devrait être de plus en plus intense (Fig. 11).

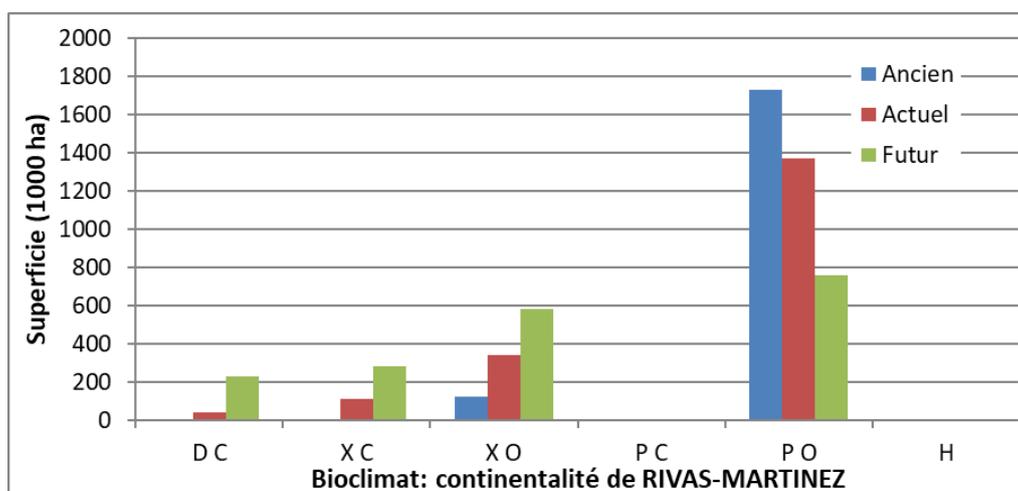


Figure 11 : Evolution des surfaces de continentalité selon les trois périodes considérées (ancienne, actuelle et future). DC : désertique continental ; XC : xérique continental ; XO : xérique océanique ; PC : pluvisaisonnier continental ; PO : pluvisaisonnier océanique ; H : hyperocéanique.

CONCLUSION

Dans le Nord-Est algérien, l'évolution du couvert végétal est surtout liée à celle du climat. Les résultats obtenus par les diverses méthodes utilisées (classification des bioclimats de RIVAS-MARTINEZ *et al.* (2011), SPI, BFAST, VCI) permettent de déterminer un certain nombre de risques du point de vue climatique, biologique et des conséquences sur les êtres vivants.

Nous tendons vers une aridification dans les décennies à venir, comme le montrent nos résultats. Certaines zones soumises à un climat semi-aride se retrouveraient sous un climat aride, avec une hausse des températures et une baisse de précipitations notables. Le Nord-Est algérien montre que tous les écosystèmes seront touchés mais certains le seront plus que d'autres. Par exemple, les cédraines dans la partie méridionale, qui sont très vulnérables, sont susceptibles de périr, voire de disparaître. Le territoire encourt un risque biologique par la dégradation et la baisse de la biodiversité et la disparition de certaines espèces. Par ailleurs, les écosystèmes steppiques, à vocation pastorale, remontent vers le Nord et s'appauvrissent, ce qui peut avoir des conséquences sur le pastoralisme. Enfin, les zones à vocation agricole des hauts plateaux sétifois se réduisent, lorsque l'on sait que les ressources en eau vont également s'amoinrir, entraînant ainsi un risque pour la sécurité alimentaire. Ces résultats et indicateurs devraient servir pour les futurs aménagements de la région.

BIBLIOGRAPHIE

- ABDESSEMED, K., 1981. *Le cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica. Manetti) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma : étude phytosociologique, problèmes de conservation et d'aménagement*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Aix Marseille (France), 200 p.
- ATZBERGER, C. & EILERS, P.H.C., 2011. Evaluating the effectiveness of smoothing algorithms in the absence of ground reference measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 32(13): 3689–3709.
- CHERMAT, S., DJELLOULI, Y. & GHARZOULI, R., 2013. Regressive dynamics of vegetation of Setif high plains: erosion of plant diversity in djebel Youssef (Algeria). *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, 38(1): 84-100.
- CLEVELAND, R.B., CLEVELAND, W.S., MCRAE, J.E. & TERPENNING, I., 1990. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 6(1): 3-73.
- DAHMANI, M., 1984. *Contribution à l'étude des groupements de chêne vert (Quercus rotundifoliae) des Monts de Tlemcen (ouest algérien)*. Thèse de 3^{ème} cycle, USTHB (Algérie), 284 p.

