

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRÈRES MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE VEGETALE

N° de série : 09/ECO/2016

N° d'ordre : 126/DS/2016



THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
DOCTEUR EN SCIENCES

Filière: Ecologie végétale

Option

Ecophysiologie et biotechnologie végétale

Thème

Cartographie de la variabilité thermique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien

Présentée par :

Mr : LAALA Ahmed

Soutenu le : 30/11/2016

Devant le jury :

Président : Mr. BENDERRADJI M^{ed} El Habib

Rapporteur : Mr. ALATOU Djamel

Examineurs : Mr. BENTOUATI Abdallah

Mr. HAFSI Miloud

Mr. BAZRI Kamel Eddine

Mr. BENMESSAOUD Hassene

Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1

Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1

Prof. Université Hadj Lakhdar Batna1

Prof. Université Ferhat Abbes Sétif1

MCA. Université des Frères Mentouri Constantine1

MCA. Université de Batna2

2016/2017

REMERCIEMENTS

*Au terme de cette étude, je remercie avant tout **Dieu le Tout Puissant**, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplissement de ce modeste travail.*

*J'exprimer en premier lieu ma reconnaissance à Mr. **ALATOU D**, professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine, pour m'avoir fait confiance malgré les connaissances légères que j'avais en septembre 2010 sur le S.I.G, et pour m'avoir guidé, encouragé, conseillé. Merci pour son soutien et sa disponibilité pendant les derniers mois.*

*Je remercie vivement Mr. **BENDERRAJI M H**, professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine, pour avoir accepté de présider le jury et pour ses nombreux commentaires utiles pour un travail futur dans ce domaine de recherche.*

*J'exprime mes plus profonds remerciements à Mr. **BAZRI K.E**, Maître de Conférences à l'Université des Frères Mentouri Constantine, d'avoir accepté de juger ce travail, ses critiques et suggestions me seront certainement utiles.*

*Mes remerciements vont également à mon encadreur d'Ingéniorat : Mr. **HAFSI M**, professeur à l'Université de Sétif, pour avoir accepté de participer au jury et de me faire l'honneur de juger cette thèse.*

*J'adresse également mes profonds remerciements à Mr. **BENTOUATI A**, professeur à l'Université de Batna, pour avoir accepté notre invitation et d'être membre de ce jury. Ses remarques et conseils me seront d'une grande utilité.*

*Je suis très reconnaissant à Mr. **BENMESSAOUD H**, Maître de Conférences à l'Université de Batna et spécialiste de télédétection et du SIG, d'avoir bien voulu participer à ce jury et examiner mon travail.*

*Je tiens ainsi à remercier tout spécialement Mr. **BOUKABOUB A**, Maître de Conférences à l'Université de Batna, pour son soutien moral et ses précieux conseils.*

*Ma plus profonde gratitude s'adresse à Mr. **BAAZIZ N**, Maître de Conférences à l'Université des Frères Mentouri Constantine, pour sa grande disponibilité, pour sa confiance et ses encouragements.*

*Je remercie également Mr. **ZEGUER T**, responsable de l'optimisation et de la simulation avancée au sein du groupe automobile britannique « Jaguar Land Rover », pour son aide précieuse dans l'étude statistique. Ses conseils sur les méthodes d'interpolation et ses critiques pointues me sont très bénéfiques.*

*Mes reconnaissances vont également à Mlle. **LEROUX L**, Géomaticienne de l'Université de Montpellier2 (France) qui a eu l'amabilité de répondre à mes questions durant mes recherches et de me donner de précieux conseils.*

*J'exprime aussi toute ma gratitude aux personnels de **l'INRF** qui ont mis à ma disposition les données qui m'étaient utiles, aux fonctionnaires de la circonscription des forêts d'El Eulma et particulièrement **MELIZI N**, pour leur soutien et aux personnels de la subdivision des forêts de la Daira Ain Oulemene et de la wilaya de Mila.*

Je voudrais remercier tous ceux qui, de quelque manière que ce soit, par un conseil, une idée, un coup de main ou, tout simplement leur amitié, m'ont aidée à réaliser ce travail.

A tous, je dis Merci.

DEDICACE

A mes parents pour avoir toujours cru en moi et m'avoir toujours soutenue malgré l'adversité, pour toutes les souffrances qu'ils ont endurées pour nous assurer une bonne éducation et nous permettre une vie décente.

A ma femme, qui n'a pas cessé de m'encourager et qui a su créer une atmosphère propice à la réalisation de ce modeste travail.

A mes filles « Assil Imtinene » et « Ilef Baïlassen »

A la mémoire vénérée de mon ami «Mérabet Mouhamed»

A mes meilleurs amis et particulièrement : Rabeh Mourad, Kais, Abd el Hamid et Lyamine.

A mon pays

Au peuple palestinien en général et particulièrement les Gazaouis

Je dédie ce travail

Laala Ahmed

Liste des figures

- Fig.1: Différence entre variabilité climatique (A) et changement climatique (B) (Cas de deux stations en Algérie : Jijel et Batna) 7
- Fig.2 : Variabilité de la température avec la latitude 9
- Fig.3 : Variation de la température avec l'altitude..... 10
- Fig.4 : Modélisation du champ thermique à l'intérieur d'une montagne en fonction des conditions de surface (dépendantes de l'altitude et de l'orientation) 11
- Fig.5 : Variation de l'énergie solaire, disponible au niveau du sol, en fonction de la pente et de l'orientation (exemple au solstice d'été, à midi, par 49° de latitude Nord) 12
- Fig.6 : Ajustement entre les valeurs NDVI et la température de surface..... 13
- Fig.7 : Relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation..... 14
- Fig.8 : Coupe transversale d'une biomembrane active dans un état fluide (A) et inactive dans un état rigide (B) 18
- Fig. 9 : Relation entre les dates de débourrement et la température moyenne de mars (à gauche) et entre les dates de jaunissement et la température moyenne d'octobre (à droite) pour les chênaies de la France (période 1997-2006) 22
- Fig.10 : Impact du réchauffement climatique sur la répartition des essences forestières dans la France 25
- Fig.11 : Impact du réchauffement climatique sur la répartition du chêne vert (*Quercus ilex*) et de l'hêtre commun (*Fagus sylvatica*) actuelle et à la fin du 21^{ème} siècle..... 26
- Fig.12 : Répartition des forêts en Algérie 27
- Fig.13 : Répartition de la forêt algérienne selon le statut juridique 28
- Fig.14: Relief de la zone d'étude et localisation des stations météorologiques..... 35
- Fig.15 : Classification morphologique de l'Est algérien 36
- Fig.16: Carte géologique du Nord algérien..... 38
- Fig.17 : Carte des sols de l'Est algérien 39
- Fig.18. Les bassins versants de l'Est algérien 40
- Fig.19 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien 42
- Fig.20 : Les étages bioclimatiques de l'Est algérien..... 44
- Fig.21 : Principales essences forestières en Algérie orientale 45
- Fig.22: Présentation en 3D de la zone d'étude..... 47
- Fig.23 : Grille de MNT de 3x3 cellules 48
- Fig.24 : Image brute NDVI de MODIS acquise le 01/02/2002 49
- Fig.25 : Schéma représentatif des étapes réalisées pour l'interpolation des températures mensuelles 59
- Fig.26 : Image satellitaire MODIS (acquise le 01/02/2002) avant et après l'application du masque 61
- Fig.27 : Géoréférencement de la carte d'occupation du sol sous ArcGis9.2 62
- Fig.28 : Vectorisation des massifs forestiers sous ArcGis9.2..... 63
- Fig.29 : Vecteurs représentant les limites des massifs forestiers de l'Est algérien 64
- Fig.30 : Principaux écosystèmes forestiers de l'Est algérien 66
- Fig.31 : Superficies (en %) des différents essences forestières de l'Est algérien 67
- Fig.32 : Carte des altitudes des forêts de l'Est algérien 68
- Fig.33 : Boîte à moustache détaillant la variation de l'altitude au niveau de différents types des forêts 68
- Fig.34 : Superficies (en %) des classes d'altitudes au niveau des forêts de l'Est algérien 69

| | |
|--|-----|
| • Fig.35: Superficies (en %) des classes d'altitudes au niveau des forêts de résineux et de feuillus | 70 |
| • Fig.36 : Carte des pentes des forêts de l'Est algérien..... | 71 |
| • Fig.37 : Superficies (en %) des pentes des forêts de l'Est algérien | 71 |
| • Fig.38 : Carte des expositions des forêts de l'Est algérien..... | 72 |
| • Fig.39 : Répartition des expositions au niveau des forêts de l'Est algérien..... | 72 |
| • Fig.40 : Superficies (en %) des expositions occupées par les écosystèmes forestiers de l'Est algérien..... | 73 |
| • Fig.41 : Anomalie des températures minimales au cours de la période 1982-2011..... | 77 |
| • Fig.42 : Anomalie des températures maximales au cours de la période 1982-2011 | 79 |
| • Fig.43 : Intensité des années froides et chaudes calculé pour la période 1982-2011..... | 80 |
| • Fig.44: Tendances des températures minimales annuelles (période 1982-2011) | 81 |
| • Fig.45 : Tendances des températures maximales annuelles (période 1982-2011) | 82 |
| • Fig.46: Tendances des amplitudes thermiques annuelles (période 1982-2011)..... | 83 |
| • Fig.47: Tendances des températures minimales de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D) | 84 |
| • Fig.48 : Tendances des températures maximales de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D) | 85 |
| • Fig.49 : Tendances des amplitudes thermiques de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D) | 86 |
| • Fig.50 : Courbure générale..... | 89 |
| • Fig.51 : Nombre de variables retenues mensuellement dans la régression multiple des températures minimales et maximales | 91 |
| • Fig.52 : Variation mensuelle du coefficient de détermination (R ²) obtenue par la régression multiple des moyennes mensuelles des températures maximales et des minimales à partir des variables topographiques..... | 93 |
| • Fig.53 : Résidus des températures minimales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation.. | 94 |
| • Fig.54 : Résidus des températures maximales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation. | 95 |
| • Fig.55 : Evaluation des méthodes d'interpolation des températures minimales par l'indicateur RMSE..... | 96 |
| • Fig.56 : Evaluation des méthodes d'interpolation des températures maximales par l'indicateur RMSE..... | 97 |
| • Fig.57: Résidus des températures minimales du mois de Janvier issus des deux méthodes d'interpolation..... | 99 |
| • Fig.58: Température minimale du mois de Janvier pour la période (1982-2011) Interpolée sous SIG par la méthode (Régression+Krigage) | 100 |
| • Fig.59 : Variation mensuelle des gradients thermiques altitudinaux calculés pour la période (1982-2011) | 101 |
| • Fig.60 : Projection des variables sur le plan des facteurs F1 et F2 | 105 |
| • Fig.61 : Projection des stations sur le plan des facteurs F1 et F2 | 107 |
| • Fig.62 : Dendrogramme de la classification des stations (critères d'agrégation de Ward) | 108 |
| • Fig.63 : Cartographie de la typologie thermique des wilayas de l'Est algérien | 109 |
| • Fig.64: Régimes thermiques des trois classes homogènes..... | 110 |
| • Fig.65 : Variation des températures minimales annuelles des trois classes issues de CAH | 111 |
| • Fig.66: Variation des températures maximales annuelles des trois classes issues de CAH..... | 112 |
| • Fig.67: Variation des températures moyennes annuelles des trois classes issues de CAH..... | 113 |
| • Fig.68: Variation de l'amplitude thermique annuelle des trois classes issues de CAH..... | 114 |
| • Fig.69 : Température moyenne annuelle au niveau des forêts de l'Est algérien..... | 115 |
| • Fig.70 : Statistique des températures moyennes annuelles au niveau de différents massifs forestiers | 116 |

- Fig.71 : Répartition des températures moyennes annuelles au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 117
- Fig.72 : Variabilité spatiale des types thermiques au niveau de l'Est algérien..... 118
- Fig.73 : Moyenne des amplitudes mensuelles au niveau des forêts de l'Est algérien..... 119
- Fig.74: Statistique des amplitudes mensuelles au niveau de différents massifs forestiers 119
- Fig.75: Répartition des moyennes des amplitudes mensuelles au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 120
- Fig.76: Isothermalité au niveau des forêts de l'Est algérien 121
- Fig.77: Statistique de l'isothermalité au niveau de différents massifs forestiers 121
- Fig.78: Classes d'isothermalité au niveau des forêts de l'Est algérien 122
- Fig.79: Saisonnalité de la température au niveau des forêts de l'Est algérien..... 123
- Fig.80: Statistique de la saisonnalité de la température au niveau de différents massifs forestiers.....123
- Fig.81: Proportion de classes de saisonnalité de la température au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien..... 124
- Fig.82: Températures maximales du mois le plus chaud au niveau des forêts de l'Est algérien.. 125
- Fig.83: Statistique de la température maximale du mois le plus chaud au niveau de différents massifs forestiers 125
- Fig.84: Proportion de classes de température maximale du mois le plus chaud au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 126
- Fig.85: Températures minimales du mois le plus froid au niveau des forêts de l'Est algérien..... 127
- Fig.86: Statistique de la température minimale du mois le plus froid au niveau de différents massifs forestiers 127
- Fig.87: Proportion de classes de température minimale du mois le plus froid au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 128
- Fig.88: Amplitudes annuelles maximales au niveau des forêts de l'Est algérien 129
- Fig.89: Statistique des amplitudes annuelles maximales au niveau de différents massifs forestiers 129
- 129
- Fig.90: Proportion de classes d'amplitudes annuelles maximales au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien..... 130
- Fig.91: Températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau des forêts de l'Est 131
- Fig.92: Statistique des températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau de différents massifs forestiers 131
- Fig.93: Répartition des températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien..... 132
- Fig.94: Températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des forêts de l'Est algérien.....133
- Fig.95: Statistique des températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des différents massifs forestiers 133
- Fig.96: Répartition des températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien..... 134
- Fig.97: Amplitude thermique annuel au niveau des forêts de l'Est algérien 135
- Fig.98: Statistique de l'amplitude thermique annuelle au niveau de différents massifs forestiers.....135
- Fig.99: Répartition de classes d'amplitude thermique annuel au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 136
- Fig.100: Indice de thermicité au niveau des forêts de l'Est algérien 137
- Fig.101: Statistique de l'indice de thermicité au niveau des différents massifs forestiers..... 137
- Fig.102: Proportion de classes d'indice de thermicité au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien 138
- Fig.103 : Variabilité du NDVI entre 2002 et 2011 selon les deux principaux types de forêts de l'Est algérien. 150

- Fig.104 : Variation interannuelle de l'indice NDVI de différents écosystèmes forestiers étudiés 151
- Fig.105 : NDVI annuel moyen calculé pour la période (2002-2011) 152
- Fig.106 : Superficies (en %) de différentes classes d'NDVI annuelle moyenne 153
- Fig.107 : Superficies (en %) de différentes classe d'NDVI moyenne des résineux et feuillus 153
- Fig.108 : Superficies (en %) de différentes classes d'NDVI moyenne de chaque écosystème forestier..... 154
- Fig.109 : Ecart type intra-annuel d'NDVI calculé pour la période (2002-2011) 155
- Fig.110 : NDVI saisonnier moyen calculé pour la période (2002-2011) au cours de A : l'hiver, B: le printemps, C: l'été, D: l'automne 156
- Fig.111 : Ecart type intra-saisonnier d'NDVI calculé pour la période (2002-2011) au cours de : A : l'hiver, B: le printemps, C: l'été, D: l'automne 157
- Fig.112 : 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 159
- Fig.113 : 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 161
- Fig.114 : Tendence de l'NDVI sur la période 2002-2011..... 162
- Fig.115 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l'Est algérien affectées par une tendance négative de l'NDVI par rapport à la surface totale régressée 163
- Fig.116 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance décroissante de l'NDVI..... 164
- Fig.117 : Tendence de l'indice NDVI au niveau de la wilaya d'El-Tarf 164
- Fig.118 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l'Est algérien affectées par une tendance positive de l'NDVI par rapport à la surface totale progressé..... 165
- Fig.119 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance positive de l'NDVI..... 166
- Fig.120 : Tendence de l'NDVI au niveau de la wilaya de Batna pour la période 2002-2011 166
- Fig.121 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l'Est algérien affectées par une tendance nulle de l'NDVI par rapport à la surface totale stable 167
- Fig.122 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance non significative de l'NDVI.... 167
- Fig.123 : Tendence de l'NDVI au niveau de la wilaya de Skikda pour la période 2002-2011 168
- Fig.124 : Superficies des écosystèmes forestiers réparties par classe de tendance de l'NDVI.... 168
- Fig.125: Coefficient de corrélation spatialisé entre la température minimale et l'indice NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien..... 172
- Fig.126. Nombre de pixel de chaque classe de corrélations entre la température minimale et l'NDVI 173
- Fig.127: Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température minimale et l'NDVI..... 174
- Fig.128: Coefficient de corrélation spatialisé entre la température moyenne et l'NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien..... 175
- Fig.129 : Nombre de pixel de chaque classe de corrélation entre la température moyenne et l'NDVI 176
- Fig.130 : Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température moyenne et l'NDVI 176
- Fig.131 : Coefficient de corrélation entre la température maximale et l'NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien..... 177
- Fig.132 : Nombre de pixel de chaque classe de corrélations entre la température maximale et l'NDVI 178
- Fig.133 : Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température maximale et l'NDVI 178

Liste des tableaux

- Tab.1 : Effet d'une augmentation de la concentration de CO₂ et de la température sur les différents processus physiologiques 16
- Tab.2 : Superficies des principales essences forestières en Algérie (en ha) 29
- Tab.3 : Bilan des incendies de forêts en Algérie (1996-2005) 30
- Tab.4 : Caractéristiques des scènes satellitaires MODIS couvrant la région Nord-Est algérienne 49
- Tab.5 : Liste des essences forestières dominantes au niveau de l'Est algérien..... 50
- Tab.6 : Les thermotypes selon les valeurs de l'indice de thermicité..... 54
- Tab.7 : Classes de pente 70
- Tab.8 : Caractéristiques altimétriques des stations météorologiques de l'Est algérien 87
- Tab.9 : Matrice de corrélation croisée au carré pour la température minimale du mois de Janvier. Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification de 5% ... 90
- Tab.10 : Coefficient de corrélation des variables significatives utilisées dans les régressions multiples des températures minimales mensuelles..... 92
- Tab.11 : Coefficient de corrélation des variables significatives utilisées dans les régressions multiples des températures maximales..... 92
- Tab.12: Régression pas à pas (backward selection) basé sur le t (Température minimale du mois de Janvier) 98
- Tab.13 : Gradients thermiques altitudinaux des minima (m') et des maxima (M') pour les wilayas de l'Est algérien..... 102
- Tab.14 : Statistique descriptive des rasters issus de l'interpolation des températures mensuelles et annuelles de l'Est algérien 103
- Tab.15 : Les valeurs propres et les statistiques associées du composant principal..... 105
- Tab.16 : Pourcentage des pixels forestiers par classe d'NDVI calculés pour les deux sous périodes (P1 = 2002-2006 ; P2 = 2007-2011) 158
- Tab.17 : Superficies forestières des wilayas affectées par les différentes classes de tendance de l'NDVI 163
- Tab.18 : Indicateur RMSE et résidus issus de l'interpolation des températures minimales et maximales annuelles 169
- Tab.19 : Analyse de régression entre l'NDVI annuel et les variables thermiques 170

Sommaire

| | |
|------------------------|---|
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des abréviations | |
| Introduction | 1 |

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---|----|
| 1. Définition des concepts | 5 |
| 1.1. Climat | 5 |
| 1.2. Variabilité climatique et changement climatique | 5 |
| 2. La température | 8 |
| 3. Variation spatio-temporelle des températures | 8 |
| 3.1. Variabilité spatiale | 8 |
| 3.2. Variabilité temporelle | 14 |
| 4. Effets de la température sur la physiologie des végétaux | 15 |
| 4.1. Sur la photosynthèse | 16 |
| 4.2. Sur les biomembranes | 17 |
| 4.3. Sur les mouvements de solutés | 19 |
| 4.4. Sur la respiration | 19 |
| 5. Impacts des variations thermiques sur les écosystèmes forestiers | 19 |
| 5.1. Sur la croissance | 20 |
| 5.2. Sur la phénologie des espèces | 20 |
| 5.3. Sur les aires de répartition des espèces | 23 |
| 6. Présentation générale de la forêt algérienne | 27 |
| 6.1. Caractéristiques générales de la forêt algérienne | 28 |
| 6.2. Potentialités de la forêt algérienne | 28 |
| 6.3. Principaux facteurs de dégradation de la forêt Algérienne | 29 |

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET MATERIELS ET METHODES

| | |
|--|----|
| 1. Présentation de la zone d'étude | 35 |
| 1.1. Localisation géographique | 35 |
| 1.2. Topographie | 35 |

| | |
|--|----|
| 1.3. Géologie | 37 |
| 1.4. Pédologie | 38 |
| 1.5. Hydrographie | 40 |
| 1.6. Climat de l'Algérie orientale | 41 |
| 1.6.1. Les précipitations | 41 |
| 1.6. 2. Les températures | 43 |
| 1.6.3. Le bioclimat | 43 |
| 1.7. La végétation forestière | 44 |
| 2. Matériels et méthodes | 46 |
| 2.1. Les données utilisées | 46 |
| 2.1.1. Les données thermiques | 46 |
| 2.1.2. Base de données du S.I.G | 47 |
| 2.1.3. Matériels informatiques | 50 |
| 2.2- Méthodes de traitement des données | 51 |
| 2.2.1. Traitement des données thermiques | 51 |
| 2.2.1.1. Lissage par moyennes mobiles | 51 |
| 2.2.1.2. Estimation de la tendance des températures | 51 |
| 2.2.1.3. Estimation de l'anomalie des températures | 52 |
| 2.2.1.4. Estimation de la corrélation entre la température et l'NDVI | 52 |
| 2.2.1.5. Calcul du gradient thermique | 53 |
| 2.2.1.6. Calcul de l'indice de thermicité (It) | 54 |
| 2.2.1.7. Méthode d'interpolation des températures | 54 |
| 2.2.1.8. Détermination des régions thermiquement homogènes de l'Est algérien | 60 |
| 2.2.1.9. Les variables thermiques et bioclimatiques utilisées pour déterminer les exigences thermiques des essences forestiers | 60 |
| 2.2.2. Prétraitement des données satellitaires | 61 |
| 2.2.3. Traitement des données d'occupation du sol | 62 |

| |
|---|
| CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION |
|---|

| | |
|---|----|
| 1. Répartition des écosystèmes forestiers dans la zone d'étude | 66 |
| 2. Caractéristiques topographiques des massifs forestiers de l'Est algérien | 67 |
| 2.1. L'altitude | 67 |
| 2.2. Pentes | 70 |
| 2.3. L'exposition | 72 |

| | |
|--|-----|
| Discussion | 74 |
| 3. Variabilité spatio-temporelle des températures au niveau de l'Est algérien | 76 |
| 3.1. Variabilité temporelle | 76 |
| 3.1.1. Les températures minimales annuelles | 76 |
| 3.1.2. Les températures maximales annuelles | 78 |
| 3.1.3. Tendances thermiques | 81 |
| 3.1.3.1. Tendances des températures annuelles | 81 |
| 3.1.3.2. Tendances des températures saisonnières | 83 |
| 3.2. Variabilité spatiale | 87 |
| 3.2.1. Les données thermiques | 87 |
| 3.2.2. Les variables explicatives de la température | 88 |
| 3.2.3. Détermination des variables explicatives | 90 |
| 3.2.4. La validation des estimations | 93 |
| 3.2.5. Modèle explicatif de l'interpolation des températures | 97 |
| 3.2.6. Variation mensuelle du gradient thermique altitudinal | 100 |
| 3.2.7. Statistique descriptive des rasters issus de l'interpolation des températures | 102 |
| 3.3. Structure spatiotemporelle de la température au niveau de l'Est algérien | 104 |
| 3.3.1. Typologie thermique | 104 |
| 3.3.2. Variabilité thermique des différentes régions homogènes | 110 |
| 4. Limites thermiques des essences forestières de l'Est algérien | 115 |
| 4.1. Température moyenne annuelle (BIO1) | 115 |
| 4.2. Moyenne des amplitudes mensuelles (BIO2) | 118 |
| 4.3. Isothermalité (BIO3) | 120 |
| 4.4. Saisonnalité de la température (BIO4) | 122 |
| 4.5. Température maximale du mois le plus chaud (BIO5) | 124 |
| 4.6. Température minimale du mois le plus froid (BIO6) | 126 |
| 4.7. Amplitude annuelle maximale (BIO7) | 128 |
| 4.8. Température moyenne de la saison la plus chaude (BIO10) | 130 |
| 4.9. Température moyenne de la saison la plus froide (BIO11) | 132 |
| 4.10. Amplitude thermique annuelle (A) | 134 |
| 4.11. Indice de thermicité (It) | 136 |
| Discussion | 139 |
| 5. Variabilité de la dynamique de la végétation forestière à l'Est algérien | 150 |
| 5.1. Variabilité temporelle | 150 |

| | |
|--|-----|
| 5.2. Variabilité spatiale | 151 |
| 5.2.1. À l'échelle annuelle | 151 |
| 5.2.2. À l'échelle saisonnière | 156 |
| 5.3. Evolution de l'NDVI entre la période (2002-2006) et (2007-2011) | 158 |
| 5.4. Tendence de l'indice NDVI pour la période (2002-2011) | 162 |
| 6. Sensibilité de la végétation forestière de l'Algérie orientale à la température | 169 |
| 6.1. Interpolation des températures annuelles de la décennie 2002-2011 | 169 |
| 6.2. Analyse de régression entre les variables thermiques et l'indice NDVI | 169 |
| 6.3. Cartographie du coefficient de corrélation | 171 |
| 6.3.1. Corrélation entre la température minimale et l'indice NDVI | 171 |
| 6.3.2. Corrélation entre la température moyenne et l'indice NDVI | 174 |
| 6.3.3. Corrélation entre la température maximale et l'indice NDVI | 176 |
| Discussion | 179 |
| Conclusions générale et perspectives | 187 |
| Références bibliographiques | |
| Annexes | |
| Résumé | |

Liste des abréviations

❖ Pour les variables topographiques:

| | |
|--------------|---------------------|
| Alt | Altitude |
| Pen | Pente |
| Exp | Exposition |
| Ray | Rayonnement solaire |
| Cur | Courbure du relief |
| Lat | Latitude |
| Lon | Longitude |
| Dis.m | Distance à la mer |
| Dis.f | Distance à la forêt |

❖ Pour les variables bioclimatiques :

| | |
|--------------------------|---|
| BIO1: | Température moyenne annuelle |
| BIO2: | Moyennes des amplitudes mensuelles |
| BIO3: | Isothermalité (BIO2/BIO7) x 100 |
| BIO4: | Saisonnalité de la température (écart-type des températures mensuelles x 100) |
| BIO5: | Température maximale du mois le plus chaud |
| BIO6: | Température minimale du mois le plus froid |
| BIO7: | Amplitude annuelle maximale (BIO5-BIO6) |
| BIO10: | Température moyenne de la saison la plus chaude |
| BIO11: | Température moyenne de la saison la plus froide |
| A: | Amplitude thermique annuelle : |
| It: | L'indice de thermicité |
| Nbr mois <7°C: | Nombre de mois avec une température moyenne mensuelle inférieurs à 7°C |
| Min : | Température minimale |
| Max : | Température maximale |
| Moy : | Température moyenne |
| m : | Température du mois le plus froid |

M : Température du mois le plus chaud
m' : La moyenne des minima
M' : La moyenne des maxima

❖ **Autres abréviations :**

SIG : Système d'Information Géographique
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NDVI : Indice de végétation par différence normalisé
MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer : Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne
RMSE : Erreur moyenne quadratique
BBA : Bordj Bou-Argeridj
OEB : Oum El-Bouaghi

INTRODUCTION

Introduction :

Au cours des dernières décennies, l'étude des variations climatiques, à l'échelle temporelle et spatiale, dans les diverses régions du monde a été l'un de principaux enjeux scientifiques. La cause principale de ces recherches intensives est l'importance des conséquences, souvent dommageables, de la variabilité des différents paramètres climatiques sur la biocénose. En terme de sensibilité, ce sont les végétaux qui sont les plus affectés et ils doivent présenter rapidement des traits d'adaptation pour surmonter les effets nocifs de la variation climatique graduelle. Par contre, ils ne peuvent pas migrer ou changer leurs habitats si les conditions du milieu amènent rapidement ces organismes à la limite de la survie.

L'étude des variations climatiques a concerné principalement la compréhension des fluctuations de la température qui est considérée comme un facteur écologique primordial conditionnant pour une large part la distribution des végétaux. Elle a des effets directs sur plusieurs processus vitaux de la plante tels que la photosynthèse, les mouvements de solutés dans les tissus spécialisés, la respiration et la croissance (Berry et Bjorkman, 1980 ; Havaux et Lannoye, 1985 ; Méthy et Trabaud, 1990 ; Ducrey, 1981 ; Côme, 1992 ; King *et al.*, 2006 ; Myneni *et al.*, 1997).

Certaines études prévoient que la température pourrait également influencer les aires de distribution biogéographique des essences forestières (Sturm *et al.*, 2001; Haman et Wang, 2006; McKenney *et al.*, 2007). Le réchauffement de la terre peut provoquer donc un déplacement des aires de répartition de la majorité des essences forestières vers des habitats favorables thermiquement à leur croissance et leur développement. Selon Davis (1989), ce déplacement sera effectué vers des latitudes et des altitudes plus élevées. A titre d'exemple, l'institut forestier du Canada (1997) montre que les variations de température poussent les forêts canadiennes vers le Nord d'environ 100 km pour chaque hausse de température de 1°C.

L'étude de la variabilité thermique et de son impact sur les massifs forestiers est considérée comme une étape clé pour prédire les régions exposées au risque de réchauffement ou refroidissement et par conséquent aider les décideurs à la mise en place d'une stratégie d'adaptation régionale ou nationale pour la protection des essences forestières. Dans cette optique, la présente étude vise à caractériser d'une part la variabilité spatio-temporelle des paramètres thermiques (température minimale, maximale et moyenne) et d'autre part comprendre l'impact de cette variation sur la dynamique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien, région

de relief contrasté qui renferme la quasi-totalité des forêts algériennes, tout en essayant de cartographier via un système d'information géographique (SIG) la relation entre les températures et l'activité photosynthétique des essences forestières.

Notre travail vise, par conséquent, de répondre aux problématiques suivantes :

- Quelle est l'intensité de la fluctuation thermique au niveau de l'Est algérien ?
- Peut-on cartographier les principales variables thermiques qui conditionnent la répartition des principaux écosystèmes forestiers de l'Est algérien ?
- Quelle est la limite thermique possible de chaque essence forestier ?
- Quels sont les changements observés sur les écosystèmes forestiers de l'Est algérien ces dernières années ?
- Quelle est le type de la relation existant entre les températures et l'activité photosynthétiques des forêts de l'Est algérien ?

Cette recherche s'organise en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions climatiques, les principaux paramètres qui expliquent la variation spatiale et temporelle de la température, les effets de ce paramètre sur la végétation, ainsi qu'une brève présentation de la forêt algérienne.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de la zone d'étude, la récolte des données et des méthodes utilisées dans la constitution d'une base spatialisée pour cette étude.

Le dernier chapitre est consacré à :

- la caractérisation topographique des massifs forestiers étudiés
- l'analyse de la variabilité temporelle de différents paramètres thermiques et de leurs évolutions récentes pour chaque wilaya de l'Est algérien durant la période 1982-2011.
- l'interpolation spatiale des données thermiques à partir des valeurs mesurées ponctuellement au niveau des stations météorologiques. Il s'agit donc d'obtenir un ensemble cartographique cohérent décrivant le climat thermique au niveau des forêts de l'Est algérien.

- l'analyse de la fluctuation et la tendance de l'indice NDVI des différents écosystèmes forestiers étudiés durant la décennie (2002-2011) à partir de données satellitaires.
- la cartographie de lien entre les différents paramètres thermiques et l'activité photosynthétique des principales essences forestière de l'Est algérien.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

1. Définition des concepts :

Dans le cadre de cette étude nous avons jugé utile de définir certains concepts importants : le climat, la variabilité climatique et le changement climatique.

1.1. Climat :

Selon le GIEC (2007), le climat est une description statistique en terme de moyenne et de variabilité des variables météorologiques, sur une longue période (souvent une trentaine d'années), alors que le temps renvoie aux conditions météorologiques d'une seule journée. Le climat représente l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné (Guyot, 1997).

Les paramètres cosmiques et les facteurs géographiques sont à l'origine de la diversité des climats. Les premiers se manifestent en fonction de l'angle d'éclairement de la terre par rapport aux rayons solaires, ce qui met en avant le rôle de la latitude et de l'épaisseur de la couche atmosphérique qui est traversée par les rayons. Ils sont responsables de l'organisation zonale des climats (Pagney, 1994). Les facteurs géographiques sont principalement : la répartition des masses terrestres et marines, la présence des courants marins, l'orientation des masses continentales et l'existence de reliefs.

1.2. Variabilité climatique et changement climatique :

La variabilité climatique désigne des variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts standards, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. Elle tient compte d'une situation climatique moyenne ainsi que des évènements plus soudains. Depuis 450000 ans, des variations de températures (de 4 à 6°C) ont été observées sur des périodes très longues (ONERC, 2007).

Selon Diaz et Pulwarty (1994), la variabilité climatique indique généralement des fluctuations à court et à moyen termes de l'état climatique moyen sur des échelles temporelles variant de moins d'un an à des décennies (30 ans).

Les scientifiques parlent de cycles de glaciation et de périodes interglaciaires (CEDEAO *et al.*, 2008). Au sein de ces grands cycles, à l'échelle temporelle d'une vie humaine, des fluctuations sont constatés : variation des températures selon les périodes de l'année (coefficient de variation inférieur à 10 % pour la sous-région), mais aussi, entre le jour et la nuit où les écarts sont plus importants (Diarra, 2010).

Le changement climatique, d'autre part, indique un déplacement fondamental de l'état moyen du climat (des tendances à long terme : décennies, siècles). Le GIEC définit les changements climatiques comme étant une évolution du climat dans le temps où la variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus) (IPCC, 2001d).

Dans le premier article de la Convention Cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC, 1992), la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat, alors que les changements climatiques désignent un changement du climat attribué directement ou indirectement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère globale et qui s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables.

Trenberth *et al.*, (2007) montrent que le changement climatique résulte essentiellement des variations de la concentration des gaz à effets de serre (GES) dans l'atmosphère, mais aussi des modifications des petites particules (aérosols) et des changements dans l'usage des sols (agriculture, forêt, urbanisation, irrigation, etc).

Pour certains auteurs (Niasse *et al.*, 2004), les deux termes (variabilités et changements climatiques) désignent la modification ou variation significative du climat, qu'elle soit naturelle ou anthropique. Burroughs (2007) signale que la variation des données de la série climatique autour de la moyenne est une mesure de la variabilité du climat. Alors que la tendance significative (positive ou négative) de cette même série climatique nous indique qu'il ya un changement climatique.

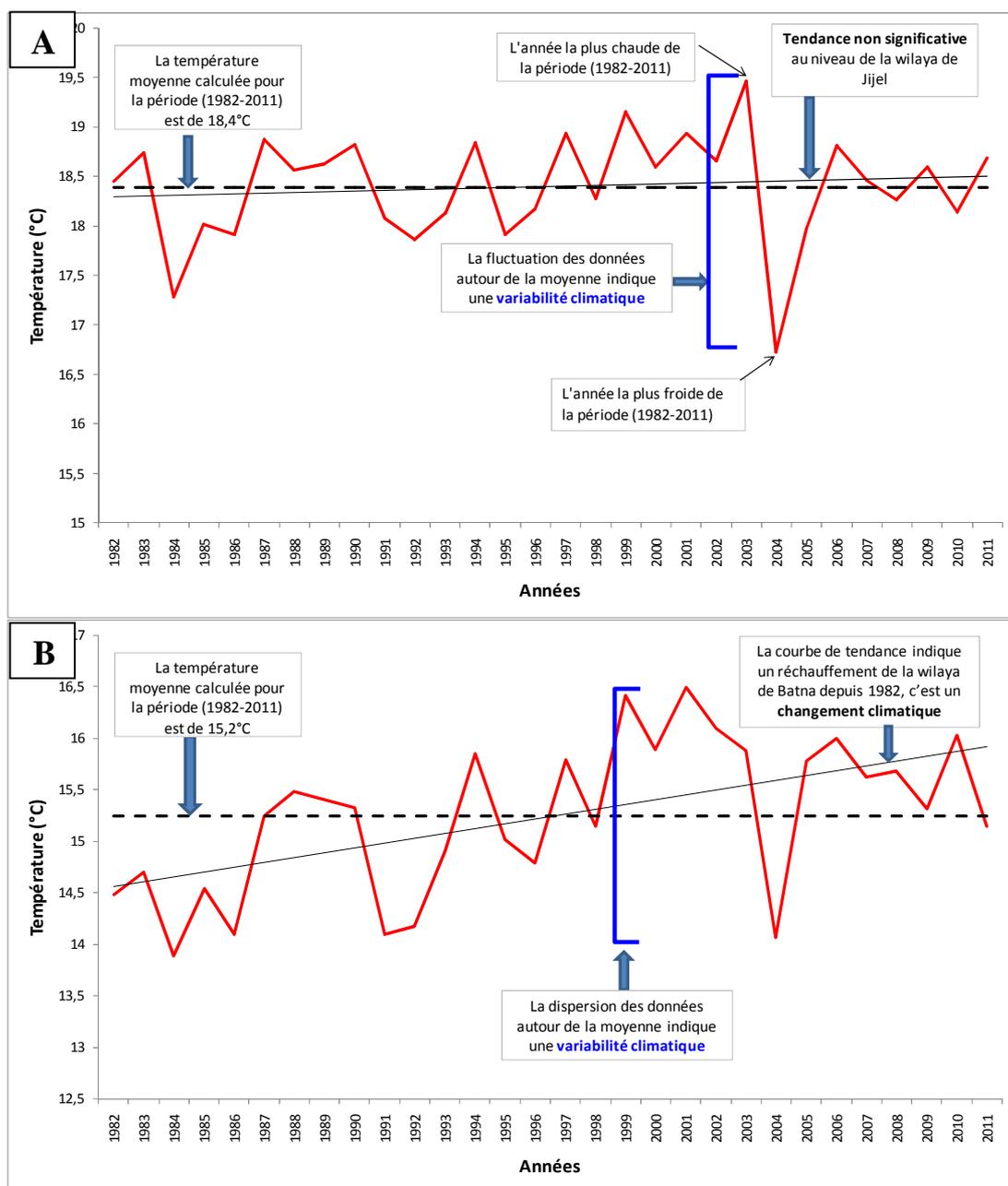


Fig.1: Différence entre variabilité climatique (A) et changement climatique (B) (Cas de deux stations en Algérie : Jijel et Batna)

La figure 1 donne un exemple pour les deux concepts. Pour la région de Jijel (fig.1.A), on remarque une variabilité du climat durant la période (1982-2011) qui se manifeste par une fluctuation des observations autour de la moyenne, sans aucune tendance significative enregistrée pour la température annuelle de cette région. Par contre, la wilaya de Batna (fig.1.B) connaît un changement climatique durant la période de 30ans illustré par un réchauffement de l'ordre de 1.4°C, ce déplacement fondamental de l'état moyen du climat est accompagnée d'une variabilité climatique caractérisée par une dispersion nette des données thermiques autour de la moyenne.

2. La température :

La température est l'un des paramètres climatiques utilisés pour caractériser les différents types de climats. Elle représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne, de ce fait, la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 2003).

L'alternance journalière ou mensuelle de la température (thermo-périodisme) agit sur la levée de la dormance des graines et la mise à fleur, ainsi que sur la vitesse de croissance des végétaux. Cependant, si les températures dépassent certains seuils de tolérance dépendants des espèces, elles peuvent provoquer des dommages importants sur les végétaux. Le gel provoque une action mécanique importante sur les cellules végétales, par la formation de cristaux de glace qui peuvent détruire les parois cellulaires et provoquer des nécroses au niveau des tissus. Il provoque également une perte d'eau, qui entraîne une dessiccation de certains organes. Ainsi, les hautes températures ont un effet lié à l'évaporation des réserves en eau contenues dans les sols et génèrent une transpiration excessive des feuilles (Garbolino, 2001).

3. Variation spatio-temporelle des températures :

Par variabilité thermique, on entend généralement les variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques de la température à toutes les échelles temporelles et spatiales. En général, la variabilité thermique se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle de la température, c'est à dire la fluctuation des variables thermiques à l'intérieur d'une période de 30 ans.

3.1. Variabilité spatiale :

Suivant l'échelle spatiale à laquelle on s'intéresse, différents facteurs interviennent pour expliquer les variations spatiales des données météorologiques. Selon Douguédroit et De Saintignon (1974), les principaux facteurs de variation de la température de l'air mesurée à 2m sont : la position topographique du poste météorologique, son altitude, l'inclinaison de la pente et son exposition adret-ubac.

- La latitude :

La latitude est un facteur de zonalité ; les températures sont d'autant plus fraîches que l'on va de l'équateur vers les pôles (fig.2). Dans les zones polaires, la température moyenne annuelle avoisine les -30°C dans l'Arctique et -50°C dans l'Antarctique (Godard et Tabeaud, 1993).

En général, les températures décroissent au fur et à mesure qu'augmente la latitude, mais la nébulosité y intervient largement. Les valeurs les plus élevées ne se localisent pas dans la zone équatoriale, mais dans les régions tropicales ou subtropicales sèches et à faible nébulosité (Godard et Tabeaud, 1993).

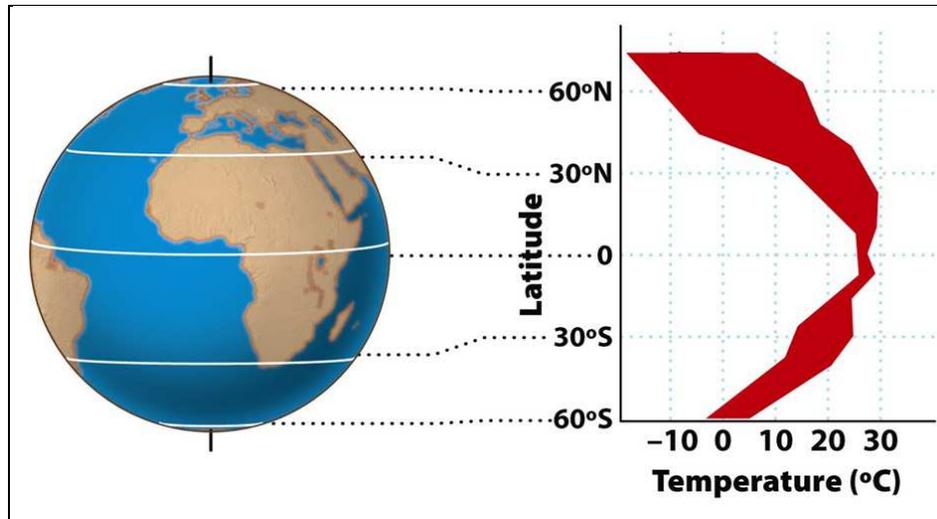


Fig.2 : Variabilité de la température avec la latitude (Ricklefs et Relyea, 2013)

- La situation continentale ou océanique :

C'est un important facteur de zonalité dans la répartition des températures. A latitude égale, l'air situé au-dessus d'un continent peut avoir une température forte différente de celle de l'air au dessus d'un océan, parfois de plus de 30°C (Godard et Tabeaud, 1993).

Les vagues, les courants et les mouvements de convection permettent aux océans d'emmagasiner par brassage, beaucoup de chaleur sur une épaisseur considérable. L'énergie solaire apportée à la terre ne peut se transmettre au contraire que sur une profondeur très faible par conduction. Les puissants mécanismes d'évaporation et de condensation qui agissent à la surface des océans impliquent un transfert d'énergie de la mer vers l'air.

Selon Cantat *et al.*, (2009), la température de l'air durant la journée au niveau du littoral est généralement plus basse que dans les terres en raison des phénomènes de brise de mer qui limite l'échauffement, et inversement plus douce durant la nuit car la masse d'eau tempère le refroidissement.

- La position de la station de mesure à l'Ouest ou à l'Est d'un continent ou d'un océan :

En général, aux moyennes et hautes latitudes en hiver, les parties orientales des océans sont relativement plus chaudes que les occidentales et c'est l'inverse pour les côtes continentales. Aux basses latitudes c'est le contraire: ce sont les parties occidentales des océans qui bénéficient de températures hivernales relativement plus clémentes (Godard et Tabeaud, 1993).

- L'altitude :

Il est connu que les formes topographiques jouent un rôle essentiel dans la structuration spatiale de la température (Geiger *et al.*, 2003). En fin de nuit et notamment en hiver, l'air froid glisse le long des versants et s'accumule dans les bas fonds (vent catabatique) tandis que les crêtes et les hauts de versants bénéficient de températures beaucoup moins froides. A l'inverse, en milieu de journée et surtout s'il fait chaud suite à un intense rayonnement solaire, l'air se réchauffe au contact du sol et tend à s'élever le long des versants bien exposés (vent anabatique).

Il est bien connu que la montée en altitude s'accompagne d'une baisse de la température de l'air en moyenne de 0.65°C par 100m d'élévation (fig.3), on parle donc du gradient thermique vertical (Hufty, 2001). C'est pourquoi la température constitue un facteur limitant pour le développement des essences forestières. Elle joue souvent un rôle négatif pour la production de bois, en réduisant la saison de végétation.

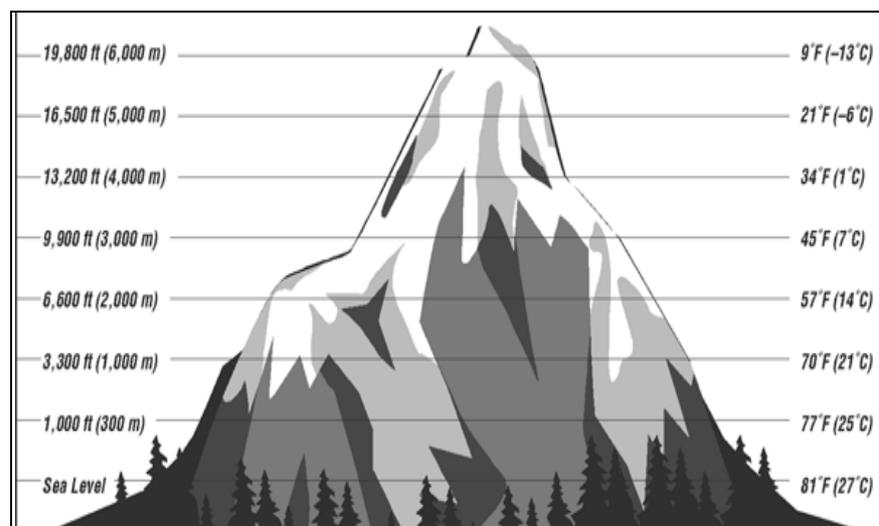


Fig.3 : Variation de la température avec l'altitude

- L'exposition et la pente du terrain:

L'opposition entre les versants Sud et Nord, le versant du soleil et le versant de l'ombre, l'adret et l'ubac, est tellement nette, qu'elle a été depuis longtemps remarquée et minutieusement décrite. En fonction de la pente et de l'exposition d'un terrain, la quantité d'énergie solaire disponible par unité de surface au niveau du sol peut varier beaucoup d'un point à un autre (fig.4 et 5) (Cantat *et al.*, 2009).

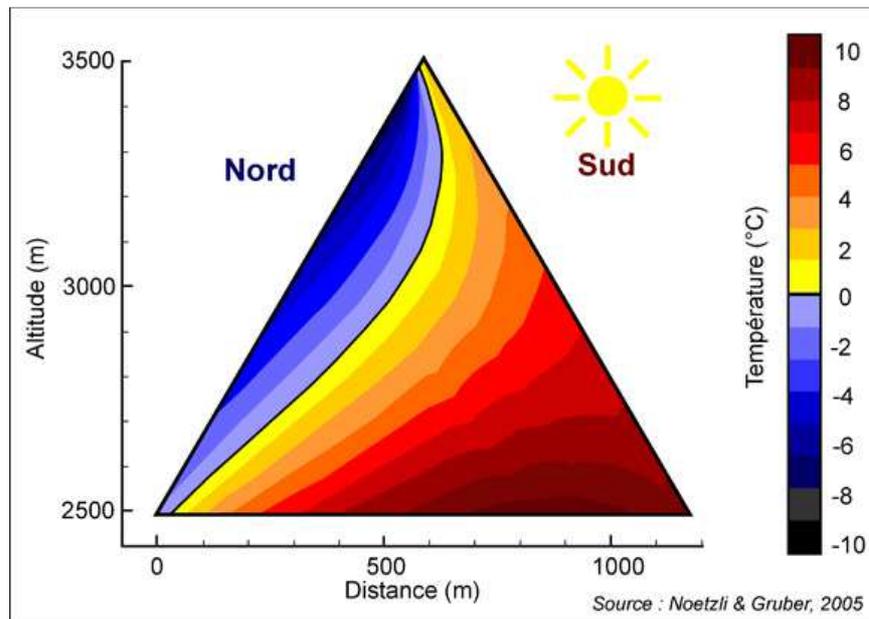


Fig.4 : Modélisation du champ thermique à l'intérieur d'une montagne en fonction des conditions de surface (dépendantes de l'altitude et de l'orientation) (Noetzi et Gruber, 2005)

D'après la figure 4 on peut remarquer que les contrastes thermiques entre les versants sont importants. Les versants d'adret, c'est-à-dire les pentes tournées vers le Sud, sont plus chauds que les versants d'ubac, tournées vers le Nord. Les premiers (adrets) sont des versants perpendiculaire aux rayons et qui reçoivent plus d'énergie solaire, ils sont donc plus chauds. Les seconds (ubacs) reçoivent le soleil très obliquement, ils sont frais et souvent à l'ombre et généralement abandonnés à la forêt.

Sous les moyennes latitudes, les vallées profondes et étroites ne reçoivent les rayons du soleil qu'en milieu de journée. Elles peuvent même rester totalement à l'ombre pendant plusieurs semaines. Selon Barry (1992), l'opposition adret-ubac est ainsi caractérisée par des écarts moyens annuels à altitude égale de l'ordre d'un degré en milieu forestier et pouvant dépasser 2°C en haute montagne.

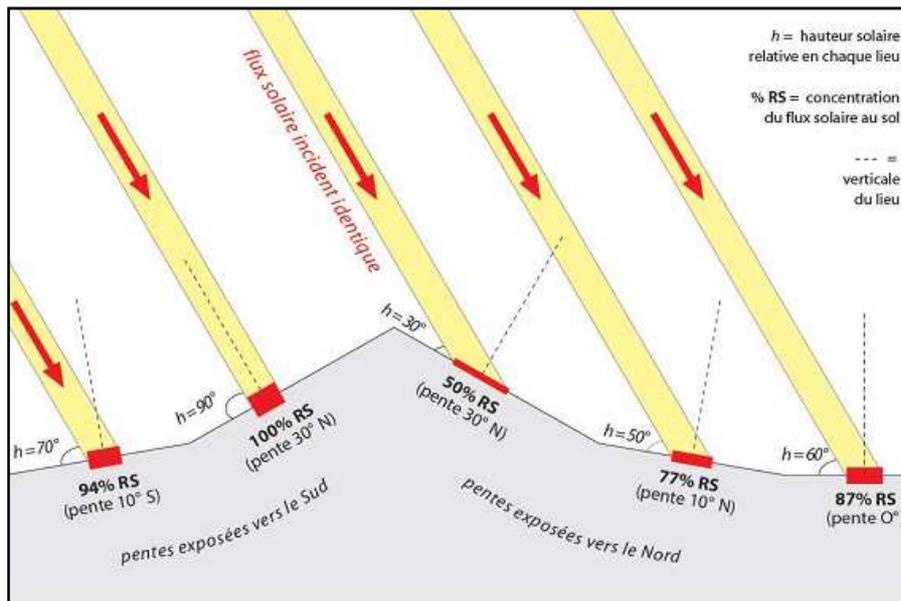


Fig.5 : Variation de l'énergie solaire, disponible au niveau du sol, en fonction de la pente et de l'orientation (exemple au solstice d'été, à midi, par 49° de latitude Nord) (Cantat *et al.*, 2009)

D'autre part, les pentes qui font face au soleil se réchauffent plus rapidement. À une altitude similaire au-dessus de la vallée et près de la pente, la température de l'air de la pente sera donc plus chaude que celle adjacente (fig.5). Par convection, l'air chaud sera donc en instabilité et subira une poussée d'Archimède vers le haut. Ainsi, lorsque l'air rencontre une montagne, il doit remonter la pente et suit les contours du terrain et diminue sa température selon la loi des gaz parfaits.

- La végétation :

La biosphère terrestre peut à son tour influencer le climat, principalement au travers de la couverture végétale. Ses effets se manifestent à partir de mécanismes biogéophysiques et biogéochimiques. La couverture de végétation peut altérer les propriétés physiques de la surface terrestre (processus biogéophysiques), comme l'albédo (la fraction de radiation solaire réfléchi par la surface), modifiant de ce fait le bilan radiatif et la température en surface.

En Algérie, Benslimane *et al.*, (2008) montrent que la partie tellienne qui renferme un couvert végétal dense est caractérisée par des valeurs faibles d'albédo, alors que la zone steppique qui présente des sols à recouvrement végétal faible est caractérisée par des valeurs élevées d'albédo. Selon Kaplan (2007), les forêts absorbent le rayonnement solaire, qui est partiellement converti en chaleur et réchauffe la surface de la terre. Mais par leur croissance, les

forêts transfèrent également de l'eau du sol vers l'atmosphère, ce qui consomme de la chaleur et peut alors rafraîchir la surface terrestre.

L'étude de Benslimane *et al.*, (2008) a permis de montrer que la température de surface est fortement corrélée à l'activité chlorophyllienne du milieu (fig.6). Les valeurs supérieures correspondent à des régions où les sols nus sont dominants (régions steppiques), tandis que les faibles valeurs caractérisent les régions à couverture végétale dense (régions telliennes).

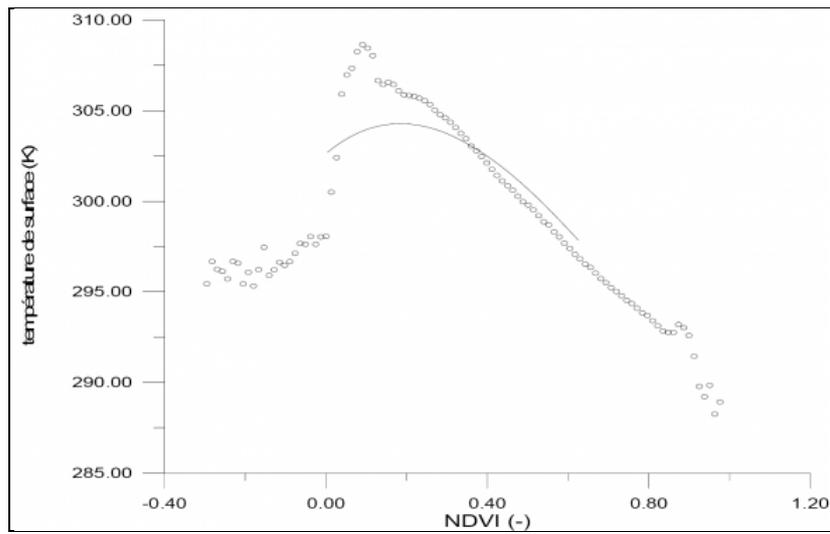


Fig.6 : Ajustement entre les valeurs NDVI et la température de surface (Benslimane *et al.*, 2008)

La même remarque a été constatée par Lambin et Ehrlich (1996) qui signalent que la température du sol est reliée à l'indice de végétation (NDVI) par une relation linéaire décroissante (fig.7). Plus la végétation a une densité importante, plus la température de surface est faible. La végétation régule la température de surface en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration.

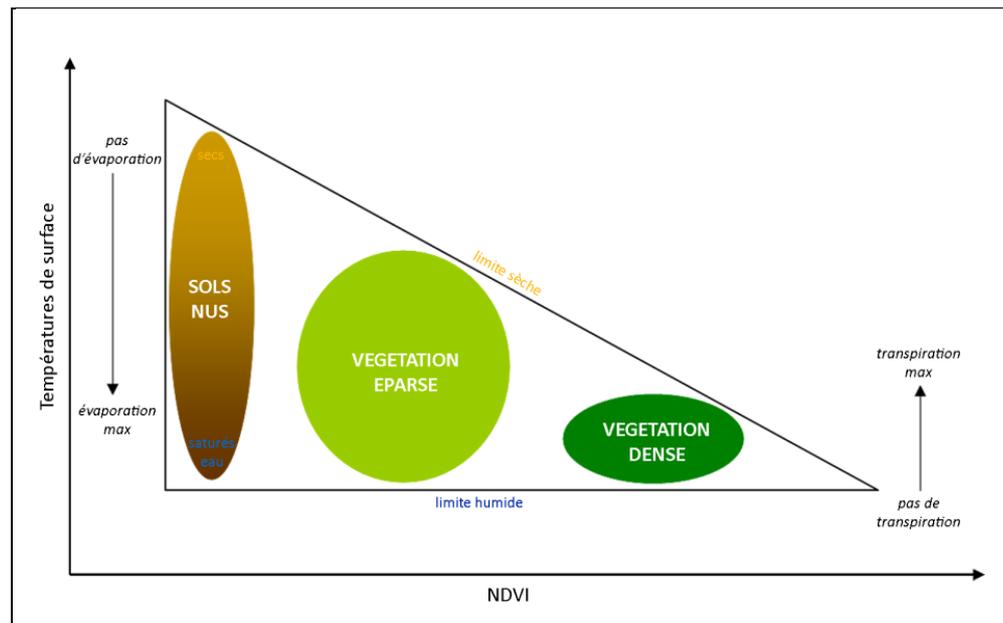


Fig.7 : Relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation (Lambin et Ehrlich, 1996)

Les forêts jouent un rôle de tampon pour les températures extrêmes. Elles accumulent d'une part de la chaleur pendant la journée avant de la réémettre la nuit, l'amplitude thermique est donc petite. Cette dernière est plus importante dans les régions dépourvues de la végétation. D'autre part, la transpiration des plantes humidifie et rafraîchit l'air de l'environnement. Les forêts font aussi de l'ombre et réduisent l'échauffement des surfaces imperméables pendant l'été.

