

Apport Des Images Satellites MODIS Dans L'étude De L'évolution De La Végétation Forestière De L'Est Algérien

Laala Ahmed, MA

Alatou Djamel, Pr

Adimi Amina, MA

Laboratoire de Développement et Valorisation des Ressources
Phytogénétiques, Université des Frères Mentouri Constantin1, Algérie

doi: 10.19044/esj.2016.v12n20p195 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20p195](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n20p195)

Abstract

The monitoring of forest dynamics is needed to better quantify the intensity of climate change and their impacted on forest resources of Algeria. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was often used to take this step. It is considered a fluctuating parameter in space and in time, very used today to measure the physiological activity of plants and characterize the vigor of vegetation. In this study we tried to characterize the one hand the spatial and temporal variability of NDVI of forest ecosystems of eastern Algeria and also spatially identify via statistical calculations the stressed forest parcels where chlorophyll activity leaves shows fluctuations and anomalies. The data used are those of the spectral index NDVI MODIS sensor for detecting photosynthetic signal returned by the tree canopy. It appears from this study that the vegetative activity of the forest ecosystems of eastern Algeria is always strong in the coastal massifs and decreases according to a latitudinal gradient oriented approximately North-South. In terms of the ecosystems, this activity is greater for deciduous stands than for softwoods. Moreover, the mapping of the standard deviation of NDVI allowed us, first, to spatially discriminate stressed forest parcels that are considered priorities for the establishment of effective conservation strategy and, secondly, to identify the most threatened tree species that requires a rapid response and collaboration between the institutions concerned to protect it.

Keywords: Vegetative activity, satellite images, forest, NDVI, MODIS, Eastern Algeria

Résumé

Le suivi de la dynamique forestière est indispensable pour mieux quantifier l'intensité des changements climatiques et leurs impacts sur les ressources sylvicoles de l'Algérie. L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été très souvent utilisé pour faire cette démarche. Il est considéré comme un paramètre fluctuant dans l'espace comme dans le temps, très utilisé aujourd'hui pour mesurer l'activité physiologique des plantes et caractériser la vigueur de la végétation. Dans le cadre de cette étude nous avons essayé de caractériser d'une part, la variabilité spatio-temporelle de l'indice NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien et d'autre part, identifier spatialement via les calculs statistiques les parcelles forestières stressées où l'activité chlorophyllienne des feuilles présente des fluctuations et des anomalies. Les données utilisées sont celles de l'indice spectral NDVI du capteur MODIS qui permettent de détecter le signal photosynthétique renvoyé par la canopée des arbres. Il ressort de cette étude que l'activité végétative des écosystèmes forestiers de l'Algérie orientale est toujours soutenue dans les massifs littoraux et elle diminue selon un gradient latitudinale orienté approximativement Nord-Sud. En termes d'écosystèmes forestiers, cette activité est plus marquée pour les peuplements feuillus que pour les résineux. Ainsi, la cartographie de l'écart type de l'indice NDVI nous a permis, d'une part, de discriminer spatialement les parcelles forestières stressées qui sont considérées comme prioritaires pour la mise en place d'une stratégie efficace de conservation et d'autre part, d'identifier l'essence forestière la plus menacée qui nécessite une intervention rapide et une collaboration entre les institutions concernées pour le protéger.

Mots clés : Activité végétative, images satellites, forêt, NDVI, MODIS, Est algérien

Introduction

Les arbres sont des espèces longévives et rencontrent donc plus de changements environnementaux et notamment des événements climatiques extrêmes au cours de leur vie que des espèces possédant une plus courte durée de vie (Gutschick et BassiriRad, 2003 ; Petit et Hampe, 2006). L'étude de la variabilité de l'activité végétative des massifs forestiers est un apport important pour la compréhension de leurs fluctuations temporelle et pour quantifier indirectement l'intensité des changements climatique.

L'NDVI, produit satellitaire, facile à calculé (Bariou *et al.*, 1985; Caloz et Collet, 2001), très utilisé, car assez générique (Jensen, 2000), normalise en partie les effets d'éclairement ou de pentes (Bariou *et al.*, 1985; Caloz et Collet, 2001). Il est utilisé pour caractériser l'état de santé des

plantes, pour repérer les changements phénologiques, pour estimer la biomasse verte et les rendements et dans bien d'autres applications. Le concept du NDVI repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande du rouge par la chlorophylle de la plante et réfléchit beaucoup dans la bande du proche infrarouge (Robin, 2002). L'élément intéressant avec l'utilisation de ces bandes est qu'elles permettent un contraste élevé au niveau des propriétés optiques entre la roche et la végétation (Baret *et al.*, 1995). Ainsi, plus la proportion de végétation décroît, plus les valeurs de réflectances du rouge tendent à décroître linéairement (Beek *et al.*, 2006), faisant en sorte que la relation entre les recouvrements végétaux en pourcentage et les valeurs du NDVI est linéaire.

Selon Pettorelli *et al.*, (2005), le NDVI est directement lié à la productivité de la végétation, à la biomasse et à la dynamique des écosystèmes, particulièrement des milieux forestiers (Carvalho *et al.*, 2004). Il est largement utilisé comme une donnée indirecte pour l'estimation de variables d'état du couvert végétal et de processus biophysiques tels que la photosynthèse (Tucker and Sellers, 1986). Donc, l'exploitation de séries temporelles de l'NDVI constitue un bon moyen de quantifier l'activité végétale à un pas de temps régulier et ainsi de suivre l'évolution et d'en mesurer les tendances sur la période pour laquelle les données sont disponibles.

L'objectif de ce travail est d'analyser la variabilité spatio-temporelle de l'activité végétative des peuplements ligneux de l'Est algérien à partir de l'indice NDVI et par conséquent cartographier les zones forestières où les arbres présentent une certaine anomalie de cette activité.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située sur la partie orientale de l'Algérie du Nord, exactement entre les latitudes 34° 31' 15" et 37° 5' 24" Nord et les longitudes 4°19' 57" et 8°41' 2" Est (Fig.1). Avec une couverture forestière de 1767720,69 ha, elle est considérée comme la partie la plus boisée de l'Algérie qui renferme la quasi-totalité des écosystèmes forestiers de la nation. Cette zone est limitée à l'Est par la frontière Algéro-Tunisienne, à l'Ouest par la vallée d'Oued Soummam et les monts des Bibans, au Sud par le piémont Sud de l'Atlas Saharien et au Nord par la rive Sud de la mer méditerranéenne.