- DJEBAILI, S., 1978. *Recherches phytosociologiques et écologiques sur la végétation des Hautes Plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 299 p. + annexes.
- DJELLOULI, Y., 1990. *Flore et climat en Algérie septentrionale. Déterminisme climatique de la répartition des plantes*. Thèse d'Etat, USTHB (Algérie), 210 p. + annexes.
- EMBERGER, L., 1971. *Travaux de Botanique et d'Écologie*. Masson, 520 p.
- FANG, X., ZHU, Q., REN, L., CHEN, H., WANG, K. & PENG, C., 2018. Large-scale detection of vegetation dynamics and their potential drivers using MODIS images and BFAST: A case study in Quebec, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 206: 391-402.
- GHAZOUALI, R. & DJELLOULI, Y., 2005a. Diversité floristique de la Kabylie des Babors (Algérie). *Sécheresse*, 16(3): 217-223.
- GHAZOUALI, R. & DJELLOULI, Y., 2005b. Diversité floristique des formations forestières et préforestères des massifs méridionaux de la chaîne des Babors (Djebel Takoucht, Adrar ou Mellal, Tababort et Babor), Algérie. *Journal de la Société Botanique de France*, 29: 69-75.
- KADIK, L. & GODRON, M., 2004. Contribution à l'étude de la dégradation de la végétation dans les pineraies de *Pinus halepensis* d'Algérie et dans les formations dérivées. *Journal de la Société Botanique de France*, 27: 9-19.
- KARGER, D.N., CONRAD, O., BÖHNER, J., KAWOHL, T., KREFT, H., SORIA-AUZA, R.W. & KESSLER, M., 2016. *CHELSEA climatologies at high resolution for the earth's land surface areas* (Version 1.2).
- KOGAN, F.N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11): 91-100.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J. & KLEIST, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17–22 January 1993, pp. 179-183.
- LOUAIL, A., 2015. *La multifonctionnalité de la trame verte de la ville de Sétif ; Analyse des politiques publiques locales*. Thèse de Magistère, Université F. Abbas Sétif (Algérie), 160 p.
- LU, M., PEBESMA, E., SANCHEZ, A. & VERBESSELT, J., 2016. Spatio-temporal change detection from multidimensional arrays: Detecting deforestation from MODIS time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117: 227–236.
- MEDDOUR, R., 2010. *Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie. Exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie djurdjuréenne*. Thèse de doctorat d'Etat, Université M. Mammeri, Tizi Ouzou (Algérie), 358 p.
- MISSAOUI, K., 2015. *Aménagement et valorisation des boisements urbains et périurbains de la ville de Sétif (Algérie)*. Thèse de Magistère, Université F. Abbas Sétif (Algérie), 170 p.
- OZENDA, P., 1985. *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*. Masson, Paris, 385 p.
- PESARESI, S., GALDENZI, D., BIONDI, E. & CASAVECCHIA, S., 2014. Bioclimate of Italy: Application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 10(4): 538-553.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., RIVAS-SÁENZ, S. & PENAS, A., 2011. Worldwide Bioclimatic Classification System (WBSC) *Global Geobotany*, 1: 1-634 + 4 cartes.
- SVOBODA, M., HAYES, M., WOOD, D., 2012. *Standardized precipitation index user guide*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- TORREGROSA, A., TAYLOR, M.D., FLINT, L.E. & FLINT, A.L. (2013). Present, future, and novel bioclimates of the San Francisco, California Region. *PloS one*, 8(3): e58450.
- VERBESSELT, J., HYNDMAN, R., NEWNHAM, G. & CULVENOR, D., 2010. Detecting Trend and Seasonal Changes in Satellite Image Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 106-115.
- YAHY, N., DJELLOULI, Y. & DE FOUCAULT, B., 2008. Diversités floristiques et biogéographiques des cédraies d'Algérie. *Acta Botanica Gallica*, 155(3): 389-402.
- ZERROUG, K., 2012. *Elaboration d'un système d'information géographique (flore) dans la wilaya de Sétif*. Thèse de Doctorat, Université de Sétif 1 (Algérie), 114 p. et illustrations.
- ZEWDIE, W., CSAPLOVICS, E. & INOSTROZA, L., 2017. Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Applied Geography*, 79: 167-178.