3.2. Variabilité temporelle :

- Au cours de la journée :

L'amplitude thermique diurne est définie comme l'écart entre le jour et la nuit. Aux basses latitudes, la durée du jour n'est jamais très différente de celle de la nuit, c'est-à-dire que toute la chaleur emmagasinée durant la journée se perdra durant une longue nuit, de sorte que les bilans thermiques restent contrastés toute l'année. La situation est comparable à celle que l'on note aux moyennes latitudes au printemps, saison qui comporte les amplitudes diurnes les plus fortes (Godard et Tabeaud, 1993).

L'amplitude thermique diurne est d'autant plus forte que la position du lieu est continentale, la présence de masses océaniques diminue les écarts journaliers; l'eau jouant un rôle de régulateur thermique.

- Au cours des saisons :

L'amplitude thermique diurne varie en fonction des saisons, du fait des variations saisonnières des durées du jour et de la nuit. Aux moyennes et hautes latitudes, la courbe des températures moyennes présente, dans l'hémisphère Nord, une oscillation marquée avec un maximum en Juillet et un minimum en Janvier. Dans les zones intertropicales, les variations saisonnières des températures sont atténuées, surtout, dans la zone équatoriale. Cependant, elles dessinent un double maximum correspondant aux équinoxes (printemps et automne) (Godard et Tabeaud, 1993).

- Au cours d'une année :

On définit l'amplitude thermique annuelle comme l'écart entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid. Ce dernier est faible dans la zone équatoriale et elle croît avec la latitude et la continentalité.

De la combinaison de ces deux facteurs découle l'amplitude thermique annuelle la plus importante à la surface de la terre qui est enregistrée au Canada du Nord-Ouest et en Sibérie du Nord-Est, où l'on relève des écarts annuels moyens de l'ordre de 65° C (Godard et Tabeaud, 1993).

4. Effets de la température sur la physiologie des végétaux:

Les processus physiologiques tels que la photorespiration, la respiration nocturne, la conductivité stomatale, la photosynthèse augmentent généralement avec une hausse de la température (Tab.1) (Colombo 1998a, Kirschbaum, 2000).

Les épisodes de fortes températures estivales ont probablement une incidence limitée sur la physiologie des arbres, ne provoquant des effets irréversibles sur le fonctionnement foliaire qu'à partir de seuils supérieurs à 40-45°C, lesquels sont rarement observés. Par contre la combinaison de fortes chaleurs avec un épisode de sécheresse risquerait de provoquer de sérieux dommages: réduction voire arrêt de la transpiration foliaire et donc diminution du refroidissement par le processus d'évaporation de l'eau (ONF, 2007).

Tab.1 : Effet d'une augmentation de la concentration de CO₂ et de la température sur les différents processus physiologiques (Colombo 1998a modifié)

| Processus physiologiques | Augmentation de la concentration de CO ₂ | Augmentation de la température |
|--|---|--|
| Photosynthèse | hausse sujette à des rétroactions liées aux ressources disponibles | hausse sujette à des rétroactions liées aux ressources disponibles |
| Photorespiration | baisse (généralement) | hausse |
| Respiration nocturne | baisse légère | hausse |
| Conductivité stomatale | baisse | hausse jusqu'à des températures de 30-35 °C |
| Efficience d'utilisation de la lumière | hausse | aucun changement |
| Efficience d'utilisation de l'eau | hausse | baisse (pour une pression de vapeur constante) |
| Efficience d'utilisation nutritionnelle | hausse | aucun effet |
| Phénologie | raccourcissement de la saison de croissance dû à : un débournement plus tardif un embourgeoisement plus hâtif | débournement plus tôt au printemps endurcissement du bourgeon plus tardif |
| Allocation du carbone / structure de l'arbre | augmentation des taux de croissance réduction de la densité stomatale hausse de la croissance racinaire | hausse des taux de croissance débournement et fleuraison plus hâtifs |
| Susceptibilité au stress | hausse de la tolérance à la sécheresse due à la fermeture des stomates | hausse des dommages potentiels par le gel hivernal et printanier |

4.1. Sur la photosynthèse :

Les fortes températures accélèrent le dessèchement des feuilles et interviennent aussi spécifiquement sur la physiologie, notamment en inhibant la photosynthèse puis en dégradant les pigments, en particulier les chlorophylles. Elles peuvent endommager des composants de l'appareil photosynthétique des feuilles, réduisant ainsi les taux d'assimilation d'anhydride carbonique (Al-Khatib et Paulsen, 1999 in Oukarroum, 2007).

De même, il est apparu que l'enveloppe du chloroplaste était plus résistante à la température que les membranes formant les thylacoïdes: c'était donc bien les processus se déroulant à l'intérieur du chloroplaste qui étaient endommagés par les températures élevées. L'étude de Berry et Bjorkman (1980) montre que le photosystème II et le complexe producteur d'oxygène qui lui est associé, sont particulièrement sensibles à l'endommagement causé par les températures élevées.

Le rendement quantique de l'incorporation de CO₂ varie selon les espèces et selon la température. Chez les plantes de type C3, le rendement quantique de l'incorporation de CO₂ augmente lorsque la température diminue de 40 à 10°C, cependant les espèces en C4 ne présentent pas cette dépendance vis-à-vis de la température (Havaux et Lannoye, 1985). Ainsi, lors d'un éclaircissement intense, le froid peut causer des dégâts au niveau des membranes de thylakoides en provoquant une inhibition de la synthèse des chlorophylles et une dégradation des pigments photorécepteurs (Havaux et Lannoye, 1985).

Méthy et Trabaud (1990) ont étudié la capacité de résistance au froid du système photosynthétique de deux espèces sclérophylles de la région méditerranéenne (*Quercus ilex* et *Quercus coccifera*). Les résultats obtenus montrent que la vitesse de fluorescence, qui traduit l'activité du PSII, semble relativement peu affectée par plusieurs heures d'exposition à -5°C comme à -10°C. En revanche, à -15°C et surtout à -20°C, il y a une réduction très rapide de l'activité photosynthétique.

Ducrey (1981) a étudié aussi l'action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du douglas. Les résultats montrent que la photosynthèse chez le cèdre est peu influencée par la température jusqu'à -2°C, ensuite elle diminue très rapidement pour s'annuler vraisemblablement vers -8°C. Cependant chez le douglas, la photosynthèse n'est pas diminuée jusqu'à -6°C, ce qui permet de penser que la température de gel des tissus n'est pas encore atteinte.

4.2. Sur les biomembranes :

Le gel s'accompagne de la formation des cristaux de glace dans les tissus de la plante, il peut agir directement sur le végétal et produire des nécroses des bourgeons, éclatement des troncs et la mort des feuilles. Il peut avoir deux actions sur les membranes : il modifie l'arrangement de la trame lipidique qui les constitue et provoque la formation de cristaux de glace qui agissent comme petites aiguilles perforatrices.

Lorsque les plantes sensibles au froid sont exposées aux conditions thermiques de basses températures négatives, les lipides membranaires de ces plantes se transforment de l'état fluide vers l'état cristallin (fig.8). Ceci est accompagné par un épaissement de la biomembrane et une déformation (et inactivation) de la protéine membranaire intégrale (Schulze *et al.*, 2002).

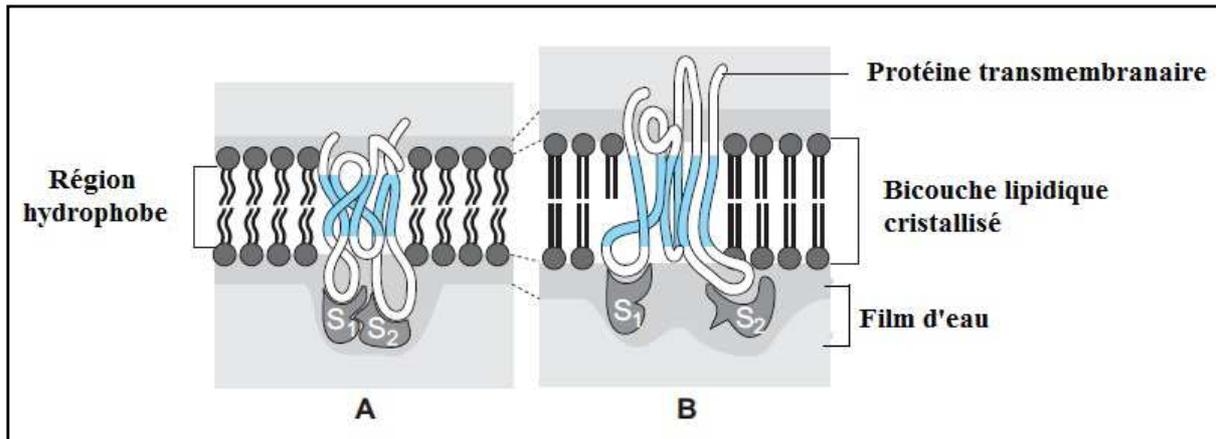


Fig.8 : Coupe transversale d'une biomembrane active dans un état fluide (A) et inactive dans un état rigide (B) (Wolf, 1978 modifiée)

Selon Côme (1992), les températures supérieures à 0°C mais inférieures à 10°C rigidifient les lipides membranaires de plantes tropicales, alors de multiples dérégulations physiologiques s'installent conduisant à des nécroses et la mort des tissus. Ainsi, à basse température les protéines intégrées s'agglomèrent dans les zones lipides fluides, donc le froid induit une redistribution de ces protéines. Le même auteur signale que la cause biologique de tous les phénomènes liés à la sensibilité au froid est sans doute le fonctionnement des membranes cellulaires (et des enzymes liés), en particulier en relation avec l'état physique de leurs lipides.

Amutha *et al.*, (2007) montrent que les hautes températures peuvent aussi endommager les parois et les membranes des organites cellulaires (la membrane nucléaire, la membrane de la réticulum endoplasmique, de la mitochondrie et du chloroplaste. Une lésion aux membranes due à un stress soudain de chaleur peut provenir soit de la dénaturation des protéines membranaires soit de la fonte des lipides membranaires qui conduit à la rupture des membranes et à la perte du contenu cellulaire (Ahrens et Ingram, 1988).

Pour une température fixée, la fluidité des membranes dépend en premier lieu du degré de saturation des acides gras qui entrent dans la formation des lipides. Lorsque les acides gras sont saturés, ils ont un point de fusion élevé et les membranes dont ils sont une partie sont rigides. Lorsqu'ils ne sont pas saturés, leur point de fusion est situé à température plus basse et les membranes dans lesquelles ils se trouvent sont plus fluides par comparaison (Cornic *et al.*, 1999).

4.3. Sur les mouvements de solutés :

Les mouvements de solutés qui se déroulent dans les tissus spécialisés (xylème pour la sève brute, phloème pour la sève élaborée) ou le long d'organes spécialisés dans le fonctionnement de transport (tige, pétiole) sont affectés par l'abaissement de la température. Donc les transports de métabolites d'un organe à l'autre sont plus difficiles par le froid, ce qui favorise l'accumulation de certains constituants (glucides solubles, acides aminés libres...) (Côme, 1992).

4.4. Sur la respiration :

L'action de la température sur la respiration est analogue à celle que l'on rencontre pour tous les phénomènes métaboliques, avec une montée sensiblement conforme à la lois d'Arrhenius, de 0 à 40°C ou 50°C puis une brusque redescente qui traduit la dénaturation des protéines (Heller *et al.*, 1989).

King *et al.*, (2006) montrent que l'augmentation de la respiration végétale en situation de hausse des températures est en fait une réponse transitoire au changement : une fois adaptées, les plantes ont une respiration équivalente à celle de la température précédente.

5. Impacts des variations thermiques sur les écosystèmes forestiers :

Les forêts, par leur longévité, sont inévitablement exposées à la fluctuation de différents paramètres climatiques et particulièrement à la variation des températures. L'impact du réchauffement climatique serait considérable sur les forêts, celles-ci ne s'adaptant en effet que très lentement à leurs nouvelles conditions environnementales.

Les températures extrêmes peuvent causer la mort prématurée des plantes, réduisent la croissance et limitent la productivité (Lobell et Asner, 2003). Selon Landmann *et al.*, (2011), les effets des canicules varient en fonction des essences forestières: les feuillus réagissent de façon spectaculaire mais les effets ne sont pas durables tandis que dans les forêts de résineux, les effets sont moins visibles, moins fréquents mais souvent irréversibles.

Ainsi, les gelées printanières tardives impactent durement les arbres, surtout pendant la période de débourrement et avec l'avancement de la phénologie des arbres, leur impact est susceptible de s'accroître à l'avenir (Roussel, 2012).

5.1. Sur la croissance :

La température a un effet direct sur plusieurs processus biologiques tels que le métabolisme et la croissance des espèces (Leblanc et Terrell 2009; Huang *et al.*, 2010). Plusieurs études montrent une corrélation significative entre la température et plusieurs indices de croissance chez les conifères, notamment la croissance annuelle et la productivité des forêts (Bonan et Shugart 1989; Brooks *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2002; Wilmking *et al.*, 2004; Kurtz *et al.*, 2008). Selon Heller *et al.*, (1989), l'effet de la température sur la croissance et la résultante de son action sur la photosynthèse et les réactions métaboliques mais aussi sur l'alimentation hydrique et minérale.

Plusieurs études récentes démontrent que l'augmentation de la température durant la saison printanière provoquant un début de saison de croissance plus hâtif et un allongement mesurable de la saison de croissance (Christidis *et al.*, 2007 ; Keyser, 2000 ; Walther *et al.*, 2002). Cette augmentation des températures printanières et de la saison de croissance influence la compétitivité et la capacité d'adaptation des arbres et pourrait donc avoir des conséquences sur la distribution des espèces, la composition et l'organisation des communautés ainsi que sur la migration des espèces (Iverson et Prasad 2001; Kimball *et al.*, 2004, Walther *et al.*, 2002).

La productivité des écosystèmes peut aussi être affectée indirectement par une augmentation de la température. Par exemple, le taux de décomposition de la matière organique augmente avec une hausse de la température, rendant les nutriments plus rapidement disponibles pour les plantes (Kirschbaum, 2000).

5.2. Sur la phénologie des espèces :

La phénologie étudie les relations entre les phénomènes climatiques et les caractères morphologiques externes du développement annuel des végétaux (Galoux *et al.*, 1967). Elle traite la chronologie saisonnière des phénomènes périodiques de croissance et de développement des plantes. Elle consiste à observer ce qu'on appelle les phases phénologiques, ou phénophases, telles que la frondaison, la floraison, la maturation des fruits et la chute des feuilles. Ces événements se produisent chaque année à la même époque, mais leur date exacte varie d'année en année.

La température a un impact sur la phénologie végétale et peut changer le moment du bourgeonnement et la date de la floraison de même que la durée de cette dernière (Menzel *et al.*,

2003; Parmesan 2006). D'un réchauffement des températures en hiver résulterait donc un débourrement hâtif au printemps (Colombo 1998b; Beaubien et Freeland, 2000) et un prolongement de la saison de croissance (Chuine *et al.*, 2000). Concernant la chute des feuilles, l'expérience de Westergaard et Eriksen (1997) sur de jeunes érables montre que la sénescence est d'autant plus rapide que la température du milieu est basse. Les plants soumis à une température de 10°C sont à un stade final de sénescence, tandis que ceux soumis à 18°C ne montrent pas de signe de sénescence.

Plusieurs études ont permis de mettre en évidence des variations de phénologie des principales essences forestières. A l'échelle européenne, des travaux ont montré une évolution très significative des dates de début et de fin de végétation au cours des dernières décennies (Menzel et Fabian, 1999 ; Menzel *et al.*, 2006 cités dans Landmann *et al.*, 2011 ; Lebourgeois *et al.*, (2011)). L'allongement significatif de la durée de végétation (en moyenne 2,9 jours par décennie depuis 1950 chez les espèces de la zone tempérée) s'est réalisé de façon plus marquée au printemps, plus précoce, qu'à l'automne, plus tardif. Selon, Landmann *et al.*, (2011), ces décalages phénologiques devraient avoir des impacts importants sur les relations interspécifiques, trophiques ou autres, les communautés seraient ainsi profondément impactées.

Lebourgeois *et al.*, (2011) ont étudié la variabilité spatiale et temporelle de la phénologie de peuplements forestiers en utilisant les dates de débournement et de jaunissement observées sur la période 1997-2006. Les résultats obtenus montrent que la date de mise en place des feuilles pour les chênaies est d'abord contrôlée par les conditions thermiques. Le débournement commence en moyenne vers la mi-avril et le jaunissement apparaît vers la mi-octobre. Une température plus élevée de 1 °C en mars se traduit par une avancée de la date de débournement d'environ un jour (fig.9).

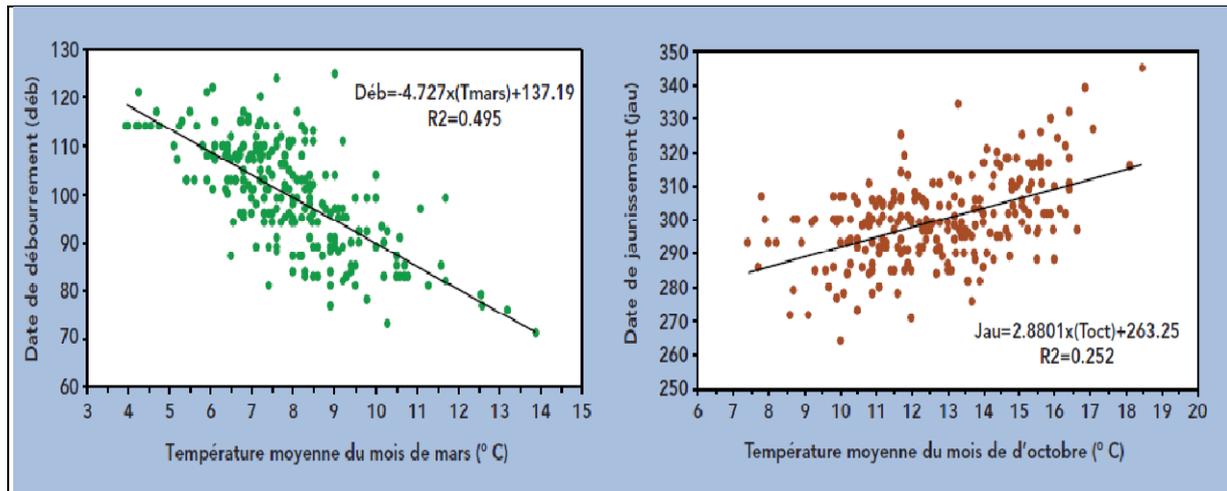


Fig. 9 : Relation entre les dates de débournement et la température moyenne de mars (à gauche) et entre les dates de jaunissement et la température moyenne d'octobre (à droite) pour les chênaies de la France (période 1997-2006). Les dates sont exprimées en jour julien (Lebourgeois *et al.*, 2011).

Pour le jaunissement, la température et la quantité de rayonnement solaire en début d'automne (Octobre et Novembre) sont les paramètres les plus importants pour expliquer la fin de la saison de végétation. Ainsi, toujours pour les chênaies, une température moyenne plus élevée de 1 °C en Octobre se traduit par un jaunissement plus tardif d'environ 3 jours (fig.9).

Roman-Amat (2007) prévoit que le réchauffement attendu pour les 50 à 100 prochaines années devrait causer un allongement remarquable de la saison de végétation, conduisant à un débournement plus précoce des arbres et à une chute plus tardive de leurs feuilles. Selon Bréda *et al.*, (2000), ce phénomène climatique pourrait rendre certaines essences plus sensibles aux gelées tardives (se produisant après le débournement au printemps) ou « précoces » à l'automne ou encore au déficit en eau au début des saison de croissance. On attend aussi une floraison plus précoce, également exposée aux gelées tardives, ainsi qu'une maturité des graines avancée en fin de saison (Roman-Amat, 2007).

L'augmentation de la température cause un allongement mesurable de la période de végétation des arbres et par conséquent favorise l'apparition des maladies forestières. Badeau *et al.*, (2004), signalent que le réchauffement climatique facilite l'extension des aires potentielles de la plupart des espèces pathogènes et en particulier celles dont la survie hivernale est limitée par les températures basses comme l'encre du chêne et la rouille du peuplier. Ces agents représentent des facteurs limitants de la productivité forestière et peuvent modifier la composition des communautés végétales. L'ONF (2007) signale que l'extension de la chenille processionnaire du

pin est fortement corrélée à l'augmentation des températures, qui entraîne une augmentation des jours favorables à son alimentation entre Octobre et Mars.

5.3. Sur les aires de répartition des espèces :

En plus de son action sur les processus biologiques, sur la croissance et la phénologie des espèces, la température peut influencer aussi la distribution biogéographique des arbres sur la planète (Woodward *et al.*, 2004 ; Parmesan, 2006 ; Shafer *et al.*, 2001).

L'étude de Briffa *et al.*, (2008) montre que la croissance des arbres est corrélée de façon significative avec la température moyenne de la saison de croissance, ce qui suggère que ce facteur climatique conditionne la limite nordique des arbres de la forêt boréale.

Dans le contexte des changements climatiques qui nous attendent probablement au 21^{ème} siècle, une part considérable des arbres existants devrait se retrouver sous des conditions climatiques inadaptées. Ce sera particulièrement le cas dans les forêts boréales de l'hémisphère Nord où les arbres se fragiliseront progressivement, ce qui les rendra plus vulnérables aux insectes nuisibles, au dépérissement et aux feux de forêt (Houghton, 2011).

Davis (1989) montre que pour chaque augmentation de la température d'un degré Celsius, les aires de répartition des arbres dans l'hémisphère Nord présentent la capacité de s'étendre de 100 km vers le Nord tandis que les limites méridionales reculent. Ainsi, l'ONF (2007), signale qu'une augmentation des températures de 0,6°C provoque au moins 100 km de migration des aires de répartition vers le Nord et 100 m de migration en altitude. Les essences forestières ne s'adaptant en effet que très lentement à leurs nouvelles conditions thermiques.

Selon Miller *et al.*, (1987), le pin à l'encens ou plus communément pin taeda (*Pinus taeda*), importante essence forestière dans le Sud-Est des Etats-Unis, se déplacerait de 350 km environ vers le Nord dans le cas d'un réchauffement de la planète de 3°C. La plupart des écosystèmes ne peuvent pas répondre ni migrer aussi rapidement. Des archives fossiles indiquent que la vitesse maximale avec laquelle la plupart des espèces de plantes ont pu migrer dans le passé est inférieures à 1 km par an (Houghton, 2011).

L'étude de Grabherr *et al.*, (1994) montre que les Alpes autrichiennes centrales se réchauffent de 0,7°C depuis l'année 1902. Avec ce changement climatique, certaines espèces de plantes alpines se déplacent vers les sommets montagneux de moins d'un mètre à près de quatre

mètres par an. Donc, les espèces tendent à déplacer leurs aires vers des latitudes et des altitudes plus élevées. Silva (2010) in Landmann *et al.*, (2011) signale que ce déplacement se manifeste surtout par un recul ou une disparition de quelques espèces au Sud de leur aire de répartition.

L'étude biogéographique récente de Urli (2013), réalisée dans les zones montagneuses de l'Espagne (les Pyrénées espagnoles et le Système Ibérique) montre une vitesse réelle de migration altitudinale des d'arbres appartenant à la famille des Fagacées de -3 à 18.1 m/an. Cette vitesse reste faible au regard des déplacements du bioclimat des espèces d'arbres (plusieurs centaines voire milliers de mètres par an) (Davis et Shaw, 2001 ; Loarie *et al.*, 2009).

Selon Urli (2013), les changements d'aire de répartition des espèces dépendent de multiples facteurs concernant des caractéristiques intrinsèques de l'espèce comme sa capacité de dispersion par exemple, ou du climat régional, du changement d'usage des terres, de la pollution atmosphérique, des interactions biotiques, de la topographie du milieu, etc....

Les espèces incapables de disperser leurs semences sur d'assez longue distance pourraient disparaître, du moins localement (Kirschbaum, 2000), alors que les espèces à croissance rapide, avec des semences légères capables de voyager sur de grandes distances et adaptées aux perturbations comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) et l'érable rouge (*Acer rubrum*) pourraient avoir une meilleure résilience aux changements climatiques et conséquemment être favorisées (Thompson *et al.*, 1998).

En 2004, Badeau *et al.*, ont effectué une projection de l'implantation en 2050 et en 2100 de près de 67 espèces forestières dans la France (fig.10). Ils ont caractérisé les aires actuelles de répartition de différentes essences ligneuses, puis calculé par régression leurs aires climatiques potentielles, en recherchant pour chacune des espèces retenues le modèle statistique qui explique au mieux sa présence ou son absence, à partir des différentes variables climatiques disponibles. Les auteurs ont ensuite remplacé les variables climatiques actuelles par leurs valeurs moyennes futures, en se référant au scénario moyen du GIEC (scénario T° + 2,5°C).

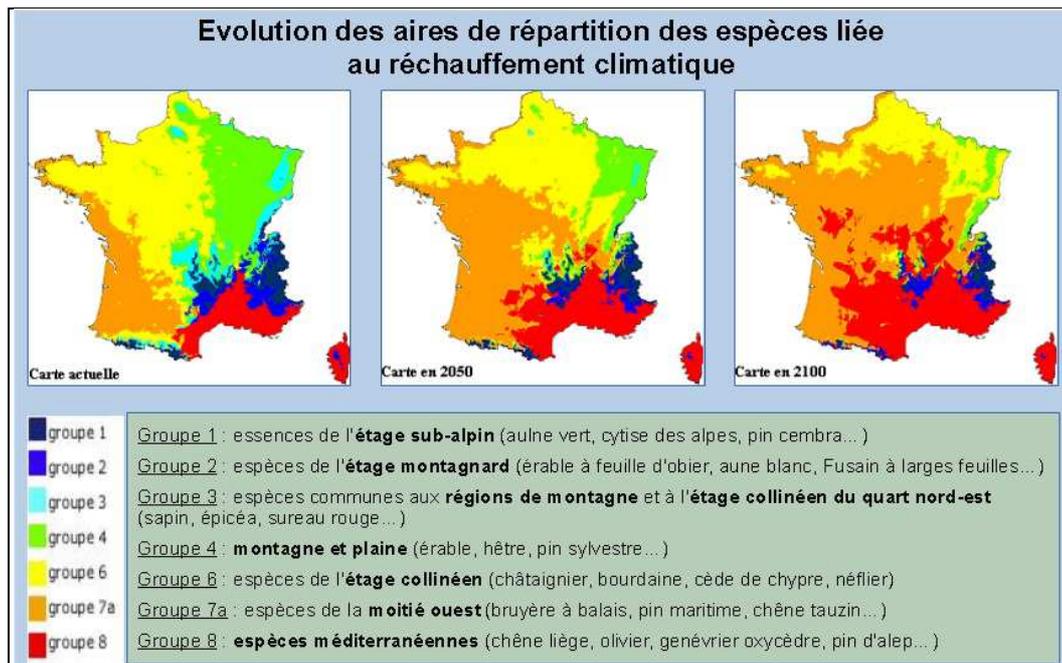


Fig.10 : Impact du réchauffement climatique sur la répartition des essences forestières dans la France (Badeau *et al.*, 2004)

Les résultats de ces projections montrent, par exemple pour le chêne vert et du hêtre commun, des modifications de répartition spectaculaires (fig.11). Ils constatent une nette extension de l'aire du chêne vert dans toute la moitié Sud de la France. Cette essence forestière a besoin d'une assez grande chaleur estivale, doublée d'un ensoleillement généreux, alors qu'il ne supporte ni les fortes amplitudes thermiques annuelles ni des jours de gel trop fréquents (températures inférieures à -10°C).

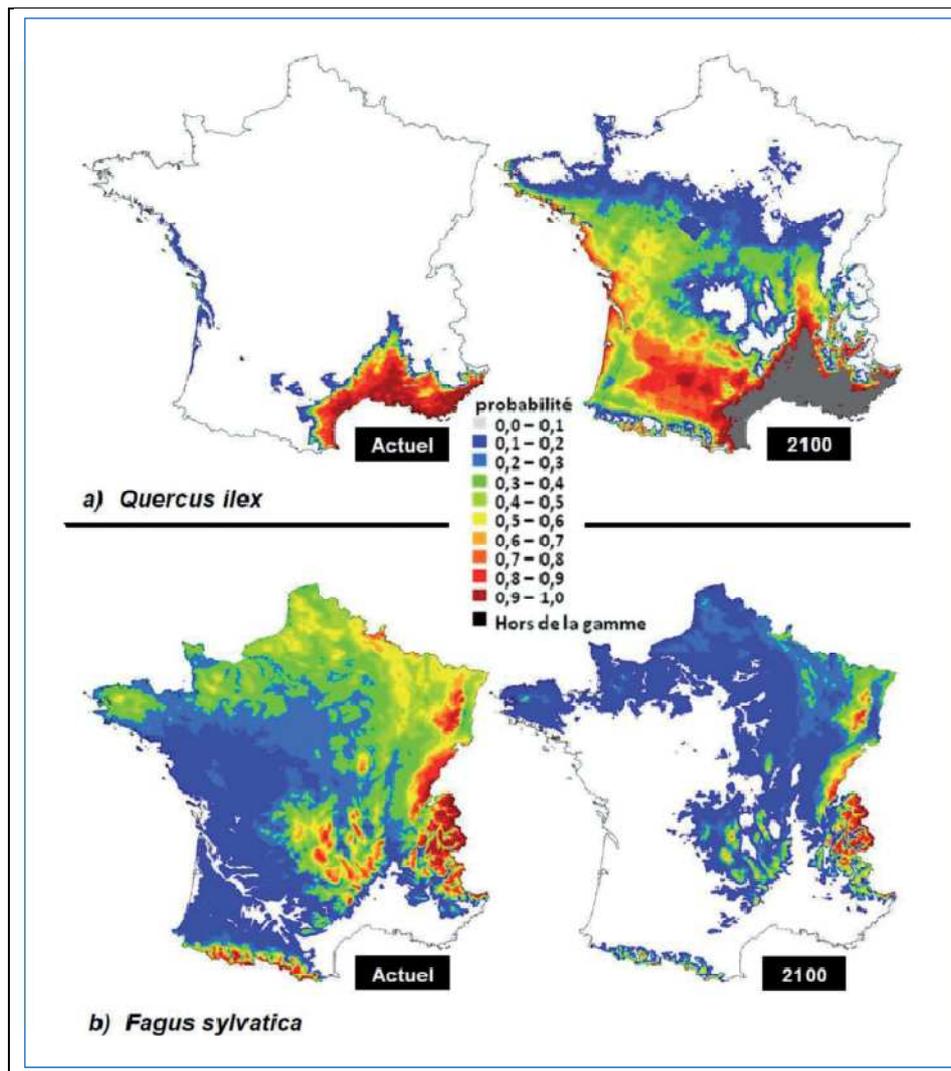


Fig.11 : Impact du réchauffement climatique sur la répartition du chêne vert (*Quercus ilex*) et de l'hêtre commun (*Fagus sylvatica*) actuelle et à la fin du 21^{ème} siècle. Les probabilités d'occurrence sont exprimées dans une échelle de 0 (présence totalement exclue) à 1 (présence certaine) (Badeau *et al.*, 2004)

Une évolution très voisine caractériserait les d'espèces méditerranéennes comme l'olivier (*Olea europa*) et le cyprès de Provence (*Cupressus sempervirens*), le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le pin parasol (*Pinus pinea*). À l'inverse, les auteurs prévoient aussi que l'aire de répartition potentielle du hêtre commun pourrait fortement régresser en 2100 et disparaître de tout ou partie du quart Sud-Ouest du pays à cause de la conjonction de températures estivales en hausse et de précipitations en baisse (fig.11).

6. Présentation générale de la forêt algérienne :

La forêt algérienne de type méditerranéen est localisée entièrement sur la partie septentrionale du pays et limitée au Sud par les monts de l'Atlas saharien (fig.12). Elle est inégalement répartie suivant les différentes régions écologiques (Ouelmouhoub, 2005), la distribution des méso-climats, de l'orographie et de l'action anthropique (Benderradji *et al.*, 2006), ce qui leur confère des taux de boisements très variables. En effet, ces taux décroissent d'Est en Ouest et du Nord au Sud plus particulièrement (Ouelmouhoub, 2005).

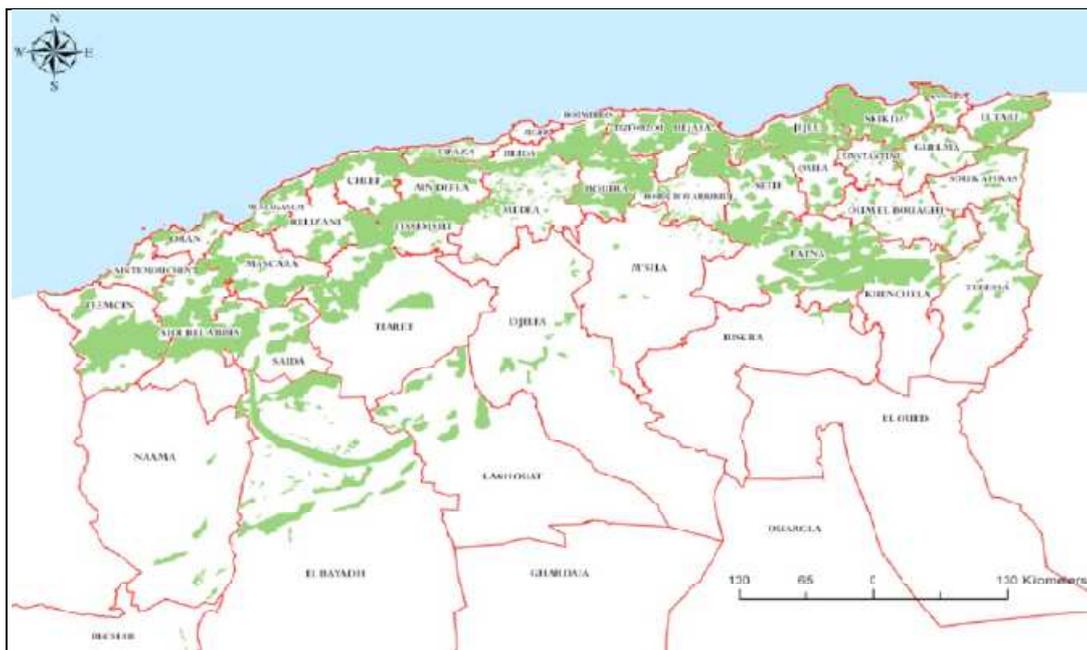


Fig.12 : Répartition des forêts en Algérie (BNEDER, 2009)

En termes de statut juridique, la forêt algérienne est essentiellement domaniale avec 82% de la superficie forestière totale (fig.13). Dans ce contexte, la politique forestière de l'État est donc d'autant plus importante qu'elle concerne la quasi-totalité de la forêt du pays.

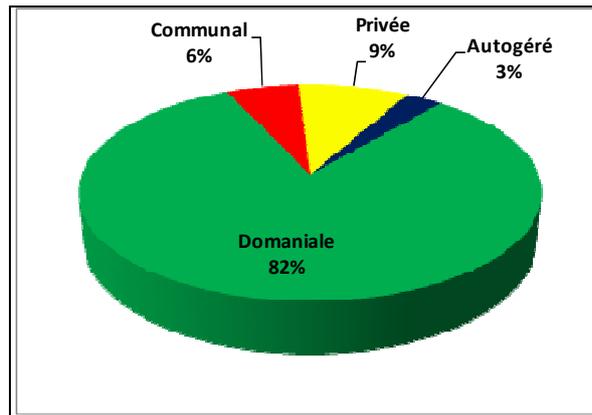


Fig.13 : Répartition de la forêt algérienne selon le statut juridique (Bensouiah, 2004 modifiée)

6.1. Caractéristiques générales de la forêt algérienne :

Les grands traits caractérisant la forêt algérienne peuvent se résumer comme suit:

- Une forêt essentiellement héliophile, irrégulière, avec des peuplements feuillus ou résineux le plus souvent ouverts formés d'arbres de toutes tailles et de tous âges en mélange parfois désordonné ;
- Présence d'un épais sous-bois composé d'un grand nombre d'espèces secondaires limitant la visibilité et l'accessibilité et favorisant la propagation des feux ;
- Faiblesse du rendement moyen en volume ligneux ;
- Un surpâturage important (surtout dans les suberaies) empiétement sur les surfaces forestières par les populations riveraines (FAO, 1999).
- Une dégradation avancée résultant des effets conjugués des incendies, du défrichement et des pacages ainsi que d'attaques parasitaires (Bensouiah, 2004).

6.2. Potentialités de la forêt algérienne:

Selon Louni (1994), la sylve algérienne est formée essentiellement de trois types de formations végétales: la forêt, le maquis et les broussailles. Elle couvre une superficie de 4,7 millions d'hectares, soit un taux de boisement de 16,4% pour le Nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes sont également prises en considération. Bensouiah en 2004 avance un chiffre de 4149400 ha, dont deux millions sont constitués de forêts dégradées (maquis et garrigues).

Concentrée surtout dans l'Algérie du Nord, la forêt est très inégalement répartie sur l'ensemble de cette partie du territoire. Sa répartition est :

➤ **1491000 ha de forêts proprement dites** qui englobe deux groupes:

- Forêts d'intérêt économique constituées par les résineux (pin d'Alep, pin maritime et cèdre) et les feuillus (chêne liège, chêne zéen et afarès, eucalyptus), occupant une superficie de 1249000 ha.

- Forêts de protection composées de chêne vert, thuya et genévriers, couvrant une superficie de 219000 ha.

➤ **1876000 ha** se répartissent entre les maquis et broussailles;

➤ **1324000 ha** constituent les reboisements réalisés depuis l'indépendance en 1962 (DGF, 2010).

Sur la base des différents travaux (Boudy, 1955 ; Seigue, 1985 ; Ghazi et Lahouati, 1997 ; RNE, 2000; DGF, 2005), les superficies des principales essences forestières sont récapitulées dans le tableau 2.

Tab.2 : Superficies des principales essences forestières en Algérie (en ha)

| Espèces forestières | 1955 (Boudy) | 1985 (Seigue) | 1997 (Ghazi et Lahouati) | 2000 (RNE) | 2005 (DGF) |
|----------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pin d'Alep | 852000 | 855000 | 800000 | 881000 | 881000 |
| Chêne liège | 426000 | 440000 | 463000 | 229000 | 230000 |
| Chêne vert | 679000 | 680000 | 354000 | 219000 | 108000 |
| Chêne zéen et Afares | - | 67000 | 65000 | 48000 | 48000 |
| Genévriers | 279000 | - | 217000 | - | - |
| Thuya de Barbarie | 157000 | 160000 | 143000 | - | - |
| Cèdre de l'Atlas | 45000 | 30000 | 12000 | 16000 | 16000 |
| Pin maritime | - | 12000 | 38000 | 32000 | 31000 |
| Sapin de Numidie | - | 300 | - | - | - |
| Maquis | 780000 | - | - | - | 1902000 |

6.3. Principaux facteurs de dégradation de la forêt Algérienne :

La forêt algérienne subit une importante dégradation qui se traduit surtout par une évolution régressive continue et par une perte substantielle de sa richesse. Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE, 2002), plus de 1030000 hectares des superficies forestières ont été détruites entre 1955 et 1997, soit une perte annuelle de 24523ha/an. Benderradji *et al.*, 2006 ont cités plusieurs facteurs qui contribuent à cette déforestation (les incendies, le surpâturage, la pression forte des populations limitrophes des

forêts, les défrichements, les coupes illicites, les attaques d'insectes et les insuffisances institutionnelles). La forêt est donc remplacée sous l'action combinée ou non de ces facteurs par des broussailles et des reboisements qui présentent des signes de dégradation plus ou moins récents (MATE, 2002).

- L'incendie :

Le facteur de dégradation le plus redoutable de la forêt algérienne méditerranéenne est, sans conteste, l'incendie qui bénéficie de conditions physiques et naturelles favorables à son éclosion et sa propagation (Madoui, 2002).

Les statistiques de la Direction Générale des Forêts (tab.3) montrent qu'entre 1996 et 2005, une superficie de 246977,94 ha de forêts, broussailles, alfa et autres ont été incendiés. En effet, dans l'été 2005, et suite à la canicule (plus de 50°C) qu'a connu le pays, près de 28500 ha du patrimoine forestier a été détruit pour la seule période du 1^{er} Juin au 16 Juillet 2005.

Tab.3 : Bilan des incendies de forêts en Algérie (1996-2005) (DGF, 2005)

| Année | Nbr de forêts | Forêts | Broussailles | Alfa | Autres | Total |
|---------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| 1996 | 737 | 4430.34 | 1632.33 | 855.58 | - | 7301.75 |
| 1997 | 1809 | 13066.35 | 2940.93 | 1802.43 | - | 17.830.75 |
| 1998 | 1826 | 15593.11 | 8883.00 | 4092.47 | - | 28.629.68 |
| 1999 | 2018 | 23254.26 | 6128.98 | 8019.76 | 1023.44 | 38.462.12 |
| 2000 | 1910 | 35617.52 | 12742.01 | 5799.10 | 1603.46 | 55.781.60 |
| 2001 | 1327 | 9066.40 | 4167.11 | 1064.37 | 44.31 | 14.377.69 |
| 2002 | 1008 | 6959.95 | 3.596.63 | 1424.01 | 142.38 | 12.217.47 |
| 2003 | 1233 | 5448.79 | 3.753.73 | 2505.26 | 275.19 | 11.997.97 |
| 2004 | 1463 | 7010.58 | 17172.19 | 6588.72 | 1080.15 | 31.998.89 |
| 2005 | 2013 | 14283.03 | 8.543.16 | 4426.37 | 790.50 | 28.380.06 |
| Totaux | 15344 | 134730.33 | 69560.35 | 36578.07 | 4969.43 | 246977.94 |

- Le surpâturage :

Le pâturage est une activité normale en forêt, parfois souhaitée, car le bétail participe au contrôle de la prolifération des strates arbustives et herbacées, hautement inflammables. Cependant, le surpâturage, causant un broutage excessif de la végétation et des jeunes plants forestiers empêche toute régénération, épuise les ressources disponibles, dégrade les parcours et les soumet à l'érosion. Dans les zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, le surpâturage est

généralement considéré comme une cause essentielle de la dégradation des écosystèmes naturels (Le Houerou, 1968). En 1997, Ghazi et Lahouati, signalent que sur 1200000 têtes de bovins, 80% se retrouvent dans les zones forestières montagneuses.

Selon Benderradji *et al.*, (2006), la forêt est une terre de transhumance pour les troupeaux steppiques. Ces auteurs dénombrent en forêt 960000 bovins, 600000 caprins et 4,2 millions d'ovins. La charge pastorale est au moins quatre fois supérieure aux capacités d'équilibre.

- Les défrichements :

Si les défrichements ont existé depuis l'époque romaine, ils se sont accélérés durant la colonisation et continuent de se pratiquer de nos jours. De 1893 à 1941, le domaine forestier a perdu 116000ha de forêts au profit de l'extension des cultures coloniales (RNE, 2000). L'extension de l'agriculture coloniale sur les plaines et les bas versants a entraîné le refoulement de la paysannerie pauvre sur les piémonts aux abords des forêts. Actuellement, les populations montagnardes, privées de surface agricole, continuent à procéder au labour dans les différents niveaux de la forêt: lisières, clairières, sommets de montagnes (Bensouiah, 2004). Cette population exerce une pression continue sur les formations forestières par le défrichement et le surpâturage, ce qui perturbe la conservation des forêts et leur développement.

Nous assistons à une dégradation des structures forestières, et le rythme actuel de 2 à 4% de disparition par an des surfaces forestières selon les pays devrait se poursuivre. C'est-à-dire que d'ici 50 ans, sans changement total des politiques socioéconomiques et forestières, il ne devrait théoriquement subsister que moins de la moitié des superficies actuelles couvertes par les forêts (Quezel et Barbero, 1990).

- Les coupes de bois :

Suite à la hausse du prix du bois, les coupes illicites de bois de chauffage, de bois d'œuvre pour la construction et de bois d'ébénisterie (cèdre, chêne, orme, frêne, etc.) sont en augmentation. Ces coupes touchent les arbres ayant les meilleures caractéristiques phénotypiques et génétiques et éliminent les meilleurs porteurs de graines (Benderradji *et al.*, 2006).

- Le réchauffement climatique :

En tant que facteurs clés régulant de nombreux processus biogéochimiques terrestres comme la respiration des sols, la décomposition de la litière, la minéralisation et la nitrification

de l'azote, la dénitrification, l'émission de méthane, la dynamique des racelles, la productivité végétale et l'absorption des nutriments, les changements de température peuvent fortement altérer les dynamiques des forêts et des écosystèmes (Norby *et al.*, 2007).

Selon Abdelguerfi (2003), l'évolution des températures en Algérie met en évidence une hausse nette des températures minimale et maximale sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis la décennie 70. La projection climatique sur ce pays à l'horizon 2020 montre une tendance au réchauffement annuel de l'ensemble des régions avec une hausse de la température moyenne de 0.8°C à 1,1°C. Ce réchauffement est accompagné d'une fluctuation de la pluviométrie avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 10 % sur le court terme. Ces évolutions ont des effets notables sur les forêts du monde entier comme sur le secteur forestier avec des périodes de croissances plus longues et des déplacements des aires de répartition des espèces d'insectes et une évolution des fréquences des feux de forêt (FAO, 2009).

Selon Rached-kanouni (2013), les changements climatiques au niveau de la région méditerranéenne sont à l'origine aussi des variations physiologiques des écosystèmes forestiers qui bouleversent leur fonctionnement écophysologique, leur croissance et leur productivité. Cette situation alarmante traduisant par une dégradation continue de la superficie des écosystèmes forestiers et un déplacement de leurs aires biogéographiques.

- Les ravageurs :

Les maladies et les insectes sont en majeure partie la cause des pertes en valeur et en productivité de nos ressources forestières (Hammami, 1985). Les Lépidoptères défoliateurs suscitent un intérêt croissant dans nos forêts en raison des invasions de ces ravageurs et de leur généralisation à l'échelle nationale, comme ce fut le cas en subculture des déprédateurs suivants: *Lymantria dispar*, *Tortrix viridana*, *Euproctis chrysorrhoea* (Khouss, 1993).

Parmi les principaux insectes ravageurs dans la forêt algérienne, on peut citer :

A)- La chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) qui se nourrit des aiguilles de diverses espèces de pins, provoquant un affaiblissement important des arbres. Selon (Gachi, 1996), une forte attaque durant 2 à 3 années successives peut entraîner une mortalité de 5 à 10% dans les jeunes reboisements.

B)- La tordeuse verte du chêne (*Tortrix viridana* L.) qui est un ravageur spécifique des chênes. Elle dévore en premier lieu les bourgeons à fleur, puis les jeunes feuilles au fur et à mesure, qu'elles sont formées (Hammami, 1985). En cas de forte attaque, la défoliation due à cet insecte peut occasionner une absence partielle voire totale de glandée. La tordeuse verte peut aussi provoquer des réductions de croissance et participer à un affaiblissement plus durable des chênes, surtout lorsqu'elle se produit lors d'années anormalement sèches.

C)- La Spongieuse *Lymantria dispar* L. qui occasionne des dégâts considérables conduisant à la défoliation complète des arbres. Il peut donc affaiblir d'avantage les peuplements et faciliter l'installation des insectes xylophages et des champignons lignivores. Des dégâts très importants causés par cet insecte sur le chêne liège avaient été signalés à Skikda, Jijel, Bejaia, et Annaba (Kerris, 2001).

Chapitre 2

Présentation de la
zone d'étude

&

Matériels et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude :

1.1. Localisation géographique :

La zone d'étude est localisée dans la partie Nord-Est du territoire algérien (fig.14) comprise entre les latitudes $34^{\circ} 31' 15''$ et $37^{\circ} 5' 24''$ Nord et les longitudes $4^{\circ}19' 57''$ et $8^{\circ}41' 2''$ Est. Elle s'étend sur une distance d'environ 266 km du Nord au Sud et de 368 km en moyenne d'Est en Ouest. Ce territoire englobe 15 wilayas aux caractères géographiques bien différents. Elle 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.

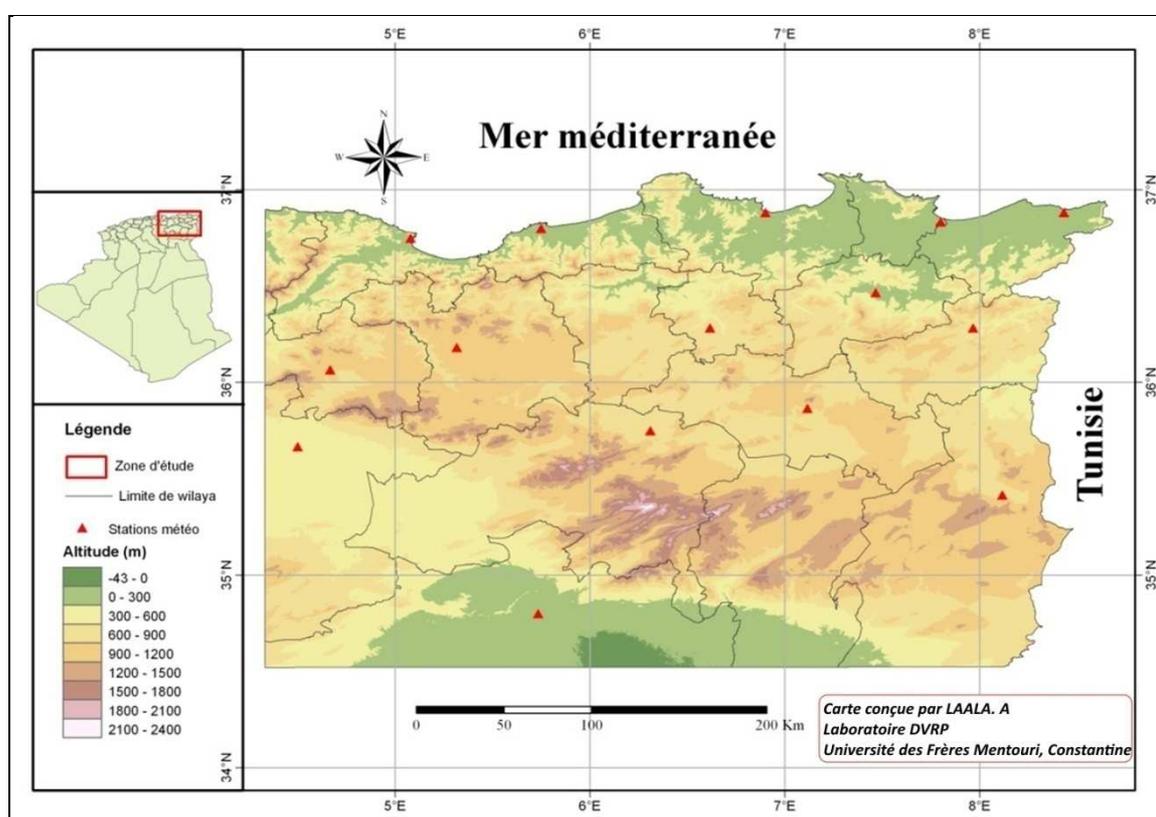


Fig.14: Relief de la zone d'étude et localisation des stations météorologiques

1.2. Topographie :

L'Est algérien renferme des principaux ensembles de reliefs, d'étendue très inégale, qui se succèdent du Nord au Sud :

- L'Atlas tellien (ou le Tell orientale):

C'est une zone qui rassemble des chaînes et des chaînons montagneux en un vaste bourrelet littoral parallèle aux chaînes Sud atlasiques. Elle représente la partie la plus montagneuse de l'Algérie (fig.15). Cet ensemble reçoit une pluviométrie importante qui dépasse les 1000 mm par endroits (Touati, 2010).

Il est disposé en chaînes parallèles et on distingue, du Nord au Sud :

- Les chaînes telliennes littorales, constituées de gneiss et de granite. Ce sont les massifs de Collo, Skikda et de l'Edough bordant la basse plaine d'Annaba.
- Les chaînes telliennes externes, constituées par les monts des Babors et les massifs de Petite Kabylie et qui reposent sur des socles du Jurassique et de l'Eocène. Les altitudes restent modestes, avec un point culminant à Djebel Babor (2004 m).

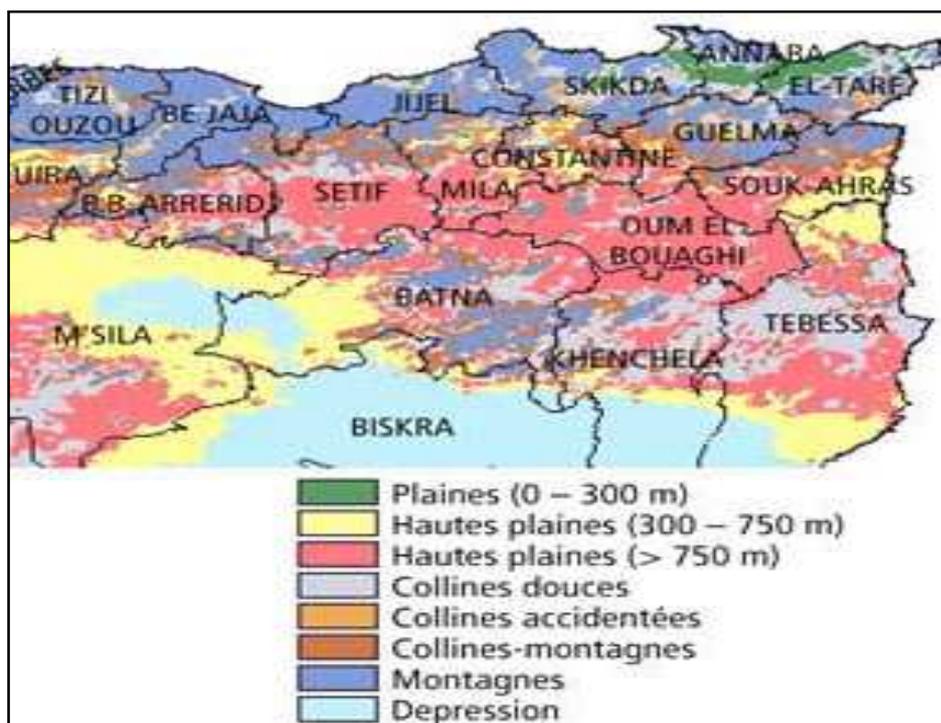


Fig.15 : Classification morphologique de l'Est algérien (FAO, 2005 modifié)

- Les Hautes plaines (vastes étendues planes):

Localisées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1200 m, ils sont marqués par une série de bombements SW-NE qui annonce les premiers reliefs de l'Atlas saharien. Ils sont parsemés de dépressions salées, chotts ou sebkhas qui sont des lacs continentaux formés au Pléistocène sous l'effet des pluies

torrentielles et du ruissellement important qui en découle. On distingue les steppes orientales à l'Est du Hodna, qui sont formées par les Hautes Plaines du Sud Constantinois où domine le Crétacé de nature calcaire et dolomitique. Ces Hautes Plaines sont bordées par le Massif des Aurès et des Némemchas (Touati, 2010).

Ce sont de vastes étendues planes, plus élevées que leurs voisines septentrionales (chaînes telliennes) ou méridionales (chaînes Sud-atlasiques) mais dominés par les massifs qui les ceignent (fig.15). Ces hauts plateaux se caractérisent par des précipitations qui se situent autour de 400 mm/an et l'année est scindée en deux saisons bien distinctes : l'une froide (hiver) et l'autre chaude (été) (Touati, 2010).

- L'atlas saharien :

L'atlas saharien forme une longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant jusqu'à la frontière algéro-Tunisienne. Il constitue la limite entre le Nord et le Sud algérien. A l'Est, se dresse les Monts des Nememcha, des Aurès et ceux du Hodna. Les plus imposants sont ceux des Aurès dont les crêtes culminent à plus de 2000 mètres et surplombent la cuvette du Hodna à l'Ouest et le Chott Melghrir au Sud. C'est un grand ensemble constitué par un axe anticlinal jalonné par deux monts dérivés, le Djebel Azreg et le Djebel Chelia (2328 m). De part et d'autre d'Arris, deux synclinaux perchés, le Djebel Zellatou (2017 m) et le Djebel Mahmel (2321m), s'inclinent vers le Sud-Ouest. Au Nord, un bombement anticlinal qui domine la dépression de Batna, sépare l'Aurès du Belezma. Au Sud Est, un vaste dôme se prolonge par un pli anticlinal étroit culminant au Djebel Aidel (2177m) au dessus de Khenchela. Ce sont, ainsi d'imposants massifs qui se dressent et constituent une barrière orographique qui bloque les influences venant du Nord (Cote, 1993). L'aridité marque cet espace et les pluies atteignent rarement les 200mm (Touati, 2010).

1.3. Géologie :

L'Algérie alpine est composée des ensembles structuro-sédimentaires suivants, du Nord au Sud :

- Le plateau continental algérien réduit, à des dépôts tertiaires et quaternaires (1000 à 3500m), repose sur un socle métamorphique (fig.16).
- L'Atlas Tellien est le domaine des nappes, avec des bassins de type intramontagneux, dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène.

- Les hauts plateaux, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite, où les processus locaux de distension ont permis la formation des bassins intramontagneux.
- L'Atlas saharien est né d'un long sillon subsident pincé entre les hauts plateaux et la plateforme saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000m), durant le tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse.
- Les bassins du Chott Melrhir dans le Sud Est constantinois, structurés au tertiaire, à remplissage crétacé (5000m), ont engendré et accumulé des hydrocarbures principalement dans le crétacé (Askri *et al.*, 2005).

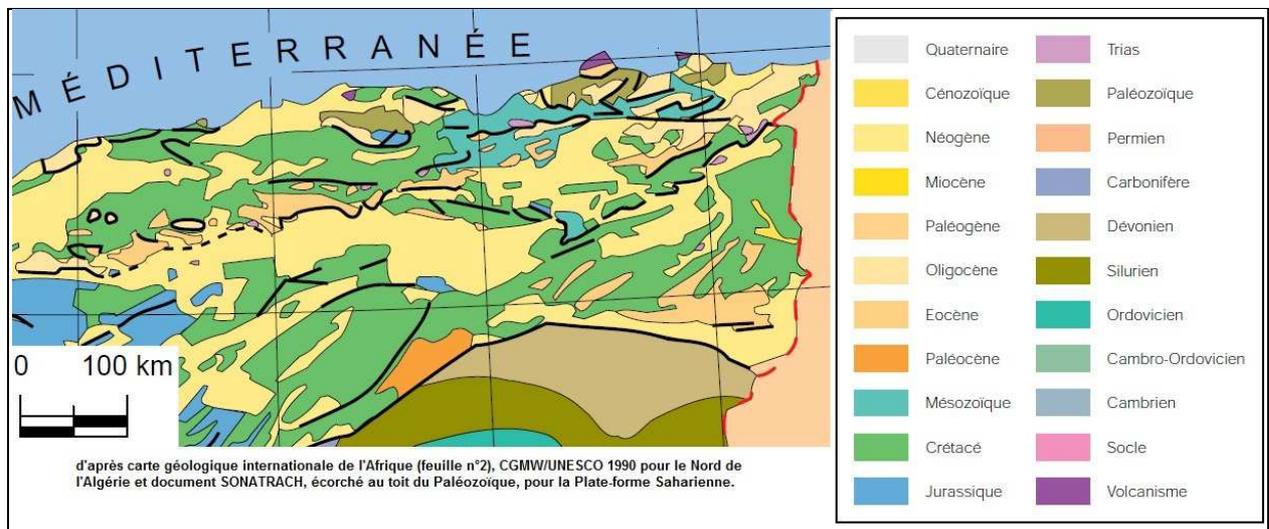


Fig.16: Carte géologique du Nord algérien (Askri, *et al.*, 2005, modifiée)

1.4. Pédologie :

La répartition des sols présente une zonation qui reflète celle du climat. Cependant, elle est largement modifiée par l'influence de la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation, ainsi que des facteurs biotiques et anthropogènes (FAO, 2005).