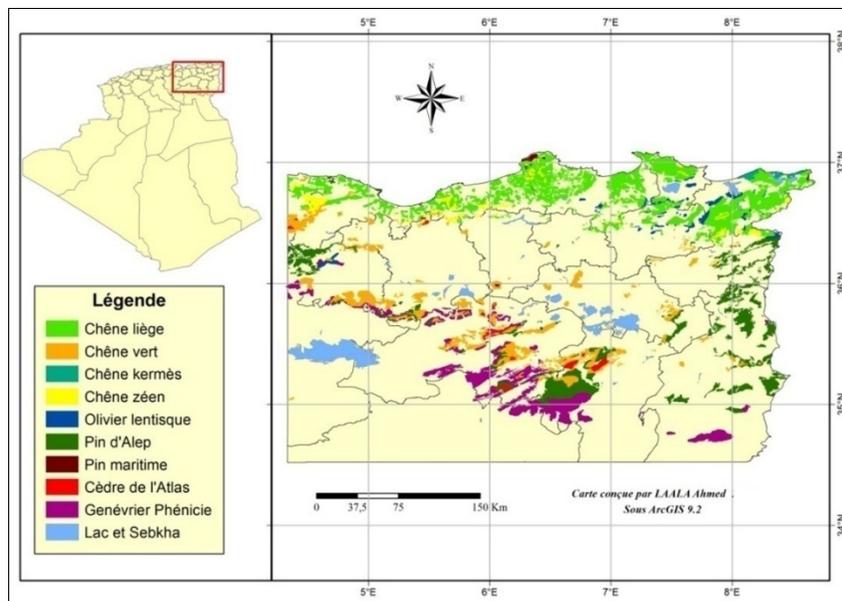


Fig.1. Principaux écosystèmes forestiers de l'Est algérien

Matériels et méthodes

Les données d'NDVI

240 images satellitaires de type MODIS de la période (2002-2011) ont été utilisées afin d'extraire les données d'NDVI de cette décennie. Ces scènes couvrent notre zone d'étude suivant une résolution spatiale moyenne de 250 mètres et une résolution temporelle de 15 jours. Le site web : <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb> fournit ces images satellitaires sous forme de cartes bimensuelles générées par la technique de synthèse temporelle dite MVC (Monthly Maximum Value Composite), fondée sur la recherche de la valeur maximale de NDVI sur chaque intervalle de 15 jours. Ces images ont déjà bénéficié d'une correction géométrique et atmosphérique de haute précision grâce à un capteur spécifique embarqué sur la plateforme TERRA (Vermote *et al.*, 2005). Cette opération est importante puisque l'indice NDVI est très sensible aux conditions atmosphériques (Holben, 1986; McDonald *et al.*, 1998).

Les données d'occupation du sol

Les cartes forestières, fournies dans un format papier par la direction générale des forêts (DGF), ont permis de bien identifier les différents types d'écosystèmes forestiers de l'Est algérien (Tableau 1). Ces cartes ont été scannées en format TIFF sur un scanner de type « Xerox 6204 » avec une résolution de 600 dpi. A Cette résolution, on peut zoomer et délimiter facilement les massifs forestiers, alors qu'à 300 dpi, les limites forestières apparaissent flous et sont plus malaisées à vectorisé.

Tableau 1. Liste des essences forestières dominantes dans l'Est algérien

	Essences forestières	Noms scientifiques
Résineux	Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>
	Pin maritime	<i>Pinus pinaster</i>
	Cèdre de l'atlas	<i>Cedrus atlantica</i>
	Genévrier de Phénicie	<i>Juniperus phoenicea</i>
Feuillus	Chêne liège	<i>Quercus suber</i>
	Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>
	Chêne zéen	<i>Quercus canariensis</i>
	Chêne kermès	<i>Quercus coccifera</i>
	Olivier lentisque	<i>Oleo-lentisque</i>

Il faut signaler ici que cette liste des espèces n'est pas exhaustive, elle correspond aux essences forestières les plus fréquemment rencontrées dans l'Est algérien.

Logiciels utilisés

Dans la méthodologie présentée ci-après, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS version 9.2 développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute) pour le traitement, l'analyse et la représentation de l'information géographique, alors que pour le traitement d'images satellites, on a travaillé avec le logiciel ENVI version 4.7.

Méthodes de traitement des données

Les transformations de coordonnées

Les images satellitaires téléchargées de type MODIS ont été importées sous le logiciel ENVI 4.7 en changeant les coordonnées projetées de type sinusoidal par les coordonnées géographiques du système international WGS 1984.

Pour chaque mois de la période étudiée, nous avons moyenné les deux valeurs bimensuelles de l'NDVI pour obtenir au final 120 scènes qui présentent les valeurs mensuelles de cet indice. Ainsi, en moyennant ces valeurs mensuelles pour chaque pixel et pour chaque année de la période étudiée (2002-2011) pour obtenir enfin une série temporelle de 10 images. Les valeurs de cette série pour un pixel forestier donné permettent alors de créer le profil interannuel de l'NDVI sur cette période.

Le géoréférencement et la délimitation des superficies forestières

Pour l'intégration des données rasters et vecteurs dans un SIG, nous avons géoréférencé, sous le logiciel ArcGIS 9.2, les cartes forestières en utilisant le même système de coordonnées géographiques adopté pour les images satellitaires. Les limites des massifs forestiers ont été extraites à partir de ces cartes géoréférencés. Une couche commune a été créée au

format Shape qui présente plus 741 polygones de délimitation des différents écosystèmes forestiers dominants de l'Est algérien (fig.2).

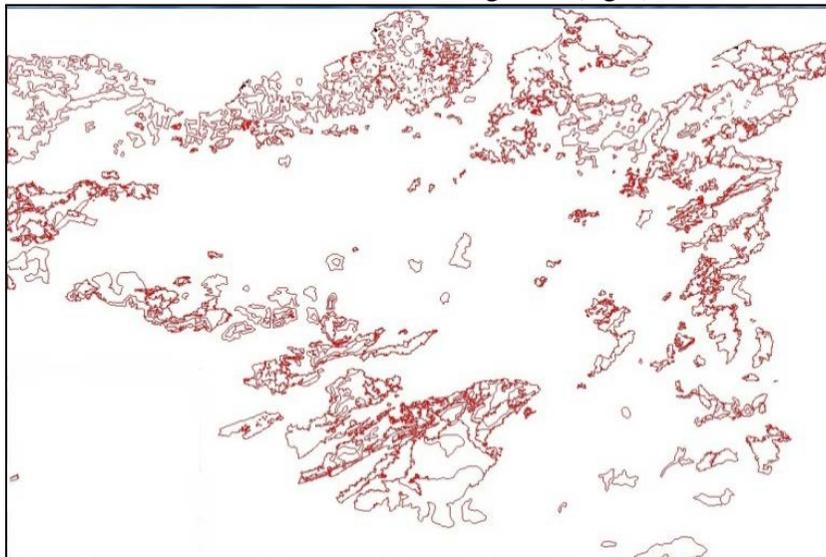


Fig.2 : Vecteurs représentant les limites des massifs forestiers

Le masquage

Pour minimiser la taille de l'espace mémoire occupée par les images satellites et pour réduire le temps d'exécution des calculs effectués par les logiciels de télédétection et du SIG, nous avons créé sous le logiciel ENVI4.7 un masque de type binaire à partir des polygones qui représentent les différents écosystèmes forestiers de la zone d'étude. Ce masque est constitué de pixels de valeur égale à (1) ou à (0). Les images satellites ont été superposées sur ce masque dans l'optique d'extraire uniquement les pixels forestiers. Lorsque ce masque est appliqué sur l'image, les pixels de cette dernière associés à la valeur (1) resteront visibles, c'est le cas des pixels forestiers, alors que les pixels associés à la valeur (0) seront occultés (fig.3).