On distingue plusieurs types de sols (Djebaili *et al.*, 1983 ; Halitim, 1988 ; Kadi Hanifi, 1998):

A)- Les sols minéraux bruts : ou sols très peu évolués, localisés principalement sur les sommets des djebels et sont soumis à une érosion hydrique intense. Ces sols caractéristiques des forêts et des matorrals et comportent :

- les lithosols sur les roches dures (grès ou calcaires) (fig.17),
- les régosols sur les roches tendres (marnes et calcaires marneux),
- les sols minéraux bruts d'apport alluvial dans les lits des oueds caillouteux.

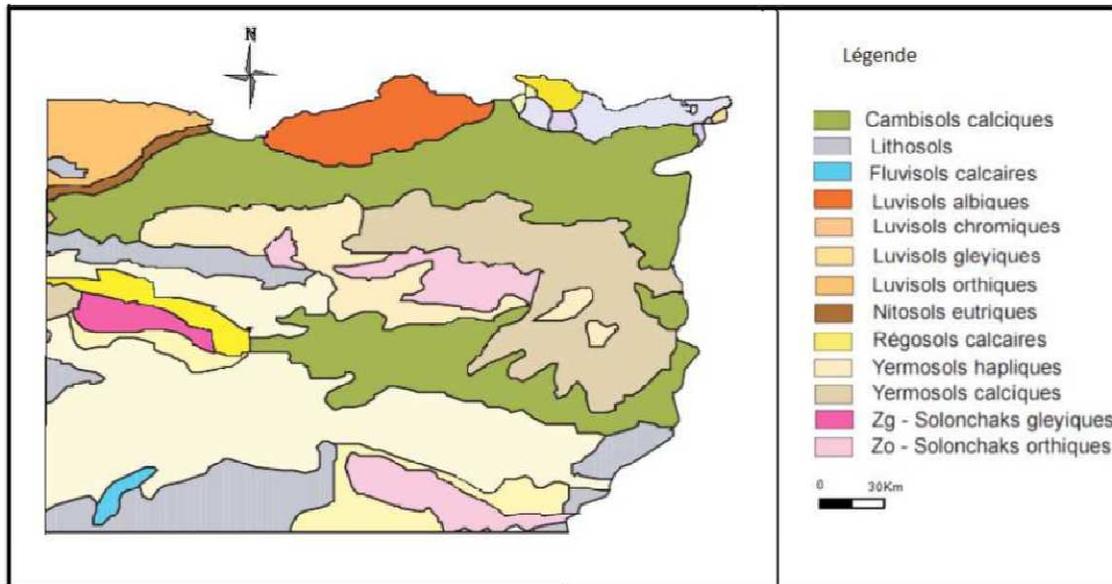


Fig.17 : Carte des sols de l'Est algérien (FAO, 2005 modifiée)

B)- Les sols peu évolués : regroupent :

- les sols d'origine colluviale sur les piedmonts des djebels et les glacis,
- les sols d'origine alluviale dans les lits d'oued, les zones d'épandage et les dayas,
- les sols d'origine éolienne avec des formations sableuses fixées.

C)- Les sols calcimagnésiques : regroupent les sols carbonatés parmi lesquels on retrouve :

- les rendzines humifères sur les versants des djebels;
- les sols bruns calcaires à accumulation calcaire xérifiée qui sont très répandus sur les glacis polygéniques du Quaternaire ancien et moyen;
- les sols à encroûtement gypseux qui sont plus rares, représentés par des petites plages dans les zones de grès alternant avec les marnes et argiles versicolores.
- Les sols carbonatés sont les plus répandus en Algérie, notamment dans les écosystèmes steppiques et présahariens où ils représentent de vastes étendues encroûtées (Halitim, 1988).

D)- Les sols isohumiques : sont représentés dans les glacis d'érosion polygéniques du Quaternaire récent. Ils regroupent les sols à encroûtement calcaire ou gypseux. On les retrouve dans les régions arides lorsque les précipitations sont inférieures à 200 mm/an.

E)- Les sols halomorphes : regroupent les sols salins (solontchak) profils AC et les sols salins à alcalis (solontchak-solonetz) profil A (B) C. Ces sols sont généralement profonds et localisés dans les chotts et les sebkhas. Ils sont pauvres en matière organique. Leur salinité est chlorurée, sulfatée sodique et magnésienne.

1.5. Hydrographie :

L'Algérie orientale représente la région la plus arrosée du pays et détient, de ce fait, la part la plus importante des ressources en eau de surface. Avec un écoulement annuel moyen pouvant dépasser les 200-300 mm sur les bassins telliens, elle s'oppose nettement à l'Algérie occidentale où la semi-aridité dominante ne permet que des écoulements médiocres, en majorité inférieurs à 50 mm par an (Mebarki, 2005).

Les cours d'eau du Tell algérien sont d'une longueur médiocre et ne drainent que des bassins réduits. Leur débit moyen est aussi faible qu'irrégulier. Ils appartiennent toutefois à l'hydrographie normale, c'est-à-dire qu'ils se dirigent vers la mer. Les hautes plaines, en revanche, ont un réseau hydrographique atrophié et incomplet : l'eau des pluies s'y rassemble dans les chotts sans emprunter de véritables vallées. Quant aux oueds issus de l'Atlas saharien, ils coulent vers le Sahara mais sont totalement dépourvus d'eau, sauf lors de crues torrentielles.

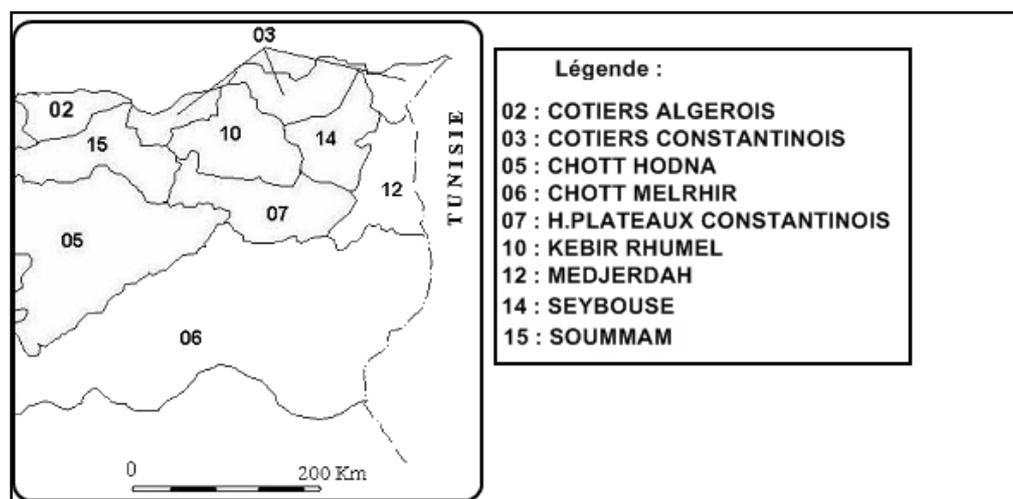


Fig18. Les bassins versants de l'Est algérien (ANRH, 1997 in Touati, 2010 modifiée)

Les 8 bassins versants qui sont situés dans la région Nord–Est algérien peuvent être regroupés en trois catégories :

- **Les bassins versants tributaires de la Méditerranée :** la Soummam, les côtiers Constantinois, le Kébir Rhumel, la Seybousse et la Medjerda; ils ont une superficie de 43766 km² et une pluviométrie annuelle qui varie entre 400 et 500 mm (fig.18) ;
- **Les bassins versants endoréiques:** le chott Hodna et les Hauts plateaux Constantinois; leur superficie est d'environ 35000km² et la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 400mm.
- **Un bassin versant saharien:** le chott Melrhir, avec une superficie d'environ 34000km² et une pluviométrie annuelle moyenne de 100 à 200mm (Touati, 2010).

1.6. Climat de l'Algérie orientale:

Le climat constitue le facteur le plus important et le plus caractéristique des diverses régions de l'Est algérien. En 250Km, du Nord au Sud, on passe du domaine humide, au subhumide, au semi aride et enfin à l'aride. La partie septentrionale, soumise à l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude, présente un climat de type méditerranéen passant au continental à mesure que l'on s'éloigne de la cote. Il est caractérisé par une longue période de sécheresse estivale variant de 3 à 4 mois sur le littoral, de 5 à 6 mois au niveau des Hautes Plaines et supérieure à 6 mois au niveau de l'Atlas Saharien (Seltzer, 1946 ; Stewart, 1969).

1.6.1. Les précipitations :

Les pluies sont généralement irrégulières et inégalement réparties à la fois dans le temps et dans l'espace. Elle est commandée par plusieurs facteurs : la position en latitude, la proximité de la mer ou de la montagne et l'exposition. Pratiquement faible en été, elles ont leur maximum en hiver dans le Tell, et au printemps sur les hautes plaines et de l'inégalité (entre les régions, entre les saisons, entre les années) (Touati, 2010).

Les pluies sont abondantes sur le littoral (supérieure à 1000 mm/an), elles déclinent très rapidement dès que s'enfonce vers le Sud (inférieure à 400 mm/an) (fig.19). En outre, une dissymétrie très nette existe entre les versants. Les versants exposés au Nord sont les mieux arrosés, les versants exposés au Sud sont les plus secs.

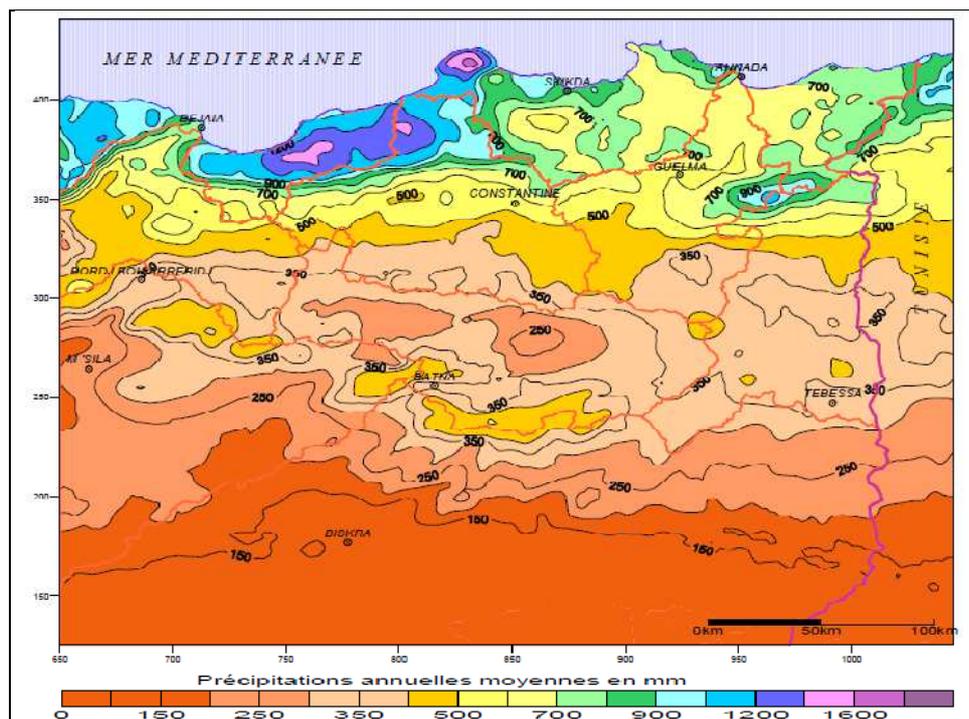


Fig.19 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (A.N.R.H., 1993 in Mebarki, 2005)

La figure ci-dessus permet de faire ressortir des zones de fortes précipitations (supérieures à 900 mm) dans la zone montagneuse Nord-Ouest, allant de Bejaia à Collo, ainsi que dans les tranches d'altitude les plus élevées des Monts de la Medjerda et du massif de l'Edough dans le Nord-Est. Les isohyètes de 600 à 800 mm balayent tout le reste de l'Atlas tellien avec cependant des contrées beaucoup plus pluvieuses dans la région extrême Est (El Kala) (Mebarki, 2005).

Les Hautes Plaines sont nettement cernées dans leur bordure Nord par l'isohyète 500 mm. La pluviométrie décroît vers la bordure Sud (350 mm) avec des creux assez nets (moins de 300 voire moins de 200 mm) dans la zone des lacs salés. C'est le même creux que l'on observe sur la cuvette du Chott Hodna, traversée par les isohyètes 300 et 250 mm (Mebarki, 2005).

L'Atlas saharien, en raison de l'effet orographique et l'exposition du versant Nord, enregistre une remontée du total pluviométrique vers des valeurs de 400 à 600 mm par an ; les sommets de l'Aurès pouvant recevoir plus de 600 mm. L'isohyète 300 mm marque l'amorce de la décroissance des précipitations sur le piémont Sud de l'Atlas dont la bordure méridionale est jalonnée par l'isohyète 200 mm et même 150 mm (Mebarki, 2005).

1.6.2. Les températures :

Les températures, comme les précipitations, connaissent d'importantes fluctuations tout au long de l'année en fonction de la latitude, de l'altitude et de l'exposition. Elles sont souvent élevées avec une très forte amplitude qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

Dans les régions littorales, les saisons humides et fraîches alternent avec des saisons plus sèches et chaudes : la température moyenne hivernale est de 12°C, celle de l'été tourne autour de 25°C. Dès que l'on pénètre vers l'intérieur, dans les Hautes Plaines, le climat devient plus vigoureux et l'amplitude moyenne augmente liée à la chaleur des étés torrides et surtout à l'apparition du gel hivernal. Ainsi, sur les Hautes Plaines, l'amplitude atteint les 20°C et la neige tombe presque toutes les années.

Dans les régions désertiques, l'amplitude moyenne est beaucoup plus marquée que dans les deux premières dépassant les 20°C. De plus, la saison humide est inexistante et l'aridité est de règle (Touati, 2010).

1.6.3. Le bioclimat :

La combinaison des données climatiques fondamentales (température et précipitations) permet de définir les étages bioclimatiques de l'Est algérien. Emberger (1955) et Sauvage (1961) proposent un indice (Q2) qui varie en sens inverse de la xéricité. Sur la base de cet indice, quatre étages du bioclimat méditerranéen ont été définis pour l'Algérie orientale : aride, semi-aride, subhumide et humide (fig.20). Ils sont subdivisés en variantes sur la base des seuils thermiques de la température du mois le plus froid (m). Les variantes thermiques qui permettent de situer les entités de végétation par rapport au climat sont les suivants :

- hiver froid, à gelées durant de longues périodes, $-3 < m < 0^{\circ}\text{C}$;
- hiver frais, à gelées très fréquentes, $0 < m < 3^{\circ}\text{C}$;
- hiver tempéré, à gelées fréquentes, $3 < m < 5^{\circ}\text{C}$;
- hiver doux, à gelées rares, $5 < m < 7^{\circ}\text{C}$;
- hiver chaud, à gelées absentes, $7 < m < 10^{\circ}\text{C}$.

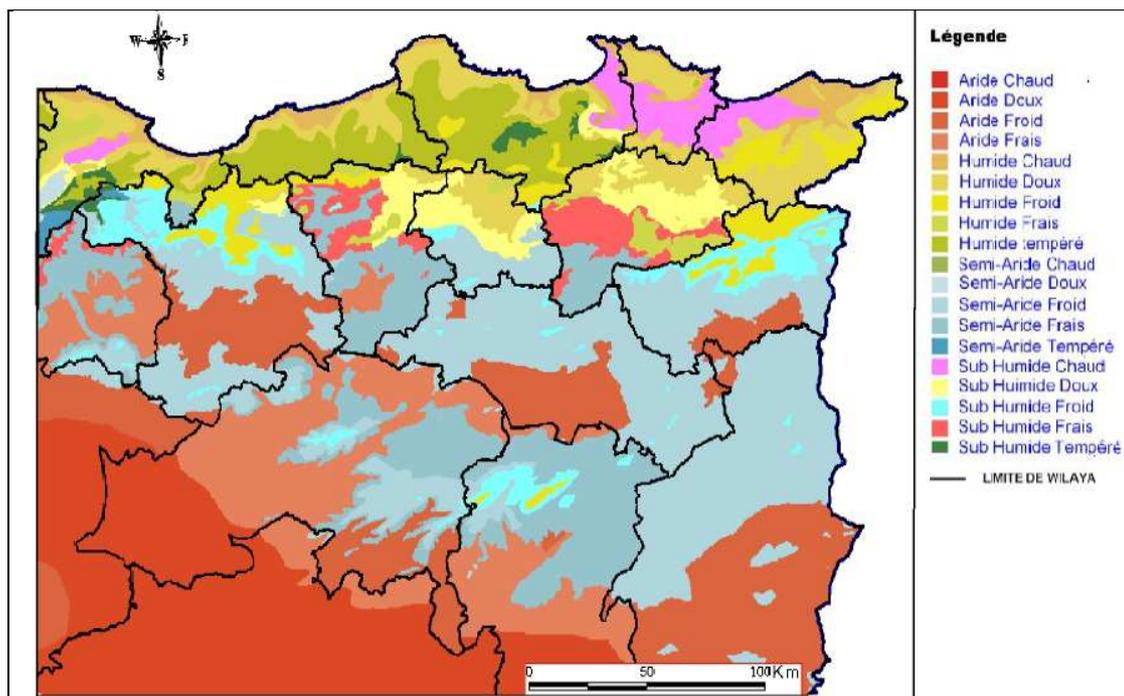


Fig.20 : Les étages bioclimatiques de l'Est algérien (BNEDER 2007, modifiée)

La zone tellienne se situe dans les domaines humide et subhumide pour ses parties orientales et centrales. Alors que la partie orientale de l'ensemble "Hautes Plaines constantinoises et Aurès-Nemencha" se retrouve presque totalement à l'étage plus favorable du domaine semi-aride, avec même quelques poches en subhumide (fig.20). L'ensemble saharien est évidemment le moins bien servi à ce niveau, car il relève intégralement du domaine aride (Touati, 2010).

1.7. La végétation forestière :

Le patrimoine naturel forestier de l'Est algérien est composé de plusieurs écosystèmes à base d'essences principales réparties entre les feuillus et les conifères (fig.21).

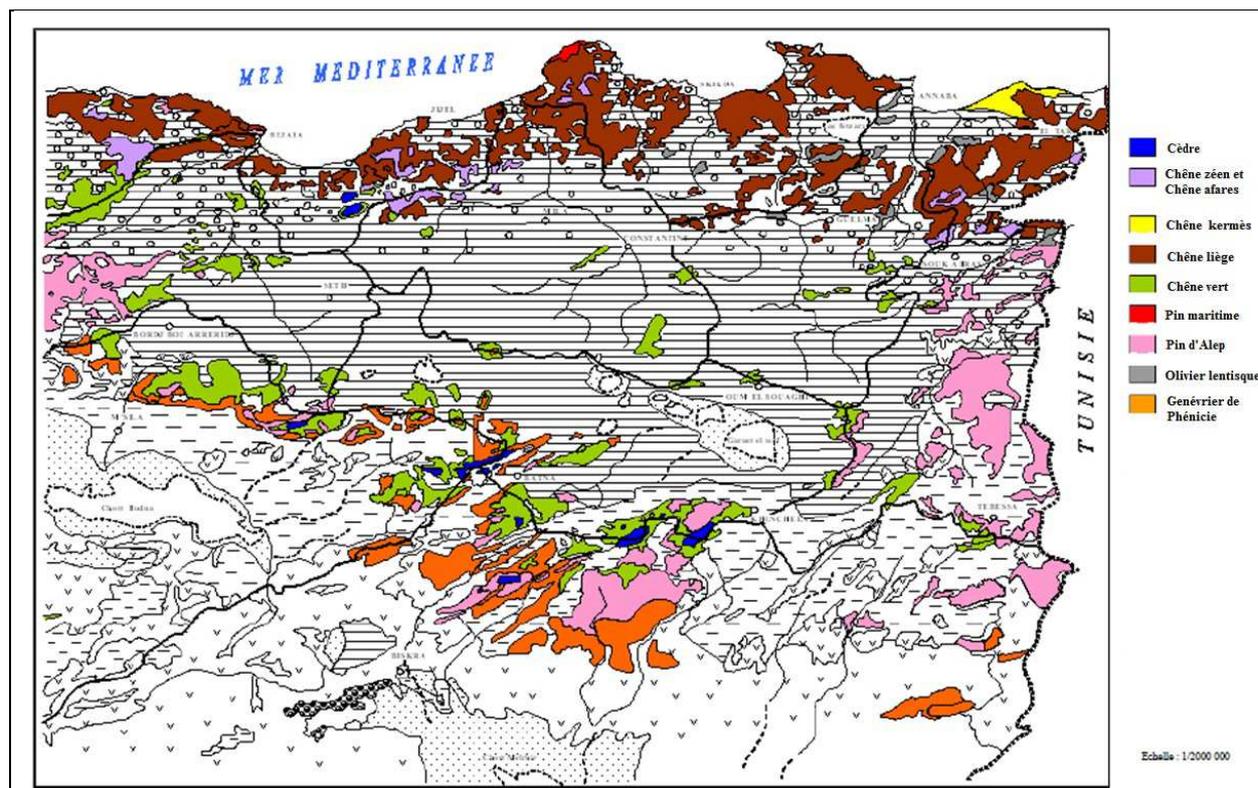


Fig.21 : Principales essences forestières en Algérie orientale d'après la carte internationale du tapis végétal au 1/1000 000 feuilles Tunis-Sfax et Alger (in Mébarki, 2005)

Les principales subéraies algériennes sont localisées dans le Tell Oriental, situées essentiellement en zones sub-humides et humides au Nord-Est de l'Algérie jusqu'à la frontière tunisienne (Zeraïa, 1982). Elles sont localisées entre le littoral et une ligne passant approximativement par Tizi-Ouzou, Kherrata, Guelma, Souk Ahras. Elles s'étalent sur une bande de 450km d'Alger au Cap Roux (Est d'El-Kala), dont la largeur ne dépassant pas 60 à 70 km. Pour les chênes à feuilles caduques (le zéen et l'Afarès), ils occupent les milieux les plus frais dans la subéraie et ils prospèrent tous deux à partir de 800 mm de pluie (Louni, 1994).

Dans l'Atlas Tellien, le chêne vert apparaît à partir de 400m d'altitude et monte jusqu'à 1700m (Maire, 1926 ; Quezel, 1976). Dans les Aurès, ses limites altitudinales oscillent entre 1200 et 1900m et entre 1500 et 2200m dans l'Atlas Saharien (Letreuch, 1995). Dans l'étage sub-humide, il entre en concurrence avec le chêne liège (sur sol silicieux) ou encore avec le pin d'Alep. Dans son faciès continental, de l'étage semi-aride froid et frais lié au domaine magrébin-steppique, il se mélange au pin d'Alep et au genévrier rouge. Dans la variante tempérée du semi-aride, il entre en contact avec le thuya.

Concernant le pin d'Alep, il couvre 35% des surfaces boisées de l'Algérie du Nord. Il est présent partout, d'Est en Ouest allant du niveau de la mer aux grands massifs montagneux du Tell littoral et de l'Atlas Saharien. Son optimum de croissance et de développement se situe au niveau des versants Nord de l'Atlas saharien où il constitue des forêts importantes et l'on peut citer à l'Est, les grands massifs de Tébessa avec 90.000 hectares, celui des Aurès avec plus de 100.000 hectares constitués principalement par les pinèdes des Béni-Imlou (72.000 ha), des Ouled Yagoub et celle des Béni Oudjana (Kadik, 1987).

Le cèdre de l'Atlas, essentiellement montagnard (dans le tell central et les hautes montagnes de l'Aurès) dont l'aire s'étend à partir de 1400 à 2800 m d'altitude et se développant à l'étage humide et froid. Il se retrouve au niveau des Aurès, du Djurdjura, de l'Atlas blidéen ainsi qu'à Teniet El Haad (Louni, 1994).

2. Matériels et méthodes :

2.1. Les données utilisées :

2.1.1. Les données thermiques :

Les données thermiques à notre disposition proviennent uniquement des 15 stations météorologiques pour une période de 30 années consécutives (1982-2011). Ces stations fournissent des données thermiques complètes par rapport à d'autres stations qui possèdent des données lacunaires ou manquantes. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), la période de 30ans est suffisamment longue pour être significative de la variabilité et la fluctuation de la température et pas de leur évolution à long terme (changement climatique). Ainsi, Richard (1997) signale que l'étude du climat doit porter sur une longue série chronologique d'observations, afin d'intégrer les variations interannuelles qui sont essentielles pour la compréhension du bioclimat, autrement dit, du climat effectivement vécu par les végétaux et autres organismes vivants.

Pour les calculs saisonniers, l'hiver a été défini comme la période de décembre de l'année n-1 à janvier et février de l'année n; le printemps regroupe les mois de mars à mai; l'été les mois de juin à août et l'automne la période de septembre à novembre.

2.1.2- Base de données du S.I.G :

A)- Le MNT (Modèle Numérique de Terrain):

Notre choix s'est porté sur le MNT ASTER Gdem (2011) élaboré par le ministère de l'Economie, du Commerce et l'Industrie du Japon (METI) et de l'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace des États-Unis (NASA) qui propose une couverture mondiale et dont la grille présente une résolution horizontale de 1 secondes d'arc, soit environ 30 mètres à l'équateur.

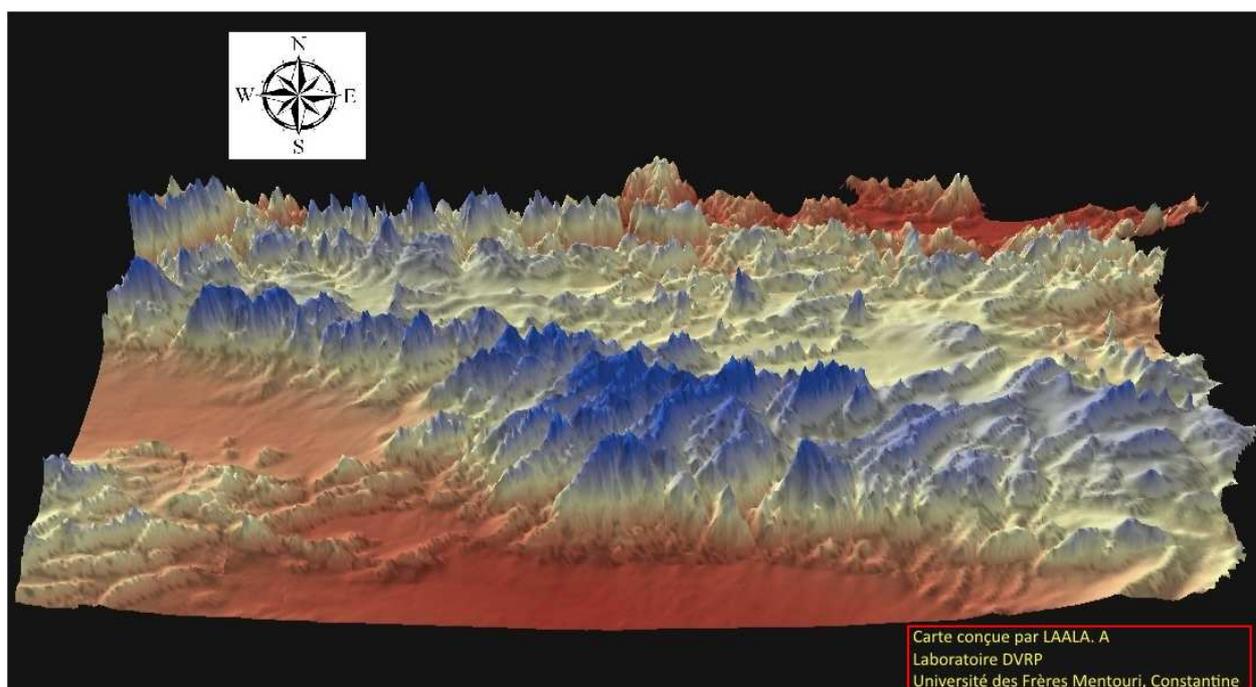


Fig.22: Présentation en 3D de la zone d'étude (Source du fond de la carte : MNT ASTER Gdem (2011))

Dans un premier temps nous avons sous-échantillonné le MNT par l'application d'un filtre spatial afin que cette dernière ait une résolution de 90 mètres puisque sa résolution initiale de 30m provoque une baisse des performances du processeur du PC, des notifications de mémoire insuffisante et des problèmes d'affichage, ce qui empêche le traitement des rasters dérivés de l'MNT. La résolution obtenue permet d'avoir une lecture fine du relief, suffisamment en tout cas au niveau des forêts de la zone étudiée.

En second lieu, on a effectué un lissage (3x3) du relief de la zone d'étude pour mieux caractériser l'environnement de chaque nœud du MNT, en remplaçant chaque altitude réelle par la moyenne de l'altitude au niveau de ce nœud et de celles des huit nœuds voisins (fig.23).

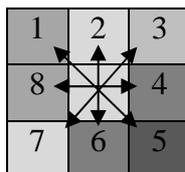


Fig.23 : Grille de MNT de 3x3 cellules

B)- L'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) :

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 peut être corrélé à de nombreuses propriétés des plantes. Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{Pir} - \rho_R}{\rho_{Pir} + \rho_R} \quad \text{Rouse } et al., (1974) \quad \text{Où :}$$

ρ_{Pir} : les valeurs de la réflectance dans le proche infrarouge (TM4)

ρ_R : les valeurs de la réflectance dans le Rouge (TM3)

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 réflectance 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.

Théoriquement, les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. Selon la NASA (2005), les valeurs modérées d'NDVI (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et de prairie, alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,9) traduisent une végétation dense abondante.

L'étape préliminaire de n'importe quel projet utilisant des images satellitaires est de choisir le capteur le plus convenable à l'objectif de l'étude. Parmi les satellites disponibles, nous avons utilisé la base de données de MODIS-Terra, fournies par la NASA, pour extraire les données de l'indice NDVI de la période (2002-2011).

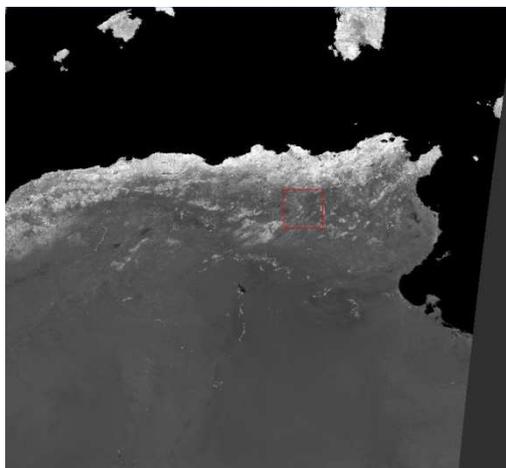


Fig.24 : Image brute NDVI de MODIS acquise le 01/02/2002

Notre choix est fondé sur la périodicité, la disponibilité et la gratuité de ces images satellitaires. Ces données sont disponibles en accès libre sur le site <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>. Elles couvrent notre zone d'étude suivant une résolution spatiale moyenne de 250 mètres et une résolution temporelle de 15 jours.

Le site 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 à de haute précision grâce à un capteur spécifique embarqué sur la plateforme TERRA (Vermote *et al.*, 2002). Cette opération est important puisque l'indice NDVI est très sensible aux conditions atmosphériques (Holben, 1986; McDonald *et al.*, 1998).

Tab.4 : Caractéristiques des scènes satellitaires MODIS couvrant la région Nord-Est algérienne

| | |
|----------------------------|---------------------------|
| Latitudes | De 34°3' Sud à 37°6' Nord |
| Longitudes | De 4° Ouest à 9° Est |
| Projection | Sinusoidal |
| Résolution spatiale | 250 mètres |
| Format | Geotiff |
| Valeurs max et min de NDVI | -1 et +1 |

Nous sommes conscients que la résolution de l'image satellitaire MODIS est assez grossière pour déterminer les types des forêts. Cependant notre objectif n'est pas de créer une carte d'occupation du sol, ni d'identifier les peuplements forestiers au niveau de l'Est algérien mais de déterminer les variations qui s'y opèrent sur la décennie (2002-2011). Cette dernière est suffisamment longue pour détecter les changements au niveau des massifs forestiers.

C)- Les données d'occupation du sol :

Les données concernant les types de forêt sont tirées de la carte internationale du tapis végétal (1/1000000) feuilles Tunis-Sfax et Alger et des cartes du tapis végétal fournit, dans un format papier, par la direction générale des forêts (DGF), sur les quelles on distingue 9 écosystèmes forestières au niveau de l'Est algérien (tab.5).

Tab.5 : Liste des essences forestières dominantes au niveau de 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> |

Cette liste des espèces n'est pas exhaustive, elle correspond aux essences les plus fréquemment rencontrées dans l'Est algérien.

2.1.3. Matériels informatiques :

- **Un PC :** Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé un ordinateur doté d'un processeur : Intel Pentium4 à 3.07GHz, de 4 Go de Ram, 80 GB de disque dur avec un système d'exploitation Windows 7 (64 bits).

- **Logiciel ENVI 4.7 :** ce logiciel a été utilisé pour les traitements d'images satellites (MODIS). La puissance interface graphique de l'ENVI est complétée par une bibliothèque d'algorithmes comportant de fonctions de transformation de données, des fonctions de filtre ainsi que des fonctions de réprojection.

- **Logiciel ArcGIS 9.2** : c'est un ensemble de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développé par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Ce logiciel nous a permis de gérer les bases de données (ArcCatalog), d'analyser les données (ArcMap) et de réaliser des géotraitements (ArcToolBox).

- **Logiciels statistiques** : les résultats, présentés sous forme de courbes ou d'histogrammes, ainsi que tous les calculs statistiques ont été réalisés par le logiciel XLSTAT 2013 sauf la classification ascendante hiérarchique (CAH) qui a été effectuée grâce au logiciel Statistica, version 5.1 (1997).

2.2- Méthodes de traitement des données :

2.2.1. Traitement des données thermiques :

2.2.1.1. Lissage par moyennes mobiles :

Pour supprimer les fluctuations transitoires des températures, on a lissé les valeurs de la série statistique par l'utilisation des moyennes mobiles (glissantes) calculées sur une période de 3 ans de manière à souligner les tendances à long terme des températures annuelles et saisonnières.

2.2.1.2. Estimation de la tendance des températures :

La tendance est l'orientation générale d'une série d'observations à la hausse ou à la baisse sur une période assez longue. Elle est estimée avec la méthode des moindres carrés pour ajuster la série chronologique Y_t , avec la fonction:

$$(Y = at + b)$$

On détermine la droite des moindres carrés ($y = at + b$) du nuage de points (t, Y_t), c'est à dire la droite qui minimise la distance : $\sum(Y_t - (at + b))^2$

$$\text{D'où : } a = \frac{\text{cov}(t, Y)}{v(t)} \quad \text{et} \quad b = \bar{Y} - a \bar{t}$$

La tendance est obtenue par le calcul de la pente a qui est un coefficient directeur :

- Si $a > 0$, on a une tendance à la hausse ;

- Si $a < 0$, on a une tendance à la baisse

Le niveau significatif ($\alpha = 5\%$) de la tendance a été estimé selon la méthode Mann-Kendall non paramétrisée (Mann, 1945; Kendall, 1975).

Les résultats obtenus sont représentés sous forme cartographique. Les tendances positives et significatives à 5% sont représentées par un triangle de couleur rouge orienté vers le haut, alors que les tendances négatives et significatives sont représentées par un triangle bleu orienté vers le bas. Les tendances non significatives sont mentionnées par un triangle noir. La taille des triangles est proportionnelle à l'intensité de la tendance.

2.2.1.3. Estimation de l'anomalie des températures :

L'anomalie climatique est la déviation par rapport à un état climatique moyen (Merle, 1980). On a estimé ce paramètre par la comparaison des températures annuelles avec celles calculées sur la période de référence (1982-2011) pour mieux distinguer les années exceptionnellement froides et chaudes.

Une année était considérée comme froide lorsque l'anomalie prend des valeurs négatives, c'est-à-dire que la moyenne annuelle est inférieure à la moyenne des températures calculée sur la période (1982-2011). Au contraire, l'anomalie est positive pour les périodes chaudes où la moyenne annuelle dépasse la moyenne de 30 années analysées.

Ainsi, pour déterminer l'intensité des années froides et chaudes, nous avons choisi les paramètres suivants :

- Le nombre d'années froides ou chaudes ;
- Le poids (en °C) : c'est la somme des valeurs de l'anomalie pour les années froides ou chaudes: par exemple : si la moyenne des températures minimales de la période de 30ans égale à 12°C, une année caractérisée par une température minimale de 11.5°C aura un poids de : $(11.5^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}) = -0.5^{\circ}\text{C}$. On fait la somme de ces valeurs pour toute la durée considérée comme froide ;
- L'intensité : (en °C/an), c'est le poids par rapport à la durée ; des périodes froides qui peuvent être longues et modérées, d'autres courtes mais intenses. Ce paramètre nous permet d'avoir un indicateur intéressant à ce niveau.

2.2.1.4. Estimation de la corrélation entre la température et l'NDVI:

Dans cette étude nous avons essayé de déceler la liaison entre la température et l'activité végétative des écosystèmes forestiers de l'Est algérien. Pour cela, nous avons utilisé le coefficient de corrélation r de Bravais-Pearson qui a été calculé selon la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2}}$$

Avec:

x_i et y_i : les valeurs des variables X et Y

m_x et m_y : les moyennes des deux variable X et Y

n : le nombre d'observation ou la taille de l'échantillon

La valeur du coefficient est toujours comprise entre : -1 et +1. On dira que la relation entre X et Y est :

- Parfaite si : $r = 1$
- Très forte si : $r > 0,7$.
- Forte si : r se situe entre 0,5 et 0,7.
- D'intensité moyenne si : r se situe entre 0,2 et 0,5.
- Faible si r : se situe entre 0 et 0.2.
- Nulle si : $r = 0$

Pour tester la signification du coefficient de corrélation, on a utilisé le test de Bravais-Pearson avec un seuil de signification de 5%.

2.2.1.5. Calcul du gradient thermique:

Le calcul du gradient thermique consiste à évaluer verticalement la décroissance de la température pour une tranche altitudinale de 100 m de dénivellation afin d'établir l'équation de la droite de régression qui détermine la température cherchée en fonction de l'altitude connue.

L'équation de régression s'écrit :

$$T = a \text{ Alt} + b$$

$$\text{Avec : } a = \frac{\text{cov}(x,y)}{S_x^2} \quad \text{et} \quad b = \bar{Y} - a \bar{x}$$

$COV_{(x,y)}$: la covariance entre les températures et les altitudes;

\bar{X} : La moyenne des altitudes ;

S_x : L'écart type des altitudes;

\bar{y} : La moyenne des températures connus.

2.2.1.6. Calcul de l'indice de thermicité (It) :

L'indice de thermicité est un indice qui pondère l'intensité du froid, facteur limitant pour beaucoup de plantes et de communautés végétales (Rivas-Martinez *et al.*, 2005). Il donne l'importance à un nouveau paramètre qui traduit la douceur relative hivernale, c'est le (m'). Il est déterminé par la combinaison des trois principaux facteurs climatique :

- (T) : Température moyenne annuelle
- (m) : Température moyenne des minima du mois le plus froid
- (m') : Température moyenne des maxima du mois le plus froid

Il est donné par la formule suivante :

$$It = (T + m + m') \times 10$$

En fonction des classes de valeurs de l'indice de thermicité (It), Rivas-Martinez *et al.*, (2005) propose une correspondance avec 7 thermotypes, alias les « étages de végétation », et distingue pour chacun d'eux deux subdivisions (horizons ou niveaux), inférieure et supérieure (tab.6).

Tab.6 : Les thermotypes selon les valeurs de l'indice de thermicité (Rivas-Martinez *et al.*, 2005)

| Thermotypes | l'indice de thermicité (It) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Inframéditerranéen | 450-580 |
| Thermoméditerranéen inférieur | 400-450 |
| Thermoméditerranéen supérieur | 350-400 |
| Mésoméditerranéen inférieur | 285-350 |
| Mésoméditerranéen supérieur | 220-285 |
| Supraméditerranéen inférieur | 150-220 |
| Supraméditerranéen supérieur | 80-150 |

2.2.1.7. Méthode d'interpolation des températures :

La section présentée ici s'intéresse particulièrement à la spatialisation de la température, variable très fluctuante dans le temps comme dans l'espace. Pour cela, l'interpolation est utilisée pour restituer le champ spatial continu de cette variable quantitative à partir des valeurs mesurées ponctuellement au niveau des stations météorologiques.

La méthode d'interpolation, suivie dans notre étude, est fondée sur une régression multiple entre la variable à expliquer (la température) et les variables explicatives (les variables géospatiales). Cette démarche est complétée par une technique géostatistique (krigeage) qui permet d'interpoler les résidus issus de cette régression. Les variables explicatives et prédictives ont été choisies en fonction de nos connaissances préalables concernant les processus qui règlent l'organisation spatiale des températures.

On peut cette méthode en 5 principales étapes :

A)- Détermination des variables explicatives:

Cette étape nous a permis de choisir les paramètres susceptibles d'expliquer le phénomène à interpoler : la température. Selon Lhotellier (2007), en relief contrasté, les seules méthodes « spatiales » d'interpolation appliquées à la température de l'air sont mal adaptées aux contraintes du relief et du réseau de mesure. Une étape fondée sur une régression, à partir de paramètres décrivant le relief, est donc indispensable.

Selon Arnaud et Emery (2000), les données géographiques et environnementales interviennent dans la modélisation comme variables explicatives. Nous pouvons penser que la température (variable dépendante) est influencée par : le relief, la distance à la mer et à la forêt, la longitude et la latitude (variables indépendantes).

Le système d'information géographique SIG nous a permis d'extraire à partir du MNT, pour chaque pixel, les variables explicatives suivantes :

- L'altitude (Alt: en mètres) ;
- La pente (Pen: en degrés) qui est la valeur du plan d'ajustement, les valeurs s'échelonnent théoriquement de 0 à 90°;
- L'orientation des versants (Exp : en degrés) pour mieux évaluer l'influence des composantes Nord-Sud et Ouest-Est sur la température ;
- Le rayonnement solaire (Ray : en KWH/m²), calculé pour le solstice d'été (21 Juin) ;
- La courbure du relief (Cur) qui renseigne sur le contexte topographique dans lequel se situe chaque pixel de l'aire d'étude.

Quatre autres couches d'information ont été créées pour déterminer :

- La latitude (Lat: en degrés décimale) ;
- La longitude (Lon: en degrés décimale) ;
- La distance orthodromique qui sépare chaque pixel de la mer la plus proche (Dis.m: exprimée en mètres) ;
- La distance orthodromique qui sépare chaque pixel de la forêt la plus proche (Dis.f: exprimée en mètres).

B)- Test de corrélation :

L'estimation du coefficient de corrélation (de Pearson) entre les 9 variables explicatives et les températures nous a permis d'identifier les variables les plus explicatives au seuil de 5% qui seront alors utilisés pour la spatialisation de la température.

C)-Détection de la colinéarité :

On a procédé après avoir dressé la matrice de corrélation à classifier les variables et à déterminer les fortes covariations et les redondances qu'elles pouvaient comporter entre elles. Au plan statistique, l'existence d'une colinéarité statistique peut perturber les estimations des paramètres du modèle (Foucart, 2006).

Pour déterminer les variables redondantes, nous avons utilisé le test de Klein qui repose sur le principe suivant :

- Nous calculons les corrélations croisées entre les variables explicatives X_{j1} et X_{j2} : $r_{j1,j2}$
- Il y a présomption de colinéarité s'il existe au moins un couple de variables X_{ja} et X_{jb} tel que $R^2 < r_{ja,jb}^2$

D)- Régressions multiples pas à pas (backward selection):

Les variables sélectionnées, comme variables significatives de la température, sont systématiquement intégrés dans des régressions multiples pas à pas (backward selection) jusqu'à la combinaison qui fournit le R^2 ajusté le plus élevé. Ce coefficient rend comparable des régressions comportant un nombre de variables différents.

Le modèle obtenu permet de reconstituer le champ thermique continu de l'Est Algérien au travers d'un réseau des stations météorologiques de 15 stations. Pour chaque mois de la période (1982-2011), l'équation du modèle obtenue s'écrit :

$$y(s) = \beta_0 + \beta_1 x_1(s) + \dots + \beta_n x_n(s) + \varepsilon(s)$$

Avec:

$y(s)$: variable dépendante (température),

$x_1(s)$ à $x_n(s)$: variables indépendantes ou explicatives,

β : coefficients des variables indépendantes,

$\varepsilon(s)$: résidus de la régression (c'est l'écart au modèle: $\varepsilon(s) = y(s) - y'(s)$)

E)- La validation du modèle :

La validation des résultats obtenus est une étape essentielle post-interpolation. Les estimations réalisées sont validées selon différentes approches : pourcentage de variance expliqué par le modèle de régression multiple pas à pas, comparaison entre estimation et mesure sur deux échantillons distincts, validation croisée.

- Validation statistique :

Le coefficient de détermination (R^2) donne une idée du pourcentage de variabilité de la variable à modéliser, et plus le coefficient R^2 est proche de 1, plus il y a une corrélation et meilleur est le modèle. C'est un indicateur de la performance du modèle comme outil de prévision.

- Estimation des résidus :

Pour valider les modèles obtenus de la régression, nous avons estimé l'erreur de modélisation ou les résidus issus de la régression. C'est la différence entre la température mesurée ponctuellement au niveau des stations météorologiques et la température estimée par la méthode de régression multiple. En fait, la température est sous-estimée si les valeurs des résidus sont nettement négatives, elle est surestimée dans le cas contraire. Les valeurs ponctuelles des résidus ont été interpolées par krigeage afin d'obtenir un champ continu des erreurs d'estimation à l'ensemble de l'aire d'étude.

La carte de résidus obtenue par Krigeage est ensuite ajoutée, sous S.I.G, à celle issue de la première méthode (régression) afin d'obtenir une carte d'une deuxième méthode (régression + Krigeage) qui représente un champ continu de la température plus proche de la réalité. Les résidus de cette 2^{ème} méthode (régression + Krigeage) sont interpolés aussi par krigeage pour comparer la performance de deux méthodes.

- Validation croisée des données interpolées :

La méthode de la validation croisée ou “cross validation” est un ensemble des paramètres statistiques permettant d'évaluer l'erreur d'estimation pour chaque méthode d'interpolation testée. L'erreur moyenne quadratique (RMSE). « Root Mean Square Error » est une estimation de la variance de l'erreur de la régression, c'est à dire la valeur de l'erreur moyenne de dispersion des données autour de l'axe de régression ou encore la variation des résidus ; plus la RMSE est élevée, plus la dispersion des résidus est large et moins exact est le modèle. Plus la valeur du RMSE est faible plus l'estimation de l'interpolateur est bonne. Donc c'est la valeur à minimiser dans le cadre d'une régression.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Où :

F : degré de liberté

N : nombre d'observation

O_i: valeur observée

P_i: valeur calculée

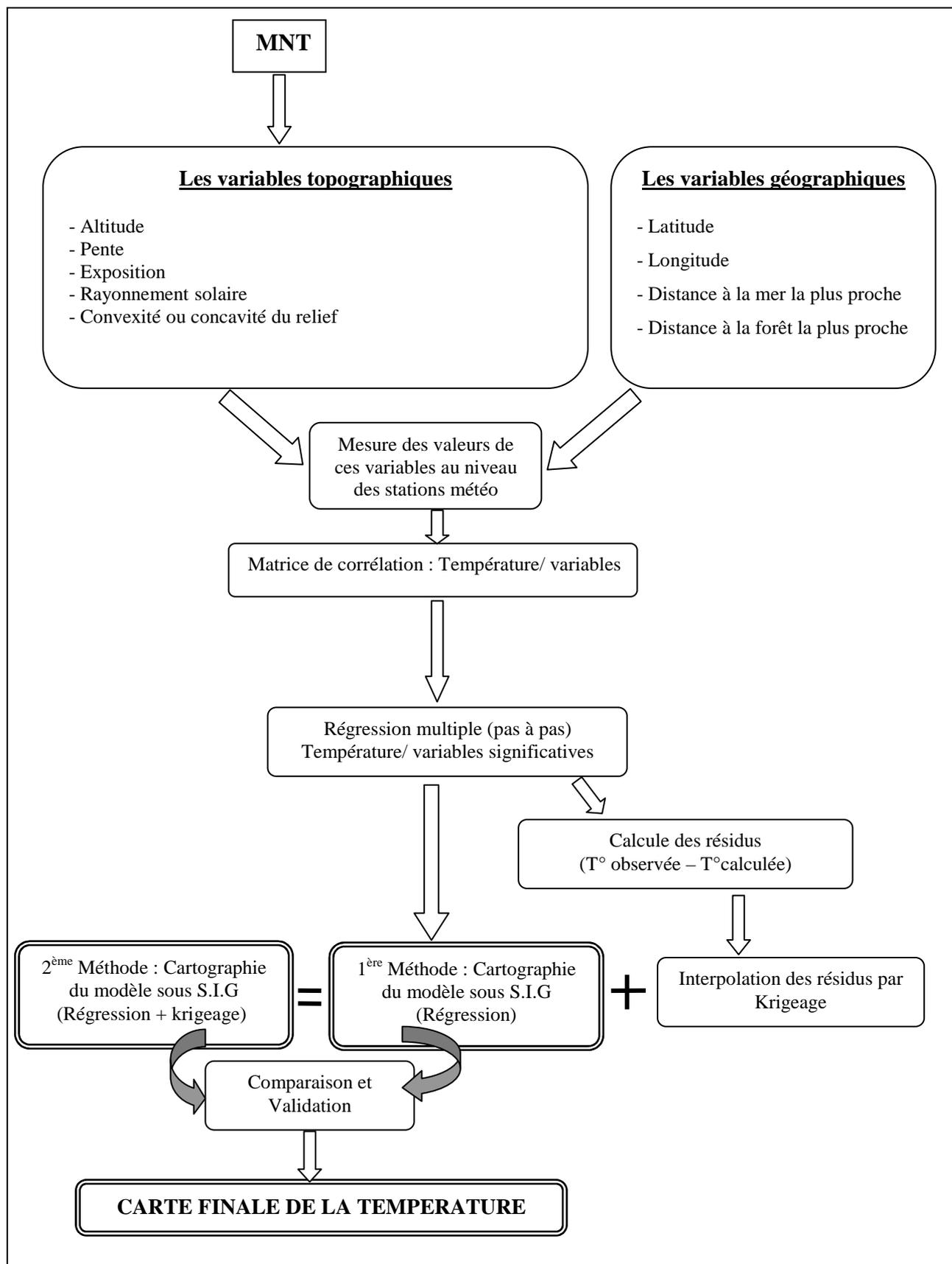


Fig.25 : Schéma représentatif des étapes réalisées pour l'interpolation des températures mensuelles

2.2.1.8. Détermination des régions thermiquement homogènes de l'Est algérien:

La démarche retenue pour la typologie et la régionalisation thermique des wilayas de l'Est algérien comprend deux analyses statistiques : l'Analyse en Composantes Principales (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH).

A- L'Analyse en Composantes Principale (ACP) :

L'Analyse en Composantes Principales est souvent utilisée avant une classification car elle permet d'identifier la structure de la population et éventuellement de déterminer le nombre de groupes à construire. L'ACP a pour objectif de présenter, sous une forme graphique le maximum de l'information contenue dans une table de données, basées sur le principe de double projection sur les axes factoriels (Lagarde, 1995).

Nous avons utilisé pour l'ACP 15 séries de température moyenne mensuelle, minimale et maximale, ainsi les températures annuelles de ces trois paramètres climatiques, ce qui donne une matrice de (39, 15).

B)- La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

Parmi les techniques de classification nous avons utilisé la CAH avec distance euclidienne et critère d'agrégation de Ward (minimisation de la variance intra-classes). Elle consiste à créer, à chaque étape, une partition obtenue en agrégeant deux à deux les éléments les plus proches (Lebart *et al.*, 1995). Cette méthode de classification hiérarchique nous permet de comparer les températures des différentes wilayas et de déterminer celles qui se rassemblent et celles qui diffèrent pour faire une typologie des wilayas de point de vue thermique.

2.2.1.9. Les variables thermiques et bioclimatiques utilisées pour déterminer les exigences thermiques des essences forestiers :

On suppose que les paramètres bioclimatiques qui conditionnent la vie des écosystèmes forestiers de l'Est algérien sont : BIO1, BIO2, BIO3, BIO4, BIO5, BIO6, BIO7, BIO10 et BIO11. Les rasters de ces variables sont générés, sous S.I.G, à partir des rasters thermiques interpolés précédemment en utilisant la fonction « Raster Calculator » du logiciel ArcGIS9.2.

Cette base de données nous a permis de caractériser la tendance annuelle des températures, la saisonnalité (par exemple, l'écart thermique annuel) et les limites extrêmes (par

exemple, la température minimale du mois le plus froid et maximale du mois le plus chaud) à l'échelle des massifs forestiers de l'Est algérien.

2.2.2. Prétraitement des données satellitaires :

A)- Les transformations des coordonnées :

Les 240 images satellitaires de type MODIS ont été importées sous le logiciel ENVI4.7 en changeant les coordonnées projetées de type sinusoidal par les coordonnées géographiques du système international WGS 1984. Cette démarche facilite la coïncidence parfaite de ces images avec le reste des données dont nous disposons (des cartes forestières).

B)- Le masquage :

Au vu de vaste zone de l'Est algérien, un masque a été créé sous le logiciel ENVI4.7 afin de retirer les pixels n'ayant pas d'intérêt à être étudiés qui correspondent aux zones non forestières (fig.26). L'application de ce masque sur toutes les images satellitaires téléchargées permet de minimiser la taille de l'espace mémoire occupé par ces scènes et par conséquent réduire le temps d'exécution des calculs effectué par les logiciel de télédétection et du SIG.

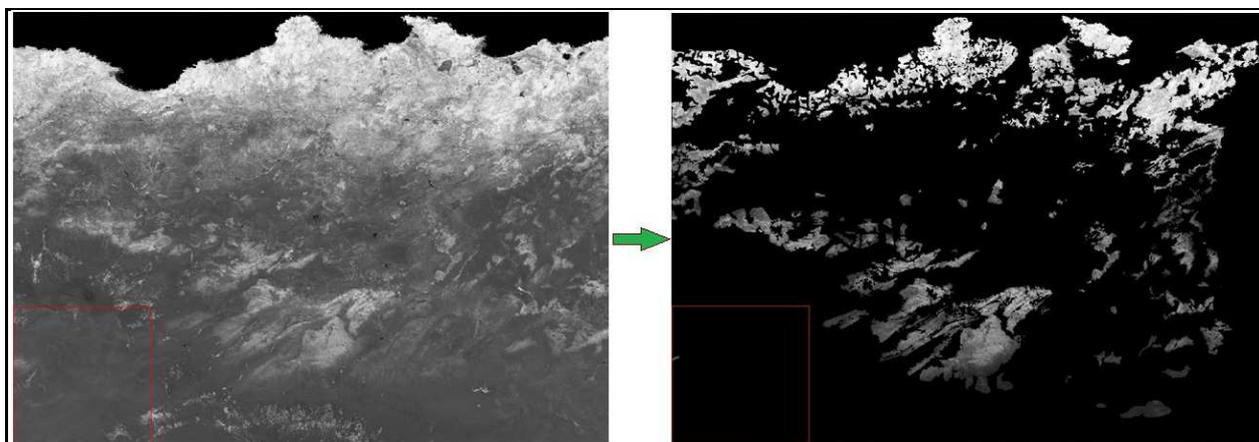


Fig.26 : Image satellitaire MODIS (acquise le 01/02/2002) avant et après l'application du masque

C)- Estimation de la tendance de l'indice NDVI :

Pour détecter les tendances de développement de la végétation forestière de l'Est algérien, nous avons calculé les moyennes annuelles de l'indice NDVI pour chaque pixel et fait ensuite une régression linéaire à travers la série temporelle de cet indice de la période 2002-2011.

D)- Calcul de l'écart type de l'indice NDVI :

Dans le but de visualiser la variabilité temporelle de la densité du couvert forestier et de la quantité de biomasse verte des écosystèmes forestiers de l'Est algérien, 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.

2.2.3. Traitement des données d'occupation du sol :

A)- Scannérisation :

Les cartes de la végétation forestière ont été scannées en format TIFF sur un scanner de type « Xerox 6204 » avec une résolution de 600 dpi (Dots Per Inch). A Cette résolution, on peut zoomer et vectoriser les contours des massifs forestiers, alors qu'à 300 dpi, ces limites apparaissent flous et sont plus malaisés à vectoriser.

B)- Géoréférencement :

C'est l'opération qui consiste à transformer géométriquement une image pour la rendre conforme à la projection cartographique désirée, et de la rééchantillonner selon un pixel carré de grandeur standard. Chaque pixel est alors positionné dans cette projection.

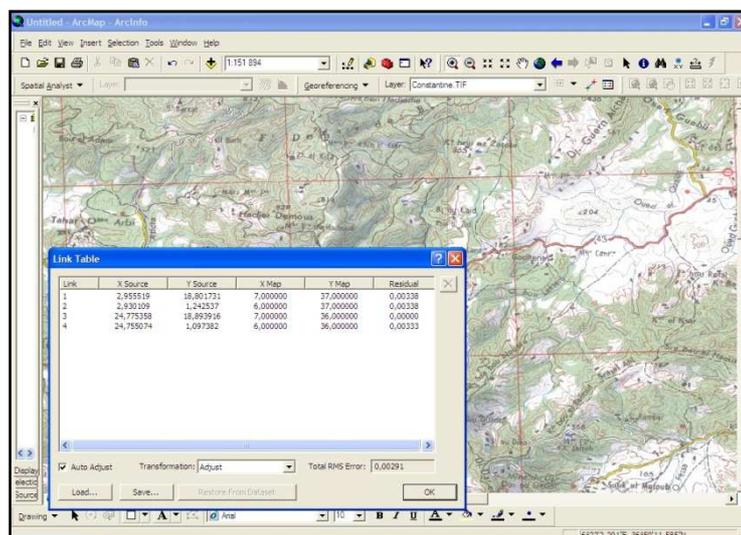


Fig.27 : Géoréférencement de la carte d'occupation du sol sous ArcGis9.2

Le géoréférencement des cartes forestières a été établi avec le logiciel ArcGis9.2 en utilisant le même système de coordonnées géographiques adopté pour les images satellitaires

(WGS 1984) (fig.27). Cette démarche permet l'intégration de ces cartes dans un SIG et facilite la superposition parfaite des vecteurs avec la série des images satellitaires.

C)- Vectorisation:

À partir des cartes forestières géoréférencées, une couche commune a été créée sous ArcGis9.2, au format Shape qui présente 741 polygones de délimitation des différents écosystèmes forestiers dominants de l'Est algérien (fig.28 et 29). Grâce à cette information géoréférencée, nous avons pu isoler les parcelles forestières et les superposer aux images MODIS acquises précédemment.

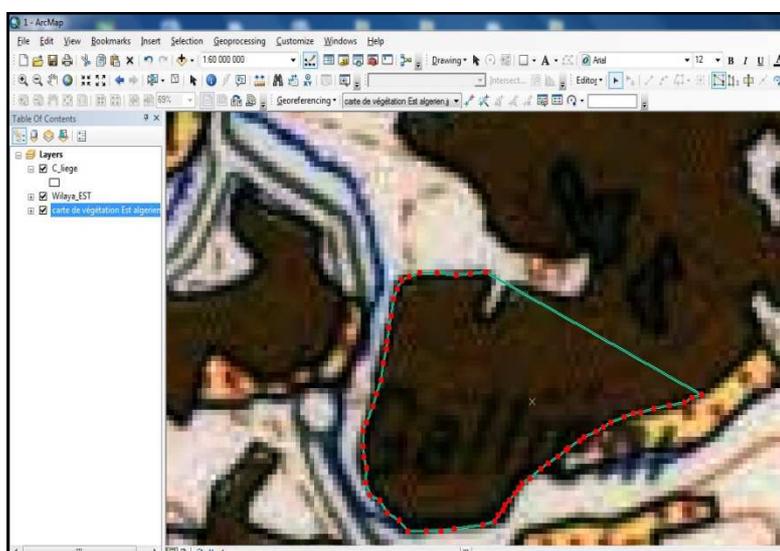


Fig.28 : Vectorisation des massifs forestiers sous ArcGis9.2

Les pixels des images satellitaires qui coïncident avec les vecteurs, sont sélectionnés pour évaluer la variabilité spatio-temporelle de l'NDVI de chaque écosystème forestier et calculer aussi la tendance végétative de chaque pixel de ces massifs forestiers sur la période (2002-2011).

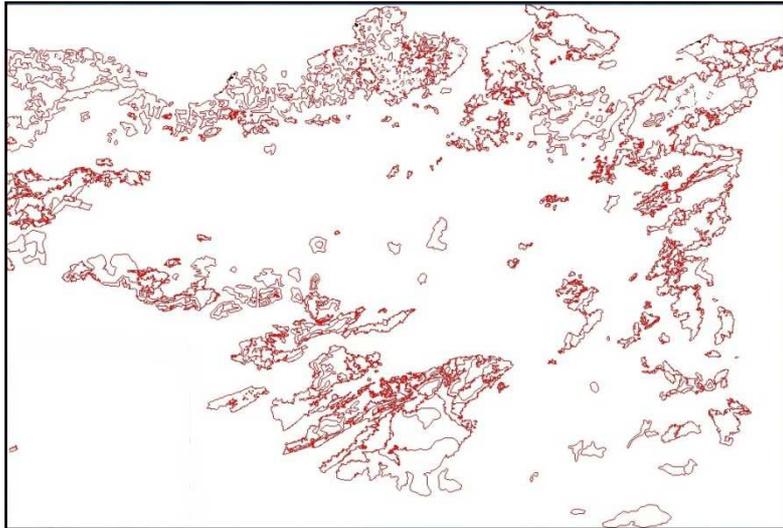


Fig.29 : Vecteurs représentant les limites des massifs forestiers de l'Est algérien

Ainsi, un tri croisé entre les données vectorielles des différentes essences forestières et les rasters calculées (d'altitude, de pente, d'exposition, de différentes variables thermiques interpolées) a été réalisé pour caractériser la localisation topographique et même les limites thermiques de différents massifs forestiers.

Chapitre 3

Résultats et discussion

1. Répartition des écosystèmes forestiers dans la zone d'étude:

La couverture forestière de l'Est algérien est égale à 1767720,69 ha, dont 61.42% de cette superficie est occupé par les forêts des feuillus et 38.57% par les résineux. Ces forêts représentent 18.56% du mode d'occupation du sol de l'Est algérien et seulement 0.74% de la surface totale de la nation.

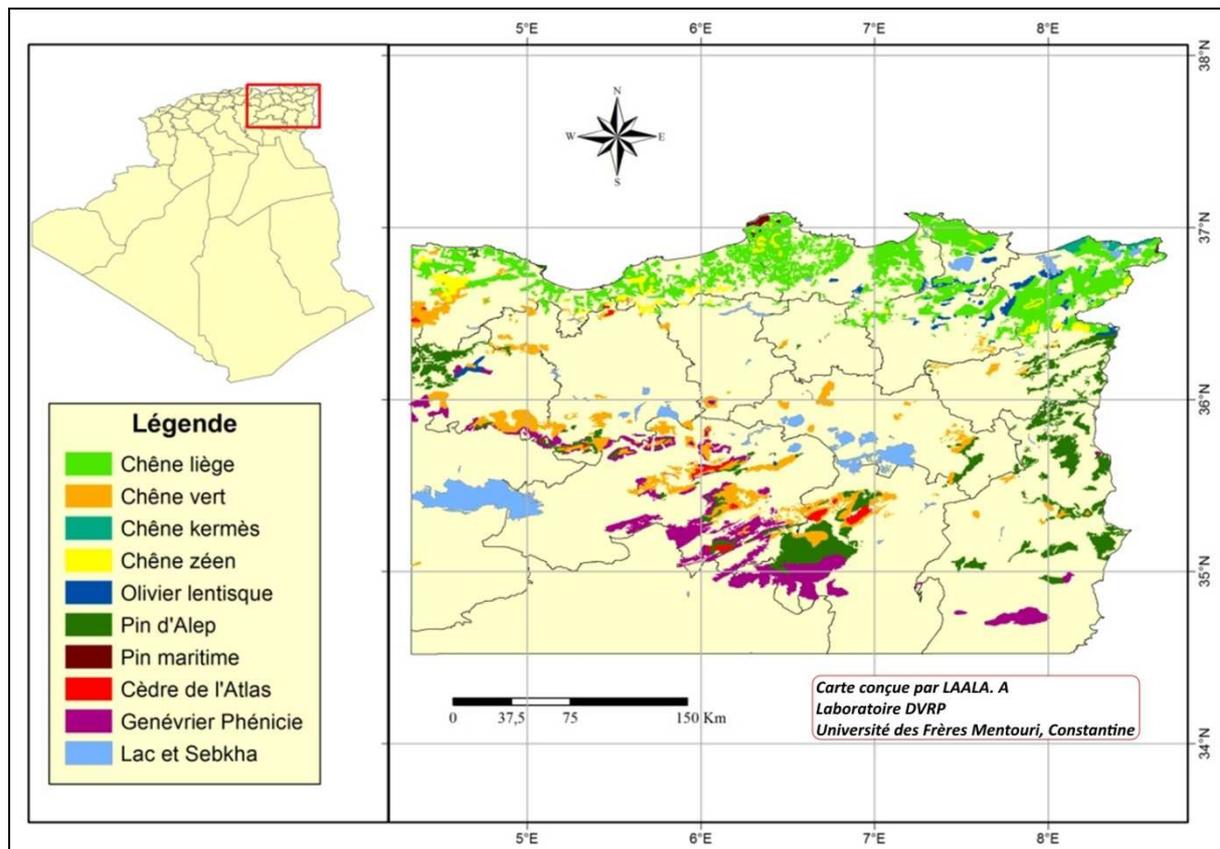


Fig.30 : Principaux écosystèmes forestiers de l'Est algérien (source du fond : carte internationale du tapis végétal 1/1000000 feuilles Tunis-Sfax et Alger)

Parmi les feuillus, le chêne liège est le plus dominant, sa superficie représente 35.89% de la surface totale des forêts de l'Algérie orientale (fig.30). Concernant les résineux, le pin d'Alep occupe le maximum des superficies avec un pourcentage égale à 20.77% de la surface forestière totale. L'essence la moins répandue au niveau de l'Est algérien est celle de pin maritime avec une faible surface forestière égale à 5577,81 ha (fig.31).

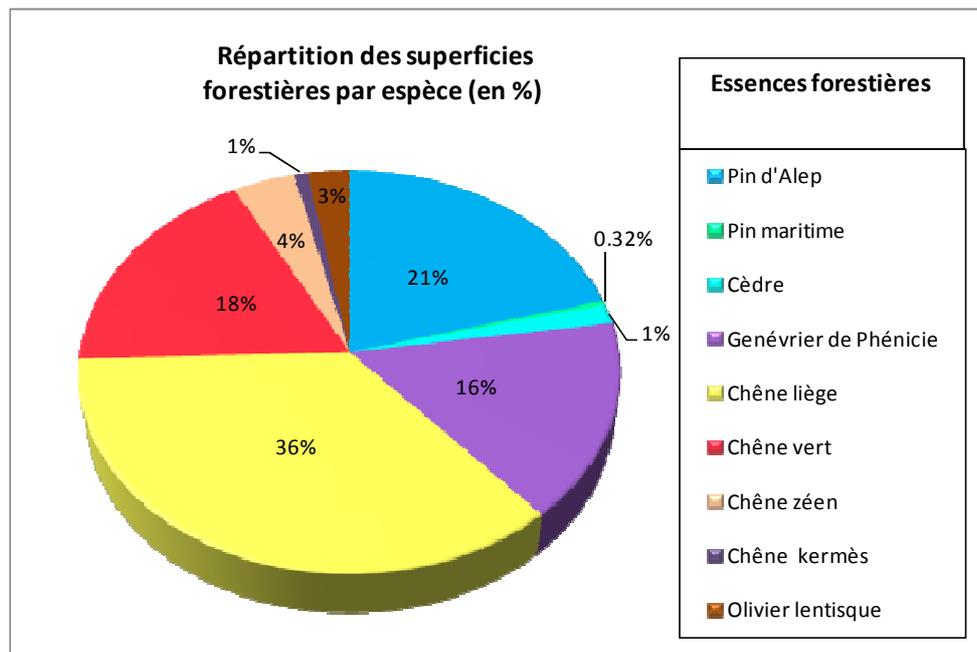


Fig.31 : Superficies (en pourcentage) des aires de répartition de différentes essences forestières de l'Est algérien

2. Caractéristiques topographiques des massifs forestiers de l'Est algérien :

Pour bien illustrer la répartition spatiale du patrimoine forestier de l'Est algérien, on a essayé de décrire les composantes du relief (altitude, pente, exposition) de chaque écosystème forestier qui sont un complément d'information sur les milieux physiques sur lesquels se développent ces essences forestières.

2.1. L'altitude :

Le croisement de la carte de végétation forestière avec la carte d'altitude a montré que la classe modale d'altitude pour les écosystèmes forestiers de l'Est algérien est celle de 900 à 1200m qui s'étend sur une superficie de 23.5% de la surface forestier totale. Ainsi, la classe d'altitude (1800-2100m) caractérise l'Est de la forêt d'Ouled Yagoub, le Centre de la forêt de Chelia (wilaya de Khenchela), quelques hectares de la forêt de Djebel Zellatou et de Belezma (wilaya de Batna), de Babor et Tababor (wilaya de Sétif) (fig.32). Les terrains à hautes altitudes (2100-2400m) sont également présents mais restent largement minoritaires, ils occupent seulement 0.03% de la totalité des surfaces forestières étudiées. C'est le cas par exemple de la forêt de Chelia (Wilaya de Khenchela).

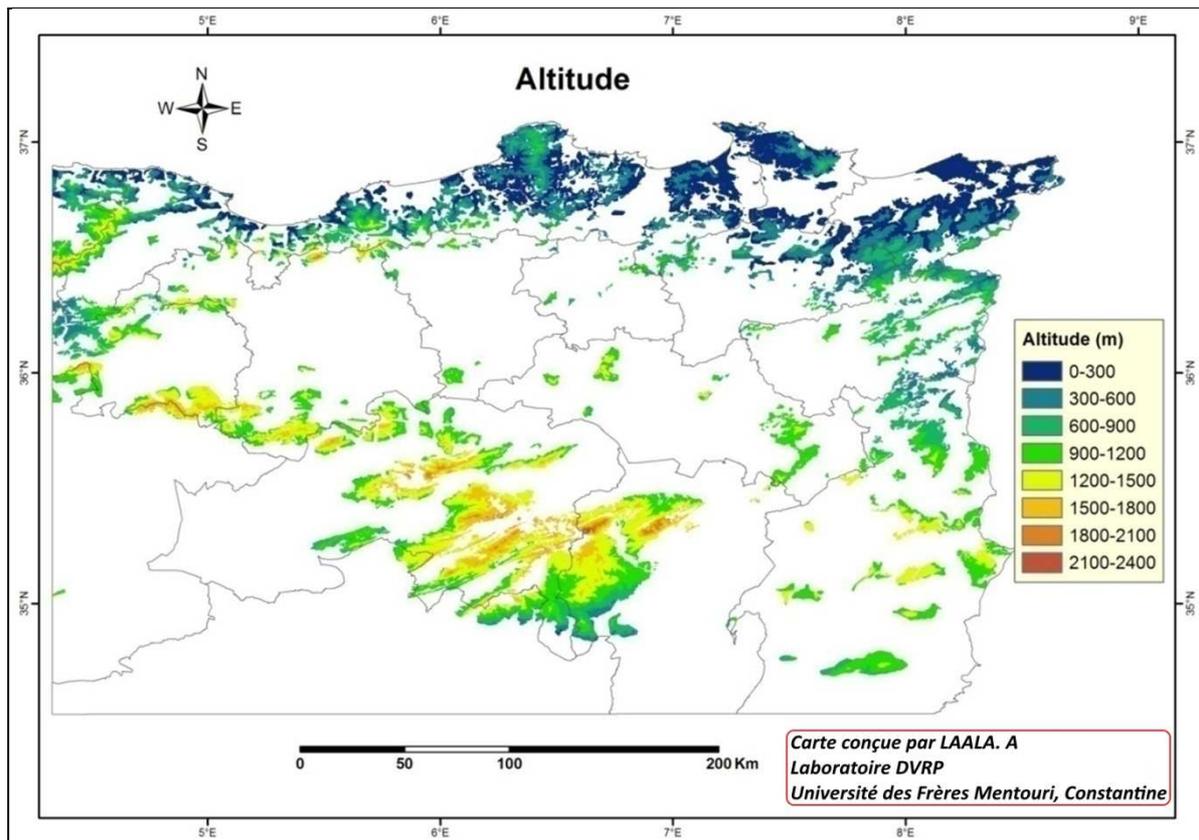


Fig.32 : Carte des altitudes des forêts de l’Est algérien

La boîte à moustache illustre bien la variabilité des limites altitudinale pour les essences forestières de l’Est algérien (fig.33). Elle indique la moyenne \pm l’écart type (la moyenne est représentée par un tracé rouge au milieu des boîtes), la longueur des moustaches correspond aux valeurs minimales et maximales de la variable.

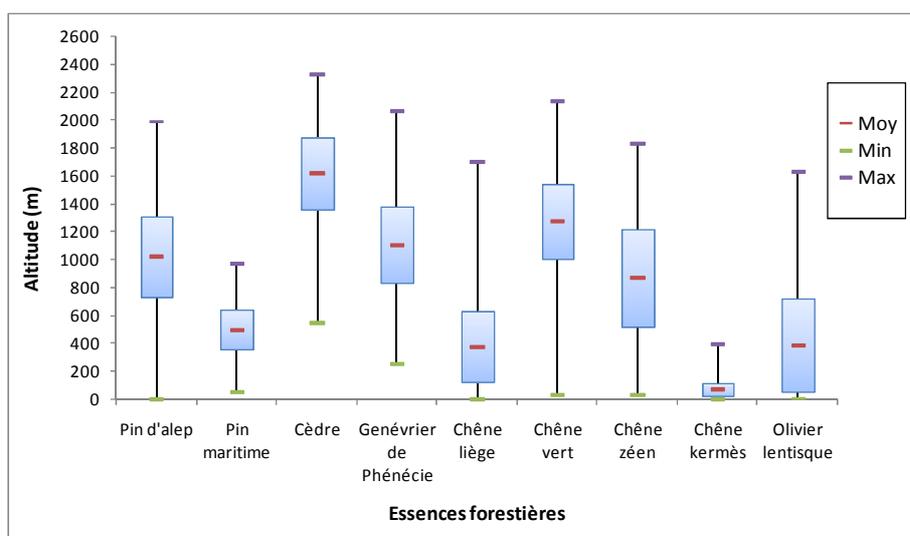


Fig.33 : Boîte à moustache détaillant la variation de l’altitude au niveau de différents types des forêts

C'est d'abord le pin d'Alep, qu'on rencontre partout, en plaine et sur les montagnes, jusqu'à 1983m d'altitude, puis le chêne vert qui est caractérisé par une amplitude altitudinale remarquable, il se trouve au niveau des basses et hautes altitudes, il s'élève jusqu'à 2126m, tandis que le chêne liège n'est plus présent au-dessus de 1692m. Concernant le cèdre, il est essentiellement cantonné les zones montagneuses et il peut monter jusqu'à 2322m (fig.33).

Il convient de noter aussi que les massifs de Chêne zéen colonisent des terrains dont l'altitude peut sensiblement s'écarter de la moyenne ($867 \pm 348m$), ce qui montre qu'il est relativement indifférent à ce paramètre topographique. Par contre, le chêne kermès occupe des terrains caractérisés par des valeurs d'altitude regroupées autour de la valeur moyenne (faible écart type $68 \pm 48m$) (fig.33). Cela peut être expliqué par le faible échantillon de la série statistique qui représente les surfaces (en pixels) occupées par cette espèce.

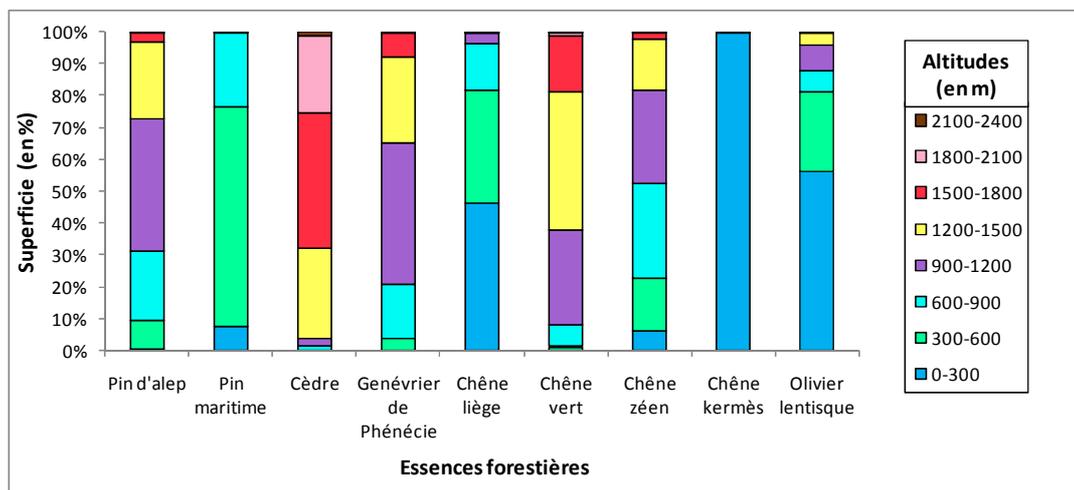


Fig.34 : Superficies (en %) des classes d'altitudes au niveau des forêts de l'Est algérien

Pour le chêne vert, la classe d'altitude préférée est celle qui oscille entre 1200 à 1500m tandis que la classe (1500-1800m) est la classe préférentielle pour le cèdre, elle caractérise 42% de sa superficie totale (fig.34). D'après la figure 35, on remarque que 33% des superficies des résineux se trouvent dans une tranche altitudinale de haute altitude variant de 1200 à 2400m, alors que seulement 20% des feuillus est localisée dans cette classe.

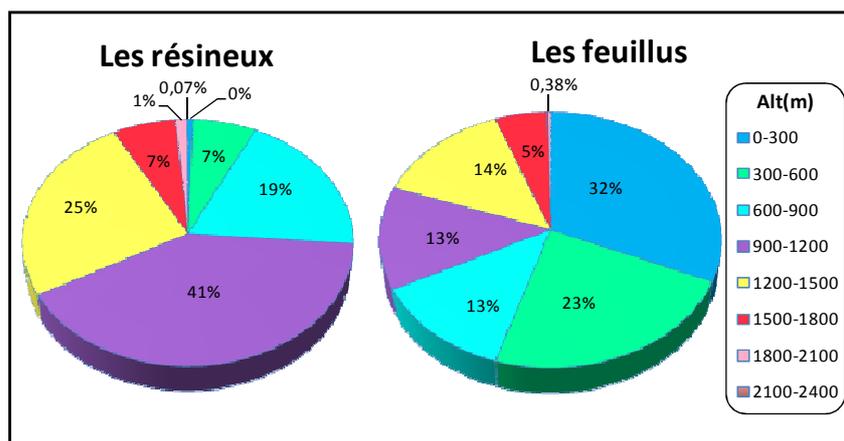


Fig.35: Superficies (en %) des classes d'altitudes au niveau des forêts de résineux et de feuillus

2.2. Pentés :

La pente revêt une importance primordiale pour la compréhension du paysage, elle régleme la localisation des activités humaines et donc la pression humaine sur les forêts. Elle nous permet de caractériser les aspects du relief et les différentes inclinaisons des versants. Nous avons retenu 7 classes de pente illustrées dans le tableau 7 :

Tab.7 : Classes de pente

| Classe de pente (en %) | Degrés de pente (en °) | Terminologie |
|------------------------|------------------------|-------------------|
| de 0 à 5 | 0 à 3 | Pente très faible |
| de 5 à 10 | de 3 à 5 | Pente faible |
| de 10 à 15 | de 5 à 8,5 | Pente modérée |
| de 15 à 30 | de 8,5 à 16,5 | Pente forte |
| de 30 à 45 | de 16,5 à 24 | Pente très forte |
| de 45 à 70 | de 24 à 35 | Pente extrême |
| > 70 | > 35 | Pente abrupte |

On peut constater que les forêts de l'Est algérien sont minoritaires sur les plaines et les plateaux où la pente varie de 0 à 5%. Cette classe caractérise 4.4% de la surface totale des forêts étudiées. Ainsi, les terrains qui ont une déclivité supérieure à 70% (pentes abruptes) s'étendent uniquement sur 2.7% de la surface totale du patrimoine forestier de l'Algérie orientale. C'est le cas de la forêt de Babor et Tabobor (Sétif), Melaha (Béjaia), l'Est de la forêt de Guerouche, la forêt de Maida et Beni Yadjis (Jijel). En revanche, la classe modale est celle des pentes fortes (15-30%) qui caractérise 36.1% de la superficie totale des forêts (fig.36).

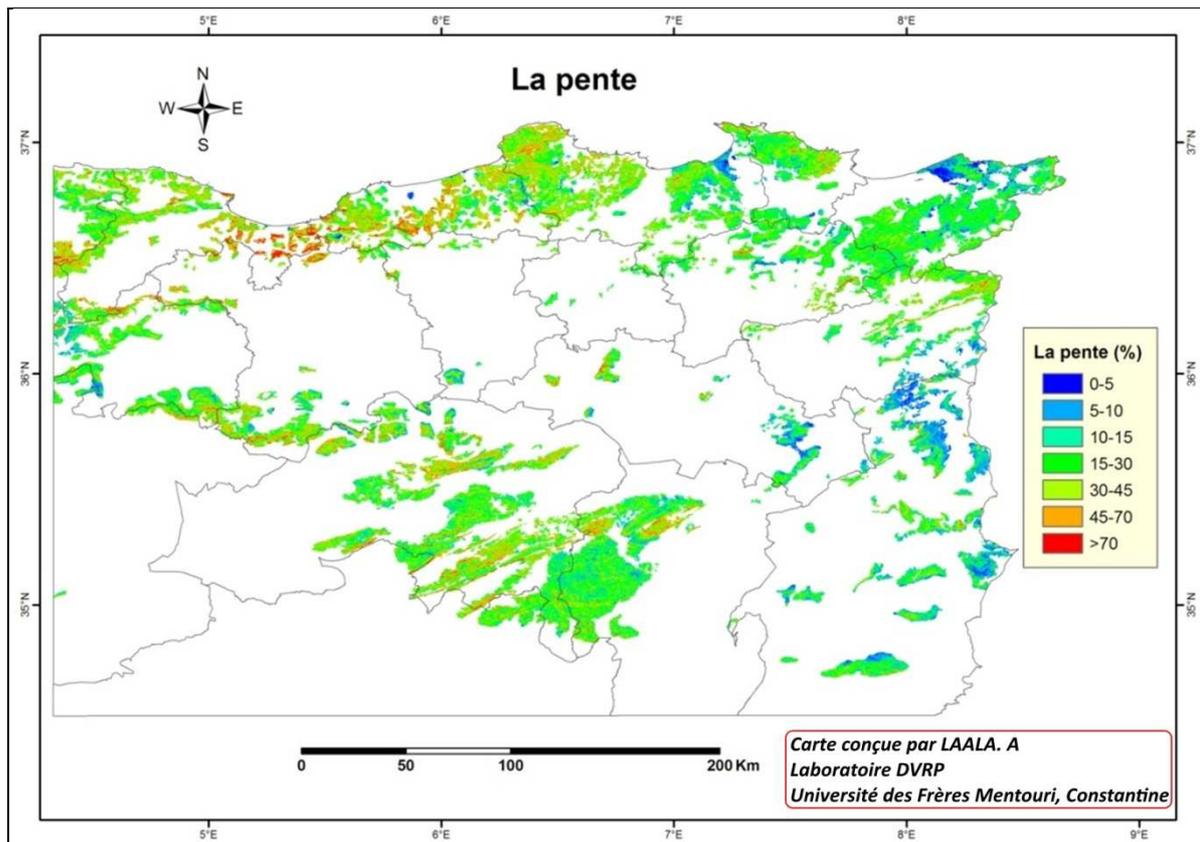


Fig.36 : Carte des pentes des forêts de l'Est algérien

Au niveau des essences forestières, on peut remarquer que 32.6% de la surface forestière totale occupée par le cèdre est caractérisé par des pentes extrêmes, alors que 8.4% de sa superficie est localisé dans des terrains à pente abrupte (fig.37). La classe majoritaire pour le reste des essences forestières est celle des pentes fortes (15 à 30%).

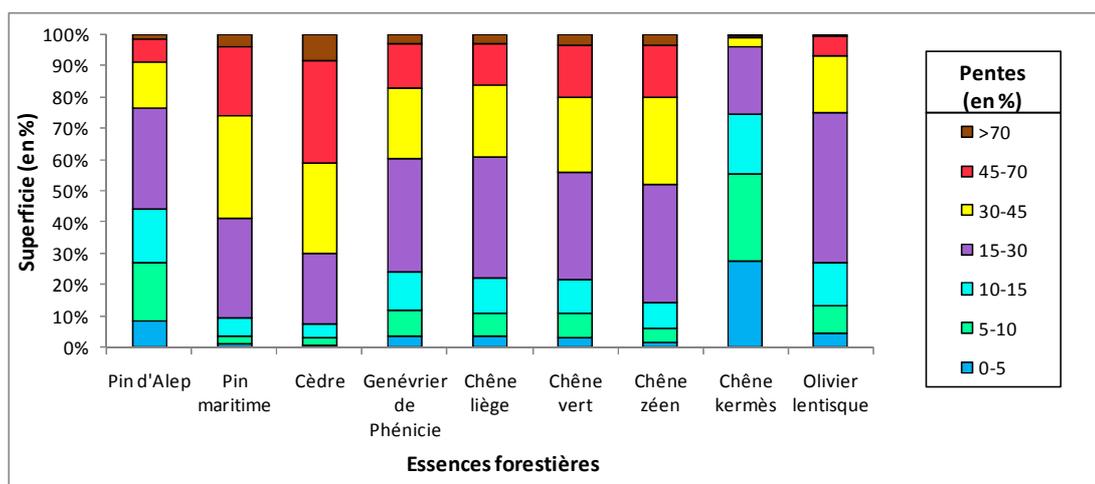


Fig.37 : Superficies (en %) des pentes des forêts de l'Est algérien

2.3. L'exposition :

L'exposition identifie la direction de la pente. Elle est mesurée dans le sens horaire, de 0° (plein Nord) à 360° (de nouveau plein Nord), formant ainsi un cercle complet de 8 classes qui décrivent l'orientation des parcelles forestières.

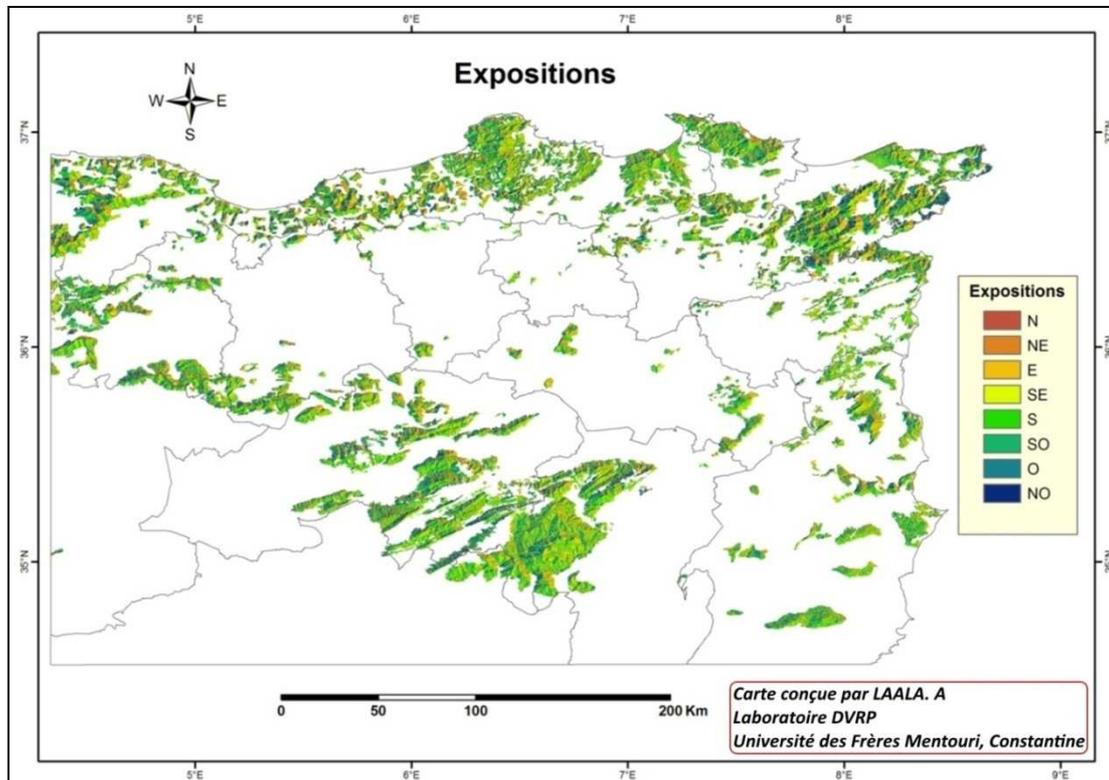


Fig.38 : Carte des expositions des forêts de l'Est algérien

Concernant l'orientation, les forêts de l'Est algérien se localisent sur des terrains caractérisés par une diversité des expositions avec une légère préférence de l'orientation Nord et Sud (fig.38, fig.39).

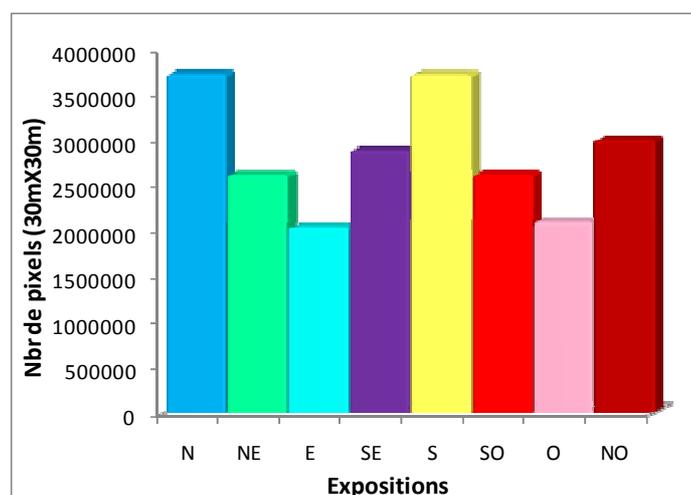


Fig.39 : Répartition des expositions au niveau des forêts de l'Est algérien

La répartition des superficies forestières en fonction des expositions décroît dans l'ordre suivant : Nord > Sud > Nord Ouest > Sud Est > Sud Ouest > Nord Est > Ouest > Est

Concernant les essences forestières, ils colonisent les 8 expositions avec une légère préférence de l'orientation Sud pour le pin d'Alep (16.50%), le genévrier de Phénicie (18.7%), le chêne vert (17.3%) et le cèdre (18.7%) (fig.40). Le reste des écosystèmes forestiers dominant légèrement les versants exposés vers le Nord.

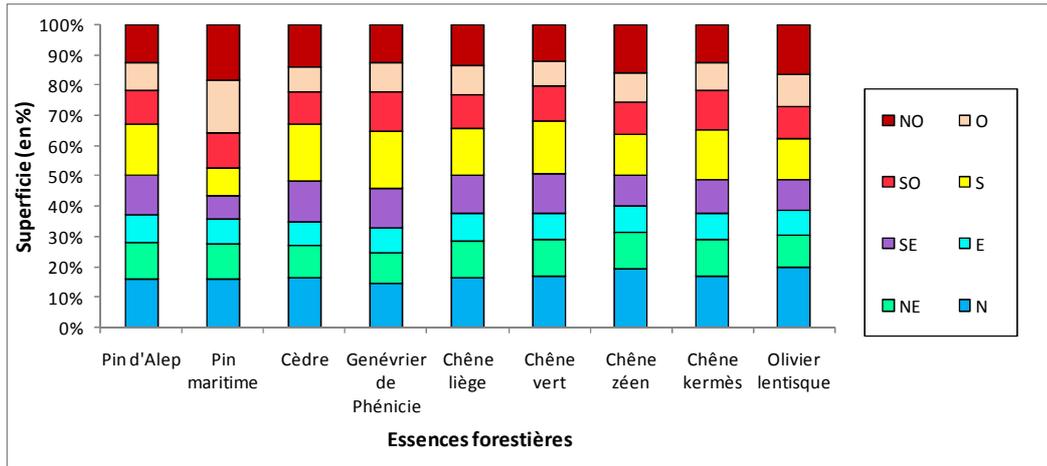


Fig.40 : Superficies (en %) des expositions occupées par les écosystèmes forestiers de l'Est algérien

Discussion:

Le patrimoine forestier couvre près de 18.56% de la surface totale de l'Est algérien, il est composé de plusieurs écosystèmes forestiers réparties entre les feuillus et les conifères. Ces deux écosystèmes sont caractérisés par une très large fourchette altitudinale, ils colonisent les plaines et s'élèvent en altitude pour occuper les hautes montagnes jusqu'à un point culminant de 2322m qui représente leur limite d'altitudinale supérieure. Les résineux se trouvent à plus haute altitude que les feuillus mais la majorité des superficies de ces deux écosystèmes se localisent sur des pentes fortes (15-30%) avec bien sûre une certaine variabilité entre les espèces. Les terrains en dépression ou horizontaux de très faibles pentes sont moins occupés par ces forêts. Concernant l'exposition, on peut dire que les écosystèmes forestiers étudiés occupent toutes les expositions des versants avec une légère préférence de direction Nord et Sud. Le versant Nord est le versant ombragé et humide caractérisé par de conditions climatiques plus clémentes et une pluviométrie intéressante. Les massifs forestiers qui préfèrent cette orientation bénéficient de la plus courte exposition au soleil, au contraire les forêts qui colonisent le versant Sud sont exposées aux vents chauds et secs « Sirocco » et un ensoleillement très important. Dans ce cas, la température est plus élevée et de ce fait la végétation forestière monte plus haut qu'en versant Nord.

L'essence prédominante dans l'Est algérien est le chêne liège qui occupe une superficie de 35.89% de la surface totale des forêts de l'Algérie orientale. Elle se localise principalement dans les zones sub-humides et humides où l'altitude moyenne est de 374 ± 250 m. Il colonise des terrains plats comme il peut se retrouver dans les hautes altitudes (1691m). Selon Boudy (1955), le chêne liège est une essence de plaine et de moyenne montagne qui peut monter en Afrique du Nord de 0 à 1300 mètres.

En ce qui concerne le chêne vert, l'altitude moyenne occupée par cette essence au niveau de l'Est algérien est 1272 ± 264 m et qui peut même atteindre 2126m. Quezel, (1976), signale que le chêne vert en Algérie apparaît à partir de 400 m d'altitude et monte jusqu'à 1700 m. Dans les Aurès, ses limites altitudinales oscillent entre 1200 et 1900 m et entre 1500 et 2200 m dans l'Atlas Saharien. Il peut supporter aussi bien les chaleurs des étés que le froid des hautes montagnes algériennes.

Pour les résineux, le pin d'Alep qui est considéré comme une essence thermophile se cantonne principalement dans les zones semi- arides et arides. Il préfère une tranche altitudinale variant de 1020 ± 286 m et il peut monter en altitude jusqu'à la limite de 1983 m. Kadik (1987)

signale que le pin d'Alep atteint fréquemment 1500 m et même 2000 m d'altitude dans l'Atlas saharien, et il trouve un optimum de développement à des altitudes allant de 600 à 1200 m dans le Tell et de 900 à 1400 m dans le Sud saharien.

Concernant le cèdre, il colonise les terrains caractérisés par des altitudes moyennes de 1619 ± 258 m, comme il peut monter jusqu'au 2322 m. Ce résultat semble presque en accord avec celle signalé par Aussenac et Guehl (1990) qui montrent que le cèdre dans son aire d'origine pousse à des altitudes variant de 1400 à 2200 m, ses limites supérieures et inférieures diffèrent d'une cédraie à l'autre en fonction des conditions climatiques du relief. Ainsi, Abdessemed (1982) signale que les limites inférieures du cèdre en Algérie se situent sur les versants méridionaux vers 1600m. La limite supérieure est de 2200m pour les deux versants (Nord et Sud) bien que des individus isolés arrivent jusqu'à 2300m.

3. Variabilité spatio-temporelle des températures au niveau de l'Est algérien :

3.1. Variabilité temporelle :

3.1.1. Les températures minimales annuelles :

L'anomalie calculée pour les températures minimales varie en fonction de l'année analysée et de la wilaya concernée. La plus forte anomalie négative est enregistrée à la wilaya de Msila durant l'année 2005, alors que celle positive a été affichée au niveau de la wilaya de Constantine durant l'année 1997. Le nombre des années froides fluctue entre 12 et 17 années avec un maximum enregistré au niveau de la wilaya d'Annaba, Constantine, Bordj Bou-Argeridj, Batna et un minimum affiché dans la wilaya d'El-Taref et Msila. On remarque également que les wilayas de Bordj Bou-Argeridj, Constantine, El-Taref et Guelma ont connu une période froide de cinq ans consécutifs (2007-2011) où les températures annuelles minimales sont inférieures à la normale calculé sur la période de 30 ans. Ainsi, la période 1982-1986 est une période froide pour Bejaia, Souk-Ahras, Tébessa, Bordj Bou-Argeridj, Skikda et Oum El-Bouaghi (fig.41).

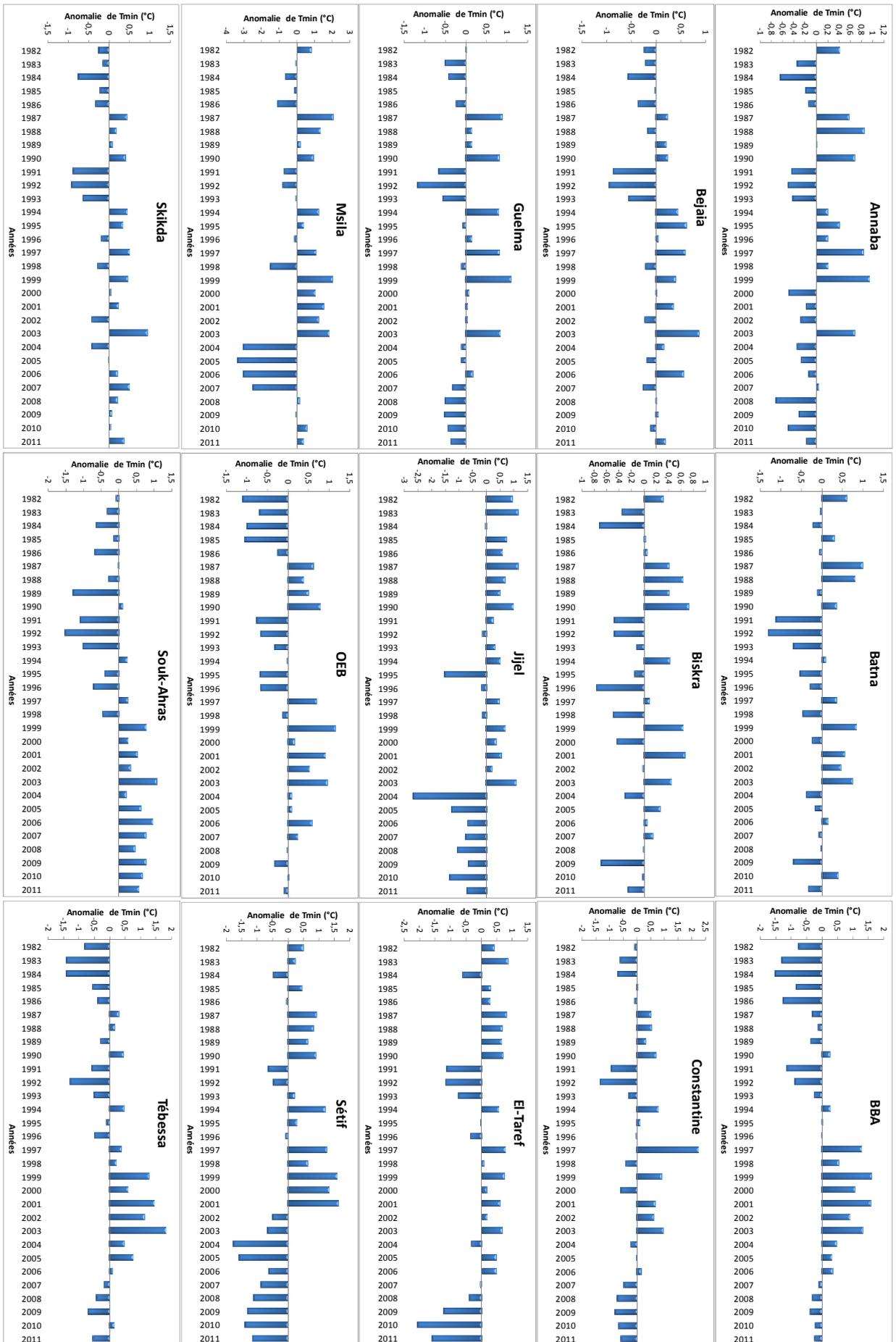


Fig.41 : Anomalie des températures minimales au cours de la période 1982-2011

3.1.2. Les températures maximales annuelles :

L'histogramme d'anomalie des températures maximales reflète bien la grande variabilité interannuelle de ce paramètre dans l'Est algérien (fig.42). Selon la wilaya étudiée, le nombre des années chaudes varie de 14 à 19 années. La période 2005-2011 est une période chaude pour 60% des wilayas analysées (Batna, Constantine, Sétif, Bordj Bou-Argeridj, Biskra, Msila, Skikda, Guelma et Jijel) où les températures annuelles maximales peuvent gagner 1.9°C, ce qui nous indique le réchauffement notable de ces régions durant les sept dernières années de la période d'étude.

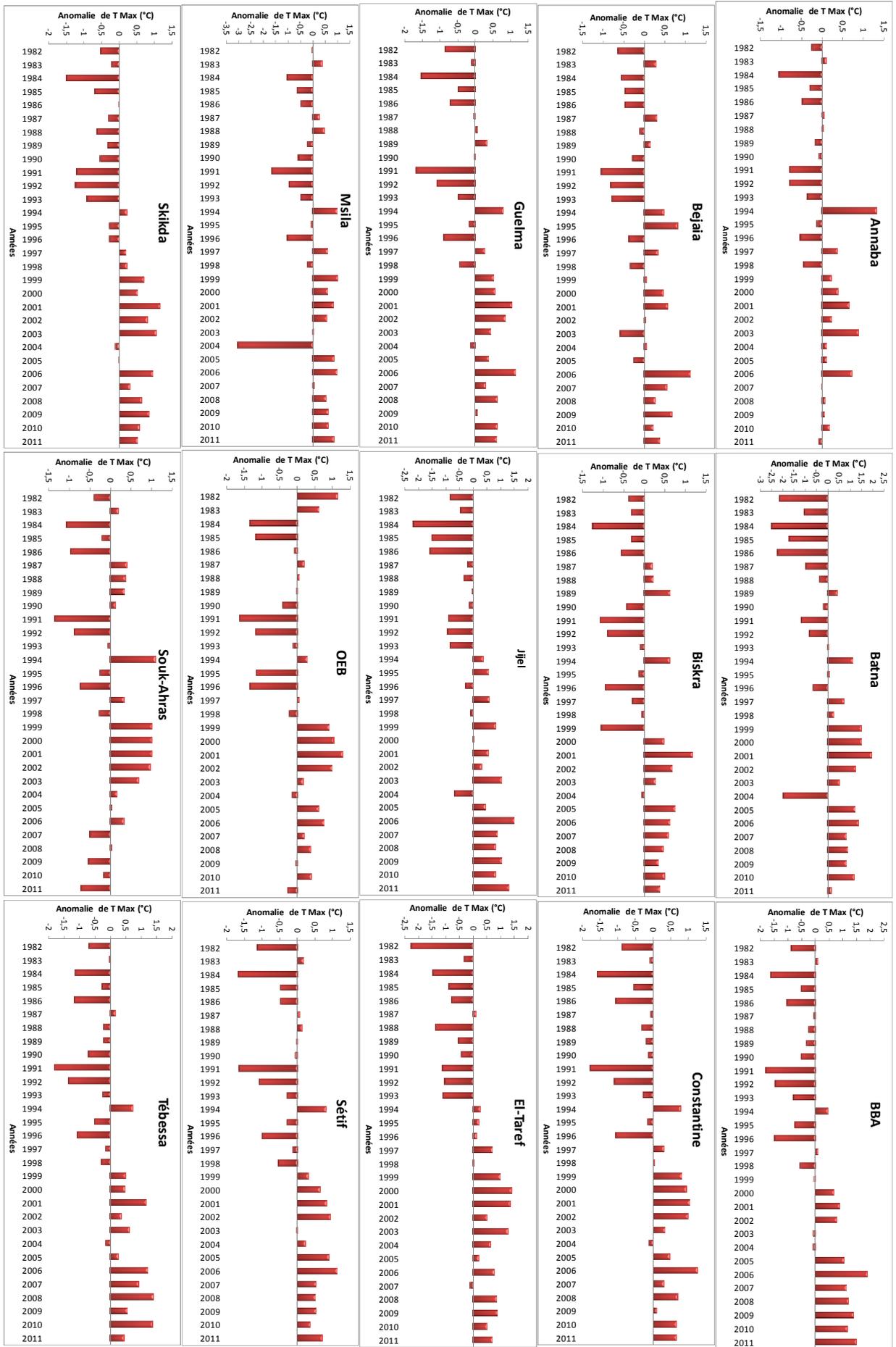


Fig.42 : Anomalie des températures maximales au cours de la période 1982-2011

La figure 43 illustre l'intensité des années froides et chaudes pour la période 1982-2011. La taille des sphères est proportionnelle à l'intensité de la période froide ou chaude : plus les sphères sont petites plus l'intensité est faible.

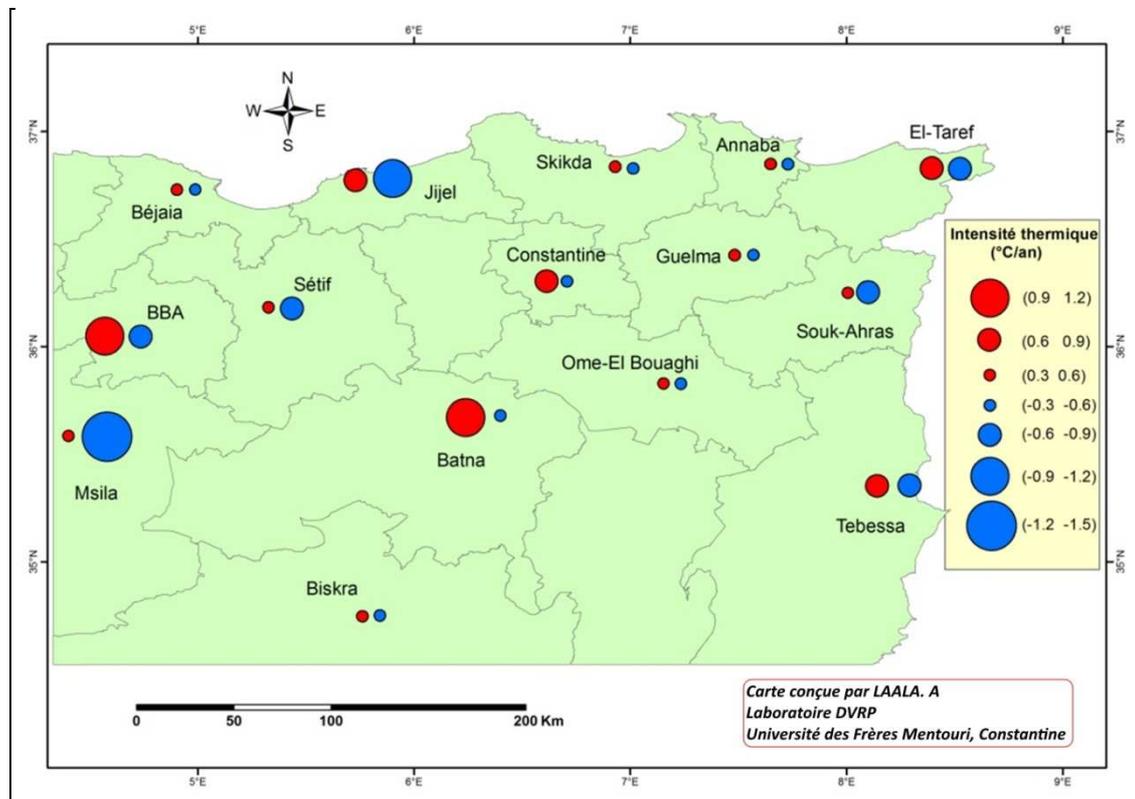


Fig.43 : Intensité des années froides et chaudes calculé pour la période 1982-2011

Sur la base du graphique ci-dessus, on remarque que :

- Six wilayas de l'Est algérien affichent des périodes de réchauffement d'une intensité supérieur à 0.6°C/an. Celles de Batna et Bordj Bou-Arredidj présentent des périodes chaudes très intenses (0.9°C/an), avec un poids thermique respectivement de l'ordre de 15.8°C et 12.2°C. Le reste des wilayas marque des périodes chaudes avec une intensité comprise entre 0.3 et 0.6°C/an.

- La période froide la plus intense (1.4°C/an) est enregistrée au niveau de la wilaya de Msila, elle est tout à fait exceptionnelle par sa durée (12 ans) et son poids (-16.9°C). La wilaya de Jijel marque aussi une période froide avec un poids égal à -11.2°C enregistrée durant 13 ans, soit une intensité de -0.9°C/an. Les autres wilayas affichent des périodes de refroidissement d'une intensité moins importante (inférieure à -0.9°C/an).

Il est également constaté que malgré la durée remarquable des années froides enregistrée à la wilaya d'Annaba (17ans), elle apparaît peut intense (-0.4°C/ans), ce qui explique que le poids de cette période est relativement faible (-6.1°C).

3.1.3. Tendances thermiques :

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus de l'analyse des tendances thermiques calculée à partir des données annuelles et saisonnières sur une période de 30 ans. La cartographie de ces tendances permet de créer une image régionale de l'évolution de la température à l'Est algérien entre 1982 et 2011.

3.1.3.1. Tendances des températures annuelles :

A)- Température minimale annuelle :

D'après la figure 44, on remarque une variabilité spatiale de la tendance des températures minimales annuelles calculé pour la période 1982-2011.

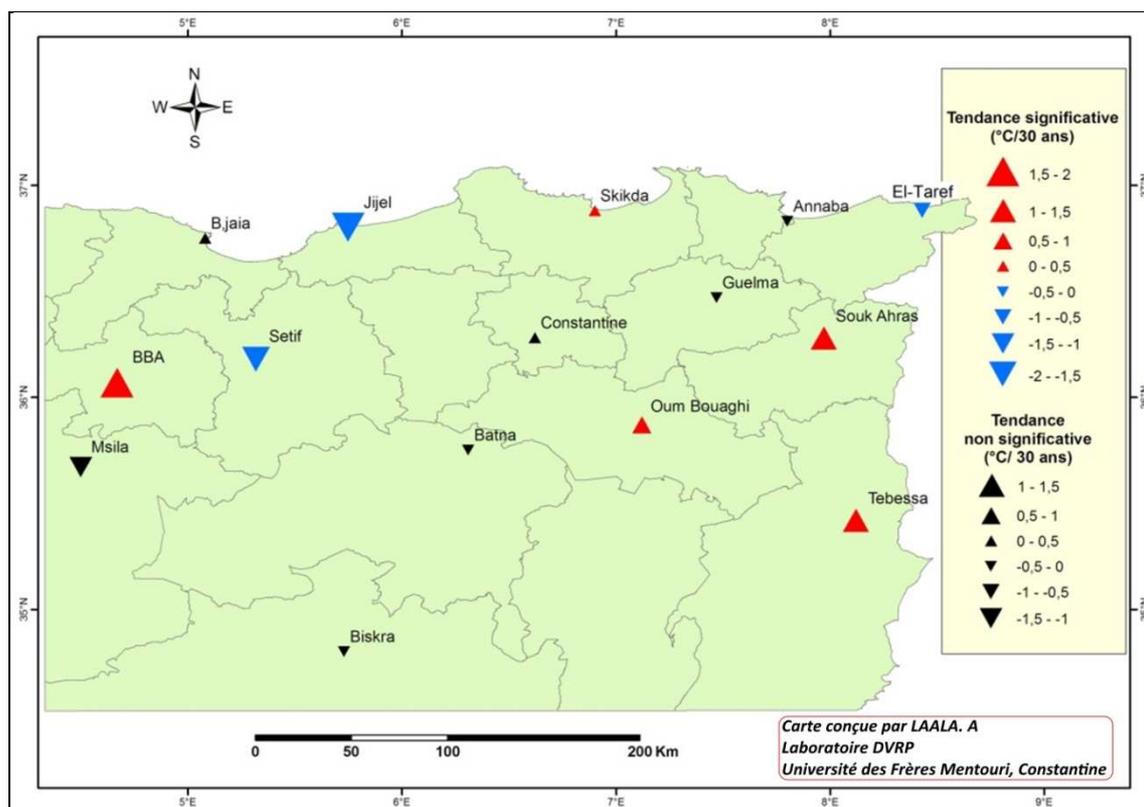


Fig.44: Tendances des températures minimales annuelles (période 1982-2011)

Concernant les tendances significativement positives, elles sont observées au niveau de 5 wilayas (Bordj Bou-Arredj, Souk-Ahras, Tébessa, Oum El-Bouaghi et Skikda). La tendance maximale est affichée pour la wilaya de Bordj Bou-Arredj (1.7°C/30 ans), alors que la

minimale est enregistrée pour la wilaya de Skikda ($0.5^{\circ}\text{C}/30$ ans). Pour les tendances significativement négatives, elles sont affichées uniquement au niveau de trois wilayas (El-Taref, Sétif et Jijel) avec des tendances respectivement de $-0.8^{\circ}\text{C}/30$, $-1.5^{\circ}\text{C}/30$ et $-2^{\circ}\text{C}/30$.

B)- Température maximale annuelle :

Un réchauffement remarquable a été enregistré dans toutes les wilayas de l'Est algérien où les tendances des températures maximales annuelles, calculées sur la période (1982-2011), sont toutes à la hausse (fig.45). L'intensité de ce réchauffement varie spatialement d'une wilaya à l'autre. Il fluctue entre $0.7^{\circ}\text{C}/30$ ans au niveau d'Annaba et $3.03^{\circ}\text{C}/30$ ans pour la wilaya de Batna. Les tendances non significatives sont affichées uniquement au niveau de deux wilayas: Souk-Ahras et Oum-El Bouaghi.