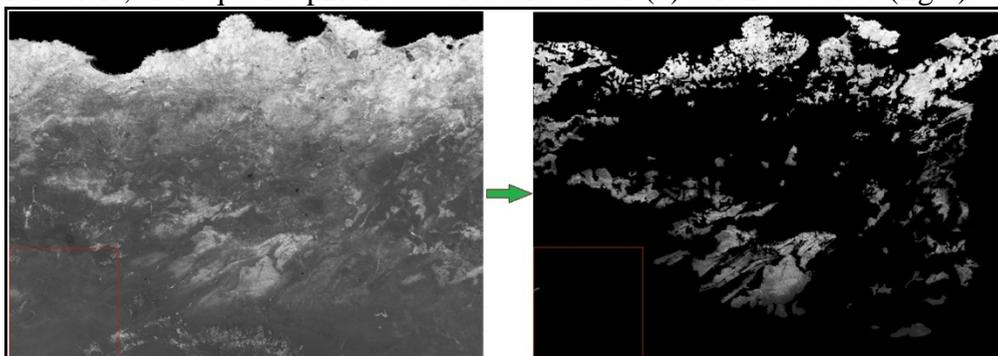


Fig.3 : Image satellitaire MODIS (acquise le 01/02/2002) avant et après l'application du masque

Estimation de l'écart type de l'NDVI :

Dans le but de visualiser la variabilité intra-annuelle et intra-saisonnière de la densité du couvert forestier et de la quantité de biomasse verte des écosystèmes forestiers, une statistique descriptive a été adoptée pour avoir une information concernant la dispersion des valeurs de l'indice NDVI par rapport à la moyenne. L'écart type a été calculé en utilisant la fonction Zonal (Spatial Analyst) du logiciel ArcGIS9.2. Les fortes valeurs indiquent une végétation forestière stressée, par contre, les valeurs faibles montrent une régularité de l'activité végétative des forêts étudiées.

Résultats et discussion

Variabilité temporelle

Dans cette section, on considère que l'NDVI est invariable spatialement. La figure 4 montre la variabilité interannuelle de cet indice pour les résineux et les feuillus de l'Est algérien. Quelque soit l'année analysée, la production en biomasse forestière marque toujours son maximum pour les feuillus où l'NDVI de ces écosystèmes varie de 0.47 à 0.72. Cependant, les valeurs de cet indice chez les résineux est de moins importance, elles fluctuent entre 0.22 et 0.43. Ceci peut être s'expliqué par le feuillage et particulièrement la forme et la structure interne des feuilles. Les feuillus possèdent des feuilles plates et larges, à parenchyme palissadique lacuneux développé, ce qui permet une réflectance dans le proche infra-rouge plus importante que celle des conifères dont la forme des feuilles est réduite à des aiguilles courtes à parenchyme palissadique développé.

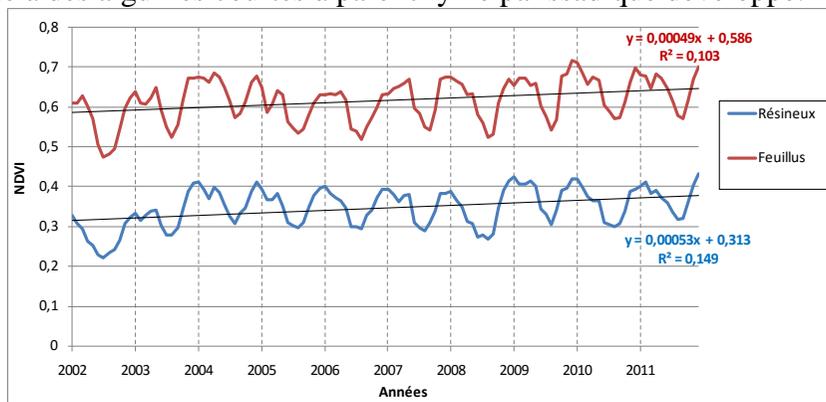


Fig.4 : Cycle annuel de la végétation forestière de l'Est algérien entre 2002 et 2011

La régression linéaire révèle une tendance à la hausse de l'NDVI égale à 6% pour les feuillus comme pour les résineux et cela durant la période 2002-2011. Cette tendance positive peut être s'expliquée, d'une part, par la dominance des superficies forestières productives au niveau de l'Est

algérien et d'autre part, par la faible superficie où la végétation forestière est moins vigoureuse.

En termes des écosystèmes forestiers, les courbes de variation interannuelle de l'NDVI ont sensiblement la même allure et présentent les mêmes « pics » (fig.5). Ils mettent en évidence une forte similarité entre le genévrier de Phénicie, le pin d'Alep, le chêne vert, le cèdre et l'olivier lentisque. Les valeurs les plus élevées de l'indice NDVI sont affichées toujours pour le Pin maritime, alors que les plus faibles sont enregistrées pour le genévrier de Phénicie et cela pour toutes les années de la décennie (2002-2011).

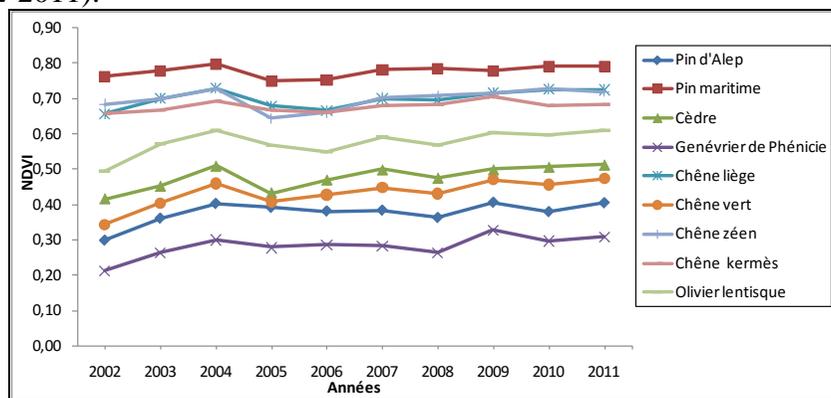


Fig.5 : Variation interannuelle de l'indice NDVI de différents écosystèmes forestiers étudiés

Ainsi, durant l'année 2004, tous les écosystèmes forestiers sont caractérisés par une activité végétative maximale, alors pendant l'année qui suite (2005), on observe une réduction rapide de cette activité qui se traduit par une chute des valeurs de l'indice NDVI. Cette réduction est variable selon l'écosystème forestier analysé, elle est importante chez le cèdre où les valeurs passent de 0.51 à 0.41.