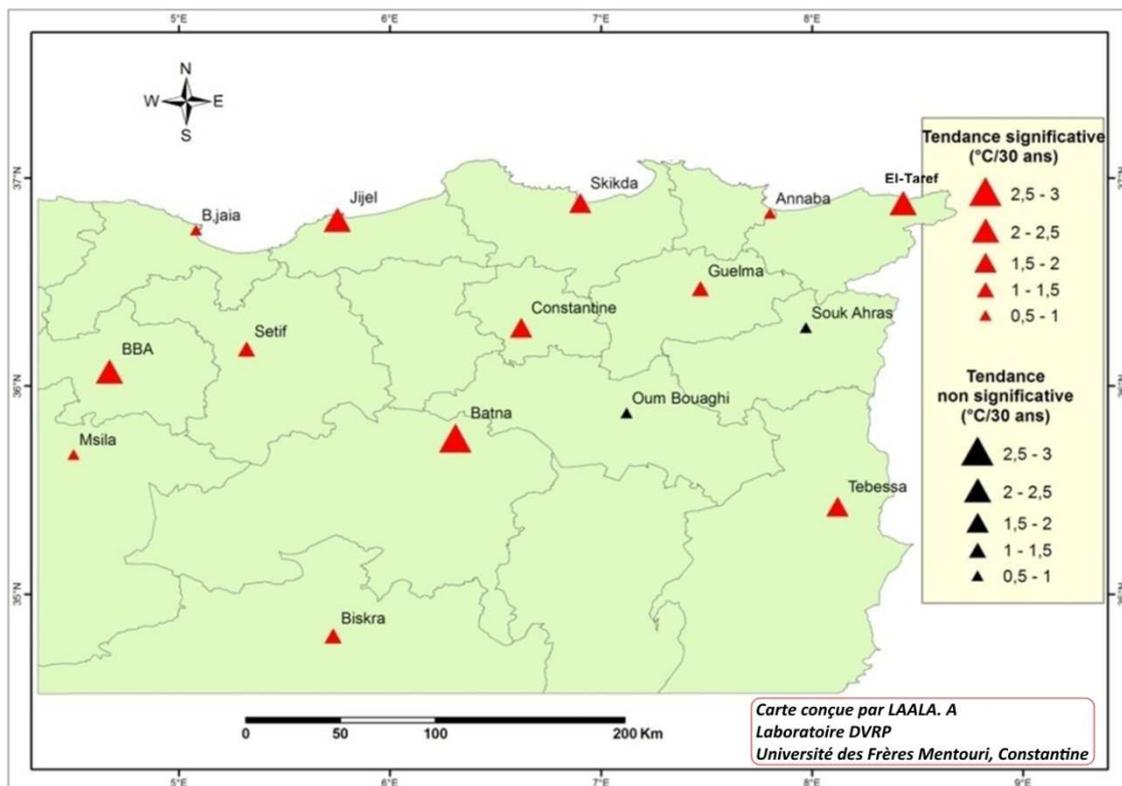


Fig.45 : Tendances des températures maximales annuelles (période 1982-2011)

La lecture des figures (fig.44 et 45) montre que les températures maximales annuelles connaîtraient une hausse plus prononcée que les températures minimales annuelles durant la période 1982-2011.

C)- L'amplitude thermique annuelle :

Concernant ce paramètre, il marque une hausse dans la majorité des wilayas avec une valeur minimale de 0.13°C/30ans enregistrée à la wilaya de Tébessa et une valeur maximale de 4.2°C/30 ans affichées au niveau de la wilaya de Jijel. Par contre la wilaya de Souk-Ahras est la seule qui présente une baisse significative de l'amplitude thermique annuelle (-1°C/30 ans) (fig.46).

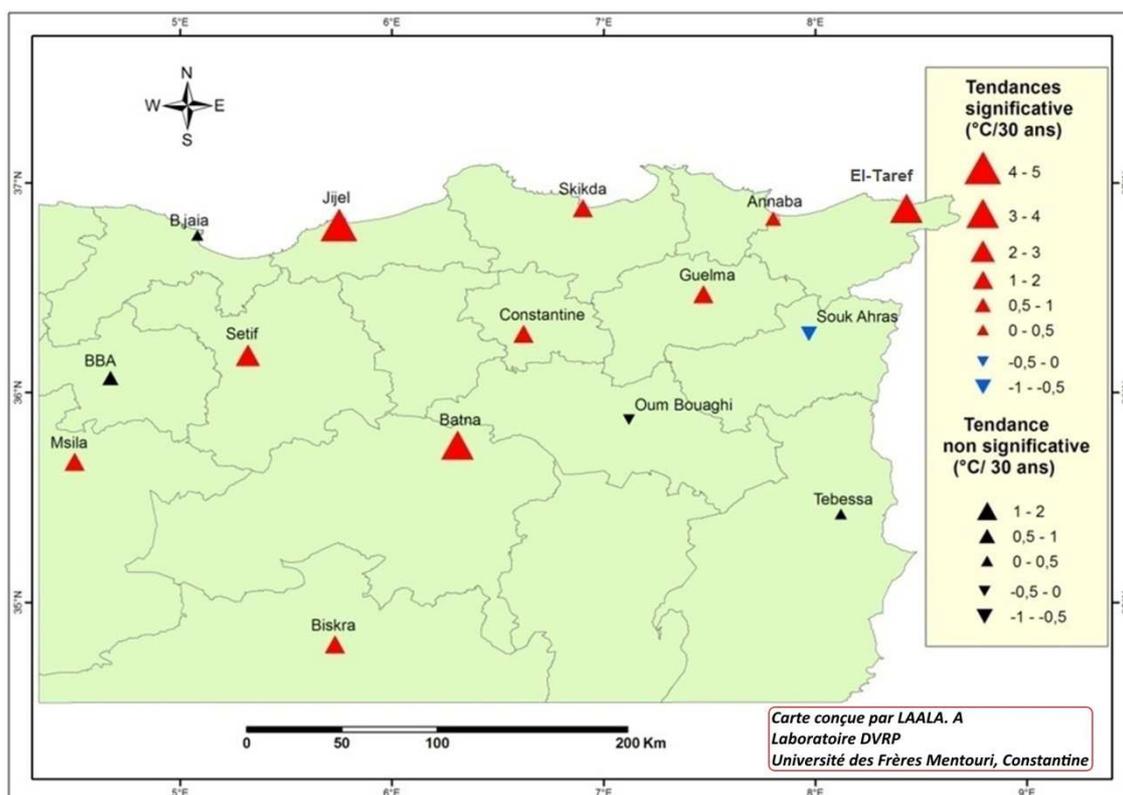


Fig.46: Tendances des amplitudes thermiques annuelles (période 1982-2011)

3.1.3.2. Tendances des températures saisonnières :

A)- Température minimale saisonnière :

La figure 47 illustre la cartographie des tendances des températures minimales saisonnières pour la période 1982-2011. On constate une forte variation saisonnière de ces tendances, allant de -2.7°C/30 ans à plus de 2.5°C/30 ans. Les tendances non significatives sont affichées, pour chaque saison, au niveau des sept wilayas dont celle de Batna et Msila présentent saisonnièrement des tendances non significative.

Soulignons également que la wilaya de Jijel affiche durant les quatre saisons de l'année une tendance significative à la baisse pour les températures minimales saisonnières. Au contraire, les wilayas de Bordj Bou-Arredj et Tébessa montrent toujours des tendances

significatives à la hausse. Le reste des wilayas marque une alternance entre les tendances significatives et non significatives à travers les saisons.

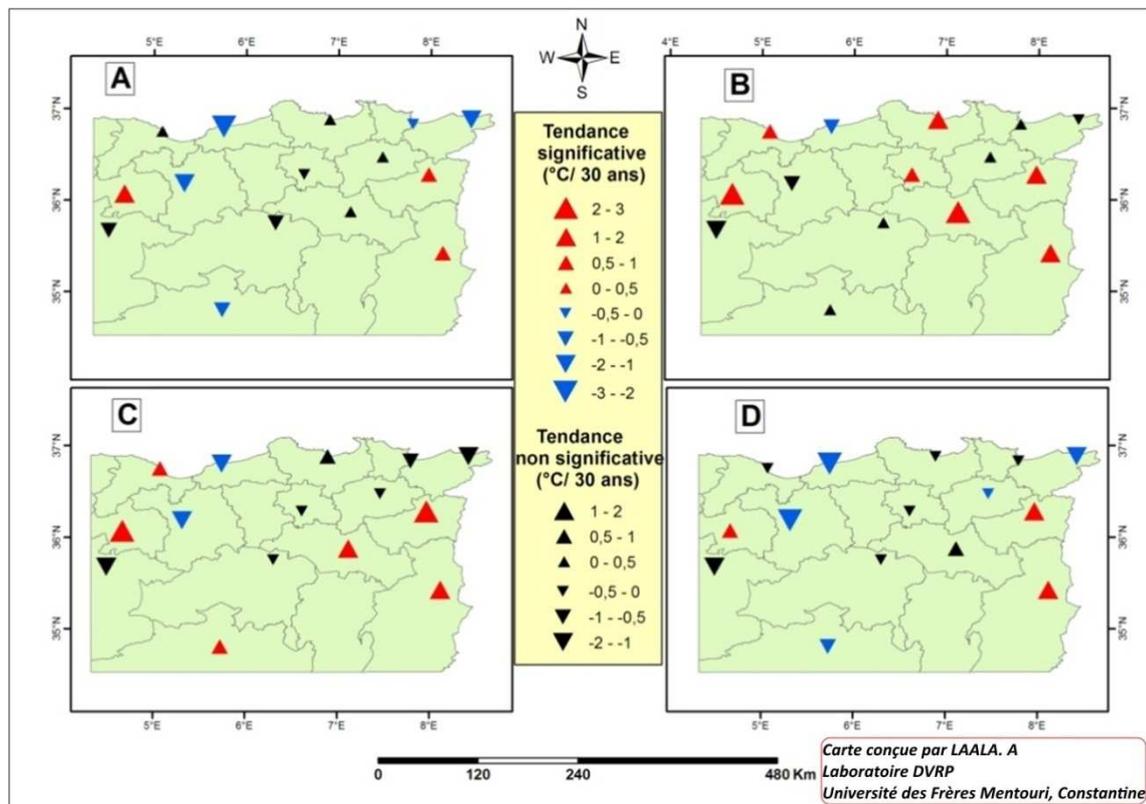


Fig.47: Tendances des températures minimales de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D)

En termes de saison, le refroidissement est très marqué en période hivernale et automnale (notamment pour la wilaya de Jijel) où les températures minimales diminuent globalement de $-2.5^{\circ}\text{C}/30$ ans. Cette diminution semble liée à l'année 2005, plutôt plus froide et marquée par une abondance des valeurs négatives durant la saison hivernale.

B)- Température maximale saisonnière :

L'analyse de la figure 48 montre que le nombre des wilayas qui affichent des tendances non significatives est plus élevé durant la saison automnale par rapport aux autres saisons de l'année.

Les températures maximales sont à la hausse pour toutes les wilayas analysée sauf pour celle de Msila qui affiche une tendance négative, significative pour l'hiver et non significative au seuil de 5% pour l'automne. Le réchauffement le plus important est observé durant le printemps dans la wilaya de Batna ($4.1^{\circ}\text{C}/30$ ans) et durant l'été pour la wilaya de Jijel ($3.5^{\circ}\text{C}/ 30$ ans). La

hausse des températures maximales de la saison estivale est de 0,5 °C dans les wilayas d’Annaba et Bejaia alors qu’elle se situe entre 3.2°C et 3,5°C pour les wilayas de Batna et Jijel (fig.48).

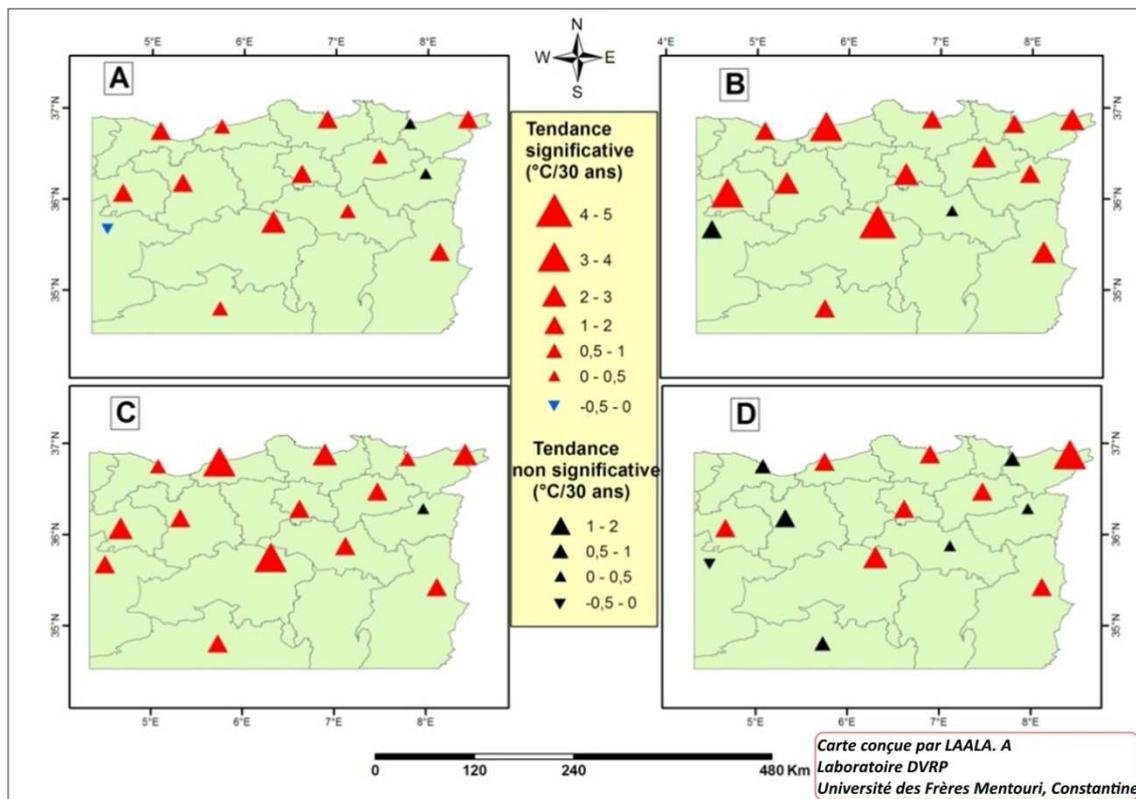


Fig.48 : Tendances des températures maximales de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D)

Par une simple comparaison entre la figure 47 et 48, il ressort que les températures maximales saisonnières ont connu une augmentation plus prononcée que les températures minimales au cours de la période 1982 à 2011 et que le nombre des wilayas ayant des valeurs de tendance significatives au seuil de 5% pour les températures maximales est plus grand que pour les températures minimales.

C)- Amplitudes thermiques saisonnières :

L’examen de la carte ci-dessous montre que la saison estivale présente des tendances très importantes : 5.2°C/30 ans au niveau de la wilaya de Jijel, 3.6°C/30 ans dans la wilaya d’El-Taref, suivie de la saison automnale avec des tendances de l’ordre de 4°C. La wilaya de Souk-Ahras présente toujours une tendance à la baisse de ce paramètre, significative pour l’été et l’automne et non significative pour l’hiver et le printemps. Ainsi, Bejaïa affiche des tendances positives durant l’hiver, le printemps et l’automne et une tendance négative pour l’été.

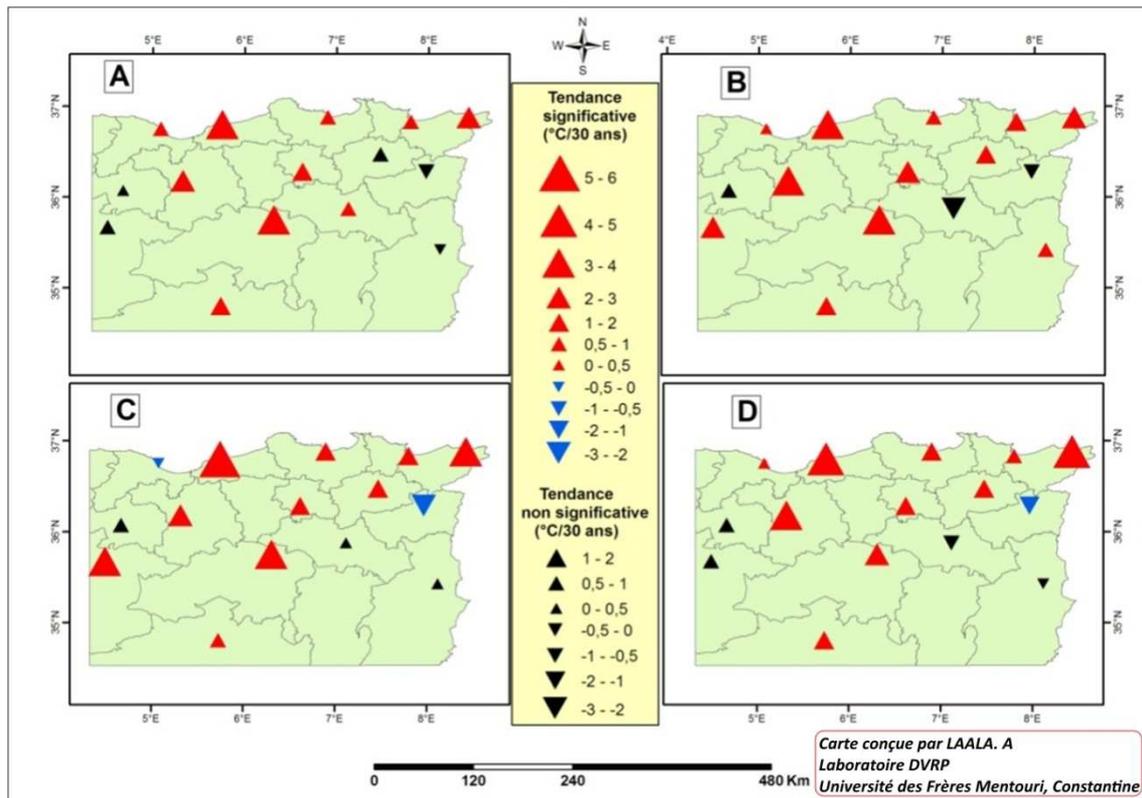


Fig.49 : Tendances des amplitudes thermiques de la saison : hivernale (A), printanière (B), estivale (C) et automnale (D)

3.2. Variabilité spatiale:

La nécessité d'obtenir des données thermiques continues dans l'espace est aujourd'hui forte, car l'étude de l'enveloppe thermique des espèces ne peut plus satisfaire des seules valeurs ponctuelles offertes par les stations météorologiques. Même si ces dernières couvrent la majorité des wilayas de l'Est algérien, elles ne permettent pas d'appréhender la variabilité spatiale des conditions thermiques à l'échelle du massif forestier. La méthode d'interpolation répond à cette problématique, elle permet de restituer le champ thermique continu à partir des variables mesurées ponctuellement. Dans ce contexte, nous avons essayé de déterminer les facteurs environnementaux explicatifs de la variation de la température et leur degré de significativité, tout en essayant de reconstituer, sous forme de cartes, les champs spatiaux en calculant, pour tout point de l'Est algérien, une valeur au mieux approchée de la température.

L'estimation du champ spatial de la température requiert deux types de données : les données de températures des stations météorologiques et les données géographiques spatiales décrivant l'environnement de chaque station qui serviront à élaborer des variables «candidates» susceptibles d'expliquer les températures.

3.2.1. Les données thermiques :

Les stations météorologiques sont en effet, pour des raisons économiques et techniques, principalement localisées en plaines et vallées. Le tableau 8 permet de donner une idée sur la répartition altimétrique des stations météorologiques dans la zone d'étude. Presque la moitié des stations se trouvent sur des terrains d'altitude supérieure à 500 mètres. Il est à noter qu'il y a uniquement une station à plus de 1000 mètres. Les stations météo sont peut nombreuses mais elles sont plus ou moins bien réparties spatialement sur la zone d'étude avec des caractères géographiques bien différents.

Tab.8 : Caractéristiques altimétriques des stations météorologiques de l'Est algérien

| | |
|---|-------------------------|
| Altitude maximale | 1009 m |
| Altitude minimale | 2 m |
| Altitude moyenne | 439,5 m |
| Nombre de station avec des altitudes supérieures à 1000m | 1 |
| Médian | 441 m |
| Surface pour une station | 6348,78 km ² |

3.2.2. Les variables explicatives de la température:

Il est connu que les formes topographiques jouent un rôle essentiel dans la structuration spatiale de la température (Geiger *et al.*, 2003). Pour cela nous avons utilisé le modèle numérique de terrain (MNT) pour dériver les facteurs explicatifs liés au relief. Le système d'information géographique SIG nous permet d'extraire à partir du MNT, pour chaque pixel de l'Est algérien, les variables explicatives suivantes : l'altitude, la pente, l'orientation, le rayonnement solaire et la courbure du relief.

Quatre autres couches d'information ont été créées sous S.I.G pour déterminer : la latitude, la longitude, la distance à la mer et à la forêt.

A- L'altitude :

D'après la figure 1 (annexe2), on constate que la classe altitudinale (600 – 900m) est la classe la plus dominante, elle représente une surface importante (30898,41Km²). Les altitudes les plus basses (0 - 300m) caractérisent 17.6% de la superficie totale de l'Est algérien, tandis que la classe des hautes altitudes (2100 – 2400m) est moins importante, elle représente uniquement 0.016 % de la superficie total de la zone d'étude.

B- La pente :

Les terrains horizontaux ou en dépression sont dominants, ils représentent 72.4 % de la surface totale. La classe des pentes abruptes (> 35°) est moins importante, elle caractérise uniquement 0,062 % de la superficie total (fig.2, annexe2).

C- L'orientation des versants :

Plus de 60% de la surface totale de l'Est algérien est exposé au : Sud (23.3%), Sud-Est (20.2%) et Sud-Ouest (18.3%), alors que les surfaces orientées vers le Nord représentent uniquement 788 km² soit 0.7% de la surface totale (fig.3, annexe2).

D- Le rayonnement solaire théorique :

Les contrastes d'éclairement solaire sont logiquement plus marqués sur les régions caractérisées par une topographie contrastée. On peut remarquer d'après la figure 4 (annexe2) trois parties distinctes : le Tell, les hauts plateaux et le sud de l'atlas saharien. Une faible partie de l'Est algérien reçoit une faible quantité du rayonnement solaire de 4000KWh/m², elle

représente 2.6km² de la superficie totale d l'Est algérien. La majeure quantité de ce rayonnement est reçue par le reste de la zone d'étude.

E- Courbure générale de la pente :

La courbure générale est la seconde dérivée de la surface, en d'autres termes c'est la pente de la pente. C'est la courbure de la surface elle-même (et non la courbure d'une ligne formée par l'intersection de la surface avec un plan) (fig.50).

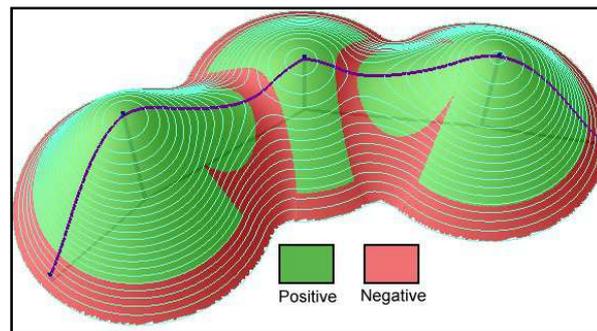


Fig.50 : Courbure générale

Une valeur de zéro indique que la surface est plate. Une courbure positive indique que la surface ou bien la pente est convexe. Les surfaces ou les pentes convexes sont généralement des crêtes et des surfaces de drainage. Une valeur négative indique que la surface est concave. Des surfaces concaves représentent des creux, des vallées. Les valeurs proches de $\pm 0,5$ représentent les reliefs modérés, tandis que les valeurs proches de ± 4 représentent des reliefs très escarpés (Harlow *et al.*, (2006).

On remarque, d'après la figure 5 (annexe2), que les terrains concaves (les vallées par exemple) occupent 51.97% de la superficie totale de l'Est algérien. Alors que les terrains convexes (les crêtes) sont également importants, elles représentent 47.94 % de la superficie totale de la zone d'étude. Cependant les surfaces plates occupent uniquement 0.0825 % de la surface totale.

F- La longitude :

Le système d'information géographique (S.I.G) nous a permis de diviser l'Est algérien en mailles de 90 mètres de coté, chaque maille a une valeur de longitude exprimée dans le système sexagésimal (Degrés Minutes Secondes) (fig.6, annexe2). Donc, si on déplace d'un pixel vers l'Est ou vers l'Ouest, on aura respectivement une augmentation ou diminution de 3 secondes de longitude.

G- La latitude :

Dans ce cas, les mailles de la grille illustrent les coordonnées géographiques en latitude, et donnent une valeur pour chaque 3 secondes de déplacement, soit vers le Nord soit vers le Sud (fig.7, annexe2). Pour faciliter les calculs sous S.I.G, les valeurs des coordonnées géographiques (longitude et latitude) sont converties en degrés décimaux.

H- La distance à la mer :

La figure 8 (annexe2) nous permet d'avoir la distance à la mer en tout point du maillage de l'Est algérien. La distance orthodromique est comprise entre : 0 (pour les zones littorales) et 264,7km (pour les zones de Sud-Est algérien). Le point le plus éloigné de la mer est situé à la wilaya de Tébessa entre la longitude 7°17'33" E et la latitude 34°31'21" N.

I- La distance à la forêt :

Pour toute maille de l'Est algérien, la distance à la forêt la plus proche est comprise entre 0 et 85920 mètres (fig.9, annexe2). Le point le plus éloigné de la forêt est situé à 5° 0' 33" de longitude Est et 34° 31' 19 de latitude Nord, ce point se trouve à la wilaya de Biskra.

3.2.3. Détermination des variables explicatives :

Pour déterminer les variables explicatives des températures, on a effectué des corrélations linéaires entre des variables candidates et les températures mensuelles (minimales et maximales). Le tableau 9 présente un exemple de la matrice de corrélation réalisée pour la température minimale du mois de Janvier.

Tab.9 : Matrice de corrélation croisée au carré pour la température minimale du mois de Janvier. Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification de 5%

| Variables | Lat | Lon | Dis.m | Dis.f | Alt | Pen | Exp | Ray | Cur |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Lat | 1,00 | | | | | | | | |
| Lon | 0,05 | 1,00 | | | | | | | |
| Dis.m | 0,98 | 0,03 | 1,00 | | | | | | |
| Dis.f | 0,43 | 0,18 | 0,40 | 1,00 | | | | | |
| Alt | 0,18 | 0,02 | 0,19 | 0,02 | 1,00 | | | | |
| Pen | 0,12 | 0,08 | 0,11 | 0,09 | 0,02 | 1,00 | | | |
| Exp | 0,18 | 0,25 | 0,16 | 0,48 | 0,00 | 0,01 | 1,00 | | |
| Ray | 0,23 | 0,03 | 0,24 | 0,01 | 0,92 | 0,16 | 0,00 | 1,00 | |
| Cur | 0,10 | 0,01 | 0,07 | 0,00 | 0,31 | 0,30 | 0,10 | 0,44 | 1,00 |

Le tableau 9 montre que la colinéarité existe entre l'altitude et le rayonnement solaire où le coefficient de détermination (R^2) dépasse 0.9. Ainsi, la latitude est fortement corrélée avec la distance à la mer ($R^2 = 0.98$). Ces aspects de colinéarité perturbent les estimations des paramètres du modèle. Donc, il paraît préférable de garder les variables "altitude" et latitude et de retirer les variables redondantes dans l'opération de régression.

Le nombre de variables retenues dans le modèle d'interpolation des températures mensuelles varie entre 1 et 4 variables selon le mois considéré (fig.51). Pour la température maximale, quatre variables retenues durant le mois d'Avril alors que durant le mois de Février la seule variable explicative de la variation des maximums est la variable "altitude". Concernant les températures minimales, le nombre de variable retenue est minimum durant les mois de Mars, Avril et Septembre (une seule variable) et maximum durant le mois de Décembre, Janvier Mai et toutes les mois de la saison estivale.

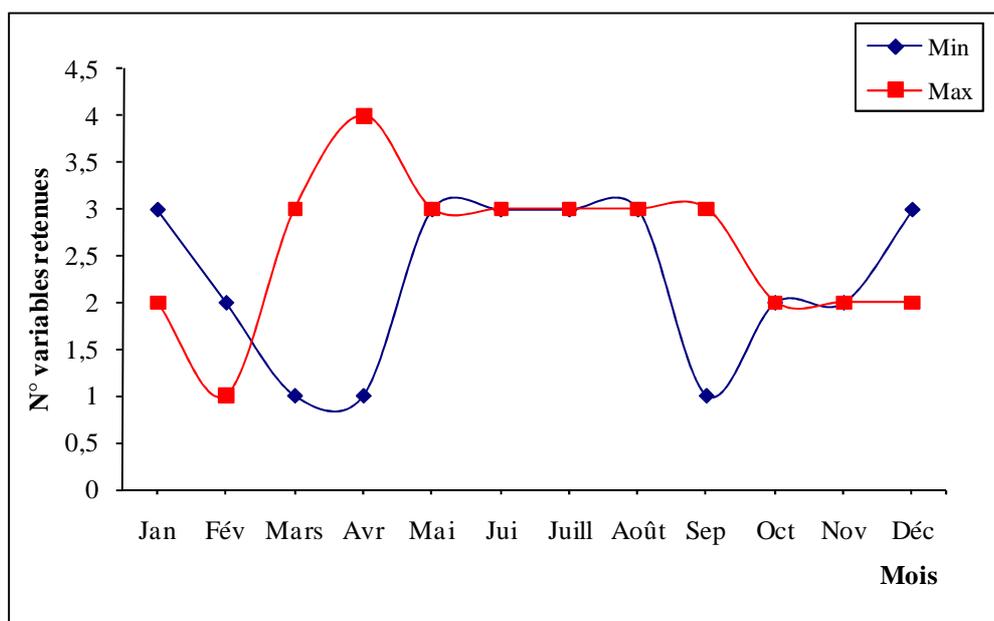


Fig.51 : Nombre de variables explicatives retenues mensuellement dans la régression multiple des températures minimales et maximales

L'altitude est toujours sélectionnée comme variable explicative dans le modèle de variation spatiale de la température minimale (tab.10). Le coefficient de corrélation entre l'altitude et la température minimale oscille entre -0.55 (Juillet) et -0,95 (Novembre). Ceci nous fait supposer que les températures d'hiver sont plus sensibles à l'altitude que celles d'été. Cette variable est négativement corrélée avec toutes les températures minimales mensuelles, cela est en accord avec la réalité puisque plus on monte, plus la température diminue car la raréfaction de l'air limite l'absorption des radiations infrarouges, issues de l'absorption des radiations solaires

par le sol. À l'inverse, la longitude est non significatives au seuil de 5% pour tous les mois de l'année et n'entrent en aucun cas dans le modèle.

Tab.10 : Coefficient de corrélation des variables significatives utilisées dans les régressions multiples des températures minimales mensuelles

| Variables | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lat | 0,52 | / | / | / | 0,51 | 0,53 | 0,52 | 0,51 | / | / | / | 0,52 |
| Dis.f | / | / | / | / | 0,61 | 0,75 | 0,77 | 0,68 | / | / | / | / |
| Alt | -0,94 | -0,93 | -0,90 | -0,86 | -0,74 | -0,61 | -0,55 | -0,68 | -0,87 | -0,93 | -0,95 | -0,94 |
| Cur | -0,55 | -0,53 | / | / | / | / | / | / | / | -0,54 | -0,56 | -0,57 |

D'autre part, la latitude est sélectionnée comme variable explicative durant la saison estivale ainsi durant les mois de Décembre, Janvier et Mai. De ce fait, les minimums sont plus sensibles à la variabilité latitudinale des stations météo durant ces périodes. La topographie de la courbure générale de la pente influe la température minimale durant uniquement la saison hivernale et automnale. La distance à la forêt est corrélée positivement avec la température minimale durant le mois de Mai et toute la saison estivale (tab.10). Ce résultat reflète bien la réalité, puisque les arbres forestiers font de l'ombre et réduisent l'échauffement des surfaces imperméables pendant l'été. D'autre part, la transpiration de ces arbres humidifie et refroidit l'air de l'environnement. On doit donc admettre que plus la distance à la forêt est importante, plus la température augmente. Il en est aussi vrai pour le contraire : plus la distance à la forêt est courte, plus la température diminue.

Concernant la température maximale, elle est plus sensible à la variation altitudinale durant toute l'année (tab.11). La Latitude et la distance à la forêt sont retenues également comme régresseurs dans le modèle de variation spatiale de la température maximale et marquent leurs importances durant la saison estivale. Alors que l'exposition marque son rôle significatif durant uniquement le mois d'Avril.

Tab.11 : Coefficient de corrélation des variables significatives utilisées dans les régressions multiples des températures maximales

| Variables | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Sep | Oct | Nov | Déc |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lat | / | / | -0,55 | -0,54 | -0,82 | -0,90 | -0,89 | -0,86 | -0,64 | -0,63 | / | / |
| Dis.f | / | / | 0,66 | 0,83 | 0,84 | 0,76 | 0,71 | 0,73 | 0,79 | / | / | / |
| Alt | -0,99 | -0,92 | -0,75 | -0,73 | -0,71 | -0,59 | -0,58 | -0,68 | -0,71 | -0,82 | -0,97 | -0,99 |
| Exp | / | / | / | 0,51 | / | / | / | / | / | / | / | / |
| Cur | -0,58 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | -0,56 | -0,61 |

Les résultats montrent aussi que la courbure du relief a une influence négative sur la température maximale durant les mois de Novembre, Décembre et Janvier, donc la concavité du relief abaisse les températures maximales durant la saison hivernale. De plus, la variable « longitude » est une variable non significative dans le modèle de la variation spatial de la température maximale (tab.11).

3.2.4. La validation des estimations :

Cette démarche permet d'évaluer la qualité des interpolations par le calcul du coefficient de détermination, de l'erreur de modélisation et de l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

A. Validation statistique :

D'après la figure 52, on remarque que le coefficient de détermination (R^2) le plus important pour les maxima est enregistré pendant le mois de Décembre (0.97) alors que pour les minima, il est enregistré durant le mois de Novembre (0.89). Dans notre exemple, 97% de la variabilité totale des températures maximales du mois de Décembre et 89% de celle des températures minimales du mois de Novembre sont expliqués par ces deux modèles. Ce qui montre que les modèles obtenus pour la saison hivernale et automnale sont les meilleurs. Cependant la valeur la plus faible du R^2 pour les températures maximales et minimales est enregistrée respectivement durant le mois de Juillet et Août.

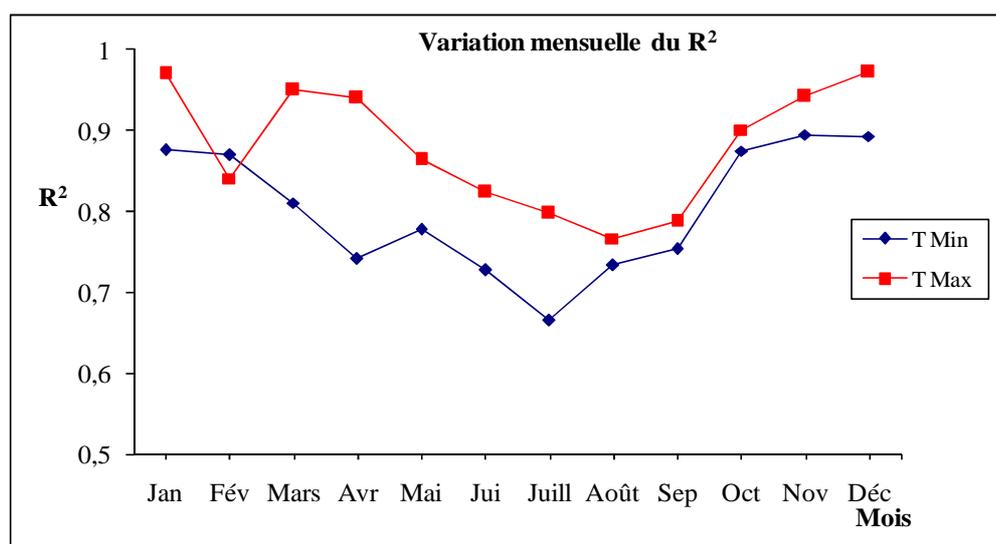


Fig.52 : Variation mensuelle du coefficient de détermination (R^2) obtenue par la régression multiple des moyennes mensuelles des températures maximales et des minimales à partir des variables topographiques

B. Validation par le calcul des résidus:

La figure 53 montre les variations des résidus moyennes annuelles des températures minimales selon deux méthodes d'interpolation.

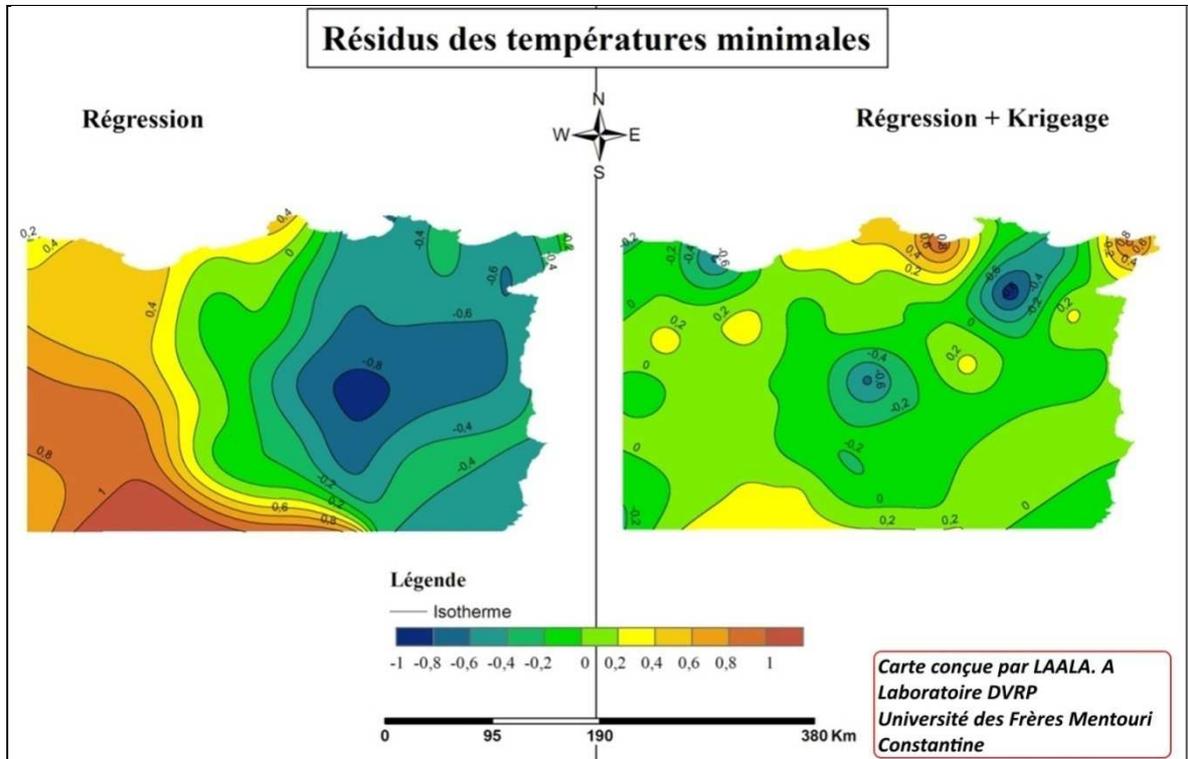


Fig.53 : Résidus des températures minimales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation

L'erreur de modélisation issue de la 1^{ère} méthode (régression) varie de -0.85°C à 1.18°C ce qui nous indique une forte sous et surestimation des températures minimales pour une vaste superficie de l'Est algérien, donc le modèle sous-estime les températures de l'Est et surestime celles de l'Ouest. Concernant la 2^{ème} méthode (régression + Krigeage), elle présente des résidus d'étendus réduites par rapport à la 1^{ère} méthode.

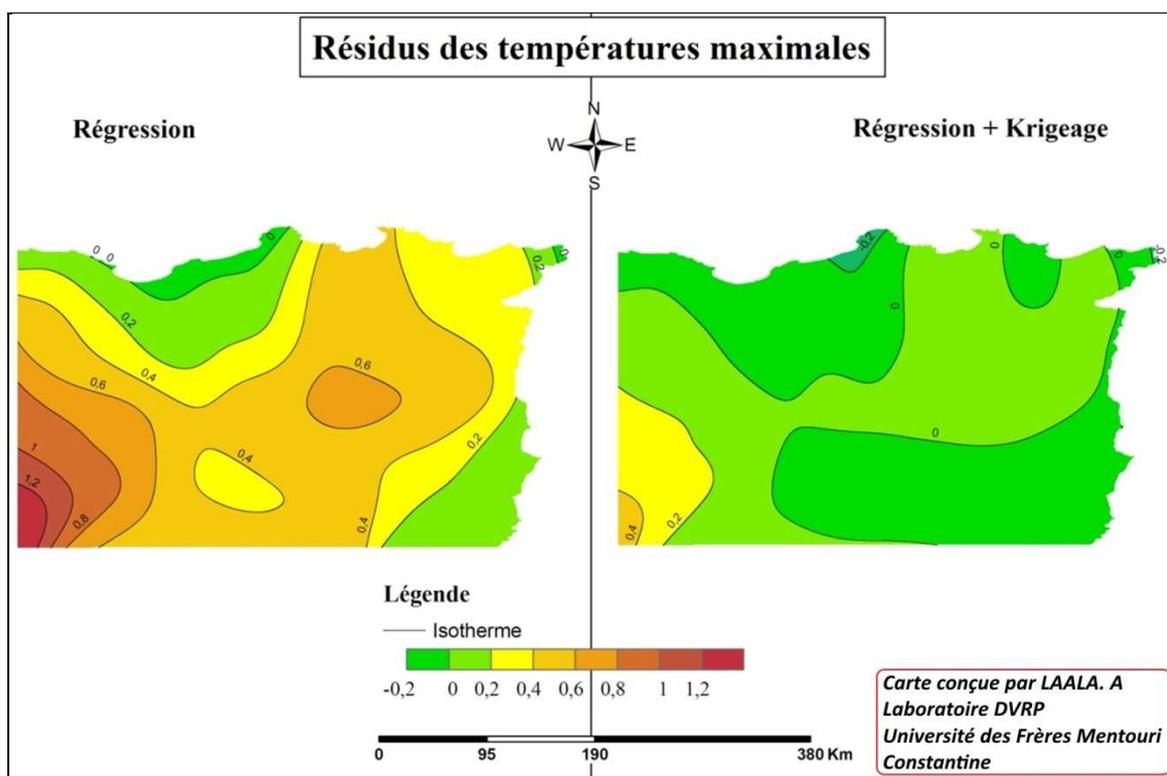


Fig.54 : Résidus des températures maximales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation

La carte à droite de la figure 54 illustre la variabilité spatiale des résidus des températures maximales issus de la 2^{ème} méthode (régression + Krigeage). Elle est caractérisée par l'extension des résidus faibles et presque négligeable pour une vaste superficie de l'Est algérien. Ces résidus varient entre -0,2 et +0,5°C. Par contre, la 1^{ère} méthode de régression présente de vastes régions avec de fortes valeurs de résidus oscillant entre -0.1°C et 1.4°C.

De la carte à gauche à la carte à droite (fig.53 et fig.54), on peut observer la restriction graduelle des plages bleu et brun foncés qui représentent les fortes valeurs des résidus, ce qui indique la performance accrue de la 2^{ème} méthode (régression + Krigeage). Donc, la première méthode (régression) est inadéquate à l'interpolation des températures minimales et maximales.

D'après ces résultats, on peut dire que les résidus d'interpolation les plus importants proviennent soit des erreurs de mesure de la température au niveau des stations météorologiques soit des erreurs de l'MNT qui peuvent par conséquence affecter les rasters dérivées.

C. Validation croisée:

Les valeurs de RMSE issus de l'interpolation des températures minimales par la 1^{ère} méthode (la régression seule) sont fortes, elles sont comprises entre 0.9 et 1.2°C respectivement

pour le mois de Novembre et Juillet (fig.55). Alors que celles de la 2^{ème} méthode (Régression+Krigage) sont relativement faibles, elles s'échelonnent entre 0.3°C pour le mois de Septembre et 0.9°C pour le mois de Mai, indiquant la variance relativement faible entre les températures minimales observées et calculées par la 2^{ème} méthode.

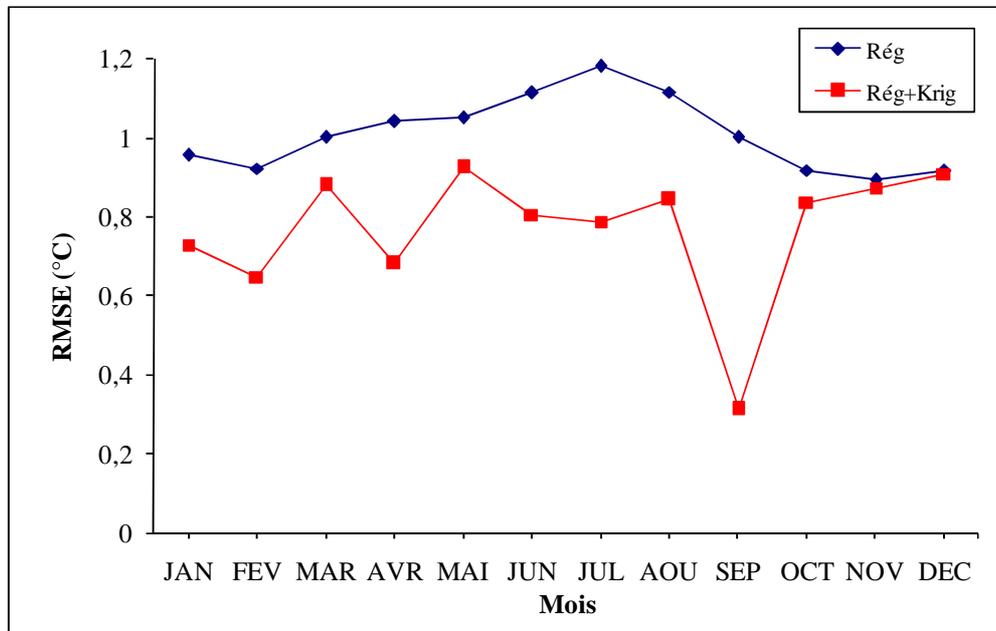


Fig.55 : Evaluation des méthodes d'interpolation des températures minimales par l'indicateur RMSE

Concernant les températures maximales, on remarque une nette amélioration du modèle par la 2^{ème} méthode qui minimise les valeurs de RMSE surtout durant le mois de Juin où les résidus passent de 1.4°C pour la 1^{ère} méthode (régression seule) à 0.1°C pour la 2^{ème} méthode (Régression+Krigage) (fig.56).

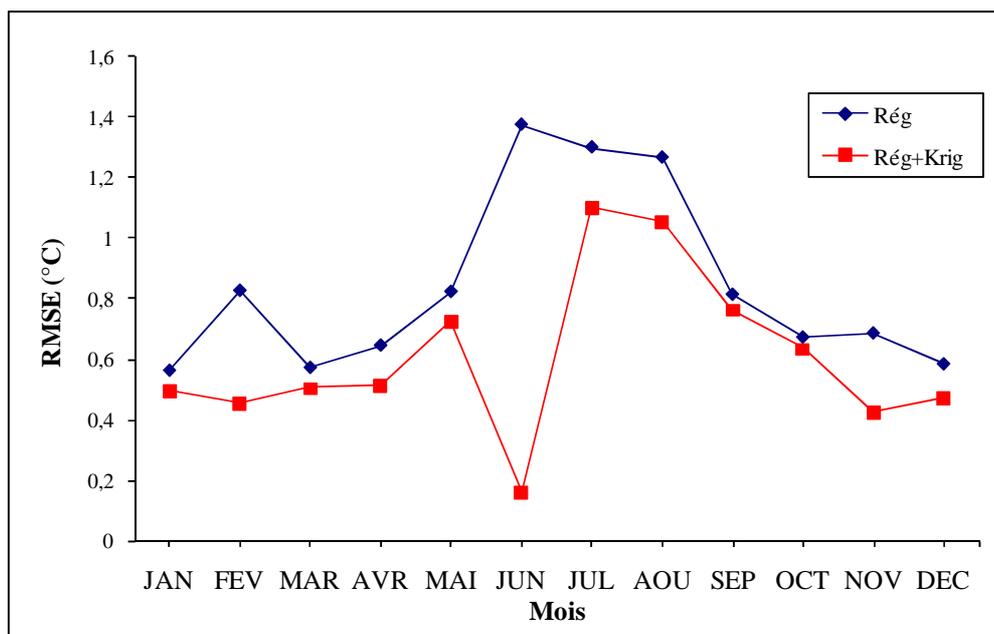


Fig.56 : Evaluation des méthodes d'interpolation des températures maximales par l'indicateur RMSE

3.2.5. Modèle explicatif de l'interpolation des températures:

Pour bien illustrer la méthode suivie pour l'interpolation de la température, nous prenons l'exemple de la température minimale du mois de Janvier. Les variables significatives et prédictives de la température sont intégrées dans des régressions multiples pas à pas (backward selection) jusqu'à la combinaison des variables qui donne une valeur maximale du R^2 ajusté.

Le modèle complet à trois variables (altitude, latitude et courbure de la pente) propose un coefficient R^2 ajusté égale à 86.64 (Tab.12). La variable la moins intéressante est la courbure de la pente (Cur) avec un $t = -0.25$, elle n'est pas significative à 5% (p.value = 0.809). Nous pouvons la retirer.

Le modèle suivant, à deux variables (altitude et latitude), propose un R^2 ajusté égale à 87.68. La variable la moins pertinente est la latitude qui n'est pas non plus significative, elle est également éliminée. La régression à une seule variable (altitude) est significative à 5% : c'est notre modèle définitif avec un R^2 ajusté égale à 86.66 (Tab.12). Donc on peut expliquer la variation de la température minimale du mois de janvier par la variation altitudinale.

**Tab.12: Régression pas à pas (backward selection) basé sur le t
(Température minimale du mois de Janvier)**

| R² | R².ajusté | Alt | | Lat | | Cur | |
|----------------------|-----------------------------|--------------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|
| | | t | Prob | t | Prob | t | Prob |
| 89.50 | 86.64 | -6.93 | 0.000 | 1.35 | 0.206 | -0.25 | 0.809 |
| 89.44 | 87.68 | -8.40 | 0.000 | 1.44 | 0.175 | | |
| 87.62 | 86.66 | -9.59 | 0.000 | | | | |

L'équation du modèle s'écrit :

$$\mathbf{T\ Min_{(Janvier)} = 7,995 - (0,00749 \times Alt)}$$

A partir de cette formule mathématique, on peut dire que la température minimale du mois de Janvier décroît de 0.75°C pour 100 m gagnés en altitude. Le signe négatif indique bien que la variable explicative (altitude) ne varie pas dans le même sens que la variable à expliquer « température minimale du mois de Janvier ». C'est une situation plus attendue, pour laquelle plus on s'élève en altitude, plus la température minimale diminue.

Ainsi, le signe négatif qui précède le coefficient de latitude du mois de Mai (Tab.3, annexe1) signifie que la température minimale de ce mois diminue au fur et à mesure que la latitude augmente (un gradient thermique Nord-Sud : -2.36 °C pour 1° parcourus vers le Nord, soit une décroissance de -2.13°C pour 100km parcouru vers le Nord (puisque un degré de latitude équivaut à environ 111km sur l'équateur).

$$\mathbf{T\ Min_{(Mai)} = 101.38 - 0,00678 \times (Alt) - 2,357 (Lat)}$$

La figure 57 montre que la 1^{ère} méthode est mal adaptée à l'interpolation des températures minimale du mois de Janvier. L'erreur systématique de modélisation issue de cette méthode varie de -1.1°C à 0.7°C. De vastes surfaces de la wilaya de Biskra présente des résidus qui varient entre -0.6°C et -1.1°C, ce qui montre une sous-estimation des températures dans cette région. La carte à droite de cette figure montre que la 2^{ème} méthode (régression + Krigeage) améliore l'estimation du champ thermique, elle est marquée par la domination des résidus faibles (comprises entre -0,4 et +0,4°C) pour une vaste superficie de l'Est algérien.

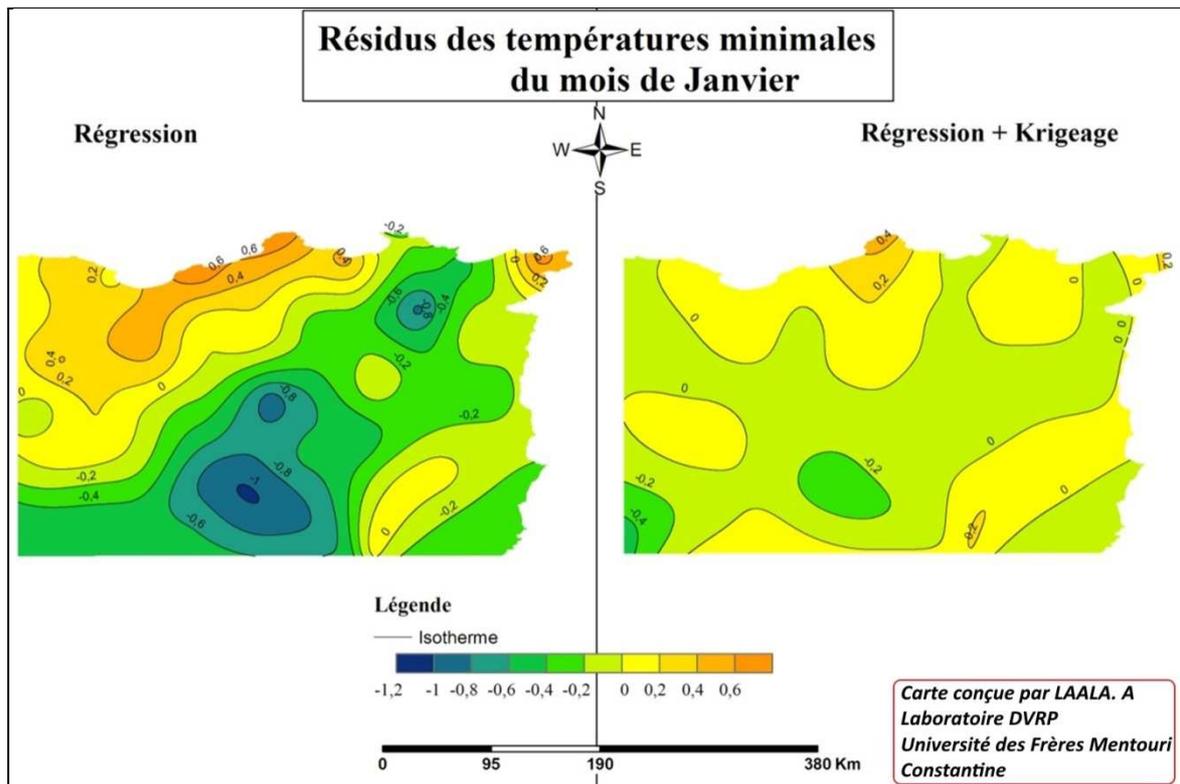
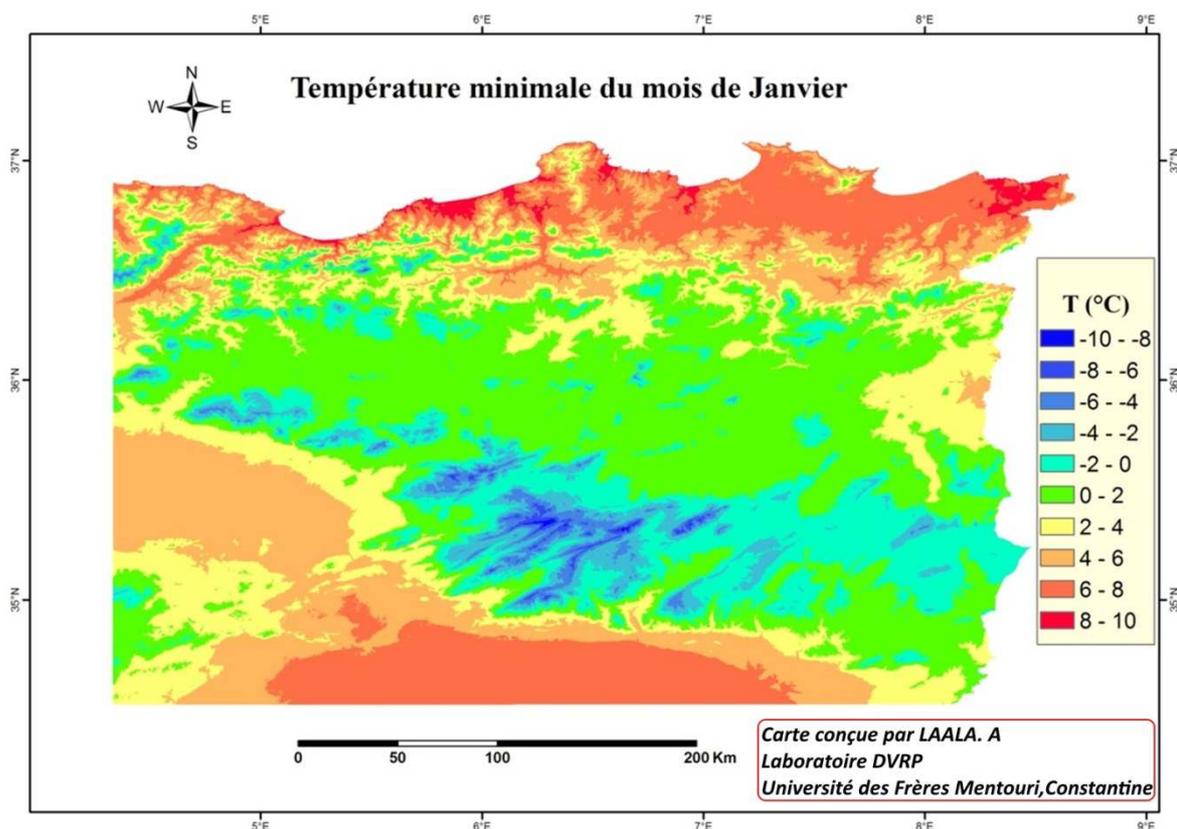


Fig.57: Résidus des températures minimales du mois de Janvier issus des deux méthodes d'interpolation

La figure 58 illustre la cartographie, à une échelle très fine (90m x 90m), de la variabilité spatiale de la température minimale du mois de Janvier de l'Est algérien pour la période (1982-2011). Elle montre clairement l'effet de la variable "altitude", sélectionnée comme variable explicative des minimums.

Les températures minimales du mois de Janvier se situent entre -9.9°C et 8.7°C . On trouve les plus fortes valeurs au littoral de l'Est algérien sous influence méditerranéenne et au Sud, les plus faibles sur les reliefs soumis au climat de montagnes (les Aurès), alors que les plaines sont marquées par des températures plus clémentes.



**Fig.58: Température minimale du mois de Janvier pour la période (1982-2011)
Interpolée sous SIG par la méthode (Régression+Krigage)**

Le gradient thermique est orienté grossièrement du centre vers le Nord et vers le Sud (fig.58). Un échauffement de l'air est en effet observé au fur et à mesure que l'on progresse du centre de l'Est algérien vers le Nord et vers le Sud.

Globalement, la 2^{ème} méthode (régression + Krigage) est considérée comme la meilleure méthode d'interpolation puisque elle donne une répartition plus similaire à la réalité et les champs thermiques cartographiés reflètent bien une certaine «logique terrain», malgré la présence d'éventuelle erreur d'interpolation du en grande partie de la faible densité des stations de mesures.

3.2.6. Variation mensuelle du gradient thermique altitudinal :

La température décroît de la surface de la terre vers la troposphère ; c'est un phénomène physique bien connu. Il est possible théoriquement d'exprimer cette variation par une fonction $t = f(z)$ où t est la température et z l'altitude (Douguedroith et Saintignon, 1984). Cette fonction illustre le gradient thermique altitudinal qui est défini comme la variation de la température, en degrés Celsius, par une tranche de 100 mètres d'altitude.

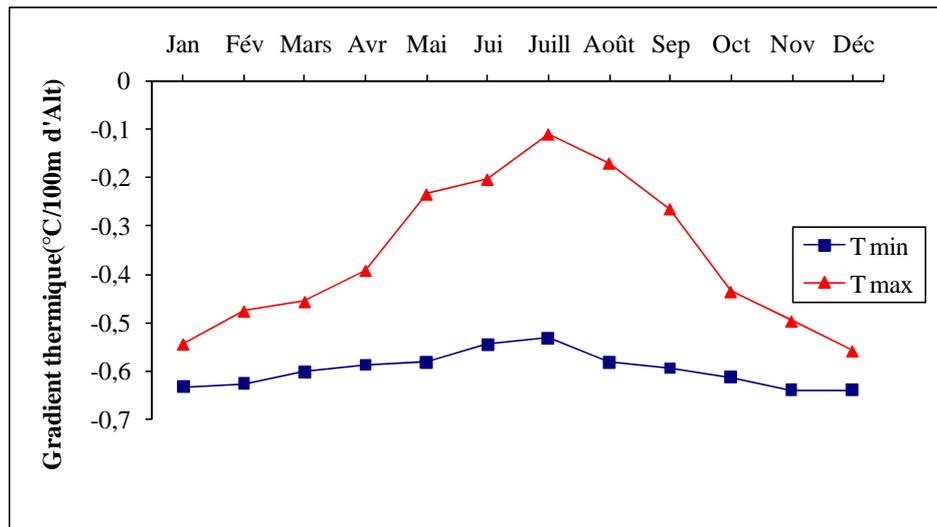


Fig.59 : Variation mensuelle des gradients thermiques altitudinaux calculés pour la période (1982-2011)

Les courbes de gradients thermiques altitudinaux des températures mensuelles dénotent toujours un fléchissement pendant la saison estivale (fig.59). Pour les maxima comme pour les minima, la valeur la plus élevée de ce gradient est enregistrée durant le mois de Décembre ($-0.64^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les minima et $-0.56^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ pour les maxima), alors que la plus faible est affichée durant le mois de Juillet ($-0.53^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les minima et $-0.11^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ pour les maxima).

Globalement, la température au niveau de l'Est algérien, décroît régulièrement en altitude avec un gradient thermique altitudinal annuel de $-0,36^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les maximums et $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les minimums.

Sous SIG, chaque wilaya de l'Est algérien est composée d'une grille de milliers de pixels, chacun affiche un couple de valeurs (de température interpolée et d'altitude), ce qui nous permet aussi de déterminer le gradient thermique pour chaque wilaya étudiée et notamment pour celles de Mila et Khenchela qui sont marqués par le manque des données thermiques (tab.13).

Tab.13 : Gradients thermiques altitudinaux des minima (m') et des maxima (M') pour les wilayas de l'Est algérien

| Wilayas | m' (en °C/100m) | M' (en °C/100m) |
|-------------|-----------------|-----------------|
| Constantine | -0,15 | -0,08 |
| Sétif | -0,32 | -0,19 |
| Annaba | -0,36 | -0,28 |
| Batna | -0,39 | -0,25 |
| BBA | -0,06 | -0,04 |
| Biskra | -0,10 | -0,07 |
| Béjaia | -0,08 | -0,05 |
| El-Taref | -0,33 | -0,18 |
| Guelma | -0,35 | -0,20 |
| Jijel | -0,35 | -0,22 |
| Khenchela | -0,50 | -0,37 |
| Mila | -0,38 | -0,20 |
| Msila | -0,35 | -0,21 |
| OEB | -0,30 | -0,19 |
| Souk-Ahras | -0,40 | -0,23 |
| Skikda | -0,33 | -0,23 |
| Tbessa | -0,43 | -0,32 |

On remarque que le gradient thermique varie spatialement d'une wilaya à l'autre. Pour les minima comme pour les maxima, la valeur maximale de ce gradient est enregistrée pour la wilaya de Khenchela où on note une décroissance des températures minimales de -0.5°C pour chaque tranche altitudinale de 100m. Au revanche, la wilaya de Mila affiche un gradient pour les minima de moins importance égale à -0.38°C pour 100m de dénivellation, tandis que celui des maxima est de 0.20°C pour 100m de dénivellation.

3.2.7. Statistique descriptive des rasters issus de l'interpolation des températures :

Le tableau 14 résume l'étude statistique descriptive des rasters thermiques interpolés de 13.662.831 pixels de l'Est algérien.

Tab.14 : Statistique descriptive des rasters issus de l'interpolation des températures mensuelles et annuelles de l'Est algérien

| Mois | Températures minimales | | | | Températures maximales | | | |
|------------------|------------------------|-------------|--------------|--------------|------------------------|------------|--------------|--------------|
| | Moy | Ecart type | Min | Max | Moy | Ecart type | Min | Max |
| Janvier | 2.48 | 2.95 | -9.91 | 8.76 | 12.3 | 2.54 | 2.09 | 17.82 |
| Février | 3.02 | 2.93 | -8.83 | 9.17 | 13.91 | 2.33 | 5.38 | 19.77 |
| Mars | 5.24 | 2.86 | -5.78 | 11.96 | 17.15 | 2.67 | 7.87 | 24.26 |
| Avril | 7.95 | 2.92 | -2.43 | 15.53 | 20.67 | 2.87 | 11.53 | 28.23 |
| Mai | 12.30 | 3.25 | 1.95 | 21.10 | 26.01 | 3 | 18.20 | 33.12 |
| Juin | 16.88 | 3.38 | 7.34 | 26.06 | 31.5 | 3.47 | 22.35 | 39.41 |
| Juillet | 20.01 | 3.93 | 10.90 | 29.22 | 33.54 | 3.31 | 27.93 | 43.6 |
| Août | 20.01 | 3.35 | 9.83 | 29.18 | 34.9 | 2.89 | 27.86 | 41.7 |
| Septembre | 16.38 | 2.99 | 5.88 | 24.14 | 29.7 | 2.3 | 22.62 | 35.67 |
| Octobre | 12.04 | 2.89 | 0.75 | 18.77 | 23.9 | 2.34 | 15.39 | 30.16 |
| Novembre | 7.22 | 2.98 | -5.03 | 13.29 | 17.54 | 2.35 | 8.4 | 22.97 |
| Décembre | 3.64 | 2.98 | -8.90 | 10 | 13.05 | 2.61 | 2.5 | 18.57 |
| Annuel | 10.6 | 2.93 | -0.33 | 17.96 | 23.01 | 2.4 | 14.83 | 29.42 |

Il ressort de ce tableau que :

- Pour l'Est algérien, le mois de Janvier est le mois le plus froid de l'année tandis que le mois d'Août est le mois le plus chaud.

- La moyenne annuelle des températures minimales est égale à 10.6°C, alors que celle des températures maximales est de 23.01°C.

- La moyenne des températures minimales varie de 2.48° à 3.02°C pendant la saison hivernale et de 16.88°C à 20.01°C pendant la saison estivale. Alors que la moyenne des températures maximales varie de 12.3°C à 13.91°C pendant la saison hivernale et de 31.5°C à 34.9°C pendant la saison estivale.

- Concernant les températures minimales, on remarque une forte différence entre les valeurs minimales et les valeurs maximales relevées pour le même mois qui peut atteindre une amplitude de 19.35°C. Alors que pour les températures maximales la différence entre les valeurs extrêmes varie de 13.05°C à 17.06°C.

- Les valeurs de l'écart type sont modérées à faibles, ce qui signifie que l'irrégularité des températures est faible et que les données sont homogènes et concentrées autour de la moyenne.

3.3. Structure spatiotemporelle de la température au niveau de l'Est algérien :

La régionalisation thermique est l'identification des régions, ayant des caractéristiques thermiques homogènes. Le but de cette section est de segmenter l'Est algérien en régions homogènes du point de vue de la température, à partir de l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique (CAH).

3.3.1. Typologie thermique :

A)- Corrélation entre les variables :

L'étude des différentes corrélations a pour objet de déterminer d'éventuelles relations entre les différentes variables thermométriques. Au seuil de 5%, la matrice de corrélation, entre les 39 variables, nous permet de retenir les points suivants :

- Une corrélation, quel que soit le mois analysé, est détectée entre les moyennes mensuelles et la moyenne annuelle et cela pour chaque variable thermique analysée ;

- Ainsi, au seuil de 5%, les températures moyennes, minimales et maximale sont tous corrélées entre eux.

- Les températures moyennes annuelles sont corrélées d'une part avec les températures minimales annuelles ($r = 0.93$) et d'autre part avec les températures annuelles maximale ($r = 0.85$).

B)- L'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

Les températures minimales et maximales n'ont pas été prise en compte dans l'analyse de l'ACP puisque elles sont redondantes (forte corrélation avec les températures moyennes). Concernant les variables actives, nous avons retenu les températures moyennes mensuelles, alors comme variables supplémentaires, on a introduit dans l'analyse la température moyenne annuelle, l'amplitude thermique et les coordonnées géographiques de chaque station météorologique (latitude et longitude). Au totale, 16 variables (actives et supplémentaires) sont utilisées pour les analyses statistiques.

On constate d'après le tableau 15 que la première valeur propre de la première composante (F1) vaut 8.9 ce qui représente 74% de la variabilité. Cela signifie que si l'on représente les données sur un seul axe, on aura toujours 74% de la variabilité totale qui sera

préservée. La deuxième composante (F2) explique une portion supplémentaire de la variance, indépendante de la première et correspondant à une proportion plus faible que la précédente, elle explique 25.4 % de la variance totale.

Tab.15 : Les valeurs propres et les statistiques associées du composant principal

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | F10 | F11 | F12 |
|-----------------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Valeur propre | 8,9 | 3,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Variabilité (%) | 74 | 25,4 | 0,4 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| % cumulé | 74 | 99,4 | 99,8 | 99,9 | 99,9 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Selon Kaiser (1960), l'extraction des composantes doit s'arrêter dès qu'une valeur propre devient inférieure à 1. Le critère de Kaiser nous conduit à sélectionner les deux premiers axes (F1 et F2) qui expliquent 99.4% de variance totale. Donc, la réduction de 16 variables initiales en deux nouvelles facteurs (F1 et F2) ne provoque qu'une faible perte égale à 0.6% de l'information contenu dans la totalité des données.

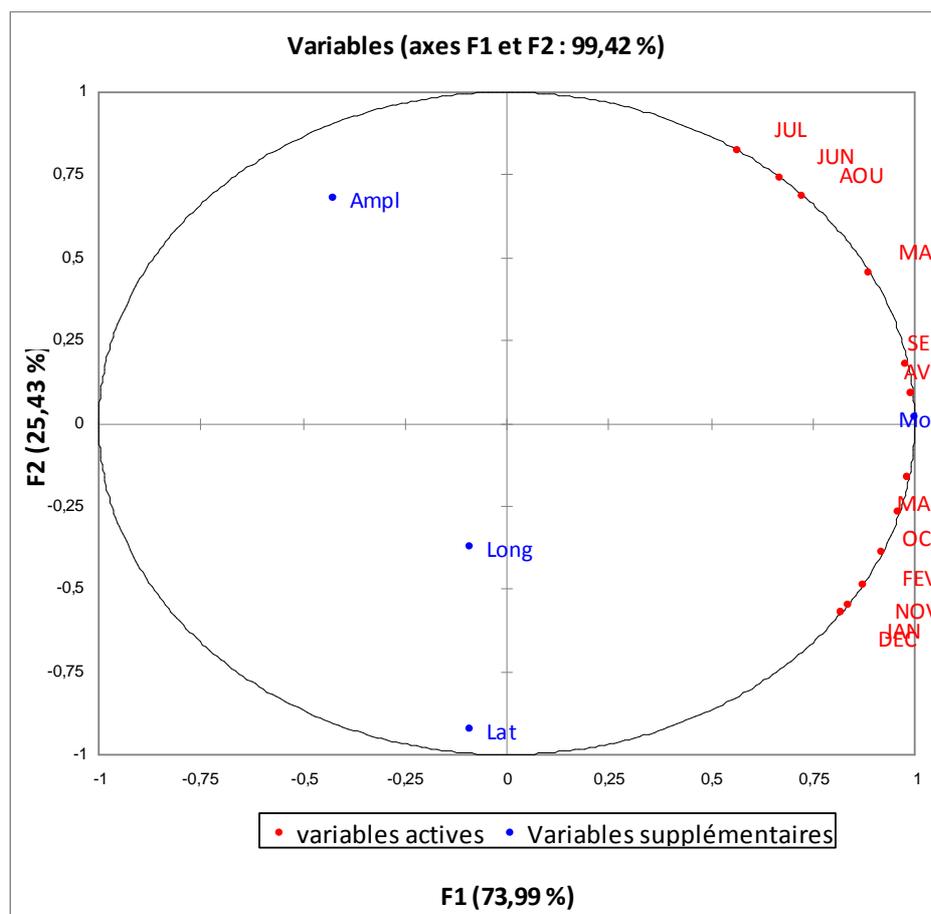


Fig.60 : Projection des variables sur le plan des facteurs F1 et F2

Le premier graphique issu de l'ACP est le cercle des corrélations (fig.60) qui montre pour notre cas que l'axe (F1) est clairement lié au mois d'Avril et Mars pour les variables actives et plus particulièrement à la température moyenne annuelle pour les variables supplémentaires. Le coefficient de corrélation entre le premier facteur (F1) et la variable « températures annuelle » est d'ailleurs proche de 1, ce qui signifie que l'axe F1 exprime la variation thermique.

Concernant le deuxième axe (F2), il est essentiellement lié au mois de Juillet et Juin pour les variables actives, alors que pour les variables supplémentaires, il est fortement lié à la latitude (-0.92). Ce qui montre que ce composant principal (F2) décrit un gradient latitudinale où les stations sont à peu près placées par latitude décroissant (fig.60).

On note également une corrélation négative entre les deux variables supplémentaires « amplitude thermique » et « latitude », ce qui montre que les stations qui affichent un écart important entre les températures minimales et maximales sont caractérisées par des valeurs relativement faibles de latitude et vice versa.

En ce qui concerne la longitude, elle est très peu liée aux deux facteurs dont la corrélation avec le composant principal (F1) est égale à -0.09, alors que celle avec F2 est de l'ordre de -0.37.

On remarque aussi que les mois de la saison hivernale sont opposés aux mois de la saison estivale (fig.60). Cette remarque montre qu'à température moyenne annuelle égale, certaines stations sont plutôt chaudes en été et plutôt froides en hiver, alors que d'autres, à l'inverse, sont plutôt froides en été et plutôt chaudes en hiver. L'amplitude thermique, plus importante dans les premières que dans les secondes.

Le graphique ci-dessous correspond à l'un des objectifs de l'ACP. Il permet de représenter les wilayas de l'Est algérien sur une carte à deux dimensions. Par rapport à l'axe F2 (gradient latitudinale), on trouve que les stations littorales sont situées en bas de l'axe alors que la station de Sud « Biskra » qui présente relativement une faible valeur de latitude se trouve en haut de l'axe.

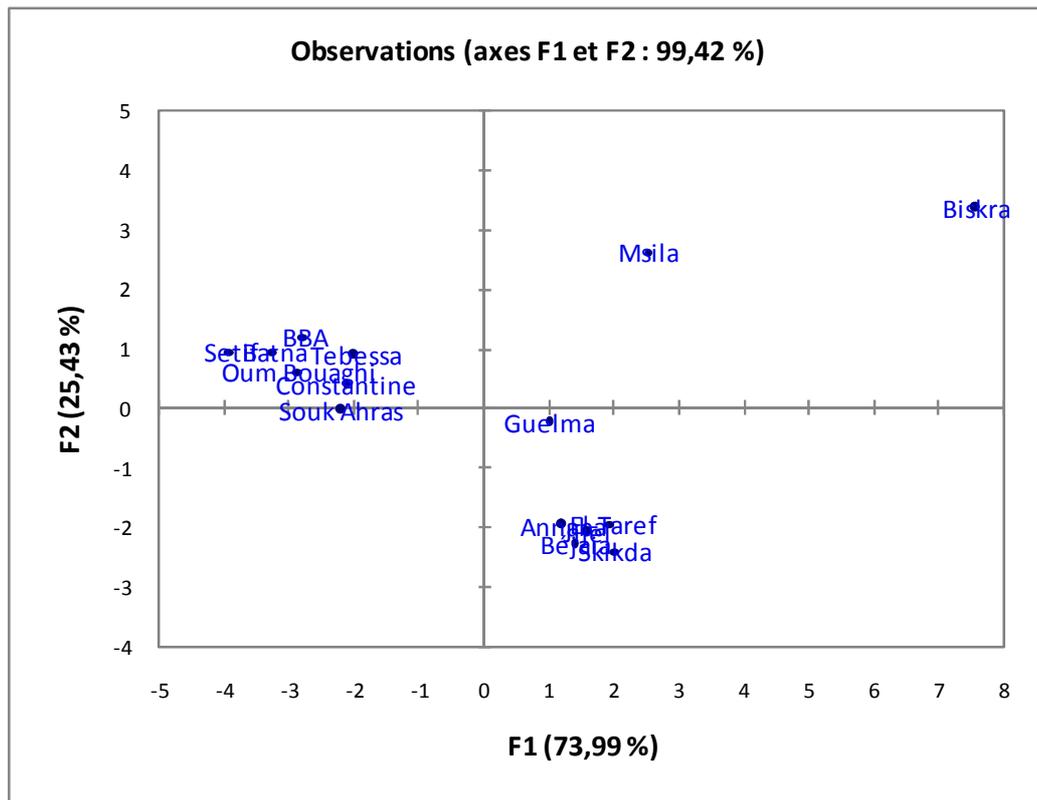


Fig.61 : Projection des stations sur le plan des facteurs F1 et F2

Les wilayas d'Annaba, Bejaia, Skikda, Jijel et El-Taref présentent des valeurs thermiques presque similaires. Cette remarque est obtenue par la superposition des deux cercles l'une des variables et l'autre des wilayas.

Sur le long de l'axe F1, on peut remarquer que les stations chaudes sont situées sur le côté des coordonnées positives et les stations froides sur le côté des coordonnées négatives. L'axe F1 opposant principalement les stations de Sétif, BBA, Oum El-Bouaghi, Batna, Tébessa, Constantine et Souk-Ahras (à gauche) à Biskra (à droite) (fig.61). Donc quel que soit le mois de l'année, les températures mesurées à Biskra se situent au-dessus de la moyenne de 15 wilayas.

Globalement, les deux axes (F1 et F2) correspondent aux deux variables synthétiques (température moyenne annuelle et latitude). Donc, plus une station est froide, plus elle est située à gauche sur le plan, plus la coordonnée latitude est grande, plus elle est située en bas.

C)- La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

La figure 62 représente le dendrogramme obtenu en appliquant l'algorithme de Ward aux données factorielles (F1 et F2 issus de l'ACP). L'algorithme a progressivement regroupé toutes les observations, ce qui nous permet de déterminer le nombre de classes à retenir pour la

régionalisation de manière objective. Le saut important (distance d'agrégation) entre la partition en trois classes et les autres partitions, traduisant ainsi le nombre de partitions dans lesquelles les données sont regroupées.

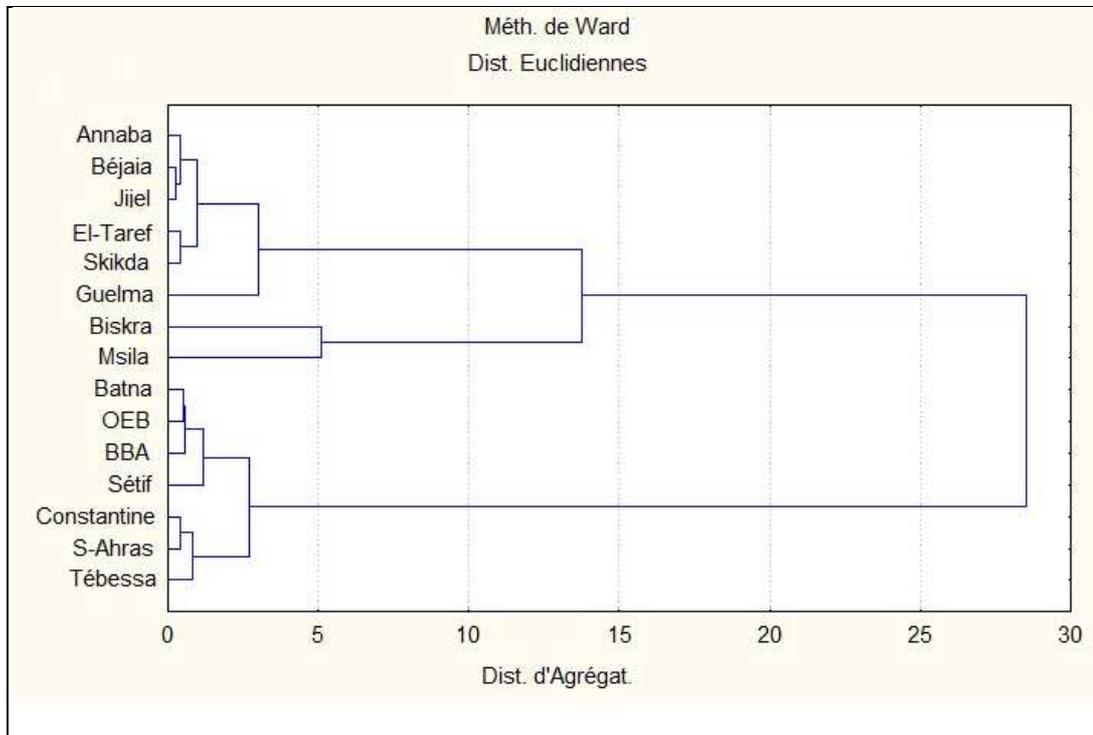


Fig.62 : Dendrogramme de la classification des stations (critères d'agrégation de Ward)

Le découpage régional a été fait en se basant fondamentalement sur les températures moyennes annuelles diversement enregistrées sur l'Est algérien. Cet aspect nous a permis, tout en conservant les dénominations administratives, de découper le territoire en régions thermiquement homogènes.

La figure 62 fournit l'arbre complet des regroupements successifs. La longueur d'un lien entre deux nœuds de l'arbre indique l'augmentation de la variance intra-classes lors d'un regroupement. Trois régions homogènes (A, B et C) ont été identifiées (fig.63) :

- **La région A** : englobe les wilayas littorales (Annaba, Bejaia, Skikda, Jijel et El-Taref), ainsi que la wilaya de Guelma qui semble, graphiquement, liée plus au facteur F1 qu'au facteur F2. La moyenne annuelle des températures de cette région homogène est de l'ordre de 18.4°C.

- **La région B** : est constituée par les wilayas des hauts plateaux et du piedmont Sud de l'Atlas Saharien avec une température moyenne annuelle égale à 15.6°C.

- La région C : regroupe les wilayas présahariennes : Biskra et Msila, plus chaudes avec une température moyenne annuelle de 20.8°C.

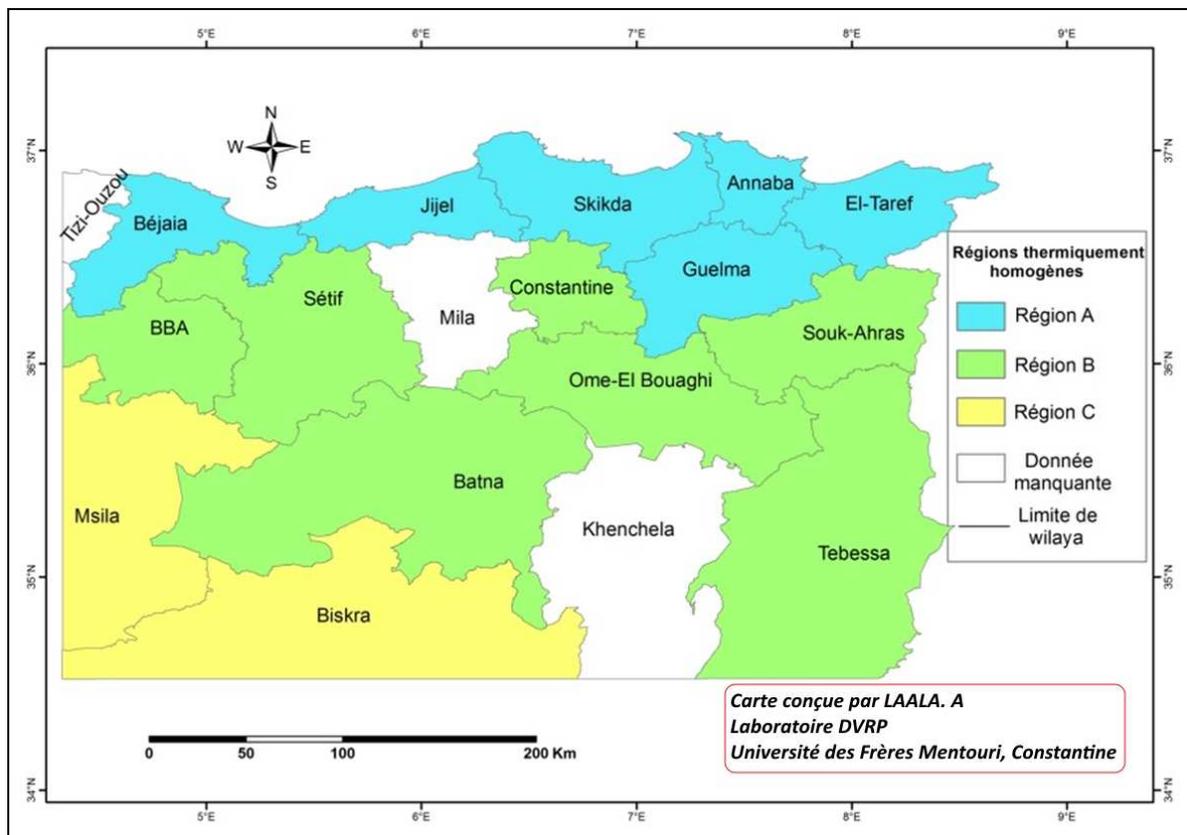


Fig.63 : Cartographie de la typologie thermique des wilayas de l’Est algérien

Les trois régions sont globalement homogènes et bien distinctes les unes des autres puisque l’analyse de variance sur les résultats de celui-ci donne 86.3% de variance interclasses (13.6% de variance intra-classes).

Pour toutes les régions homogènes, le mois de Janvier est le mois le plus froid de l’année dont les valeurs des températures moyennes oscillent entre 6.5°C et 11.9°C (fig.64). Concernant le mois le plus chaud de l’année, il est observé durant le mois de Juillet pour les wilayas présahariennes et des hauts plateaux et pendant le mois d’Août pour les wilayas du littoral.

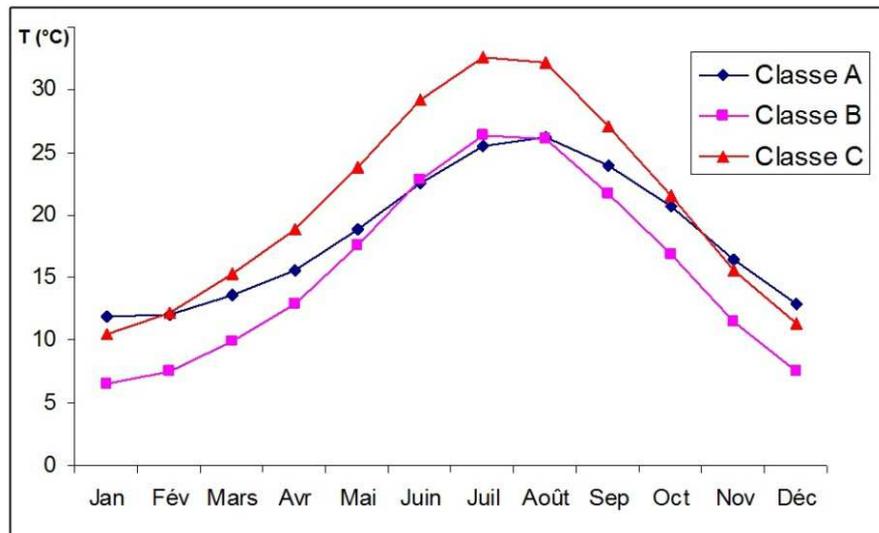


Fig.64: Régimes thermiques des trois classes homogènes

Il ressort aussi que le nombre de mois où la température moyenne mensuelle inférieure à la température moyenne annuelle est de six mois (fig.64). Ceci divise l'année en deux saisons distinctes : une saison froide (s'étalant de Novembre jusqu'Avril) et une saison chaude (du mois de Mai au mois d'Octobre) (caractéristique du climat méditerranéen).

3.3.2. Variabilité thermique des différentes régions homogènes :

A)- Les températures minimales annuelles :

La figure 65 présente, pour chacune des trois régions thermiques, la variabilité interannuelle des températures minimales annuelles pour la période 1982-2011. La courbe en rouge représente la moyenne glissante sur 3 ans. L'évolution des températures minimales annuelles pour les trois classes est assez irrégulière. On remarque que l'année 1992 est l'année la plus froide de la période (1982-2011) pour les wilayas littorales et des hauts plateaux où les températures minimales annuelles atteignent respectivement 12.8°C et 8.3°C. Alors que l'année la plus froide pour les wilayas présahariennes est celle de 2004 avec une température de 13.3°C.

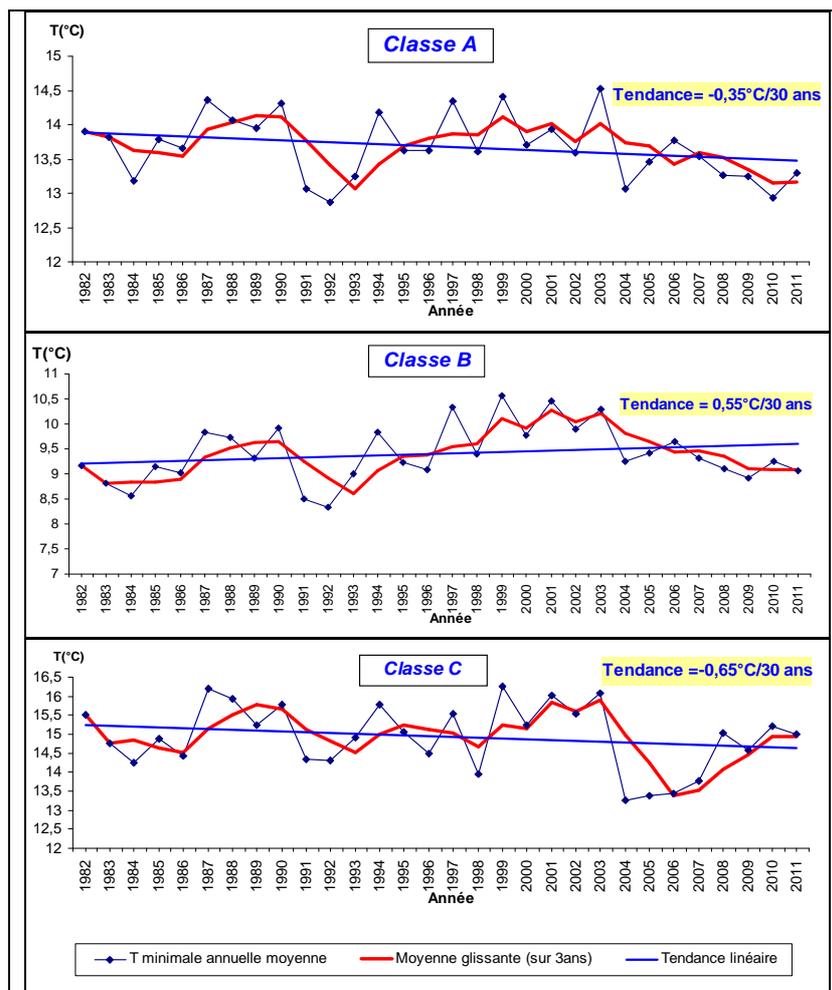


Fig.65 : Variation des températures minimales annuelles des trois classes issues de CAH

En termes de tendance, on remarque que les températures minimales annuelles de la région « A » et « C » tendent vers un refroidissement respectivement de l'ordre de -0.35°C et $-0.65^{\circ}\text{C}/30\text{ans}$. Cependant la région « B » qui englobe les wilayas des hauts plateaux affiche une hausse de ces températures égale à 0.55°C pour la période (1982-2011).

B)- Les températures maximales annuelles :

La chronique interannuelle des températures maximales des régions littorales oscille en moyenne autour de 23°C , alors que celle des régions Sud-Centre fluctuent entre 25.7 et 27.4°C (fig.66). Pour les régions des hauts plateaux, la moyenne des températures maximales entre 1982 et 2011 est d'environ 21.7°C . L'année la plus chaude pour la région « A » est l'année 2006, alors que celle de la région « B » et « C » est l'année 2001. Notons également qu'aucune moyenne annuelle des maxima inférieure à 20.1°C ne s'est produite depuis 1991.

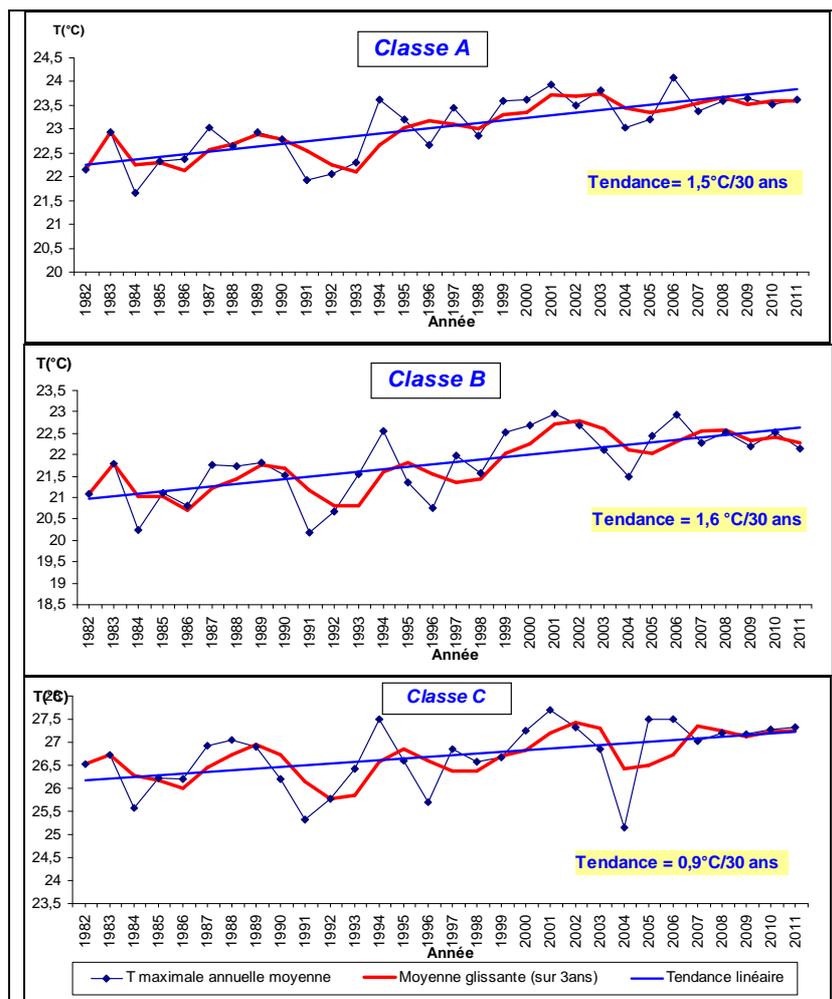


Fig.66: Variation des températures maximales annuelles des trois classes issues de CAH

Les trois classes issues de l'analyse CAH présentent des tendances positives. Les températures maximales annuelles de la région « A » gagnent 1.5°C sur 30ans. Ainsi, la tendance enregistrée pour les températures maximales de la région « B » montre que les valeurs passent de 20.9°C à 22.5°C en 30 ans. En revanche, la tendance enregistrée pour la région « C » est faible, elle est de l'ordre de 0.9°C/30 ans.

C)- Les températures moyennes annuelles :

Pour les trois classes homogènes, l'augmentation des températures moyennes au cours des trente dernières années ne fait aucun doute avec des hausses variant de 0.9°C à 1.6°C/30ans. La tendance la plus élevée est enregistrée pour la région des hauts plateaux où les températures maximales gagnent globalement 1.6°C/30 ans, alors que la plus faible est celle de la région présaharienne (0.9°C/30 ans).

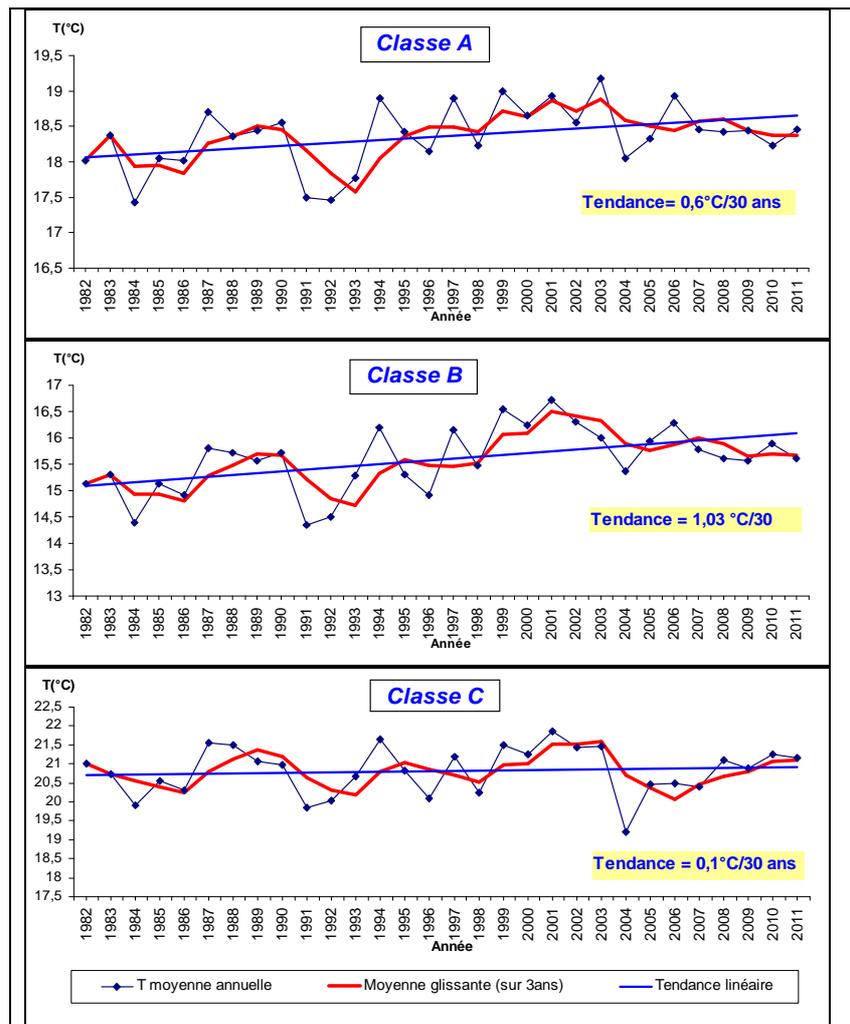


Fig.67: Variation des températures moyennes annuelles des trois classes issues de CAH

La région « A » qui englobe les wilayas littorales présente deux baisses importantes de température moyenne annuelle en 1984 et en 1992 (fig.67). Ce signal est également présent dans une moindre mesure dans les régions des hauts plateaux. En plus de ces deux anomalies, les régions du Sud-Centre manifestent également une baisse importante de la température moyenne annuelle durant l'année 2004.

D)- L'amplitude thermique annuelle :

D'après la figure 68, on peut constater que l'amplitude thermique des trois régions tend à augmenter durant la période 1982-2011. Donc, l'écart entre les températures maximales et minimales a augmenté de 2°C pour la région des wilayas littorales et de 1°C pour les deux autres régions. En effet, plus les extrêmes s'éloignent des valeurs centrales, plus l'amplitude augmente; plus elles se rapprochent du centre plus l'amplitude diminue.

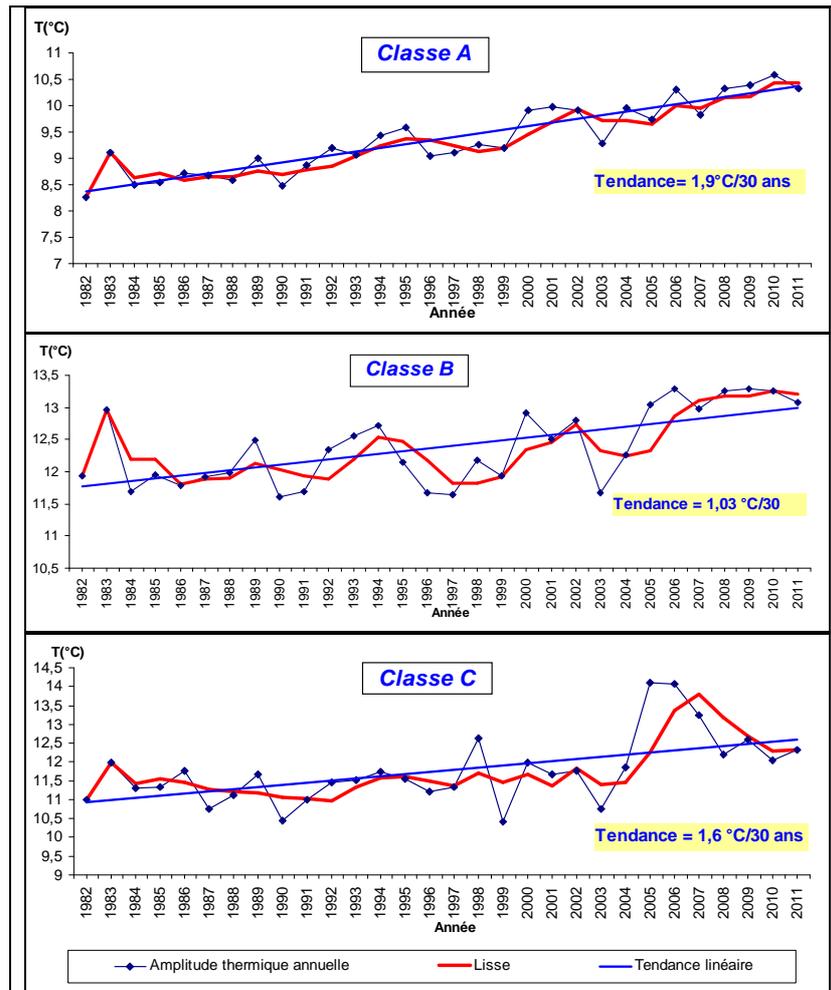


Fig.68: Variation de l'amplitude thermique annuelle des trois classes issues de CAH

4. Limites thermiques des essences forestières de l'Est algérien :

L'objectif de cette partie est de déterminer le seuil où l'enveloppe thermique de chaque essence forestière de l'Est algérien à partir des variables bioclimatiques dérivées de la température interpolée précédemment pour la période (1982-2011). Selon Gavilan (2005), les indices bioclimatiques ont été développés comme outils d'explication de la distribution spatiale des unités de végétation par la combinaison de différents facteurs climatiques.

4.1. Température moyenne annuelle (BIO1) :

La figure 69 montre la distribution spatiale de la température moyenne annuelle au sein des forêts de l'Est algérien qui varie globalement entre 8.2 à 20.8°C. La classe thermique (14-16°C) caractérise une superficie forestière égale à 34% de la surface forestière totale qui correspond généralement à des unités de végétation dominées par les pinèdes. Par contre, la classe de basses températures (8-10°C) est minoritaire, elle caractérise les massifs de hautes altitudes tels que la forêt de Ouled Yagoub (2148m), Chelia (2296m), Babor (2002m) et Tababor (1855m).

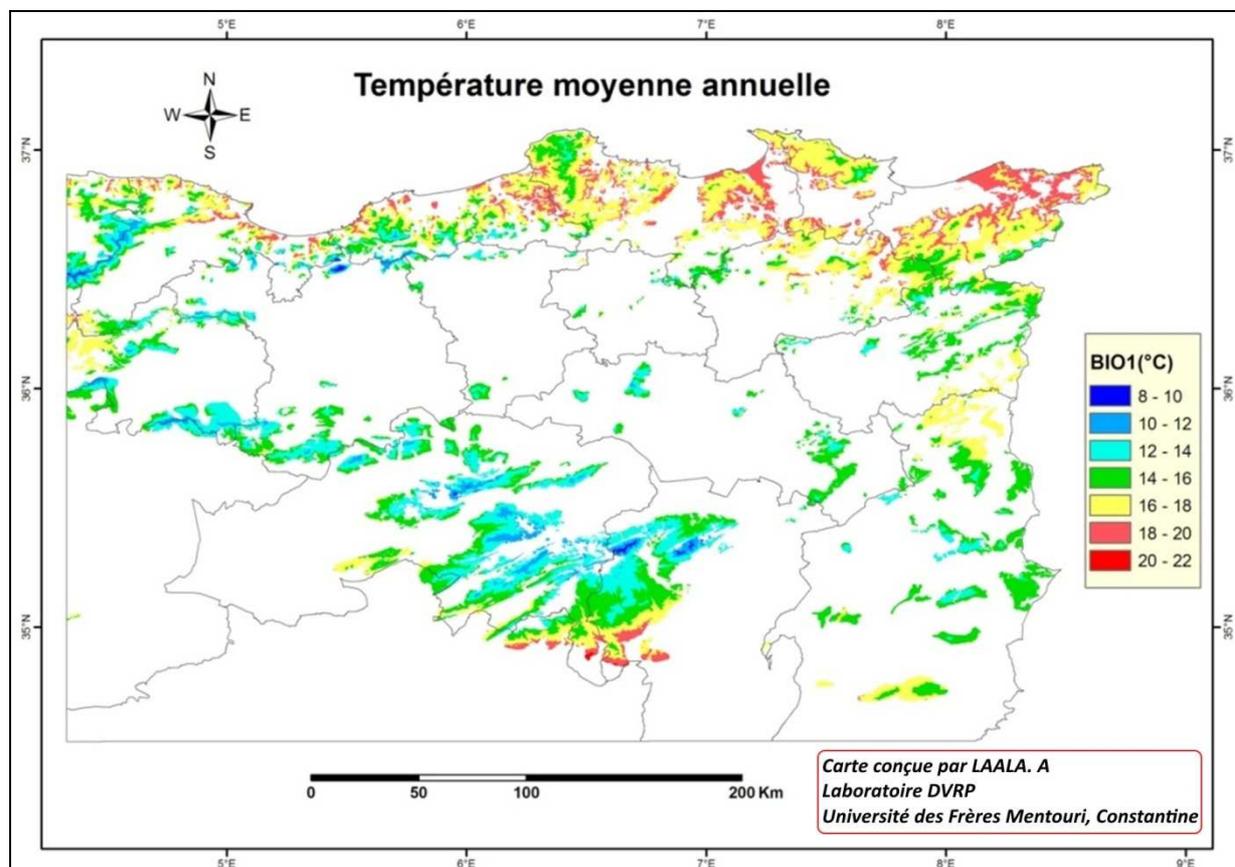


Fig.69 : Température moyenne annuelle au niveau des forêts de l'Est algérien

Concernant les résineux, la classe thermique (8-10°C) caractérise particulièrement les forêts du cèdre et du genévrier de Phénicie avec des superficies de 11.32% et 0.01% respectivement, alors que pour les feuillus, elle occupe seulement 0.18% de la surface du chêne vert et 0.14% du Chêne zéen. D'autre part, les valeurs maximales de la température moyenne annuelle sont enregistrées dans le Sud et particulièrement dans l'extrême Sud de la forêt de Mezbel (entre la wilaya de Batna et Biskra) où elles caractérisent 1555.2 ha de la superficie totale du genévrier de Phénicie.

Les températures moyennes annuelles, pour chaque essence forestière, est représentée sous forme de boîte à moustache dans la figure 70.

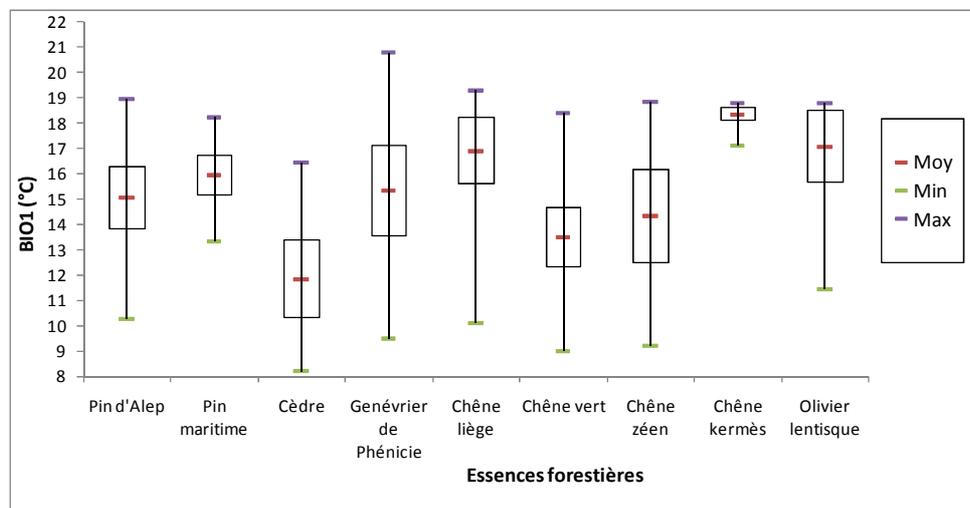


Fig.70 : Statistique des températures moyennes annuelles au niveau de différents massifs forestiers

L'amplitude thermique est remarquable pour le genévrier de Phénicie où cette essence peut se retrouver sous des conditions thermiques différentes avec un minimum de 9.5°C et un maximum égal à 20.8°C, soit un écart de 11.3°C. Ainsi, la faible étendue de la boîte à moustache pour le chêne kermès traduit l'homogénéité des valeurs de la température moyenne annuelle. Cela peut s'expliquer par la faible superficie occupée par cette essence forestière.

Globalement, la classe de température moyenne annuelle préférentielle pour les résineux est celle variant entre 14 et 16°C, alors que pour les feuillus, elle oscille entre 16 et 18°C (fig.71).

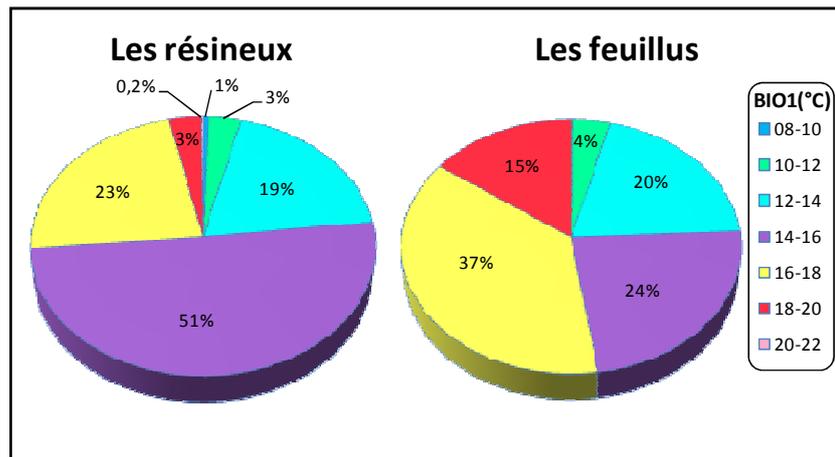


Fig.71 : Répartition des températures moyennes annuelles au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

Nous avons essayé de classer les wilayas et les forêts de l'Est algérien dans le nouveau système de classification thermo-climatique proposé par Rivas-Martinez (1996) qui a retenu 3 groupes thermiques subdivisés en 8 types thermiques (tab2. annexe1). Ce système est basé sur les valeurs de la température moyenne annuelle.

D'après la carte ci-dessous, on peut constater que le type thermique « Tempéré-froid » est quasiment absent dans l'Est algérien (quelques pixels localisés au niveau de la forêt de Babor et Chelia). Globalement, la majorité des superficies forestières de la wilaya d'El-Taref, Annaba, Skikda, Guelma et Msila est caractérisée par un thermo-climat « tempéré chaud ». Alors que les forêts de la wilaya de Sétif, Bordj Bou-Argeridj, Mila, ainsi les massifs forestiers montagnards des Aurès sont caractérisés par un climat de type « tempéré frais ». La seule wilaya qui marque un thermo-climat « chaud » est celle de Biskra (fig.72).

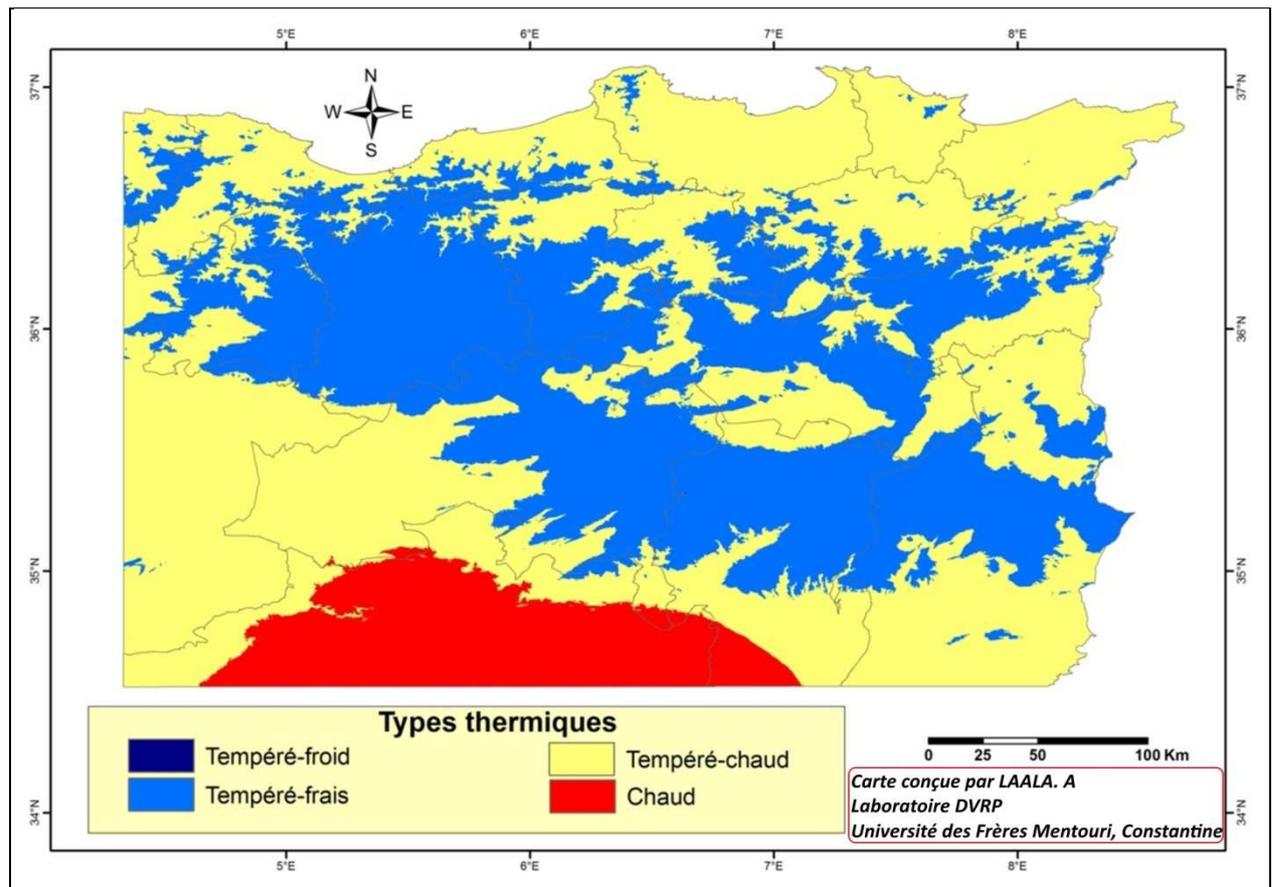


Fig.72 : Variabilité spatiale des types thermiques au niveau de l'Est algérien

4.2. Moyenne des amplitudes mensuelles (BIO2) :

D'après la figure 73, on constate que les forêts collinéennes et littorales sont caractérisées par des amplitudes mensuelles comprises entre 8 et 12°C; alors que les montagnardes sont dominées par des amplitudes importantes qui fluctuent entre 14 et 18°C.

La moyenne des amplitudes mensuelles marque son valeur maximale (17°C) au niveau de cédraie de la forêt d'Ouled Yagoub (Khenchela) et sa valeur minimale (8.1°C) au niveau des massifs de pin maritime de la forêt de Bougaroune (Skikda).