Variabilité spatiale À l'échelle annuelle

La figure 6 présente les surfaces forestières de l'Est algérien selon un seuillage de l'indice NDVI calculé sur une période de 10 ans. On remarque que les fortes valeurs de cet indice sont enregistrées pour les massifs forestiers littoraux et sublittoraux et particulièrement entre la côte et une ligne horizontale qui passe par la latitude 36°30'Nord, alors que les faibles valeurs sont concentrées dans le Sud et notamment: au Sud de la forêt de Beni Amloul, toute la forêt de Mezbel (wilaya de Khanchela), le massif d'Ahmar Kraddou, l'Ouest de la forêt d'Ich Ali, la forêt domaniale de Metlili, la forêt de Rahbat et l'Ouest des montagnes de Belezma (wilaya de Batna), l'Ouest des montagnes de Hodna, la forêt de Dreat, Mansourah,

Biban, Beni-Yadel, Ounnourha, (wilaya de Bordj Bou-Arredj), la forêt domaniale d'Ouled Abd El-Nour (Wilaya de Mila), forêt domaniale d'Ain Mlila (wilaya de Ome El-Bouaghi) et toutes les massifs forestières de la wilaya de Tébessa.

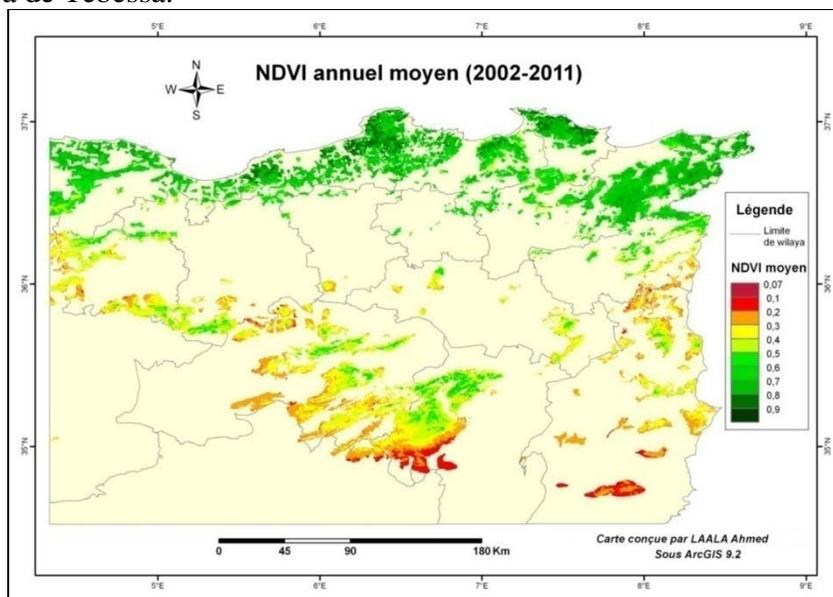


Fig.6 : NDVI annuel moyen calculé pour la période (2002-2011)

Spatialement, le croisement de la carte d'NDVI annuelle moyenne avec la carte d'altitude nous a permis de constater que les massifs forestiers situés à des altitudes comprises entre 0 et 600m présentent les valeurs d'NDVI les plus élevées. Alors que les forêts qui se trouvent dans la tranche altitudinale variant entre 1500 et 2400m tels que les massifs des Aurès présentent des faibles valeurs de cet indice.

La figure ci-dessous permet de distinguer la variabilité des classes d'NDVI selon l'essence forestière concernée.

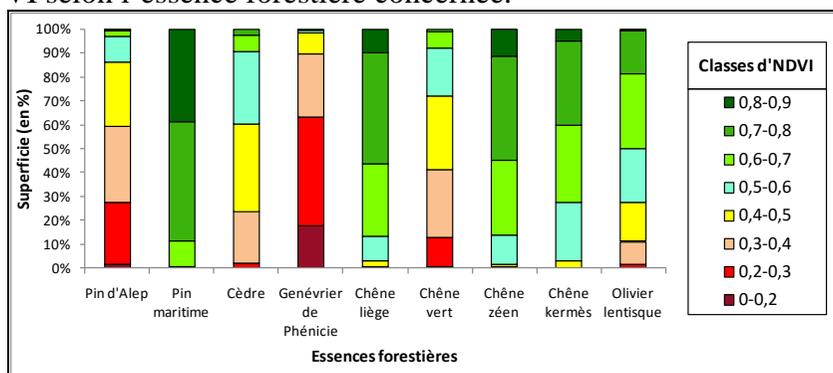


Fig.7 : Superficies (en %) de différentes classes d'NDVI pour chaque écosystème forestier

À l'exception du pin maritime qui occupe une faible superficie dans l'Algérie orientale, les feuillus comportent les essences les plus productifs de la biomasse végétale que les résineux (fig.7). A titre d'exemple, la superficie qui présente un indice NDVI supérieur à 0.6 est de 86.7% pour le chêne liège, 86.4% pour le chêne zéen, 72.5% pour le chêne kermès et 50% pour l'olivier lentisque.

Les classes de forte valeur d'NDVI (0.6-0.9) est affichées au niveau de 2.5% de la surface totale des résineux, alors que pour les feuillus, elles caractérisent une importante superficie égale à 61.8% (fig.8).

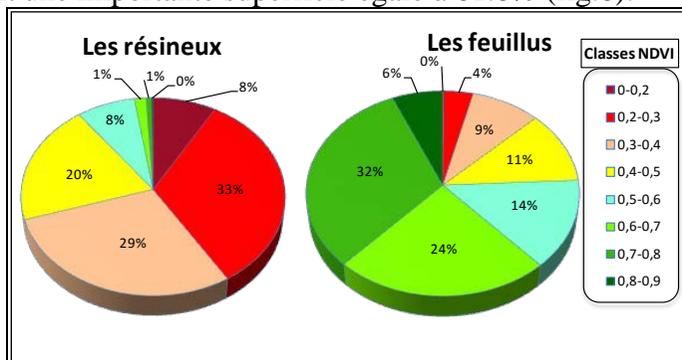


Fig.8 : Superficies (en %) de différentes classe d'NDVI pour la totalité des résineux et des feuillus de l'Est algérien

Le calcul de l'écart type d'NDVI et son cartographie sont très intéressants. D'une part, ils donnent une excellente mesure de la variabilité temporelle de la santé forestière et d'autre part, ils nous permettent de cibler les écosystèmes forestiers qui subissent des déforestations ou des stress environnementaux d'origine biotiques ou abiotiques.

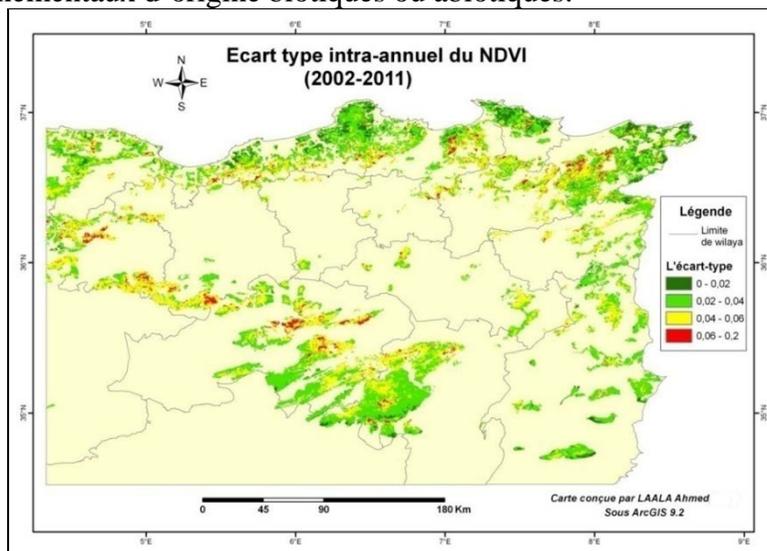


Fig.9 : Ecart type intra-annuel d'NDVI calculé pour la période (2002-2011)

L'écart type intra-annuel de l'NDVI, présenté sur la figure 9, a été calculé sur une période de 10 ans (2002-2011). Les résultats obtenus montrent que 94.97% de la superficie forestière de l'Est algérien est caractérisé par un écart type d'NDVI négligeable (<0.06), ce qui signifie que l'irrégularité de l'indice est faible et que les données sont homogènes et regroupées autour de la moyenne. On peut dire que l'Algérie orientale regroupe des formations forestières caractérisées par une certaine stabilité de leurs activités végétatives.