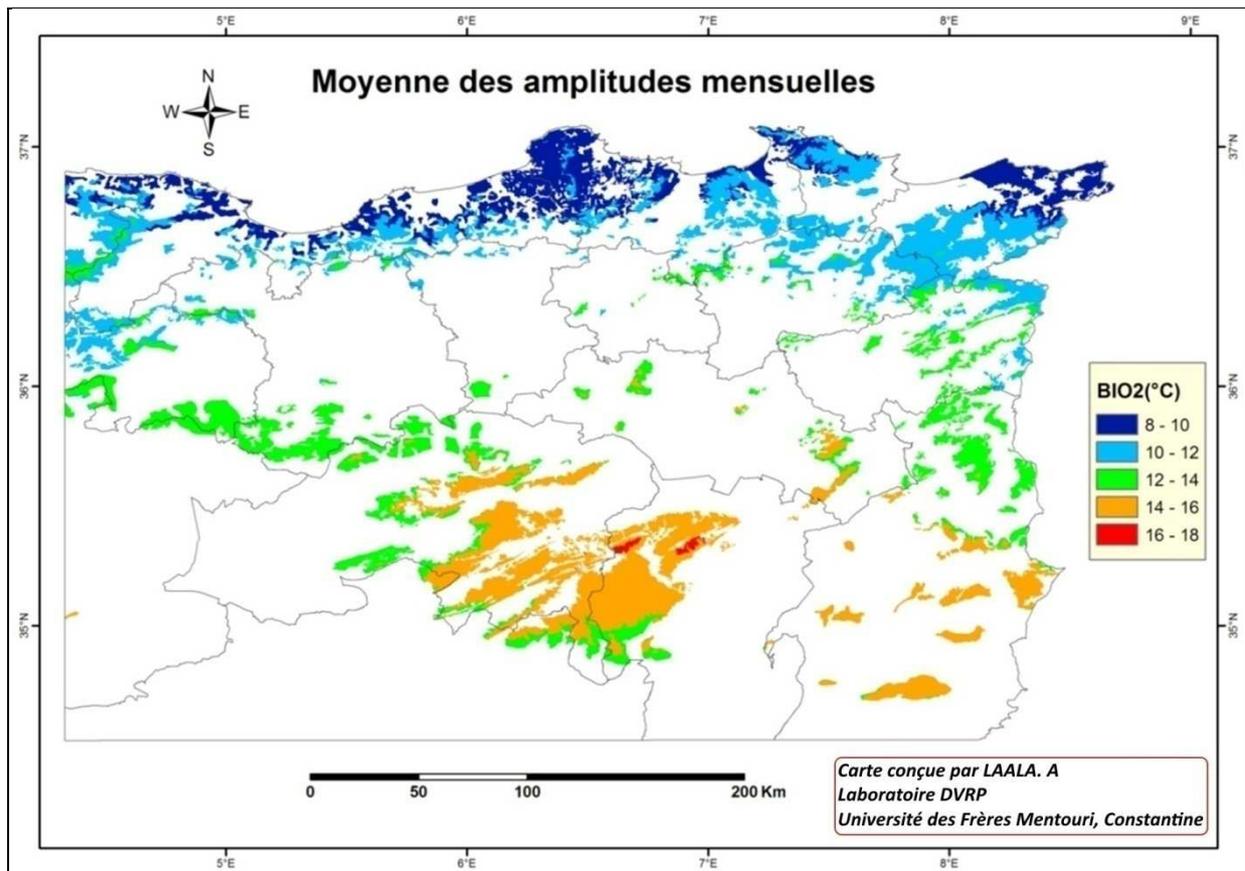


Fig.73 : Moyenne des amplitudes mensuelles au niveau des forêts de l’Est algérien

Les valeurs moyennes des amplitudes mensuelles sont de l’ordre de 9°C pour le chêne kermès et le pin maritime, de 11°C pour l’olivier lentisque et le chêne zéen, 13.5°C pour le pin d’Alep et le chêne vert, et enfin 13.9°C pour le genévrier de Phénicie (fig.74).

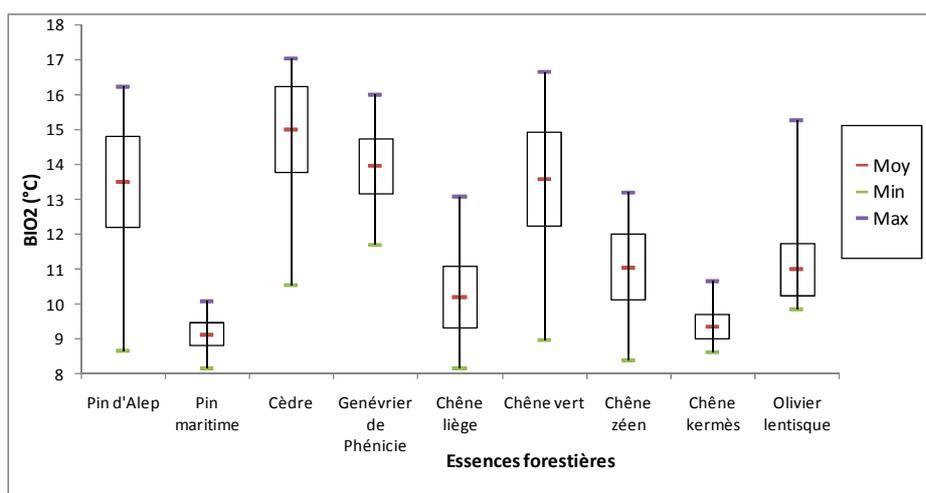


Fig.74: Statistique des amplitudes mensuelles au niveau de différents massifs forestiers

La faible variation spatiale de ce paramètre bioclimatique est observée pour le chêne kermès et le pin maritime. Alors que les moustaches étendues verticalement chez le chêne vert

indiquent une importante variation spatiale des amplitudes mensuelles pour cette essence forestière où l'écart type peut atteindre $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$.

Presque la moitié des surfaces des résineux sont caractérisées par des amplitudes mensuelles variant de 14 à 16°C, alors que seulement 12% des surfaces des feuillus sont dominées par cette classe thermique. D'un autre coté, la classe thermique de 8 à 10°C caractérise 30% de la surface des feuillus et uniquement 1% des résineux (fig.75).

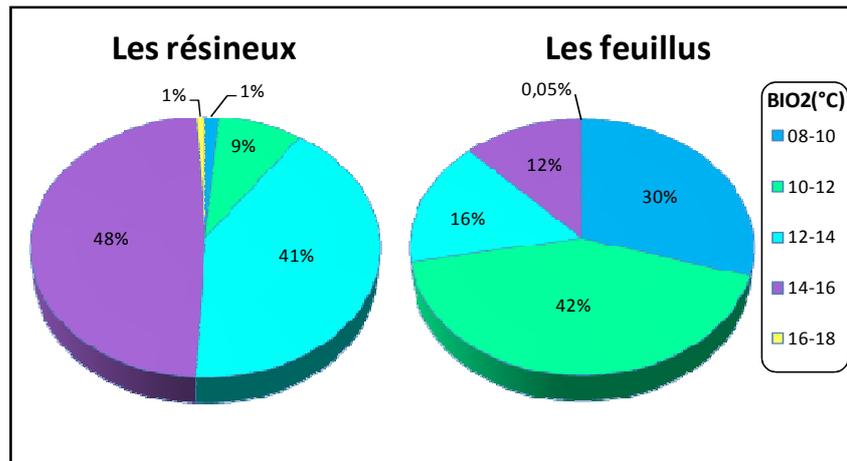


Fig.75: Répartition des moyennes des amplitudes mensuelles au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.3. Isothermalité (BIO3) :

La figure 76 montre que l'isothermalité croît de l'Ouest vers l'Est de la zone d'étude. La classe de faible valeur d'isothermalité (34-36%) caractérise une très faible superficie forestière de 2.4 hectares. Cependant les fortes valeurs d'isothermalité (40-42%) sont localisées au niveau des forêts de l'Est situant entre la longitude 6°43' et 8°2'E. Elle représente un pourcentage égal à 21.7% de la totalité des massifs forestiers étudiés.

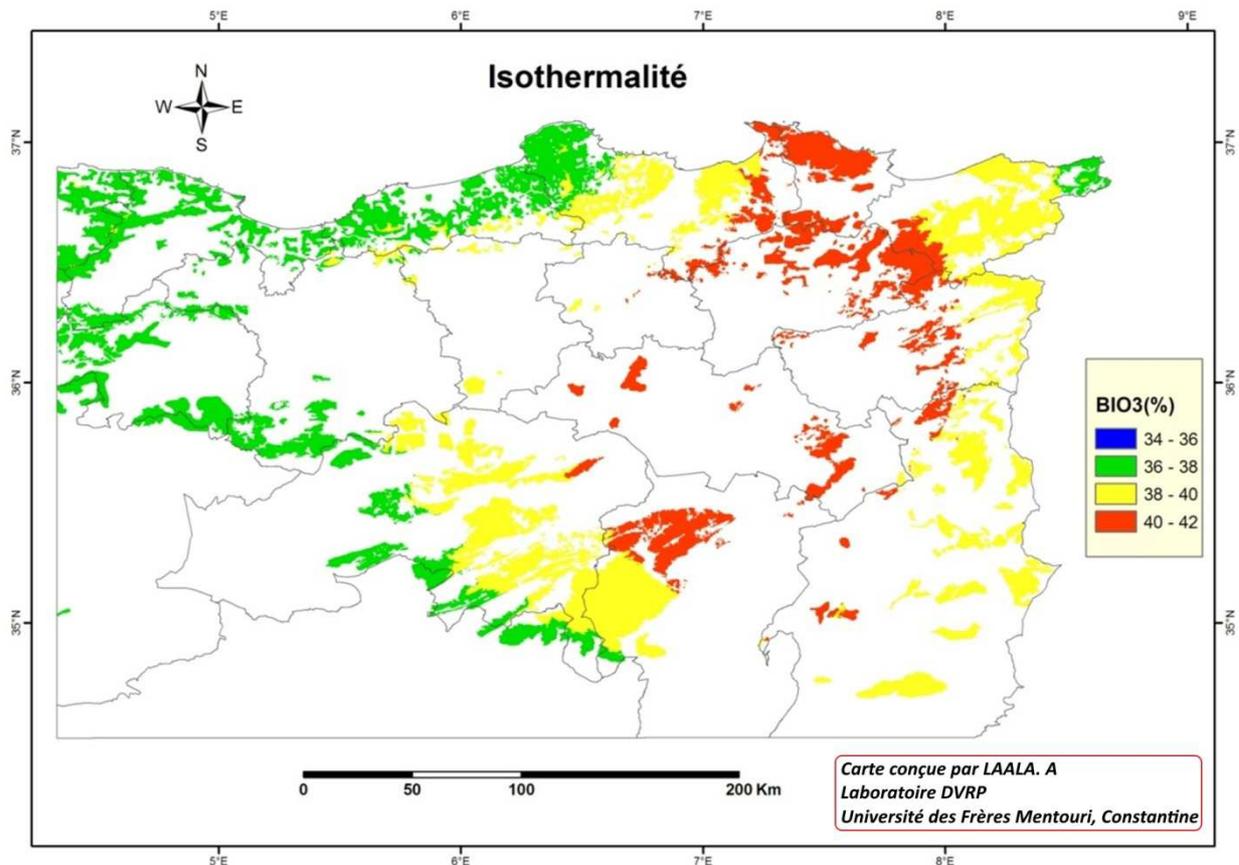


Fig.76: Isothermalité au niveau des forêts de l’Est algérien

En termes d’essences forestières, le minimum l’isothermalité est enregistré au niveau des forêts de genévrier de Phénicie, alors que le maximum est observé pour les massifs du chêne liège. Ainsi, la dispersion autour de la moyenne est faible pour les forêts de pin maritime ($\pm 0.22\%$) et du chêne kermès ($\pm 0.52\%$), alors qu’elle dépasse le 1% pour les autres essences forestières (fig.77).

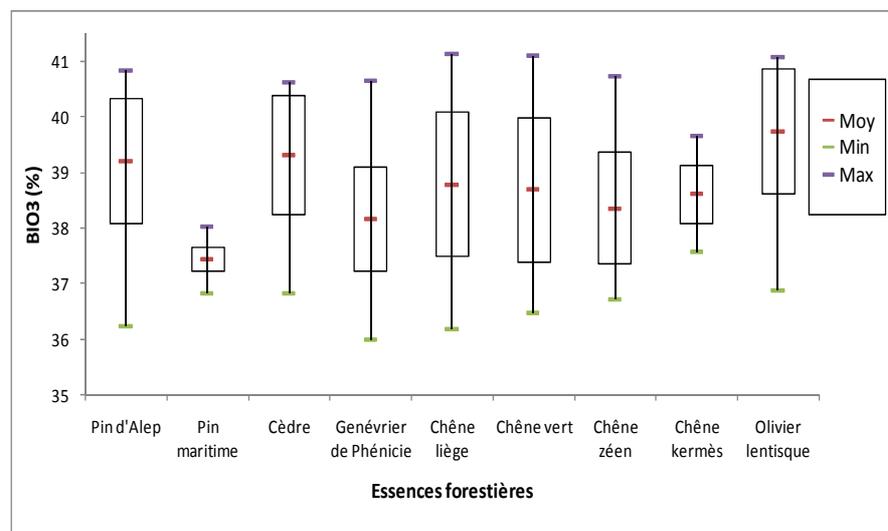


Fig.77: Statistique de l’isothermalité au niveau de différents massifs forestiers

Pour les résineux, la classe modale en terme d'isothermalité est la classe (38-40%) qui domine une superficie forestière de 447983 ha, alors que pour les feuillus celle de (36-38%) caractérise une surface de 491827 ha (fig.78).

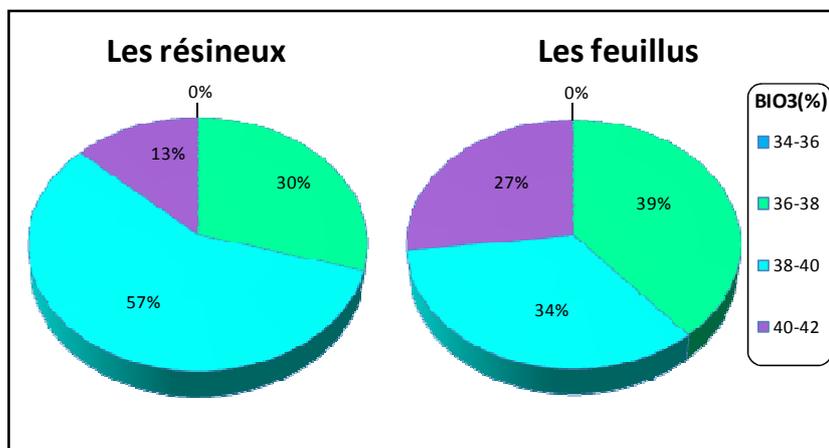


Fig.78: Classes d'isothermalité au niveau des forêts de l'Est algérien

4.4. Saisonnalité de la température (BIO4) :

D'après la figure 79, on peut remarquer que l'écart entre les températures mensuelles est plus prononcé en allant du Nord vers le Sud. Les forêts des wilayas littorales (tels que la forêt de la Calle, Seraidi, Chetaibi, Filfila, Guerbes, Oued Gebli, Bougafoune, Beni Saleh, Mehesen, Guerrouch, Bou Hatten, Tigrine et Tamgout) sont caractérisées par une saisonnalité faible qui varie de 400 à 600%. Ce qui montre que les températures mensuelles au niveau de ces régions sont plus ou moins homogènes. Alors que les valeurs maximales qui oscillent entre 800 et 1000% sont affichées au niveau des massifs forestiers du Sud et particulièrement dans les massifs des Aurès, les massifs de Hodna et Boutaleb. Ce qui montre que dans ces régions, les températures mensuelles sont hétérogènes et non concentrées autour de la moyenne.

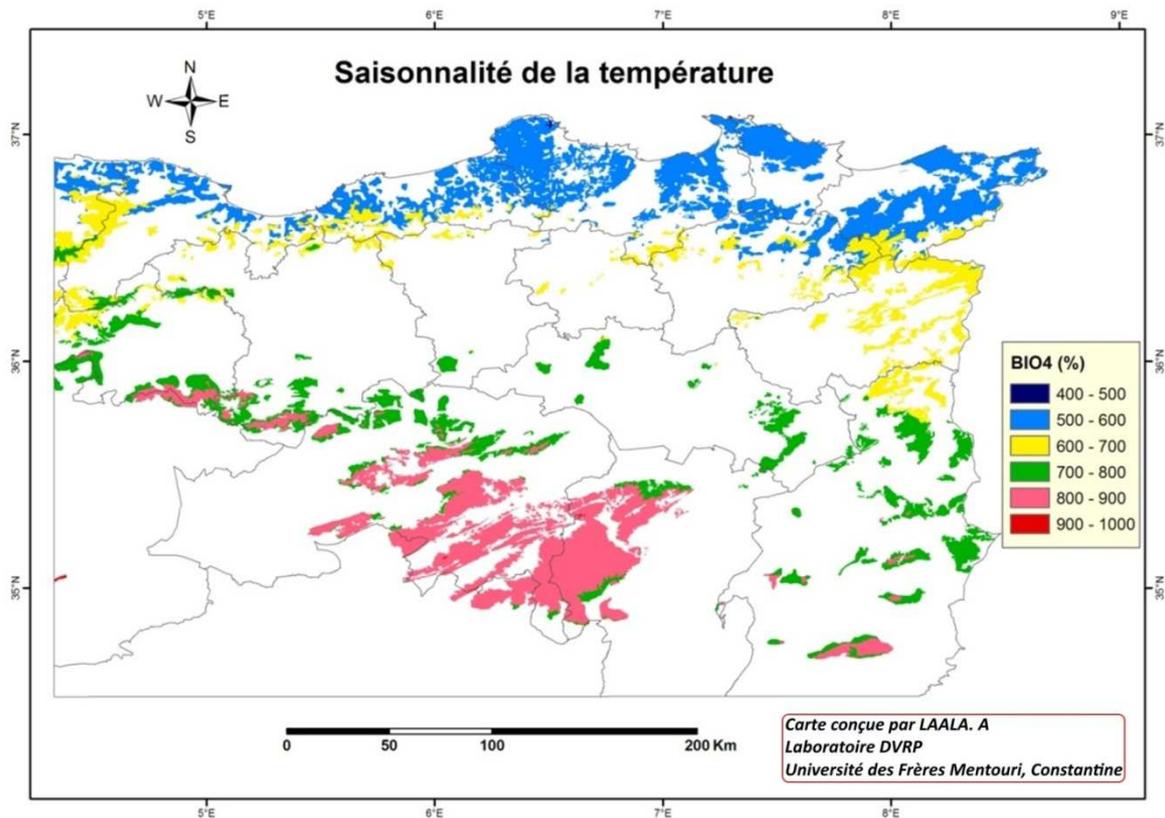


Fig.79: Saisonnalité de la température au niveau des forêts de l’Est algérien

Le minimum de la saisonnalité de la température passe de 486% au niveau des forêts de chêne liège à 678% au niveau des forêts de genévrier de Phénicie (fig.80). L’importante étendue verticale de la boîte à moustache pour le chêne vert traduit la variabilité spatiale de la saisonnalité pour l’ensemble des superficies de cette essence forestière, ce qui montre que le chêne vert supporte les grandes variations thermiques mensuelles.

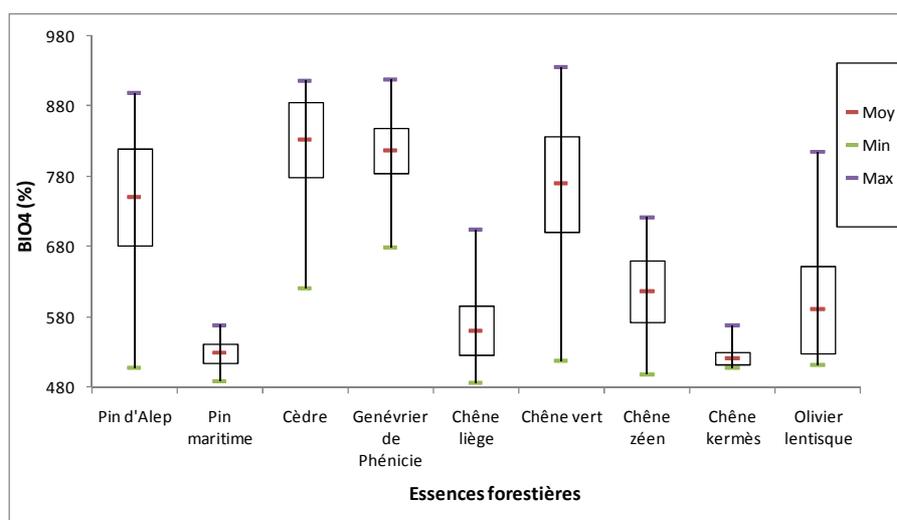


Fig.80: Statistique de la saisonnalité de la température au niveau de différents massifs forestiers

Dans l'ensemble, la classe à forte valeur de saisonnalité (800 à 1000%) est majoritaire pour les résineux et minoritaire pour les feuillus. L'écart entre les moyennes mensuelles est significatif au niveau des résineux vis à vis des feuillus (fig.81).

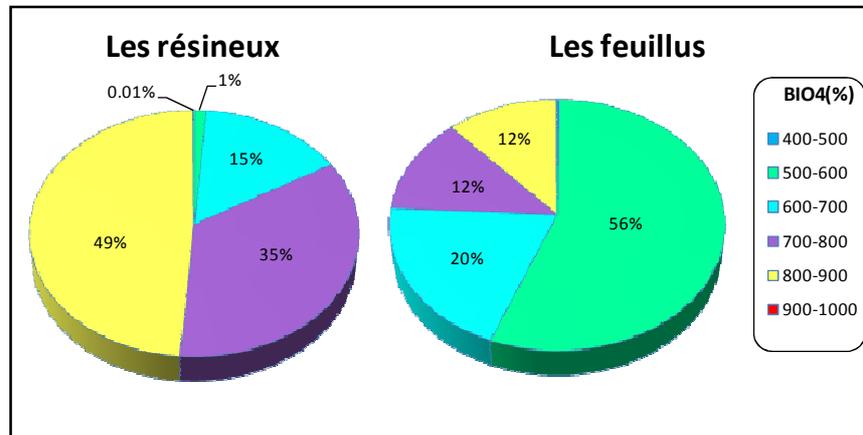


Fig.81: Proportion de classes de saisonnalité de la température au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.5. Température maximale du mois le plus chaud (BIO5) :

Les résultats statistiques des températures interpolées montrent que le mois le plus chaud pour l'Est algérien est le mois d'Août. D'après la figure 82, on peut remarquer que les valeurs maximales (38-40°C) sont peut représentées, elles sont observées au Sud et particulièrement à l'extrême Sud de la forêt de Beni Amloul et la forêt de Mezbel (Khenchela) où elles caractérisent une surface de 5.4% de la superficie totale de genévrier de Phénicie. Les valeurs les plus faibles de cette variable bioclimatique sont localisées au niveau des forêts des wilayas littorales et de quelques forêts de wilayas de l'intérieur tels que la forêt de Babor et Tababor de la wilaya de Sétif. Ainsi, la classe thermique (30-32°C) est majoritaire pour le chêne liège, chêne zéen et le chêne kermès.

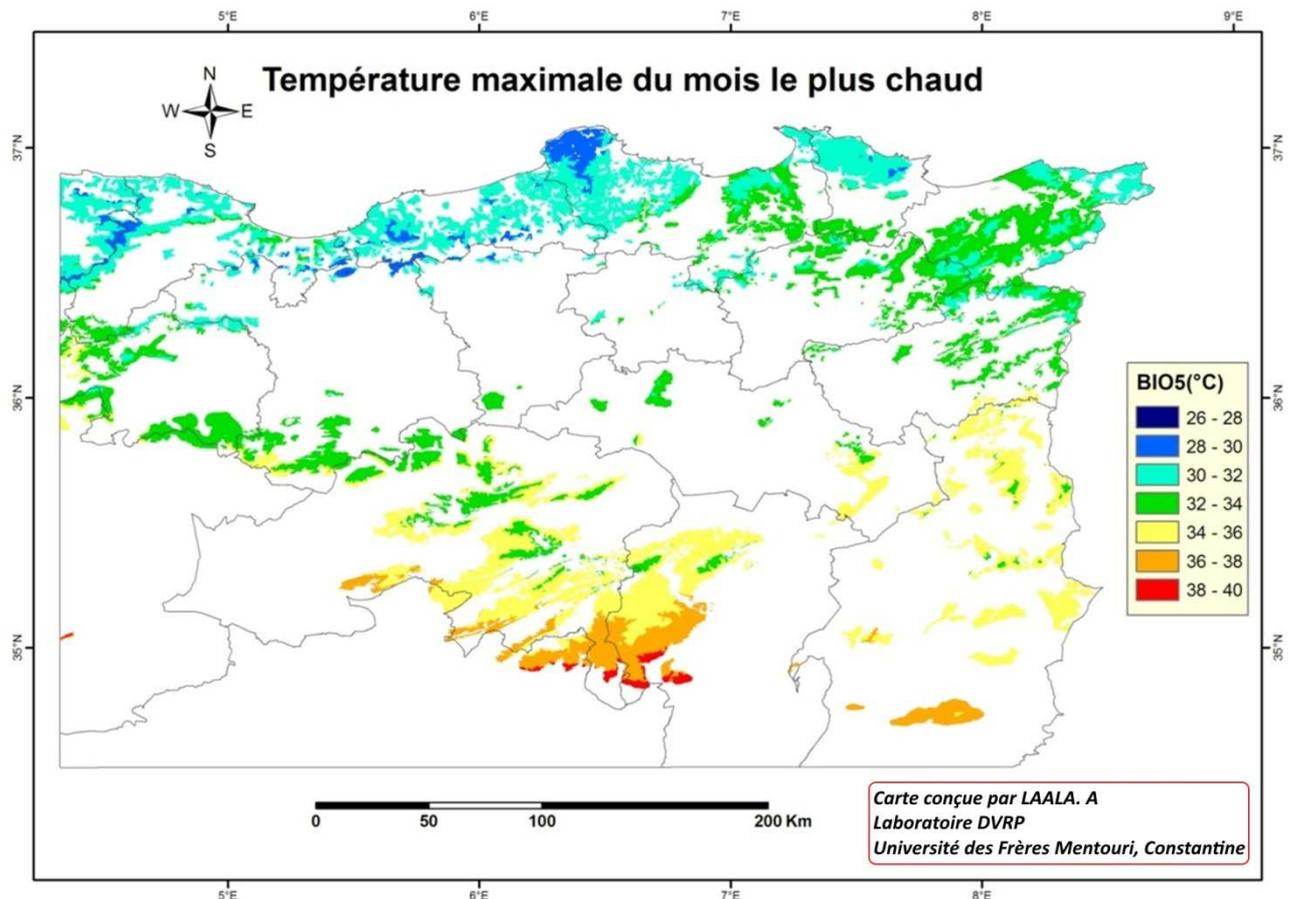


Fig.82: Températures maximales du mois le plus chaud au niveau des forêts de l’Est algérien

D’après la figure 83, on remarque que l’intervalle thermique de la température maximale du mois le plus chaud est compris entre : 30.4 et 37.3°C pour le pin d'Alep, 28.1 et 31.1°C pour le pin maritime, 27.9 et 36.2°C pour le cèdre, 31 et 39.3°C pour le genévrier de Phénicie. Pour les feuillus, la température maximales du mois le plus chaud varie de 28 à 38.3°C.

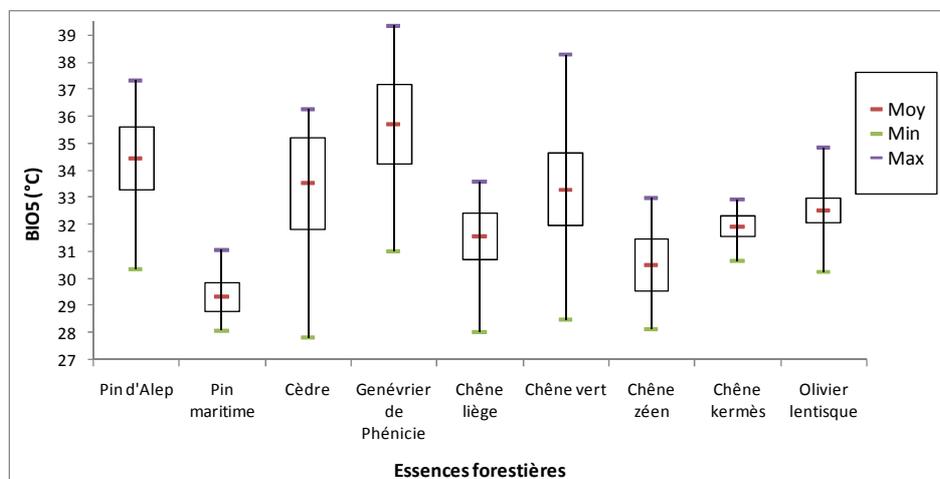


Fig.83: Statistique de la température maximale du mois le plus chaud au niveau de différents massifs forestiers

Globalement, plus de la moitié des superficies des résineux est dominée par les températures maximales du mois le plus chaud oscillant entre 34 et 36°C (fig.84), alors que 45% de la surface totale des feuillus préfère la classe thermique (30-32°C).

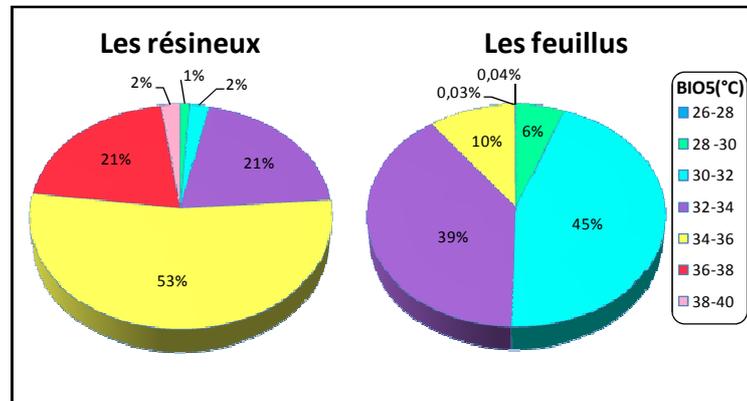


Fig.84: Proportion de classes de température maximale du mois le plus chaud au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.6. Température minimale du mois le plus froid (BIO6) :

La forêt de l'Est algérien se trouve dans des régions caractérisées par des températures minimales du mois le plus froide variant de (-9.8°C) à (+8.6°C), soit un écart très important égale à 18.4°C (fig.85). Les faibles valeurs de ce paramètre sont affichées au niveau des massifs forestiers à haute altitude tel que le massif d'Ouled Yagoub (2148m) et de Chelia (2296m) de la wilaya de Khenchela, de Babor (2002m) et Tababor (1855m) de la wilaya de Sétif. Pour le cèdre, 55.4% de sa superficie est dominée par des valeurs négatives de température minimale du mois le plus froid variant de -6 à -3°C, alors qu'un quart de sa superficie totale est caractérisé par des températures très basses allant de -9 jusqu'à -6°C. C'est le cas des céderais de la forêt de Chelia.

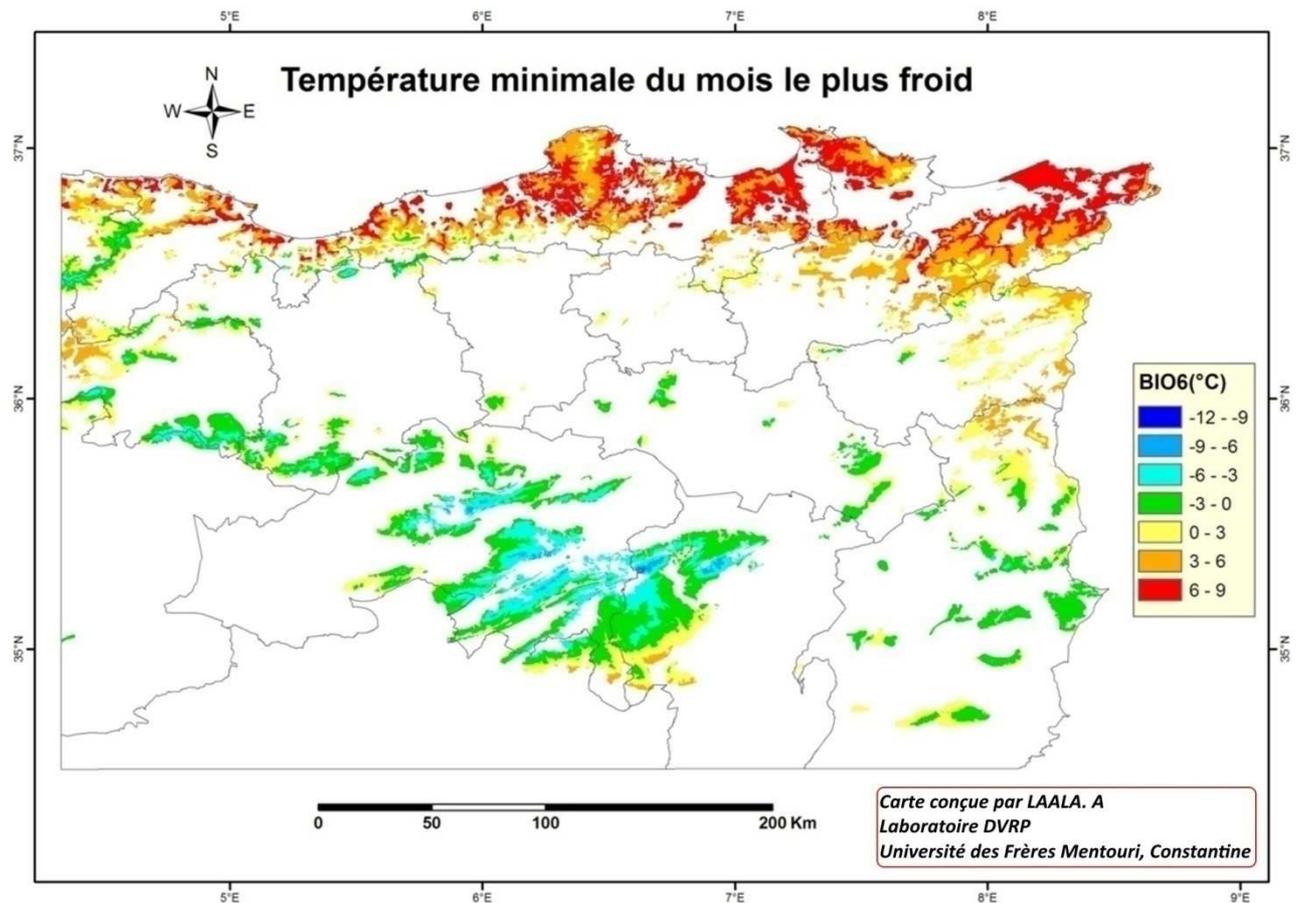


Fig.85: Températures minimales du mois le plus froid au niveau des forêts de l’Est algérien

Le pin d’Alep se trouve entre -7.4°C et 8.1°C avec une moyenne de $0 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$, le cèdre est localisé dans des limites thermiques de -9.75 et 3.8°C , avec une moyenne de $(-4.63 \pm 2^{\circ}\text{C})$, alors que la limite thermique du chêne liège varie de -4 à 8.6°C avec une moyenne de $5.2 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ (fig.86).

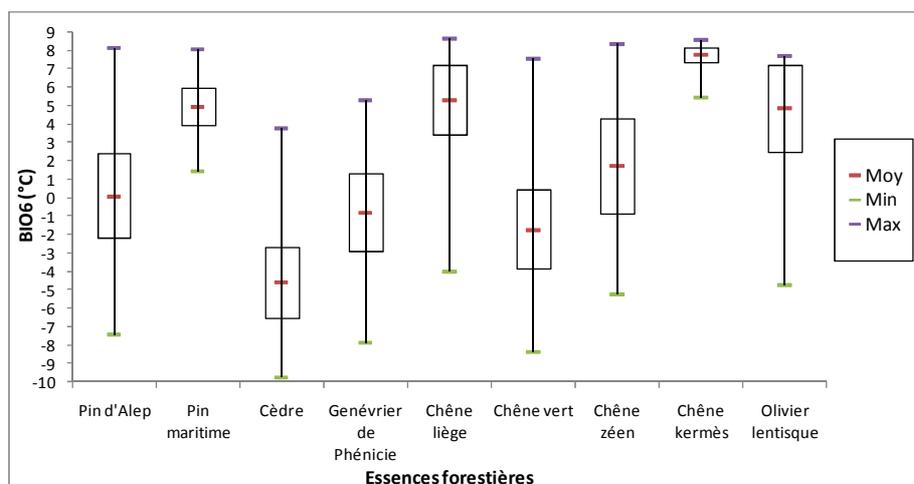


Fig.86: Statistique de la température minimale du mois le plus froid au niveau de différents massifs forestiers

En terme des valeurs de température minimales du mois le plus froid, la classe majoritaire pour les résineux est celle des températures négatives variant entre -3 et 0°C, alors que pour les feuillus est celle des températures positives (3 - 6°C) (fig.87).

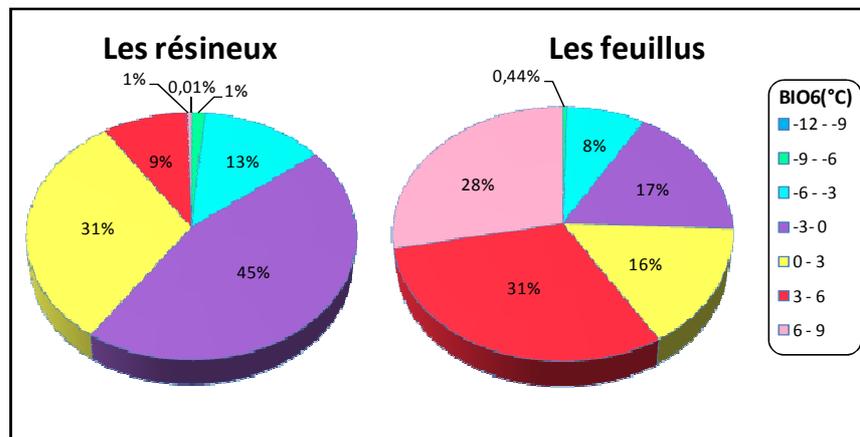


Fig.87: Proportion de classes de température minimale du mois le plus froid au niveau des résineux et feuillus de l’Est algérien

4.7. Amplitude annuelle maximale (BIO7) :

Il est défini comme étant la différence entre la température maximale du mois le plus chaud et la température minimale du mois le plus froid. Selon Ozenda (1991), le grand écart thermique entre l’hiver et l’été est l’un des caractères des climats continentaux.

D’après la figure 88, on constate que l’écart thermique entre l’hiver et l’été décroît du Sud vers le Nord. L’écart le plus important est localisé au niveau de la cédraie de l’Aurès qui résulte généralement de la diminution des minima hivernaux. Cependant, les plus faibles valeurs de cet écart thermique sont enregistrées au niveau des subéraies littorales. Dans ces stations, la diminution de l’amplitude annuelle est dûe exclusivement à un relèvement des températures hivernales, sous l’influence modératrice exercée par la mer (Seltzer, 1946).

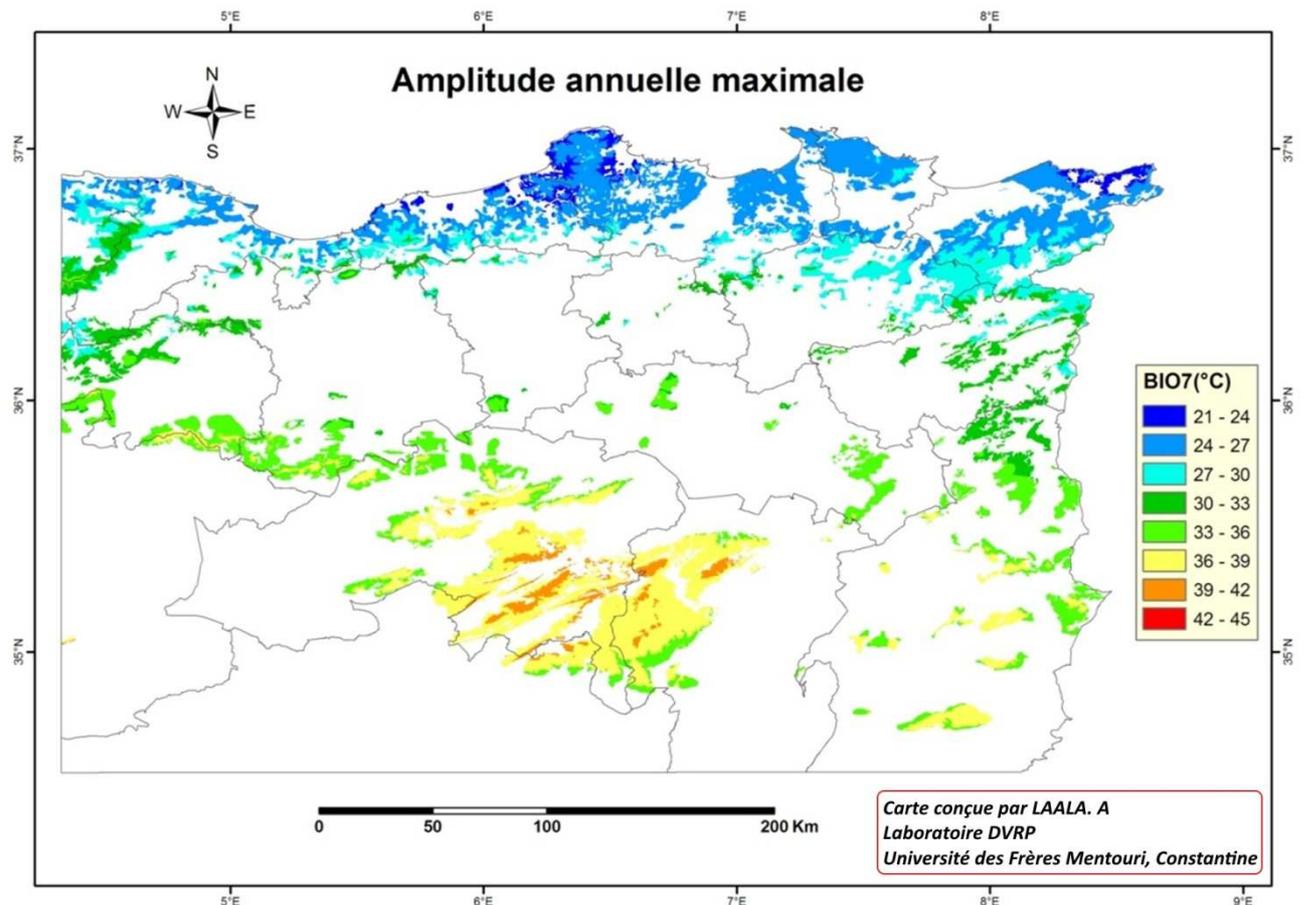


Fig.88: Amplitudes annuelles maximales au niveau des forêts de l’Est algérien

En termes d’espèces, les massifs de cèdre sont caractérisés par un écart thermique très important, entre l’hiver et l’été, qui peut atteindre $38.1 \pm 2.4^\circ\text{C}$. Pour les feuillus, le grand écart est enregistrée pour les massifs de chêne vert ($35 \pm 2.9^\circ\text{C}$) (fig.89). Cela peut nous indiquer le seuil de tolérance de ces essences forestières aux fluctuations thermiques de basse température de la saison hivernale et des hautes températures de la saison estivale.

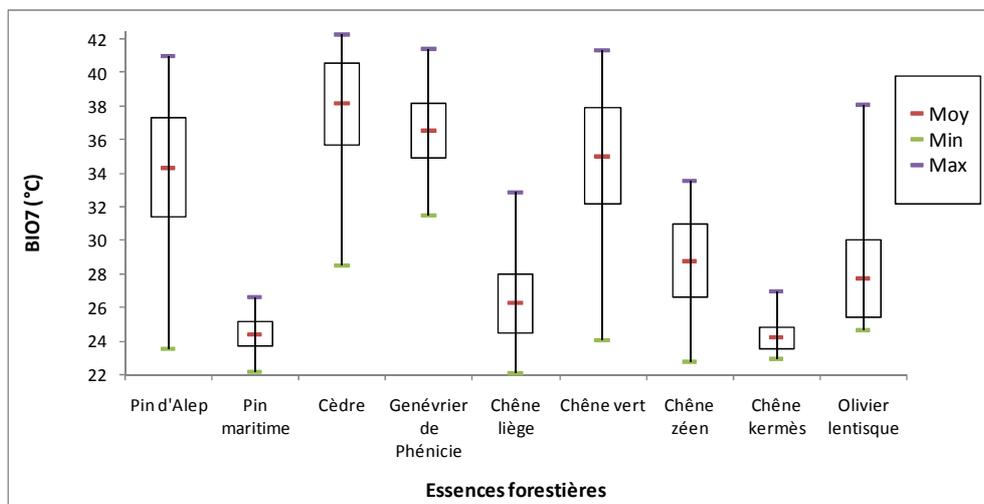


Fig.89: Statistique des amplitudes annuelles maximales au niveau de différents massifs forestiers

D'une manière globale, l'écart entre les valeurs extrêmes est important pour les forêts des résineux où 44% de la surface totale de ces écosystèmes forestiers est caractérisés par des amplitudes annuelles maximales variant entre 36 et 39°C, alors que pour les feuillus, cette classe thermique caractérise uniquement 11% de leur superficie totale (fig.90).

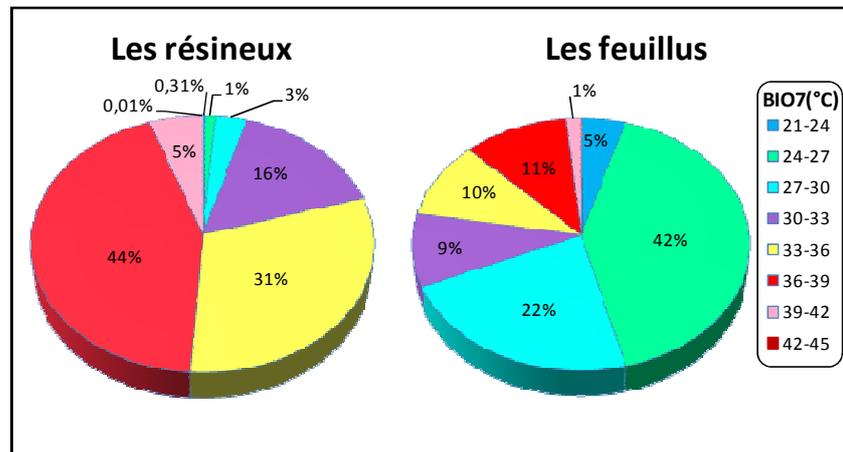


Fig.90: Proportion de classes d'amplitudes annuelles maximales au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.8. Température moyenne de la saison la plus chaude (BIO10) :

La figure 91 montre la distribution de six différentes classes de température moyennes de la saison la plus chaude au niveau des forêts de l'Est algérien. On peut remarquer la variabilité spatiale de ce paramètre bioclimatique où le minimum (17.9 °C) est enregistré au niveau des massifs forestiers de Babor, alors que le maximum (31.4 °C) caractérise l'extrême Sud des massifs de genévrier de Phénicie de la forêt de Beni Amloul et de Mezbel (wilaya de Khenchela).

En termes de pourcentage, 60% de la superficie du chêne liège est caractérisé par des températures variant entre 24 et 27°C, alors que seulement 0.5% de sa superficie est marquée par des températures moyennes de la saison la plus chaude variant entre 18 et 21°C. Pour le cèdre, la classe (21-24°C) domine 68% de sa superficie totale, alors que la classe (15-18°C) est quasiment absente (elle caractérise 0.05% de sa superficie).

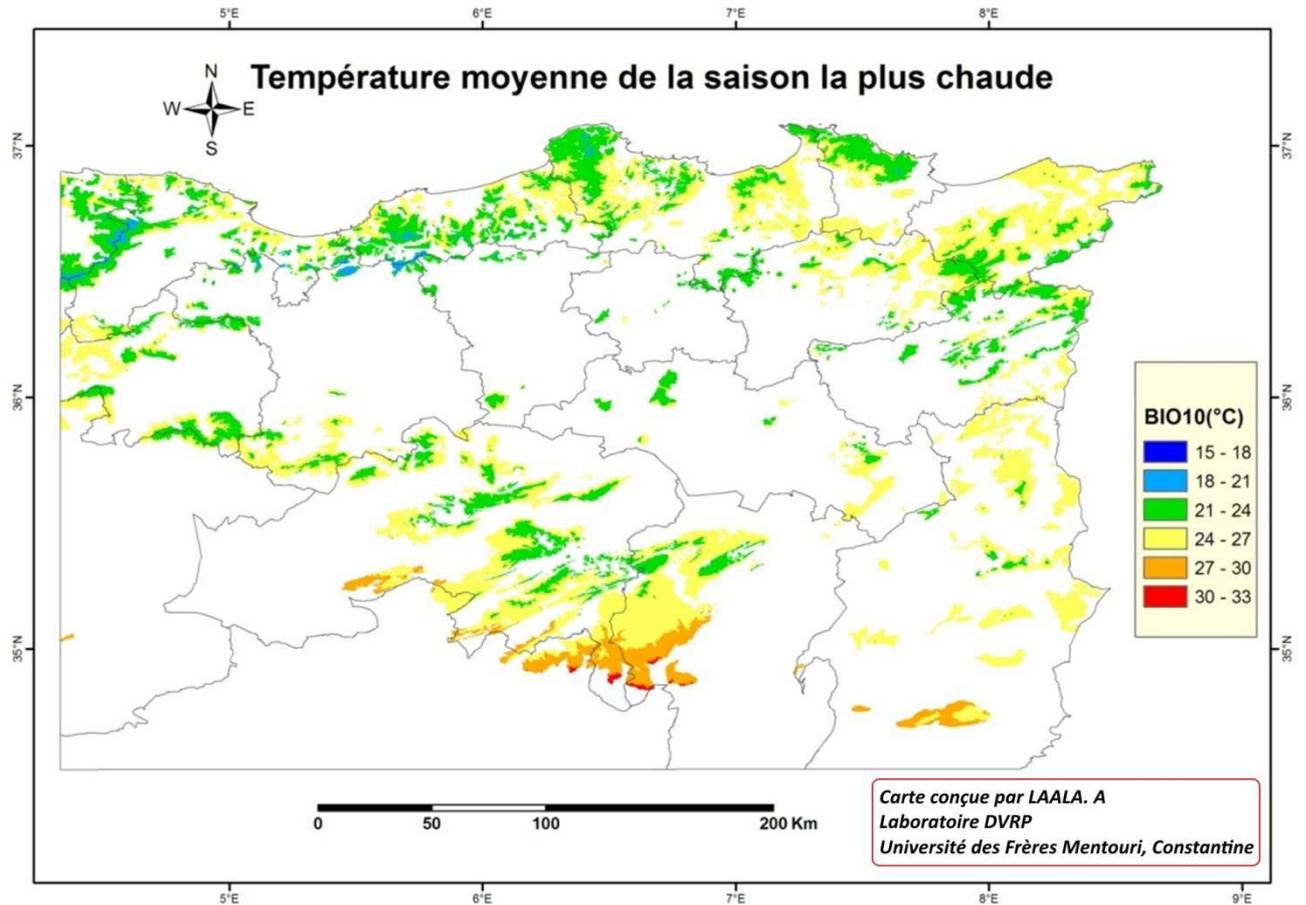


Fig.91: Températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau des forêts de l’Est algérien

En ce qui concerne les essences forestières, la température moyenne de la saison la plus chaude est de $25.1 \pm 0.9^\circ\text{C}$ pour le pin d’Alep, $23 \pm 1.6^\circ\text{C}$ pour le cèdre, $24.1 \pm 1^\circ\text{C}$ pour le chêne liège et $23.8 \pm 1^\circ\text{C}$ pour le chêne vert. Le minimum est enregistré au niveau de la cédraie (17.9°C) et le maximum au niveau des forêts de genévrier de Phénicie (31.4°C) (fig.92).

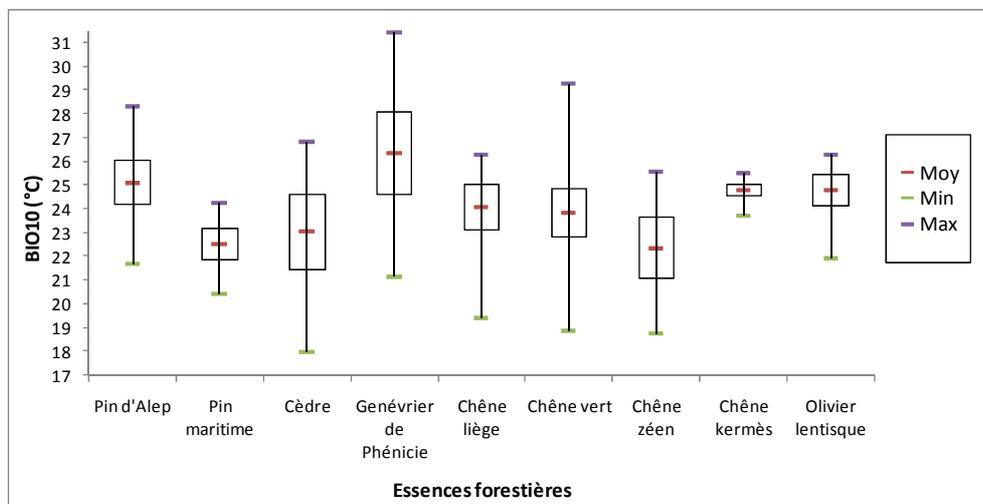


Fig.92: Statistique des températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau de différents massifs forestiers

Ainsi, la classe des températures moyennes de la saison la plus chaude (24-27°C) domine une vaste superficie des forêts de l'Est algérien, soit 60% de la superficie totale. Elle est majoritaire pour les résineux (71%) comme pour les feuillus (55%) (fig.93).

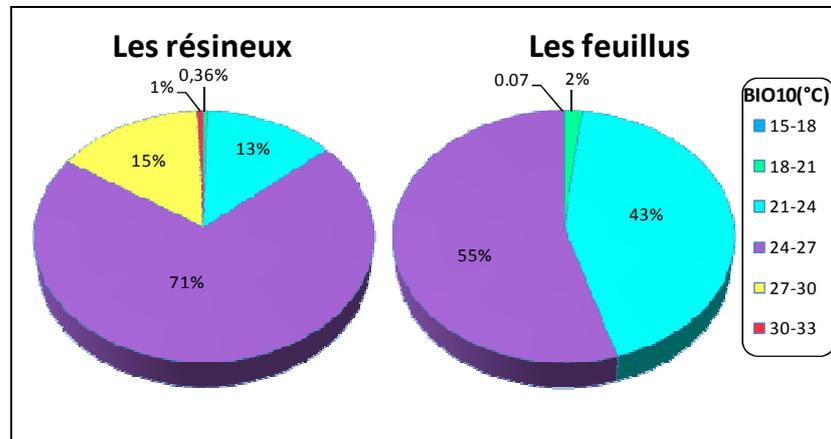


Fig.93: Répartition des températures moyennes de la saison la plus chaude au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.9. Température moyenne de la saison la plus froide (BIO11) :

Globalement, les températures moyennes de la saison la plus froide fluctuent entre 12 et 15 °C au niveau des forêts collinéennes et s'abaisse jusqu'à -2°C et moins dans les zones de hautes altitudes (>1800 m) qui sont principalement dominées par le cèdre de l'atlas (fig.94). C'est le cas de la forêt de Chelia et de Ouled Yagoub de la wilaya de Khenchela.

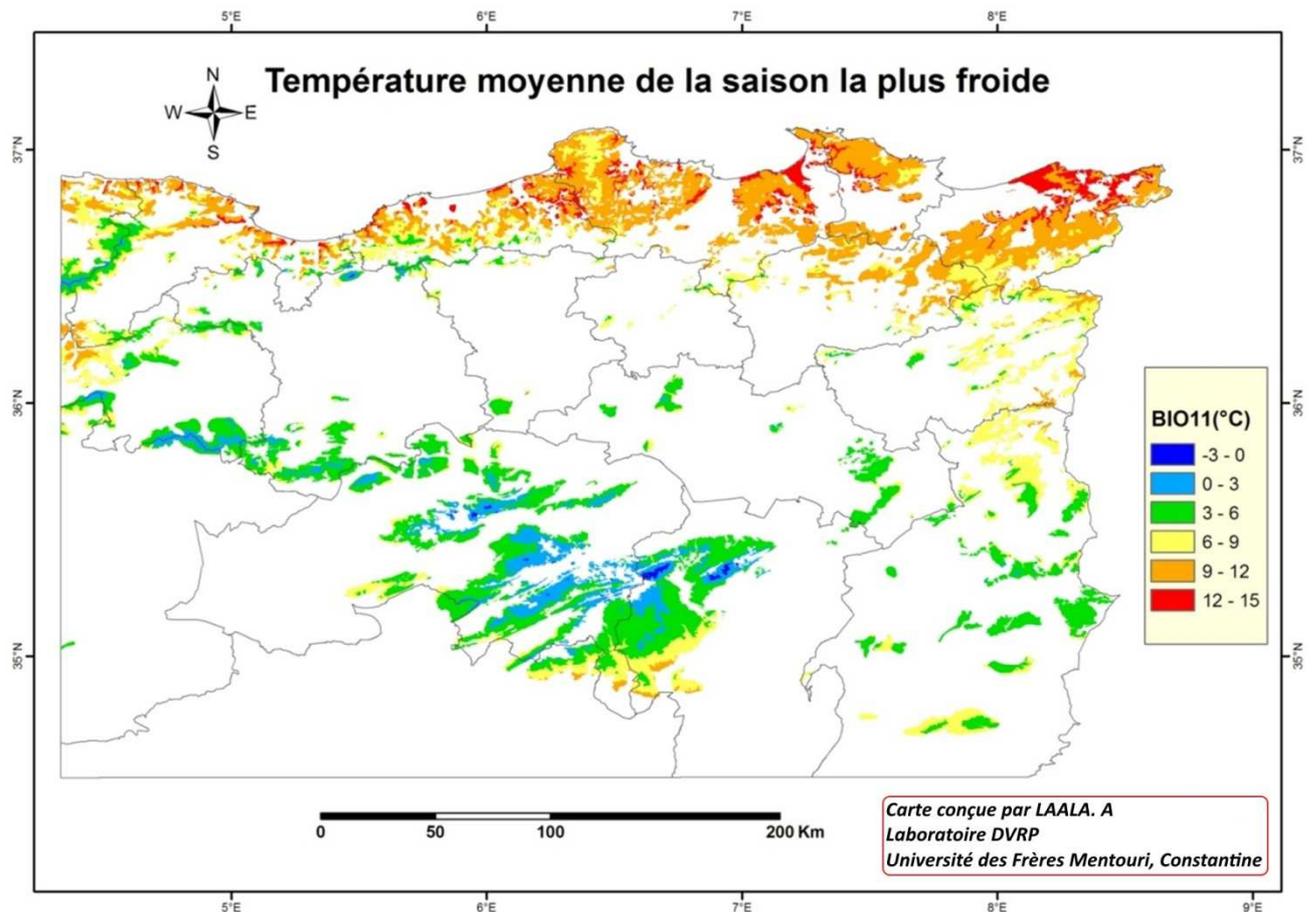


Fig.94: Températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des forêts de l’Est algérien

La limite thermique en termes de température moyenne de la saison la plus froide est différente d’une espèce à l’autre. Le minimum est observé chez le cèdre ($1.7 \pm 1.8^\circ\text{C}$), alors que le maximum est enregistré au niveau des forêts de chêne kermès ($12.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$). L’écart entre les valeurs extrêmes est de l’ordre de 14°C pour le chêne vert et de 2.4°C pour le chêne kermès (fig.95).