Le reste des superficies, qui représente 5.03% de la surface totale des écosystèmes forestiers analysés, affiche des fortes valeurs d'écart type d'NDVI. Ces parcelles forestières sont localisées particulièrement au niveau de la forêt de l'Oued Soudan (wilaya d'El-Taref), Faid Ed-Deba et Ouled Bergouga (wilaya de Skikda), Tababor (entre la wilaya de Bejaia et Sétif), Beni-Yadel et Hodna (wilaya de Bordj Bou-Argeridj), Boutaleb (wilaya de Sétif), Belezma, Bouarif et l'Est de la forêt d'Ich Ali (wilaya de Batna). Les données annuelles de l'indice NDVI au niveau de ces massifs sont irréguliers et présentent des pics importants à travers les années.

En termes des espèces, l'importante superficie où les données annuelles de l'indice NDVI sont irrégulières a été observée pour l'olivier lentisque. Elle est égale à 11.8% de la surface totale de cette essence forestière. Il est suivie par le chêne vert (8.4%), le cèdre (6.8%), le chêne liège (5.6%), le chêne zéen (4.9%), le genévrier de Phénicie (2.3%), le pin d'Alep (2.2%), le chêne kermès (1.1%) et enfin le pin maritime (0.1%).

À l'échelle saisonnière

Nous avons essayé de cartographier l'indice NDVI saisonnier de la période (2002-2011) pour déterminer spatialement l'écart de la production de la biomasse forestière entre les saisons. On a segmenté les pixels qui représentent les surfaces forestières en 9 classes d'NDVI de 0.1 d'écart.

D'après la figure 10, on remarque une nette variation saisonnière de l'activité végétative qui reste toujours soutenue dans la partie Nord. Contrairement au cycle naturel de la végétation où la saison végétative est celle du printemps, la végétation forestière de l'Est algérien montre une forte activité végétative au cours de la saison hivernale. Ceci nous laisse à supposer que soit l'activité végétative des arbres est d'avantage lié à la précipitation hivernale qu'à la température, soit le réchauffement marquée au niveau de l'Algérie orientale améliore l'intensité photosynthétique des essences forestiers. Davantage de détails concernant cette tendance positive des températures sont disponibles dans notre étude publiée récemment (Laala et Alatou, 2016).

D'autre part, les feuillus sont dominés par des valeurs d'NDVI supérieure au seuil de 0.6, alors que la quasi-totalité des superficies des résineux affichent des valeurs inférieures à ce seuil. Ceci est peut être du au réflectance des feuilles qui dépend de la structure du parenchyme lacuneux et de l'importance du parenchyme palissadique. Le parenchyme lacuneux est le principal responsable de la réflexion dans le proche infrarouge. Lorsque celui-ci est peu développé (cas des résineux) la réflectance est faible. À l'inverse, lorsqu'il est très développé (cas des feuillus), la réflectance est forte.

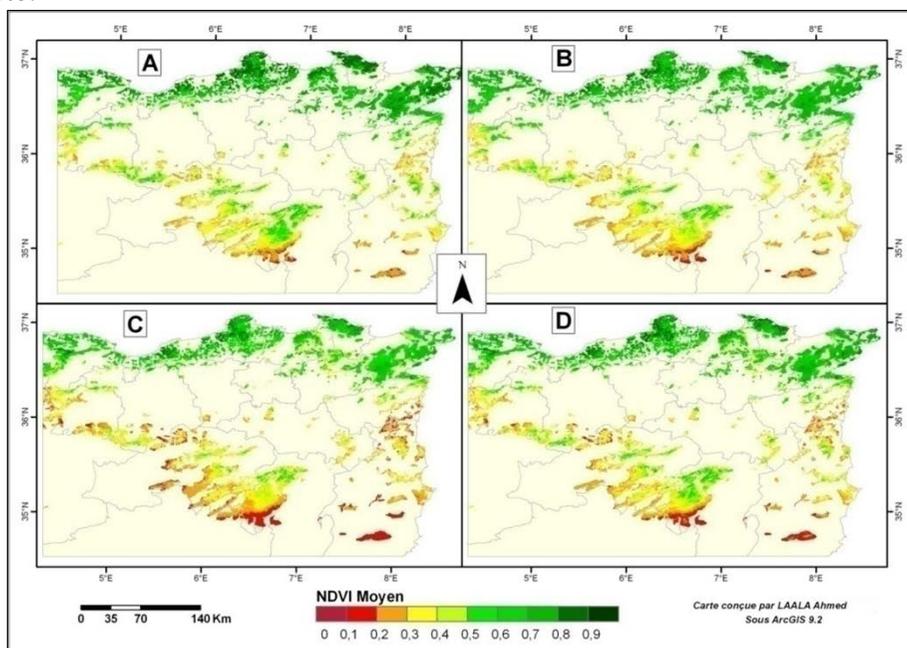


Fig.10 : NDVI saisonnier moyenne calculé pour la période (2002-2011) au cours de l'hiver (A), le printemps (B), l'été (C) et l'automne (D)

En termes des écosystèmes forestiers, 8% de la surface totale du Pin d'Alep est marqué par des fortes valeurs d'NDVI dépassant le 0.6 et cela durant la saison hivernale. Cette surface est de 4% durant la saison printanière et de 1% durant la saison estivale. Concernant les feuillus, la saison hivernale est marquée par des valeurs très fortes d'NDVI affichées au niveau de 95% de la surface totale du chêne liège. Cette surface est égale à 69% durant la saison estivale.

Pour la variabilité intra-saisonnière de la végétation forestière, on peut constater des valeurs d'écart type de l'indice NDVI non négligeables, qui peuvent dépasser 0.2, traduisant l'extrême variabilité de l'activité végétative saisonnière et indiquent l'irrégularité et l'hétérogénéité saisonnière de l'NDVI. Les pixels forestiers concernés sont mentionnés en rouge sur la

figure 11. Ils représentent 18.97% de la surface totale des forêts étudiées durant la saison hivernale et 13% durant les autres saisons de l'année.

Pour les quatre saisons de l'année, les forêts suivantes affichent des valeurs notables d'écart type d'NDVI: la forêt de Beni-Yadel, Bibans (Bordj Bou-Arreridj), Ouled Bergougga, Faid Ed Deba (wilaya de Skikda), Belezma, Bouarif, Hodna, Ich Ali (wilaya de Batna), Chelia (wilaya de Khenchela).

Ainsi, les variations intra-saisonniers de l'NDVI sont très marquées surtout pour la saison hivernale, durant laquelle l'activité végétative de 60.7% de la surface total des cédraies est irrégulière et marque des pics à travers les années. Toutefois, la classe de forte valeur d'écart type caractérise uniquement 3.7% de la surface totale du chêne kermès et seulement 1.07% du pin maritime.

Concernant la saison printanière, les fortes valeurs d'écart type caractérisent 25.8% de la surface totale du chêne vert. Alors, pour la saison estivale et automnale, elles dominent une superficie allant de 22.6% à 30.9% au niveau des forêts d'olivier lentisque. Durant ces deux saisons, on remarque qu'une partie importante des forêts de la wilaya d'El-Taref marque des irrégularités intra-saisonniers remarquables de l'indice NDVI.

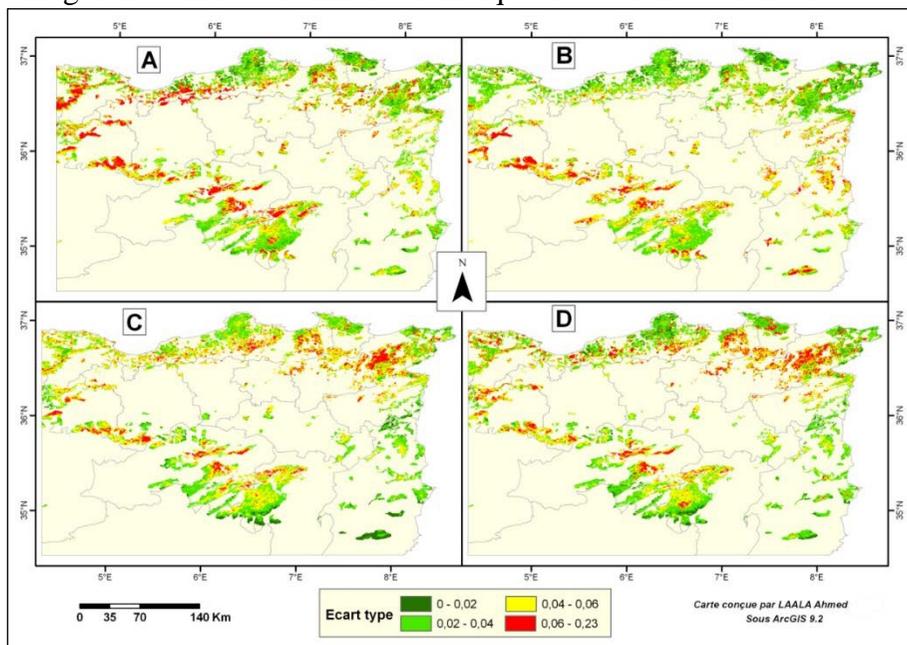


Fig.11 : Ecart type intra-saisonnier d'NDVI calculé pour la période (2002-2011) au cours de l'hiver (A), le printemps (B), l'été (C) et l'automne (D)

Evolution de l'NDVI entre la période (2002-2006) et (2007-2011)

Dans cette partie, on a essayé d'illustrer la fluctuation et l'irrégularité de l'activité végétative des peuplements ligneux entre deux sous-périodes à

partir de l'analyse statistique de l'indice NDVI. D'après le tableau 2, on peut constater que la totalité de la forêt de l'Est algérien a connu une amélioration de la production végétale durant la 2^{ème} période (2006-2011) où les superficies à fortes valeurs d'NDVI augmentent de 38.4% à 41.4%, soit un gain de 3%.

Tableau 2 : Pourcentage des pixels forestiers par classe d'NDVI pour les deux sous-périodes (P1 = 2002-2006 ; P2 = 2007-2011)

Forêts	0-0,2		0,2-0,3		0,3-0,4		0,4-0,5		0,5-0,6		0,6-0,7		0,7-0,8		0,8-0,9	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Pin d'Alep	2,2	1,3	27,6	23,9	32,7	31,0	26,5	27,0	8,8	13,4	1,8	3,0	0,4	0,5	0,0	0,0
Pin maritime	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8	12,6	8,4	53,3	42,9	33,3	47,9
Cèdre	0,0	0,0	3,0	1,0	25,9	17,6	41,9	31,1	21,7	36,1	5,5	10,9	2,0	3,3	0,0	0,0
Genévrier de Phénicie	22,1	14,8	47,8	42,0	22,8	29,7	6,5	10,8	0,8	2,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Les résineux	0,0	6,9	38,9	30,4	31,3	29,7	20,8	20,2	6,6	9,7	1,4	2,2	0,7	0,7	0,2	0,3
Chêne liège	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	0,2	4,0	1,7	12,2	8,6	32,9	27,6	42,4	48,3	7,9	13,6
Chêne vert	1,0	0,1	16,5	9,2	32,2	24,1	28,8	31,1	16,3	23,9	4,7	10,0	0,5	1,5	0,0	0,0
Chêne zéen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	2,8	0,5	15,7	7,6	32,8	30,2	38,6	46,7	9,7	14,7
Chêne kermès	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	3,6	3,1	27,6	20,4	30,7	30,4	32,3	38,0	5,6	8,1
Olivier lentisque	0,2	0,1	4,2	0,5	10,4	6,7	17,6	16,0	21,3	22,8	31,4	30,7	14,7	22,5	0,3	0,6
Les feuillus	0,3	0,0	5,0	2,7	10,2	7,5	11,8	10,8	14,2	13,7	24,6	22,8	28,5	33,3	5,4	9,1
Totalité des écosystèmes forestiers	0,2	2,7	17,1	13,3	17,7	16,0	15,0	14,4	11,5	12,2	16,3	14,9	18,6	20,8	3,5	5,7

Pour les résineux, la classe à forte valeur d'NDVI (0.6-0.9) gagne 0.9% de la surface totale durant la deuxième sous-période (tab.16). Cependant chez les feuillus, cette classe présente un important gain égale à 6.7%, elle passe de 58.5% pour la 1^{ère} période à 65.2% pour la 2^{ème} période (tab.2).

Concernant la variabilité temporelle des valeurs d'NDVI, on peut remarquer que les fortes valeurs de l'écart type de cet indice caractérisent une superficie forestière égale à 37.8% durant la première période (2002-2006), ce qui montre l'intensité de la variabilité interannuelle de l'NDVI durant ces 5 ans (fig.12). Les forêts concernées par cette irrégularité sont : la forêt de Beni Yadel, Hodna, Boutaleb, Ich Ali, Belezma, Tababor, Guerrouch, Oled Bergouga, Faid Ed-Deba et Oued Soudane. Cette surface est de moins importance durant la deuxième période, elle ne représente que 7.8% de la surface forestière totale de l'Est algérien, ce qui montre la faible dessaisonalisation des années et la faible irrégularité de l'indice NDVI pour cette sous-période.

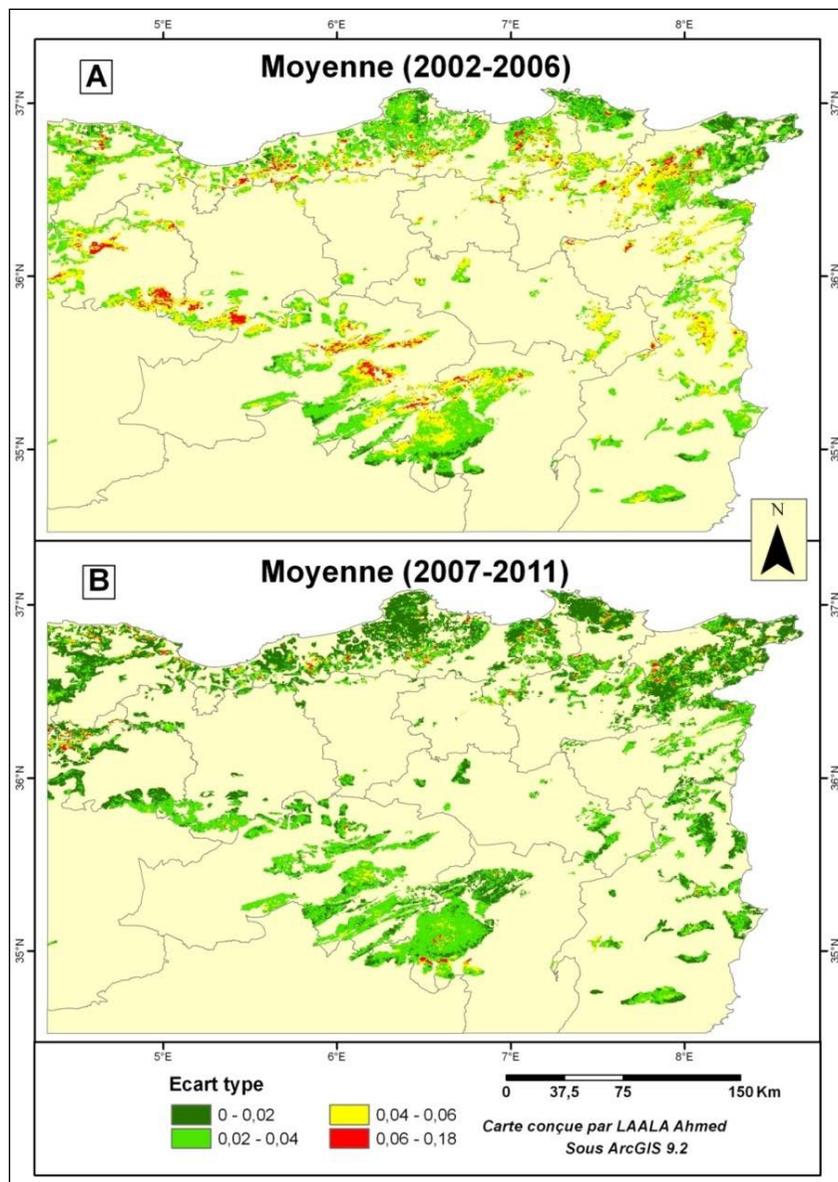


Fig.12 : Ecart type intra-annuel d’NDVI calculé pour les deux sous-périodes (2002-2006) et (2007-2011). La légende située en bas est valable pour les deux cartes

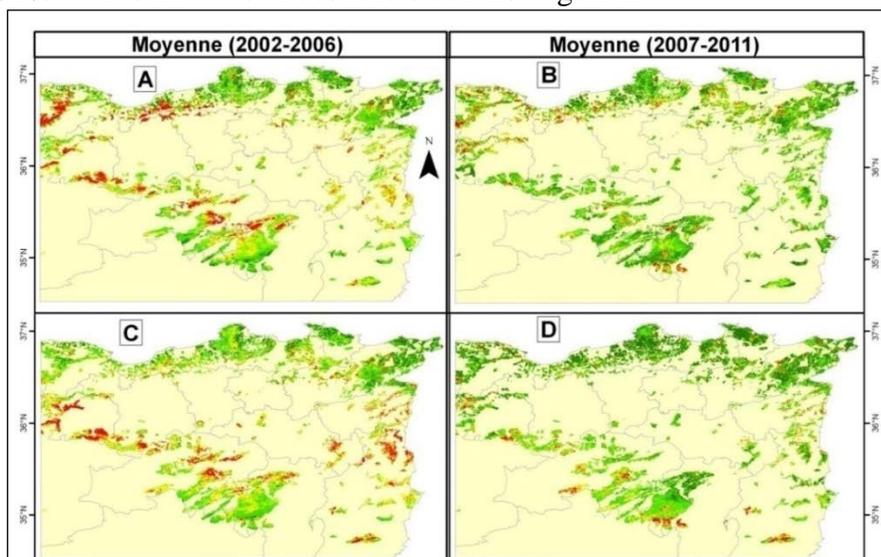
Durant la première sous période, la classe d’écart type d’NDVI (0.04-0.2) caractérise 34.8% de la surface totale des résineux et 39.6% de la surface des feuillus. Cependant durant la deuxième sous-période, cette classe est minoritaire, elle caractérise seulement 7% de la surface totale des résineux et 8.3% des feuillus.

Durant la première sous-période, l’écosystème forestier qui affiche une forte irrégularité de l’activité végétative est celui d’olivier lentisque où

les fortes valeurs d'écart type sont enregistrées au niveau de 960 pixels forestiers, soit 13.35% de la surface totale de cet écosystème. Il est suivi par le chêne vert avec une superficie de 11.6%. Ces surfaces diminuent durant la deuxième sous-période pour atteindre 3.2% pour l'olivier lentisque et 0.3% pour le chêne vert.

La figure 13 présente l'écart type intra-saisonnier d'NDVI calculé pour les deux sous-périodes. Les zones forestières où la végétation est stressée sont facilement identifiables, elles sont colorées en rouge, alors que les zones en vert indiquent des zones pour lesquelles l'NDVI présente un pic relativement peu marqué. Les valeurs d'écart type d'NDVI dépassent 0.06 durant la première période (2002-2006) et elles peuvent atteindre plus de 0.2 pour quelques pixels de l'Est algérien. Les forêts qui marquent cette grande dispersion des valeurs durant la saison hivernale sont: la forêt de Beni-Yadel, Dreat, Akfadou, Beni Rhobi, Babor, Tababor, Beni Medjalled, Guerrouche, Arres, Hodna, Boutaleb, Ich Ali, Bouarif, Chelia et Ouled Yagoub. Ainsi, durant la saison estivale, une bonne partie des forêts de l'Oued Soudan, Bouredine, Mahabouba, Fedj El Mekta, Rezgoun, Beni Ahmed, Beni Mezzeline, Ain El Kelb, Senhadja, Larsahas, Safia et Tsmara, présente une forte valeur d'écart type d'NDVI. Durant la deuxième période (2007-2011), ces fortes valeurs d'écart type dépassent rarement le seuil 0.04.

D'après la figure 13, on peut constater une amélioration de l'activité végétative des massifs forestiers étudiée durant la 2^{ème} période où les fortes valeurs d'écart type (0.06-0.2) calculées pour la saison estivale ne représentent que 2.8% de la superficie forestière totale. Par contre la 1^{ère} période est caractérisée par des moyennes saisonnières d'NDVI dispersées autour de la moyenne où les fortes valeurs d'écart type peuvent dominer 19.52% de la surface total des forêts de l'Est algérien.



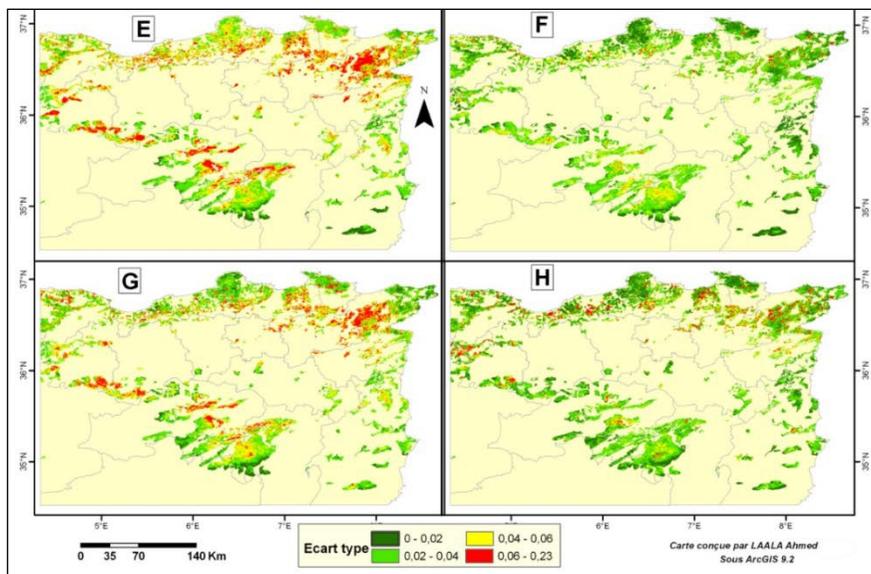


Fig.13 : Ecart type intra-saisonnier d’NDVI calculé pour les deux sous-périodes (2002-2006) et (2007-2011). A, B : l’hiver, C, D: le printemps, E, F: l’été, G, H: l’automne. La légende située en bas est valable pour toutes les cartes

Durant la saison hivernale de la première période, l’écosystème forestier qui renferme le maximum des superficies où la valeur d’écart type d’NDVI dépasse le 0.06 est celui du cèdre. Ces superficies représentent 58.8% de sa surface totale et elles diminuent durant la deuxième période pour atteindre 27.6%.

Concernant les fortes valeurs d’écart type d’NDVI (>0.06), ils sont affichées principalement au niveau 28.9% de la surface totale du chêne vert et cela durant la saison printanière de la première sous-période. Cette surface est moins importante durant la deuxième période (5.9%). La même remarque a été constatée pour l’olivier lentisque qui marque une surface maximale de 41.8% durant la saison estivale de la première période et seulement 4.6% pour la deuxième période.

Conclusion

Les cartes issues de cette étude donnent une idée sur la répartition spatiale de la biomasse verte et de l’intensité de l’activité végétative des forêts de l’Est algérien. Elles font ressortir une décroissance de cette activité du Nord vers le Sud, ce qui nous reflète l’effet prépondérant de la latitude qui est considérée comme une variable explicative de la variation thermique. Cette expression cartographique montre également que les parcelles forestières les moins vigoureuses se situent essentiellement au Sud de la zone d’étude, à partir de la latitude 35°30’, ce qui signifie que les conditions

écologiques et particulièrement thermiques de ces régions sont moins propices à la croissance des essences forestières.

Le paramètre statistique de dispersion calculé à partir des séries temporelles d'NDVI durant la période 2002-2011, a permis, d'une part, de comprendre la variabilité intra-annuelle et intra-saisonnière du couvert forestier et d'autre part, de géolocaliser spatialement les zones forestières qui connaissent des pic de stress et des perturbations de la production de la biomasse. A l'échelle annuelle, le maximum des pixels forestiers concernés par ces anomalies appartient à l'écosystème d'olivier lentisque, alors qu'à l'échelle saisonnière, ce sont les cédraies qui connaissent des hausses et des baisses de la production forestière durant la saison hivernale, les chênaies vertes durant la saison printanière et les massifs d'olivier lentisque durant la saison estivale et automnale. Or, la comparaison des cartes des deux sous-périodes étudiées révèle une amélioration majeure de l'activité végétative des années 2007 vers la fin de 2011.

Au terme de cette étude, on peut dire que l'analyse de la dynamique spatiotemporelle de la végétation forestière à partir de la télédétection satellitaire s'est révélé un excellent moyen d'investigation pour évaluer l'intensité des facteurs naturels et anthropiques qui contribuent à la régression de la sylve algérienne.

References:

- Baret, F., Clevers, J. G. P. W., Steven, M. D. (1995). The robustness of canopy gap fraction estimations from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches. *Remote Sensing of Environment*, 54(2): pp.141-151.
- Bariou, R., Lecanu, D., Le Henaff, F. (1985). Dossiers de télédétection. Tome 1. Réponse spectral des végétaux". Centre régional de télédétection", Université de Rennes 2-Haute Bretagne, (2) : pp.71-73.
- Beek, P. S. A., Atzberger, C., Hogda, K.A., Johansen, B., Skidmore, A. K. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): pp.321-334.
- Caloz, R., Collet, C. (2001). Précis de Télédétection, Volume 3: Traitements Numériques d'images de télédétection. AUF, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 386p.
- Carvalho, L. M. T. D., Clevers, J. G. P.W., Skidmore, A. K., and Jong, S. M. D. (2004), Selection of imagery data and classifiers for mapping Brazilian semideciduous Atlantic forests, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5 (3), 173-186.

- Gutschick, V.P., & BassiriRad, H. (2003). Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences. *New Phytologist*. 160:21-42.
- Holben, B. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* (7): 1417 – 1434.
- Jensen, J.R. (2000). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 544p.
- Laala, A., Alatou, D. (2016). Variabilité temporelle des températures annuelles et saisonnières dans l'est algérien. *European Scientific Journal*. Vol.12, No.14 (2016), ISSN: 1857- 7431, pp 45-62.
- McDonald, A. J., Gemell, F.M., Lewis, P. E. (1998). Investigation of the Utility of Spectral Vegetation Indices for determining Information on Coniferous Forests”. *Remote Sensing of Environment*, (66): pp.250-272.
- Petit, R. J., & Hampe, A. (2006). Some evolutionary consequences of being a tree. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*. 37:187-214.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J-M., Tucker, C.J., and Stenseth, N.C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology* 20 (9), 503-510.
- Robin, M. (2002). Télédétection : Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. Nathan Université, 318 p.
- Tucker, C.J., & Sellers P.J. (1986). Satellite remote sensing of primary production, *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11), 1395-1416.
- Vermote, E. F., El Saleous, N. Z., Justice, C.O. (2002). Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, (83): pp.97-111.