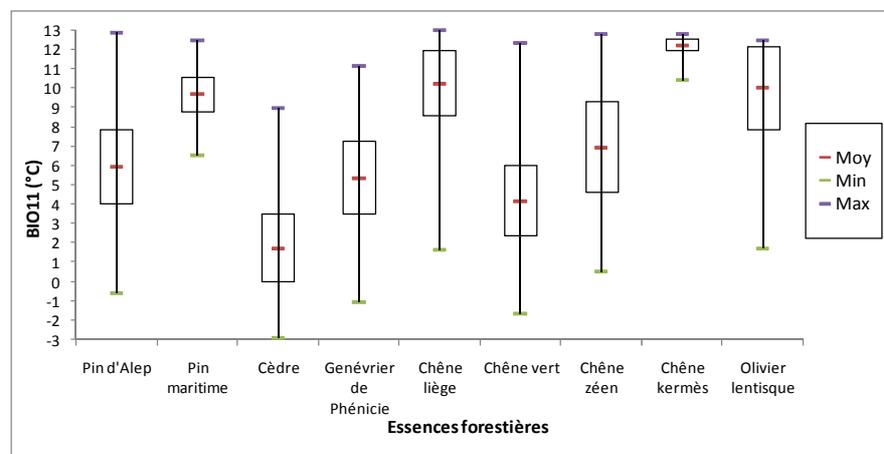


Fig.95: Statistique des températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des différents massifs forestiers

La classe majoritaire pour les résineux est celle où les températures moyennes de la saison la plus froide oscillent entre 3 et 6°C. Elle représente la moitié de sa superficie totale. Cependant, la classe dominante pour les feuillus est celle variant de 9 à 12°C caractérisant 43% de leur superficie (fig.96).

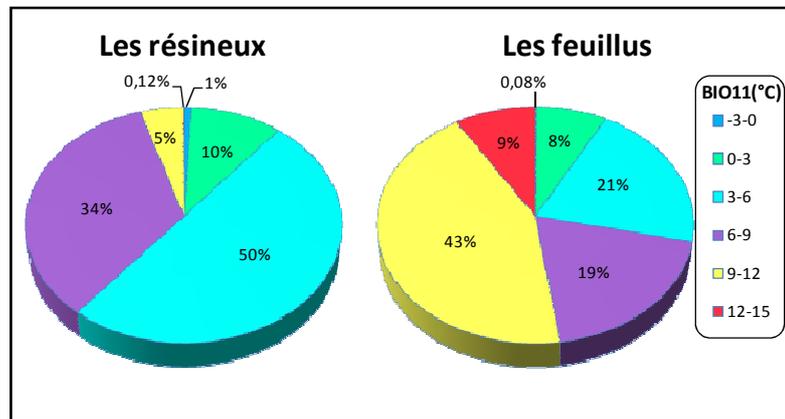


Fig.96: Répartition des températures moyennes de la saison la plus froide au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.10. Amplitude thermique annuelle (A) :

C'est l'écart entre la valeur la plus faible et la plus forte des moyennes mensuelles. D'après la figure 97, on constate une croissance de l'amplitude thermique annuelle du Nord vers le Sud. Le maximum de ce variable est observé au niveau de la forêt de Chelia, de Mezbel et de Djbel Ahmar Kraddou, alors que le minimum est affiché au niveau des forêts littorales de chêne liège, du chêne kermès et du pin maritime. La classe thermique (15-18°C) est majoritaire pour 76% de la surface totale du chêne liège, alors que celle (12 - 15°C) domine 89% de la surface totale du chêne kermès.

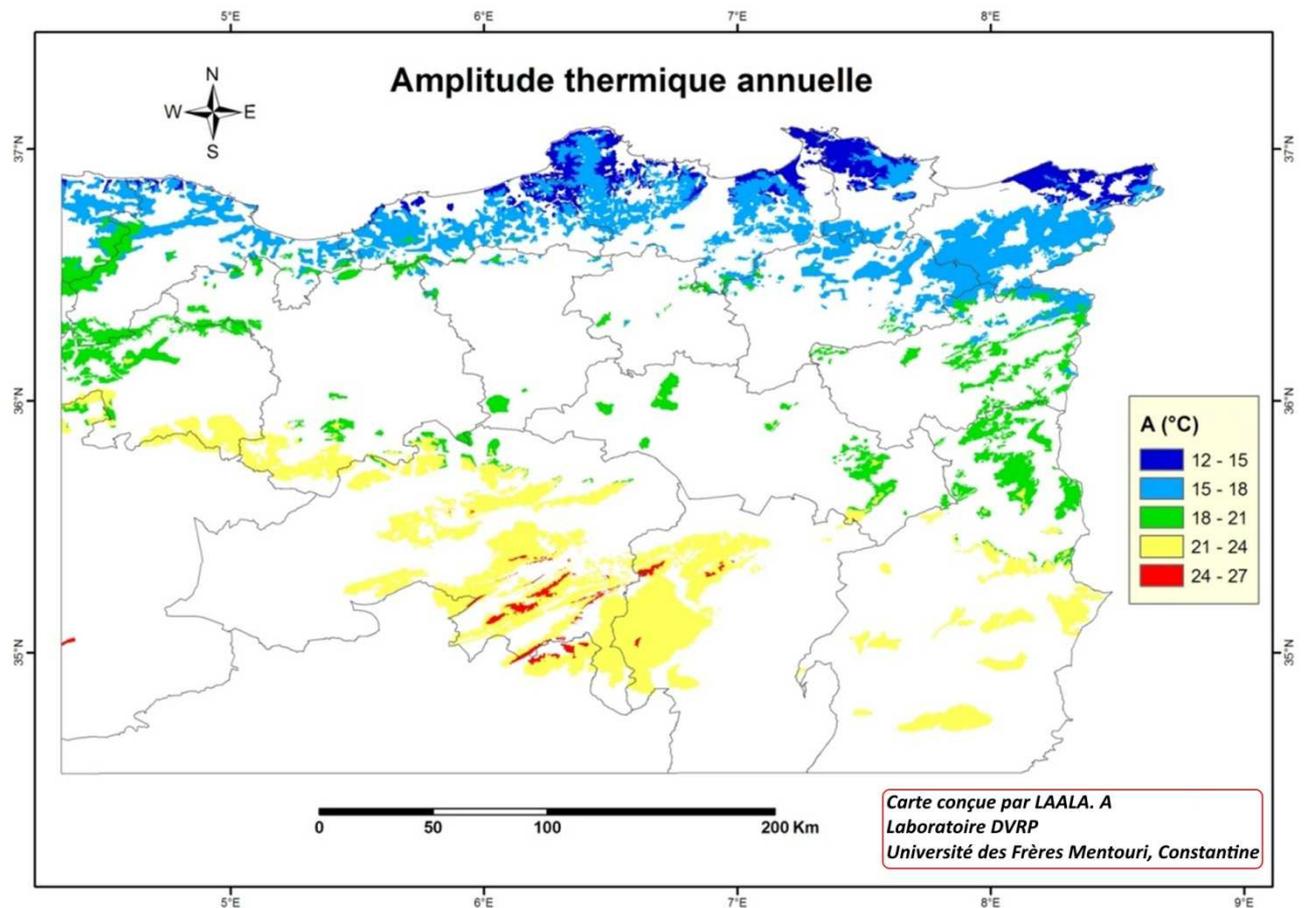


Fig.97: Amplitude thermique annuel au niveau des forêts de l’Est algérien

L’amplitude thermique annuelle fluctue entre un minimum de 14.6°C et un maximum de 24.8°C pour le pin d’Alep et entre 14.7°C et 25,42°C pour l’olivier lentisque. L’écart entre le minimum et le maximum est faible pour le Chêne kermès (2°C) et il est remarquable pour le Chêne vert (10.7°C) (fig.98).

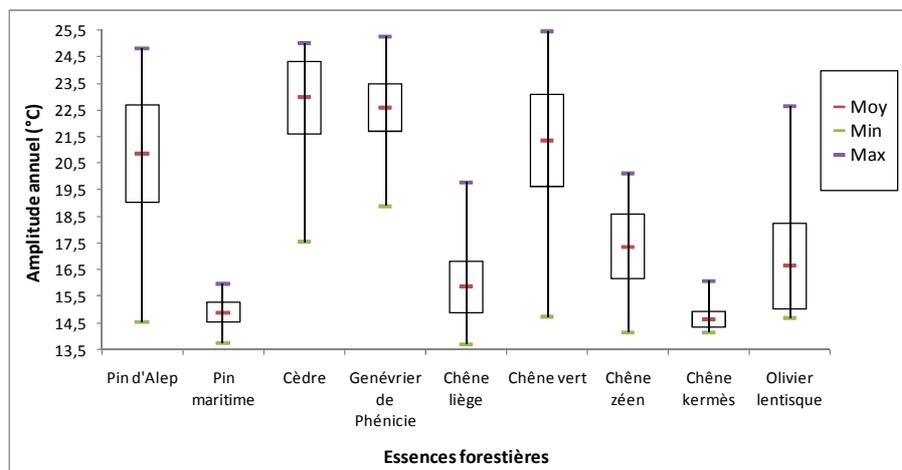


Fig.98: Statistique de l’amplitude thermique annuelle au niveau de différents massifs forestiers

La classe thermique majoritaire pour les résineux est celle où l'amplitude thermique annuelle variant de 21 à 24°C. Elle domine une surface forestière de 69% de la surface totale de cet écosystème forestier. Concernant les feuillus, 54% de leur superficie est dominée par des amplitudes allant de 15 à 18°C (fig.99).

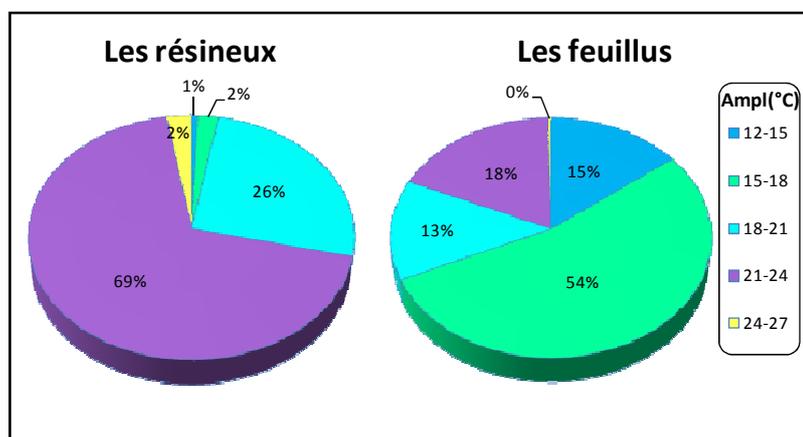


Fig.99: Répartition de classes d'amplitude thermique annuel au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

4.11. Indice de thermicité (It) :

En termes de superficie, plus de 42% de la surface du chêne liège est dominée par la classe Thermoméditerranéen supérieure, un quart de son superficie est dominé par la classe Thermoméditerranéen inférieure et un autre quart par la classe Mésoméditerranéen inférieure où le climat est trop doux, mais ni trop chaud (étage thermo- méditerranéen), ni trop frais (supra-méditerranéen). Cette zone est typiquement sous climat méditerranéen. D'un point de vue climatique, la limite inférieure de cette classe peut se définir avec la disparition des gelées (moins de 1 jour par an).

Pour le chêne kermès, la classe Thermoméditerranéen inférieure représente 97% de sa superficie (fig.100). Elle occupe les forêts littorales (de moins de 300 m d'altitude). La classe Thermoméditerranéen est caractérisée par un constat d'alternance de deux saisons contrastées très marquées (hiver frais et très pluvieux pendant 4-5 mois et été chaud et très sec pendant plus de 6 mois).

Concernant la classe du Supraméditerranéen supérieure où l'indice de thermicité est inférieur à 150, elle caractérise les forêts de Ouled Yagoub, Chelia, Ich Ali, Belezma, Hodna, Dreat, Babor et Tababor. D'un point de vue climatique, ces zones sont caractérisées par la continuité des gels nocturnes en hiver (température moyenne de Janvier négative).

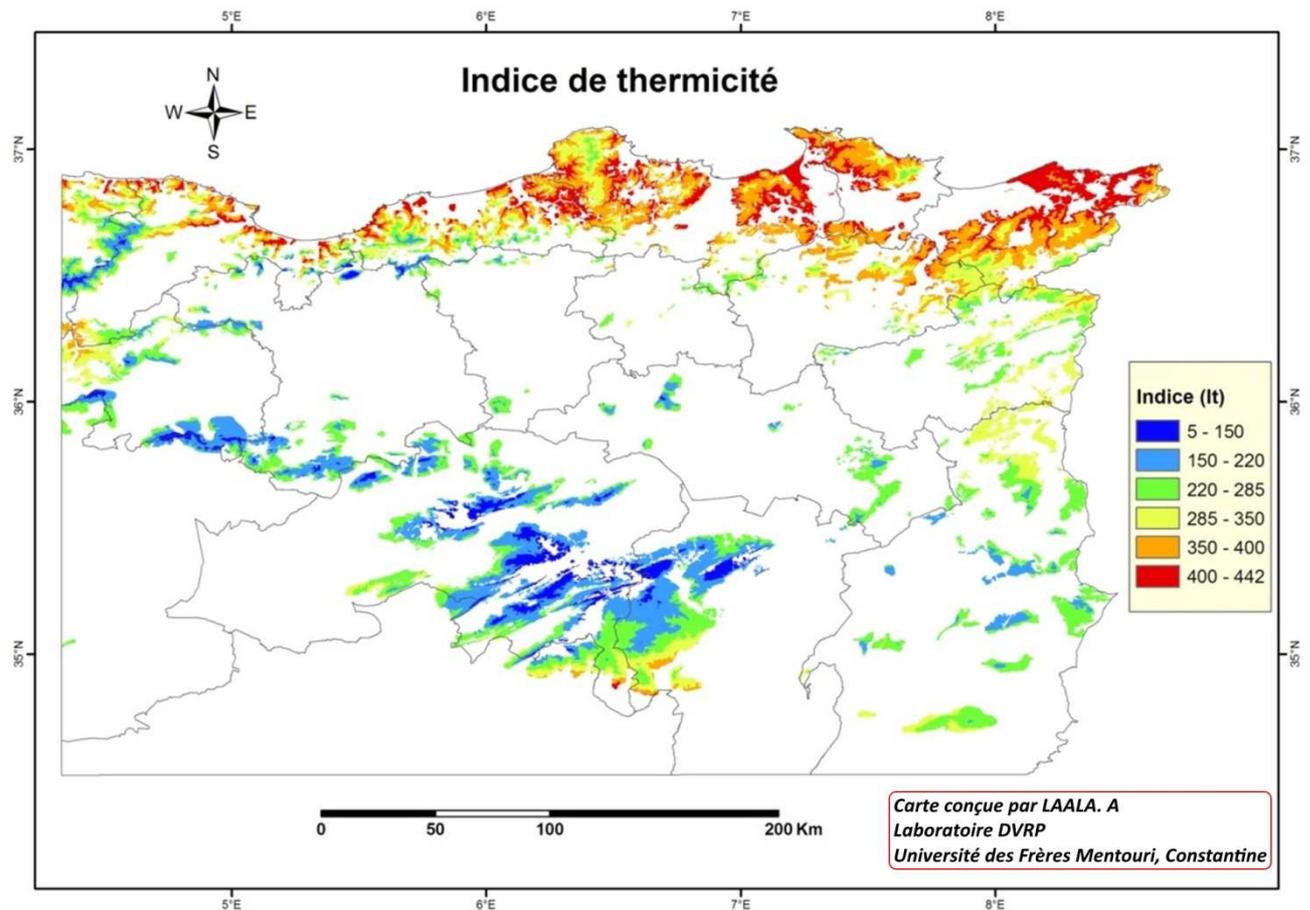


Fig.100: Indice de thermicité au niveau des forêts de l’Est algérien

Pour les pinèdes, l’indice de thermicité fluctue entre un minimum de 71.3 et un maximum de 437.5 avec une moyenne de 254.2 ± 51.8 . En ce qui concerne l’espèce la plus dominante de l’Est algérien qui est le chêne liège, l’indice varie de 119.7 à 442.1 avec une moyenne de 363.8 ± 47.5 (fig.101).

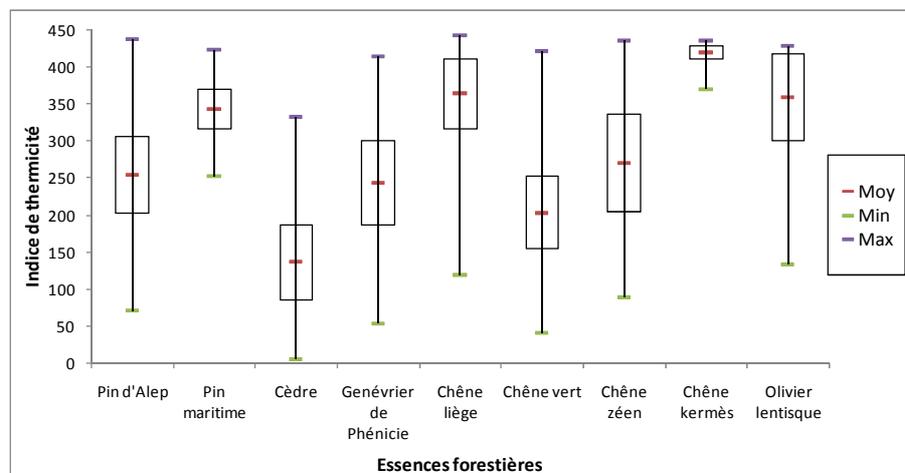


Fig.101: Statistique de l’indice de thermicité au niveau des différents massifs forestiers

La classe Mésoméditerranéen supérieure est majoritaire pour les résineux où elle occupe 45% de leur superficie totale, alors que 28% de la superficie des feuillus est dominée par la classe du Thermoméditerranéen supérieur (fig.102).

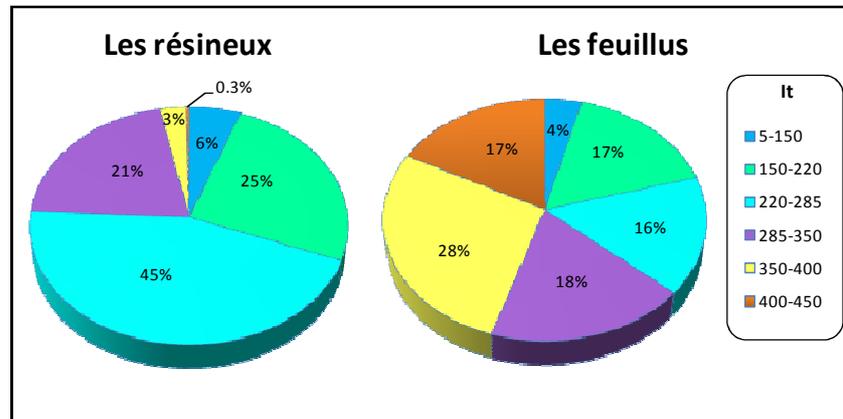


Fig.102: Proportion de classes d'indice de thermicité au niveau des résineux et feuillus de l'Est algérien

Discussion :

Le but de cette section de la thèse était d'analyser d'une part la variabilité temporelle des paramètres thermiques et leurs évolutions récentes dans chaque wilaya du Nord Est algérien et d'autre part cartographier particulièrement le climat thermique au niveau des forêts de cette vaste zone. Ainsi, une typologie des wilayas a été envisagée dans cette partie afin de déterminer les régions homogènes du point de vue thermique.

- **Fluctuation et tendances des températures :**

L'analyse des séries temporelles des données thermiques a permis de mettre en évidence une variabilité spatio-temporelle des températures minimales et maximales au niveau de l'Algérie orientale. Les dernières années de la période (1982-2011) symbolisent les années chaudes pour la quasi-totalité des wilayas de l'Est algérien où le poids thermique le plus important est observé au niveau de la wilaya de Batna (+15.8°C). Alors que les années froides constituent 40 à 57% des années analysées avec un poids thermique remarquable pour la wilaya de Msila (-16.9°C). On peut dire donc que l'extrême variabilité interannuelle de la température au niveau de l'Est algérien constitue certainement l'une des causes de stress thermique pour la végétation arborescente de cette vaste région.

Les températures minimales annuelles tendent vers un refroidissement pour la wilaya d'El-Taref, Jijel et Sétif, tandis que les wilayas de Bordj Bou-Arredj, Souk-Ahras, Tébessa, Oum El-Bouaghi et Skikda marquent une hausse de ces températures allant de 0.5 à 1.7°C/30ans. Ainsi, l'analyse chronologique de séries des températures maximales annuelles témoignent d'un réchauffement évident au niveau de la majorité des wilayas de l'Est algérien. A l'échelle régionale, une remarquable hausse de ces températures de l'ordre de 3°C/30ans est enregistrée à la wilaya de Batna, soit près de deux fois le taux de réchauffement de la wilaya de Sétif. Ce résultat est en accord avec le travail de Tabet-Aoul (2010) qui montre qu'en Algérie la hausse des températures au 20^{ème} siècle s'est située entre 1,5° et 2°C, soit plus du double de la hausse moyenne planétaire.

Nos résultats concordent aussi avec plusieurs études qui démontrent, au moyen des principaux postes climatologiques mondiaux, qu'il existe un réchauffement planétaire et envisage que la température moyenne de la terre aurait augmenté de 0,7 °C en un siècle (Boden *et al.*, 1994 ; Kelly *et al.*, 1985 ; Jones *et al.*, 1994 ; Mann *et al.*, (1998) ; Wilson et Hansen, 1994 ; Vinnikov *et al.*, 1994). Ces recherches soutenues sont justifiées par les conséquences notables

du changement climatique sur l'environnement de la terre et particulièrement sur le monde des végétaux.

Pour les régions méditerranéennes, de nombreuses recherches sur les variations climatiques et particulièrement sur la tendance des températures ont été conduites au cours des dernières décennies. En France, les températures suivent la même tendance au cours des dernières années que celle relevée à l'échelle mondiale (Seguin, 2007). Dessens et Barés (1996) ont mis en évidence une forte augmentation de la température minimale notamment en été (+0,93 C°) et en automne (+0,88 C°) et cela à partir de l'analyse des longues séries des températures de la période 1910-1986. La même remarque a été signalé pour les température moyenne au cours du travail de Moisselin *et al.*, 2002. Ces auteurs affirment une augmentation de ces températures de l'ordre de 0.9°C au cours du 20^{ème} siècle, mais avec une nette accélération sur la dernière décennie de ce siècle et sur la première du 21^{ème}. Cette tendance est plus importante pour les températures minimales (0.7 à 1.7°C /siècle) que pour les maximales (0 à 1.3°C).

Ainsi, Fratianni *et al.*, (2009) ont étudié les tendances des température de l'Italie et montre aussi une augmentation des températures saisonnières de l'ordre 0,07 °C pour les maximas et de 0,03 °C pour les minimas et cela durant la période de 1971-2000.

Concernant l'Espagne, l'analyse statistique des longues séries de température réalisée par Quereda *et al.*, (2005) montre une tendance significative au réchauffement, avec une augmentation de la température moyenne annuelle comprise entre 0,5 °C et 1,2 °C pour la période 1870-1996. Cependant, les différentes valeurs de la tendance suggèrent que le réchauffement n'a pas affecté les stations de façon homogène.

Pour notre étude, les maximales tendent à une augmentation plus remarquable que les minimales et l'amplitude thermique est notable pour la majorité des wilayas étudiées. Ceci est en désaccord avec l'étude d'Easterling *et al.*,(1997) qui montre que l'augmentation de la température minimale avait été supérieure à celle de la température maximale entraînant une diminution de l'amplitude thermique diurne.

Le résultat saisonnier révèle aussi une tendance positive des températures maximales saisonnières pour presque toutes les wilayas étudiées avec bien sûr une certaine variabilité inter-saisonnière, ce qui montre la vigueur de l'accroissement des températures maximales au

cours de la période 1982-2011. Cependant les températures minimales saisonnières présentent un mélange de baisse et de hausse pour les 15 wilayas étudiées.

En printemps et en été, les tendances significativement positives sont largement majoritaires, alors qu'en hiver et en automne, elles sont observées uniquement au niveau de trois stations météorologiques des wilayas de Tébessa, Souk-Ahras et Bordj Bou-Arredidj. Tabet-Aoul (2008) signale également une hausse de température moyenne de l'Algérie au cours des saisons d'hiver et d'automne durant la période (1930-2000) et une hausse nette des températures minimales et maximales sur le Nord du pays.

La distribution géographique des tendances des températures (minimales et maximales) pour la saison printanière est presque comparable à celle de la saison estivale, alors que celle de la saison automnale est pratiquement analogue à celle de la saison hivernale. Ceci nous permet de diviser l'année en deux saisons distinctes : une saison froide et une saison chaude et donc c'est l'une des caractéristiques du climat méditerranéen.

Ducouso et Déqué (2005) affirment que les augmentations des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, protoxyde d'azote...) sont responsables des élévations globales des températures et par là-même du réchauffement planétaire. Le GIEC (2007) précise aussi qu'il est hautement probable que le réchauffement de la terre soit d'origine anthropique. Une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère conduit à une augmentation du rayonnement solaire piégé sur Terre et donc à un forçage radiatif dont le bilan est positif, résultante de l'effet de serre additionnel (Rabourdin, 2005). Le GIEC (2007) prévoit aussi que la croissance mondiale et le développement économique associé auront pour effet la poursuite des rejets massifs de gaz à effet de serre. Le réchauffement climatique dans le futur sera donc amplifié par leur stockage dans l'atmosphère avec les conséquences socio-économiques, environnementales qui en résulteront.

De plus, les différents modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) prévoient, selon les scénarios, une hausse de la température moyenne du globe, de 2 à 6°C d'ici la fin du 20ème siècle (Pachauri et Reisinger, 2007). En ce qui concerne l'Algérie, les projections climatiques de l'avenir indiquent que ce pays va éventuellement subir encore plus, des variations importantes des hausses des températures et projettent une hausse de des températures de 2° à 3°C à l'horizon 2050 (Rousset, 2006 in Boussard et Chabane, 2011).

Ces résultats constituent un cri d'alarme lancé aux décideurs pour définir des politiques stratégiques d'adaptation durables, puisque ces tendances vers le réchauffement auront toujours des incidences nocives et palpables sur les écosystèmes forestières. La liste de ces conséquences possibles qui en découlent est longue, parmi lesquelles, on peut citer : le débourrement et la floraison plus précoce des arbres, la chute plus tardive de leurs feuilles, avortements floraux, sensibilité au gel hivernal et printanière, phénologie erratique, maturité échelonnée, difficulté de régénération, croissance limitée, forte vulnérabilité aux attaques massives des insectes...etc.

Ce réchauffement peut provoquer aussi un déplacement des aires de répartition de la majorité des essences forestières vers des habitats favorable thermiquement à leurs croissances et leurs développements. Il faut cependant signaler que la réaction et le déplacement de ces écosystèmes n'est pas immédiate.

- **Spatialisation du champ thermique :**

Le deuxième objectif de notre étude est de restituer le champ spatial continu de la température, au niveau de l'Algérie orientale, à partir des valeurs mesurées ponctuellement au niveau des stations météorologiques. La question est donc de savoir d'une part, quelles sont les variables orotopographiques les plus explicatifs de la variabilité spatiale des températures au niveau de l'Est algérien, et d'autre part déterminer la méthode optimale d'interpolation qui fournit les meilleures estimations.

La spatialisation de données climatiques et notamment les températures a fait l'objet de nombreuses études qui testent la fiabilité de diverses méthodes d'interpolation pour plusieurs régions du monde. Courault et Monestiez (1999) ont essayé de spatialiser les températures journalières du Sud-Est français par une approche géostatistique (le krigeage ordinaire). La même méthode a été utilisée par Holdaway (1996) pour l'estimation des températures mensuelles des zones forestières de Minnesota (Nord-Est de l'USA) et aussi par Benavides *et al.*, (2007) pour la spatialisation des températures moyennes du mois de Janvier pour les montagnes du Nord de l'Espagne.

Ainsi, Ninyerola *et al.*, (2000) ont cartographié les températures et les précipitations de Catalonia (Nord-est de l'Espagne) par une méthode statistique basée sur l'analyse de régression multiple entre ces variables météorologiques et les variables géographiques (altitude, latitude, continentalité et radiation solaire). En 2007, ces chercheurs ont utilisé la même méthode pour cartographier les températures minimales mensuelles de la Péninsule Ibérique. Ainsi, dans une

étude récente, Joly *et al.*, (2009) ont modélisé la relation statistique entre les températures quotidiennes (minimums et maximums) de quatre zones d'étude (Franche-Comté, PACA, Gironde et Slovénie) par une méthode de régression multiple qui croise ces variables thermiques avec des variables topographiques. D'autre part, Rodriguez-lado *et al.*, (2007) ont spatialisé les températures (moyennes, minimales et maximales) de la wilaya de São Paulo (Brazil) par une nouvelle méthode qui combine la régression multiple avec un krigeage ordinaire.

Nalder et Wein (1998), confirment qu'il n'existe pas une méthode optimale d'interpolation applicable sur toutes les régions. Plusieurs méthodes géostatistiques ont été utilisées par ces auteurs pour modéliser les températures et les précipitations pour tout le Nord Ouest du Canada et cela à partir de 31 stations météorologiques.

En Algérie, plusieurs travaux ont caractérisé la variabilité spatiale des précipitations (Aissani et Laborde, 1983 ; Touazi et Laborde, 2000 ; Mebarki, 2005 ; Louamri, 2009 ; Touaibia *et al.*, 2006), par contre il est difficile de trouver des travaux portant sur la spatialisation du champs thermique pour le territoire algérienne. La seule étude climatique sur l'Algérie orientale est celle de Tabet (2008). Elle est basée sur une méthode déterministe d'interpolation inversement proportionnelle à la distance (IDW : Inverse Distance Weighting) pour cartographier les températures annuelles et saisonnières de l'Est algérien en utilisant 08 stations météorologiques. Cependant, l'emploi unique de cette méthode d'interpolation ne convient pas en relief fortement contrasté comme le cas de l'Est algérien. Il est donc nécessaire de prendre en compte des variables topographiques, décrivant du terrain, qui expliquent mieux la variabilité du champ thermique.

La synthèse de l'ensemble des résultats sous un système d'information géographique (SIG) nous a permis de représenter, sous forme d'une carte, le champ thermique de chaque point de l'Est algérien. En effet, la méthode de la régression seule est mal adaptée à l'interpolation des températures minimales et maximales car elle donne des résidus supérieurs à 0.5°C pour une vaste surface de la zone d'étude. Les résultats affirment aussi que la 2^{ème} méthode qui combine la régression multiple avec le krigeage est la méthode retenue pour l'interpolation de la température au niveau de l'Algérie orientale. Elle offre des résultats fiables et proches des valeurs observées avec une domination des résidus statiquement acceptable et presque négligeable pour une vaste superficie de notre zone d'étude.

La signification des variables explicatives dans l'interpolation des températures mensuelles varie selon le mois et le type de la température analysée (minimale ou maximale). Les coefficients de corrélation marquent le rôle significatif et structurant de l'altitude qui joue le rôle d'une variable explicative du caractère thermique de l'Est algérien et cela pour tous les mois de l'année. Elle est négativement corrélée avec les températures mensuelles. Cette relation est conforme à nos attentes, puisque plus on monte en altitude plus la température diminue jusqu'à atteindre des valeurs nettement inférieures. À l'inverse, la longitude est non significatives au seuil de 5% pour tous les mois de l'année et n'entrent en aucun cas dans le modèle.

Les résultats de la régression multiple permettent aussi de déduire le gradient thermique annuel de l'Est algérien qui varie de $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les minima à $-0,36^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ d'altitude pour les maxima. Nos résultats sont différents de ceux rapportés par Tir (2008) qui a constaté que le gradient annuel des minima pour l'Est algérien est de 0.33°C pour 100m de dénivellation, tandis que celui des maxima est de 0.72°C , soit un écart non négligeable par rapport à nos résultats égal à 0.27°C pour les minima et 0.36 pour les maxima. Ainsi, l'étude récente réalisée par Farah (2013) au niveau de l'Est algérien avance des valeurs différentes : $-0,44^{\circ}\text{C}$ pour les maxima et $-0,25^{\circ}\text{C}$ pour les minima.

L'écart important entre ces valeurs du gradient verticale peut être s'expliqué par les données utilisées et par la méthodologie suivie. En effet, pour ces deux études, la régression est réalisée sur un très faible échantillon et avec une seule variable explicative (altitude). Tir (2008) a utilisé les séries thermiques de 14 stations pour estimer ce gradient, alors que Farah (2013) néglige les stations du littoral et considère que l'estimation des températures au niveau de ces dernières est perturbée par l'influence de la mer méditerranéenne qui cause une inversion thermique en été. Il rejette aussi la station de Batna à cause de l'influence du climat saharien et donc, il a retenu seulement 7 stations météo pour le calcul du gradient thermique. Donc ces deux études ne prennent pas en compte l'hétérogénéité altitudinal de l'Est algérien et utilisent un très faible échantillon non représentatif du terrain. Alors, que durant ce travail nous avons tenté de calculer le gradient thermique en fonction d'une importante série de données qui comporte 13.694.960 valeurs thermiques et altitudinales représentant le nombre total des pixels de l'Est algérien.

Ainsi, les données thermiques issues de l'interpolation nous permettent aussi de calculer les gradients thermiques à une échelle régionale à partir de la relation altitude-température, mais les résultats obtenus confirment qu'il est difficile d'arriver à déterminer le gradient thermique

d'une région quelconque à partir des seules données de températures et d'altitudes. Il faut prendre en considération d'autres facteurs d'ordre géographique et topographique pour arriver à une évaluation correcte des variations des températures avec l'altitude. Par d'exemple, à altitude égale, les minima sont plus faibles dans les fonds de vallée que sur les adrets (versant exposé au Sud). Donc, les méthodes qui ne tiennent pas compte de la topographie donnent des résultats décevants.

D'autre part, le gradient altitudinal est un peu plus faible pour les maximums que pour les minimums. De tels résultats ont déjà été mentionnés au cours d'une étude polonaise de Hess *et al.*, (1975), qui indique également des valeurs de gradients moins élevés pour les maximums que pour les minimums. Selon cette étude, la forme des versants, convexe ou concave, modifie également le gradient thermique. Les formes concaves connaissent un gradient thermique plus fort, notamment pour les minima. Pour notre étude, ces terrains concaves sont majoritaires dans l'Est algérien.

La méthode d'interpolation suivie, malgré elle donne des résultats proches de la réalité avec une résolution spatiale fine (90m), elle présente aussi des limites car elle ne prend pas en compte l'interaction d'autres variables climatiques avec la température tels que l'humidité, le vent....

Globalement, on dispose donc des cartes thermiques qui peuvent contribuer à différentes analyses, sous S.I.G, visant à expliquer la distribution spatiale des écosystèmes forestiers de l'Est algérien et par conséquent elles constituent une source d'information qui aide les forestiers à choisir l'essence forestière à planter dans certains sites.

- **Régionalisation thermique des wilayas :**

Pour mieux comprendre le climat à l'échelle de l'Est algérien, il est important de subdiviser cette vaste zone en régions thermiquement homogènes et de cibler les paramètres climatiques qui jouent un rôle important dans cette typologie. Cette approche peut aider les écologistes à résumer plusieurs paramètres climatiques et à déterminer celui qui explique mieux la distribution de la végétation dans ces régions.

Plusieurs études ont été réalisées dans le but de déterminer les zones climatiquement homogènes à partir d'une analyse en composantes principales (ACP) et des méthodes de classification (Guiot, 1986 ; Wigley et Col, 1984 ; Steiner, 1965 ; Jedidi *et al.*, 2009, Salinger,

1980; Salama, 2011). Ces méthodes statistiques permettront une régionalisation intégrant à la fois les variations temporelles et le maximum de paramètres climatiques les plus pondérant.

Notre étude a permis la réduction de plusieurs variables climatiques et particulièrement thermométrique en un seul paramètre : c'est la température moyenne annuelle qui résume les caractéristiques et les variations du climat de l'Est algérien. Elle nous a permis d'identifier trois zones (A, B et C), ayant des caractéristiques thermiques homogènes. La première représente la région côtière avec la wilaya de Guelma qui semble, d'après l'ACP, très proche thermiquement aux wilayas du littoral. La deuxième est la région des hauts plateaux et du piedmont Sud de l'Atlas Saharien, alors que la troisième est celle des régions présahariennes. Sachant que les noms donnés à différentes régions thermiques sont tout à fait relatifs. Cette régionalisation thermique nous a permis de déterminer les variables thermiques les plus significatives qui caractérisent le territoire de l'Est algérien et par conséquent appréhender de façon globale le climat d'une vaste région.

Ainsi, l'analyse chronologique de séries des températures moyennes annuelles témoigne d'un réchauffement évident au niveau de ces trois régions homogènes. Les tendances thermiques peuvent nous aider à identifier les régions exposées au risque de réchauffement et par conséquent aider les décideurs à la mise en place d'une stratégie d'adaptation régionale nécessaire.

L'un des perspectives de cette contribution est l'inclusion d'autres variables climatiques (précipitation, humidité, vents...) pour un zonage climatique impeccable de l'Est algérien qui va aider les biogéographes à mieux expliquer les raisons de la répartition géographique des espèces. Ainsi l'implantation de plusieurs stations météorologiques au niveau de ce territoire sera nécessaire pour découper l'Est algérien en régions homogènes plus fines dont les éléments réagissent de façon similaire aux variations climatiques.

- **Limites thermiques des essences forestières de l'Est algérien :**

Chaque essence forestière se caractérise par des exigences qui lui sont propres : climatiques (précipitations, températures...), topographiques (altitude, exposition,...), pédologiques (texture, acidité, ...) et qui contribuent à l'organisation de leur distribution spatiale à l'échelle des territoires. Nous avons couplé les rasters bioclimatiques, issus de l'interpolation des températures de la période 1982-2011, à la distribution géographique des écosystèmes forestiers pour identifier les conditions thermiques dans lesquelles poussent les essences

forestières de l'Est algérien. Les résultats obtenus montrent que les feuillus se localisent dans des stations forestières caractérisées par des conditions thermiques plus fraîches que les résineux. La classe modale en terme de température maximale du mois le plus chaud est celle de (34-36°C) pour les résineux et (30-32°C) pour les feuillus. Pour ce paramètre bioclimatique, les valeurs supérieures à 36°C caractérisent 22.82% de la surface totale des résineux et seulement 0.07% des feuillus. Globalement, la diminution de la température est observée avec chaque élévation de l'altitude (chaîne littorale, monts des Aurès et de Hodna); l'augmentation est par contre sensible dans les dépressions de Biskra et le Sud de Khenchela.

Ainsi, les résineux se retrouvent sous des températures minimales du mois le plus froid supérieures ou égales à -0.45°C avec un minimum observé pour le cèdre (-9.75°C). Cependant, les feuillus occupent des terrains où ces températures sont égales à 3.05°C avec un minimum noté pour le chêne vert (-8.37°C) et un maximum observé pour le chêne liège (+8.64°C).

À l'exception des variables BIO5 et BIO10, l'écart type de toutes les données bioclimatiques est important pour les feuillus où il varie de 1°C à 4.5°C, alors qu'il fluctue entre 1.2°C à 2.9°C pour les résineux. Ce qui signifie que l'éventail thermique des feuillus est large et que ces derniers manifestent des traits d'adaptation aux variations thermiques enregistrées dans la région d'étude. Ainsi, l'écart type de la saisonnalité est maximal pour le cèdre 832%, ce qui indique que les stations forestières préférées par cette essence sont caractérisées par une importante fluctuation temporelle des températures mensuelles.

Le chêne liège peut potentiellement être présent dans les régions où le climat présente des températures moyennes annuelles de l'ordre de $16.9 \pm 1.3^\circ\text{C}$, des températures maximales du mois le plus chaud de $31.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$, des températures minimales du mois le plus froid de $5.3 \pm 1.9^\circ\text{C}$, avec un minimum qui peut atteindre -4°C . Ces résultats semblent en accord parfait avec ceux signalé par Boudy (1952) qui montre que le chêne liège est caractéristique des climats tempérés où les températures moyennes annuelles varient entre 13°C et 18°C , il craint les fortes gelées persistantes et il ne supporte pas de minimum de température inférieur à -9°C .

Le cèdre, selon ses exigences thermiques, n'est pas présent dans les régions côtières, secteurs pour lesquels la saisonnalité de la température est inférieure à 600%. Il se trouve dans une tranche altitudinale variant de 543 m et 2322 m. Ces régions sont caractérisées par des températures moyennes annuelles de l'ordre de $11.8 \pm 1.5^\circ\text{C}$, des températures maximales du mois le plus chaud de $33.5 \pm 1.7^\circ\text{C}$, des températures minimales du mois le plus froid de -

4.6±1.9°C, avec un minimum de -9.8°C. En ce qui concerne la température moyenne annuelle, nos résultats sont en désaccord avec ceux obtenus par Toth (1984) qui montre que le cèdre croit sous des températures comprises entre 4 et 8 °C. Pour les températures moyennes des minima du mois le plus froid, nos résultats ont déjà été mentionnés au cours de la synthèse bibliographique de Quezel (1980) qui signale que les cédraines peuvent tolérer des valeurs comprises entre -1 et -8°C.

Concernant le pin d'Alep, il est présent sur des régions où les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 15±1.2°C. La même remarque a été signalée par Kadik (1987) qui montre que cette espèce se développe dans des limites de températures moyennes annuelles comprises entre 13°C et 18.35 °C. C'est une espèce thermophile par excellence, pouvant résister à des températures très élevées. D'après les résultats de notre étude, le pin d'Alep peut se retrouver dans des régions caractérisées par des températures maximales du mois le plus chaud égale à 34.4±1.2°C, avec un maximum de 37°C. Selon Kadik (1987), l'optimum de développement de cette essence forestière est enregistré entre les températures moyennes maximales de 32°C et 33°C.

En ce qui concerne la température minimale du mois le plus froid, on a remarqué que le pin d'Alep se retrouve dans des régions caractérisées par des valeurs minimales et maximales de -7.4°C et 8.1°C respectivement. Selon Quezel (1986), l'aire naturelle du pin d'Alep admet une variante humide et semi-aride, froide à chaude avec des valeurs moyennes de températures minimales du mois le plus froid de -3° à +10°C. Il peut supporter des froids accidentels de -15 à -18 °C, à condition qu'ils restent exceptionnels et de courte durée. Ces froids laissent toujours une trace provoquant quelquefois la mort des arbres, mais toujours une coloration rousse des feuilles et un ralentissement de croissance pendant une ou plusieurs années (Bedel, 1986).

Au terme de cette partie de la thèse, on peut dire que chaque essence forestière exige des conditions thermiques pour lesquelles sa croissance et son développement s'effectuent normalement. En dehors de cet éventail thermique, l'espèce peut subsister mais elle présente à des degrés variés des signes de dépérissement et devient plus sensible aux facteurs biotiques (attaques des insectes et des parasites) si les conditions thermiques auxquelles elle est soumise sont très sévères.

Bien que le principal facteur limitant la présence de ces essences forestières soit la température mais elle ne permet pas d'expliquer à elle seule la répartition des espèces forestières

dans l'Est algérien. C'est bien l'étude de la combinaison des températures, des précipitations et d'autres paramètres pédologiques et topographiques qui peuvent aussi expliquer la présence ou l'absence de l'espèce dans une station forestière donnée. Ces facteurs ne sont pas pris en compte dans cette étude.

5. Variabilité de la dynamique de la végétation forestière à l'Est algérien :

Le suivi de la dynamique spatio-temporelle de la couverture forestière est indispensable pour mieux comprendre les influences du changement climatique et plus particulièrement thermique sur les écosystèmes forestiers de l'Est algérien. L'indice NDVI du capteur MODIS a été très souvent utilisé pour faire cette démarche. Il est considéré comme un paramètre fluctuant dans l'espace comme dans le temps.

5.1. Variabilité temporelle:

La figure 103 illustre la variabilité interannuelle de l'activité photosynthétique pour les forêts de l'Est algérien. On remarque que l'indice NDVI des forêts de feuillus est toujours supérieur de celui des conifères. Ainsi, la régression linéaire révèle une tendance à la hausse de cet indice égale à 6% pour les feuillus comme pour les résineux et cela durant la période 2002-2011. Cette tendance positive est 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 en état de stress.

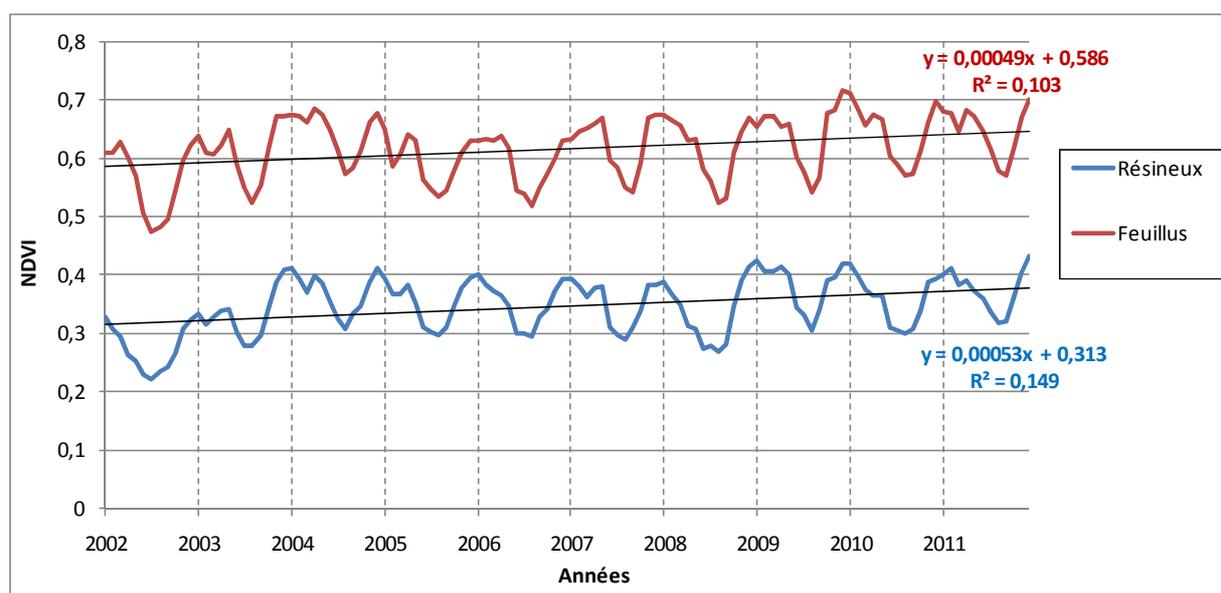


Fig.103 : Variabilité du NDVI entre 2002 et 2011 selon les deux principaux types de forêts de l'Est algérien

La figure 104 montre que l'indice NDVI de tous les écosystèmes forestiers a connu une fluctuation interannuelle au cours de la période 2002-2011. Les courbes ont sensiblement la même allure et présentent les mêmes « pics ». Durant l'année 2004, tous les écosystèmes forestiers affichent une quantité maximale de chlorophylle synthétisée, alors pendant l'année qui

suite, on observe une réduction rapide de cette quantité chlorophyllienne qui se traduit par une chute de valeur 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.

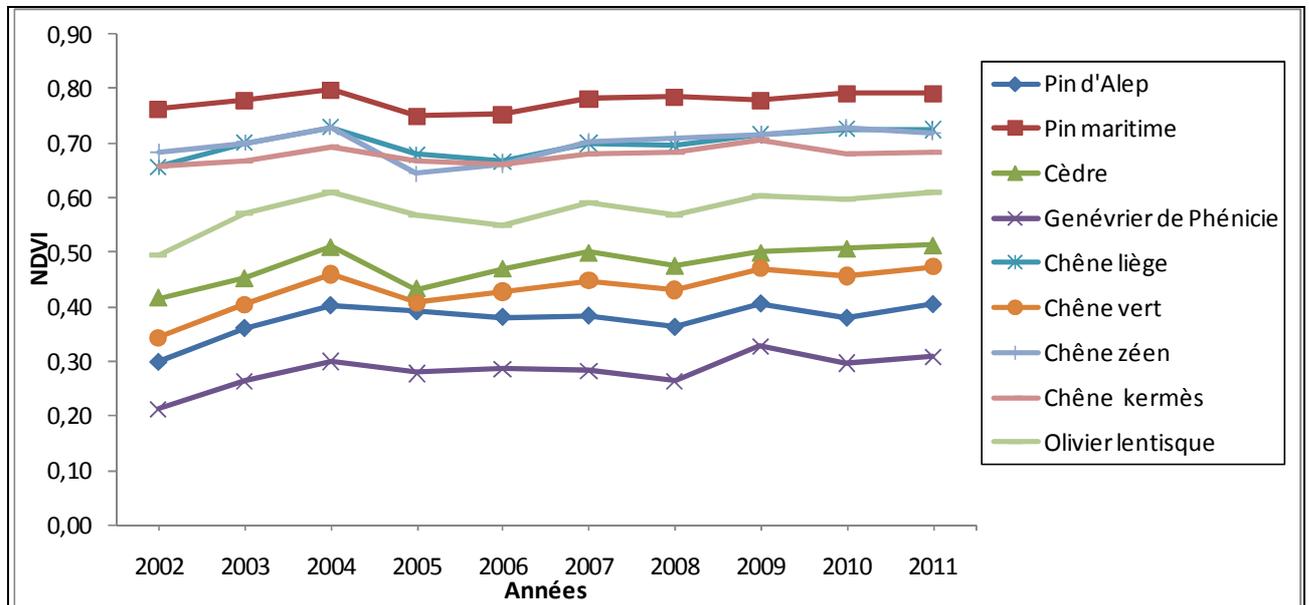


Fig.104 : Variation interannuelle de l'indice NDVI de différents écosystèmes forestiers étudiés

En termes des écosystèmes forestiers, on constate que 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).

5.2. Variabilité spatiale :

5.2.1. À l'échelle annuelle :

La figure 105 présente les surfaces forestières de l'Est algérien selon un seuillage de l'indice NDVI calculé sur une période de 10 ans (2002-2011). On remarque que les fortes valeurs de cet indice sont enregistrées dans 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 montagne de Belezma (wilaya de Batna), l'Ouest des montagne de Hodna, la forêt de Dreat, Mansourah, Biban, Beni-Yadel, Ounnourha, (wilaya de Bordj Bou-Argeridj), la forêt domaniale de Ouled Abd

El-Nour (wilaya de Mila), forêt domaniale de Ain Mlila (wilaya de Oum El-Bouaghi) et toutes les massifs forestiers de la wilaya de Tébessa.

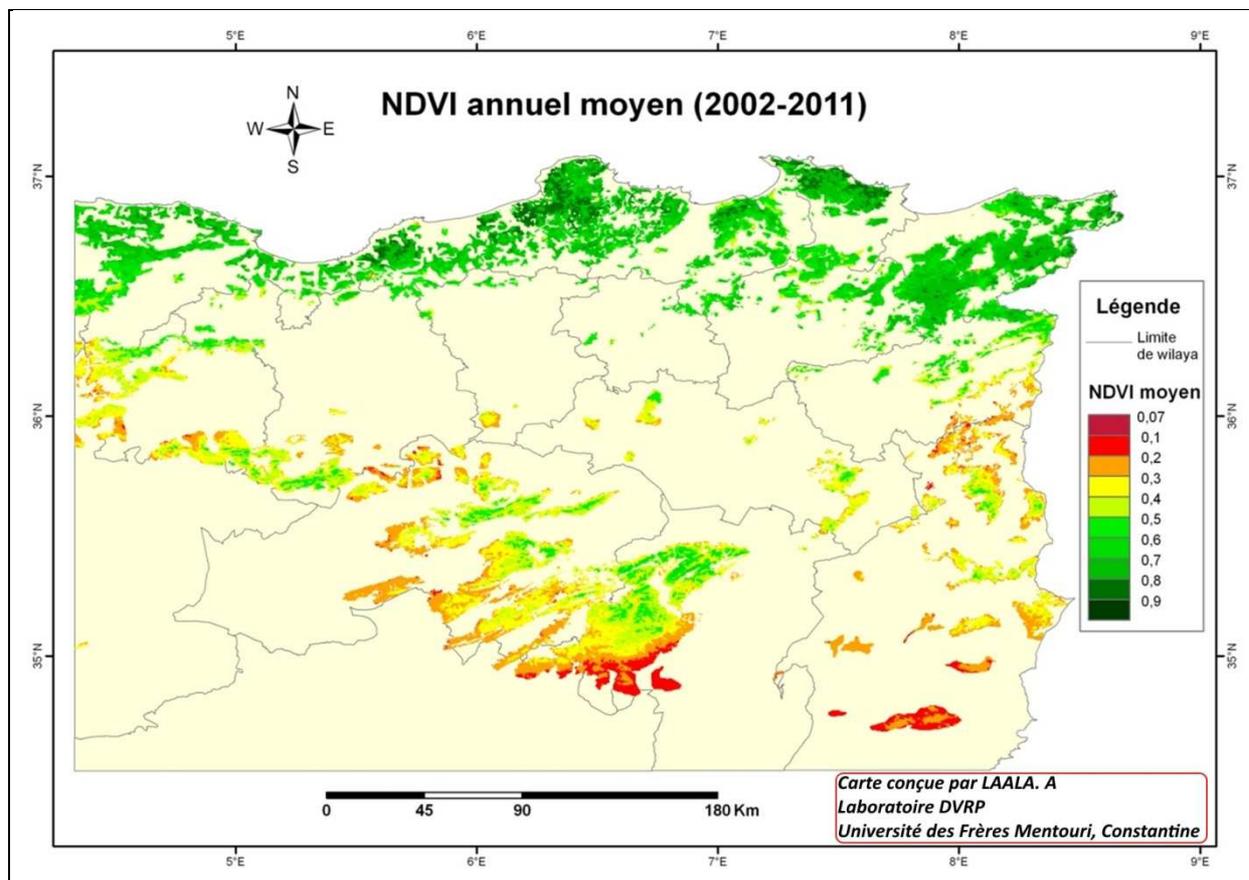


Fig.105 : NDVI annuel moyen calculé pour la période (2002-2011)

Spatialement, le croisement de la carte d'NDVI annuel et la carte d'altitude nous permet de constater que les massifs forestiers situés à des altitudes comprises entre 0 et 600m présentent les valeurs de l'indice NDVI les plus élevées (>0.6), alors que les forêts qui se trouvent dans la tranche altitudinale variant entre 1500 et 2400m tels que les massifs des Aurès présentent les valeurs les plus faibles.

Durant la décennie (2002-2011), 39% de la surface totale des forêts de l'Est algérien présente des fortes valeurs d'NDVI allant de 0.6 jusqu'à 0.9. La classe modale est celle oscillant entre 0.7 et 0.8, elle occupe une superficie de 19.71% de la surface totale des écosystèmes forestiers de l'Est algérien (fig.106).

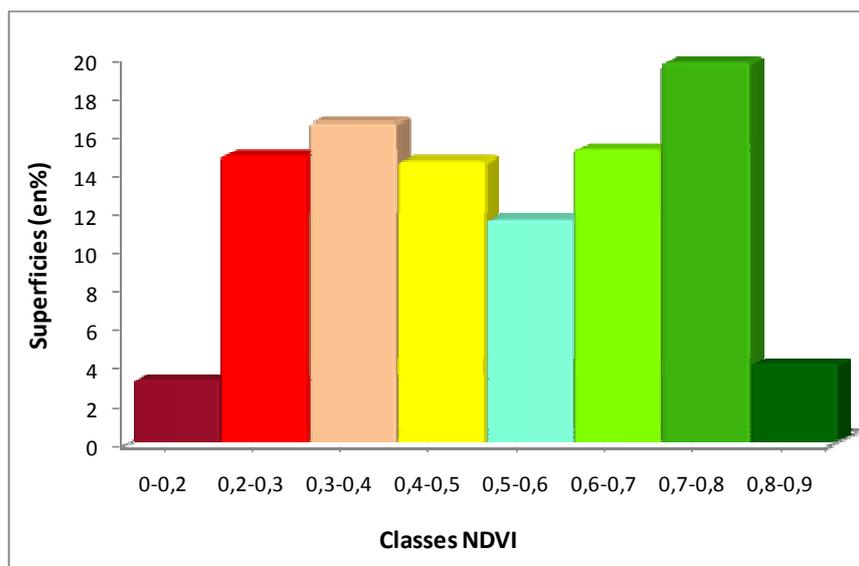


Fig.106 : Superficies (en %) de différentes classes d'NDVI annuelle moyenne

Concernant les résineux, la classe de forte valeur d'NDVI (0.6-0.9) occupe 2.5% de la surface totale des conifères de l'Est algérien, alors que pour les feuillus, elle caractérise une importante superficie forestière égale à 61.8%. (fig.107).

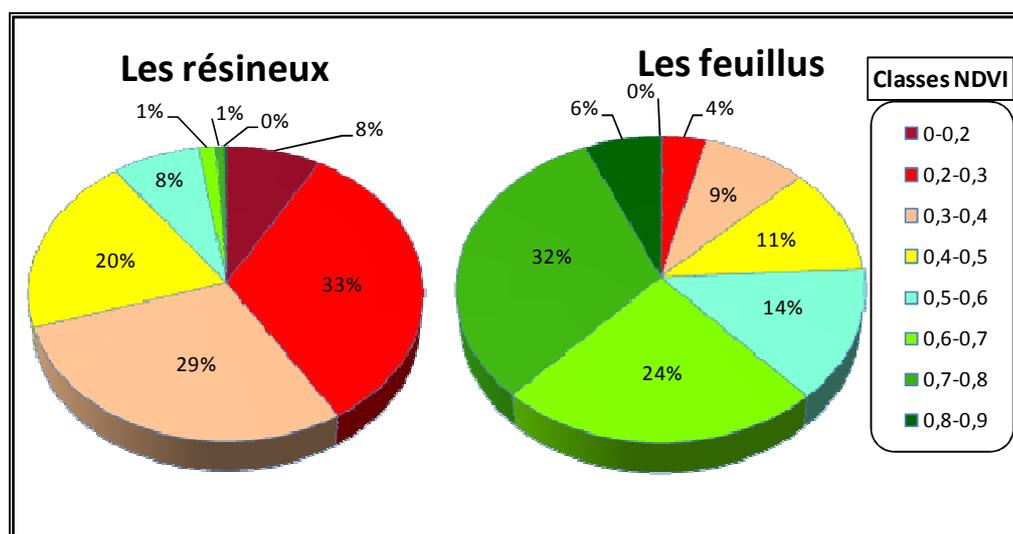


Fig.107 : Superficies (en %) de différentes classe d'NDVI moyenne des résineux et feuillus

La figure ci-dessous permet de distinguer la variabilité des classes d'NDVI selon l'essence forestière concernée. On remarque que la superficie forestière 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, 50% pour l'olivier lentisque et uniquement 7.7% pour le chêne vert. Pour les résineux, cette surface représente moins de 10% de la surface totale de pin d'Alep, de cèdre et de genévrier de Phénicie.

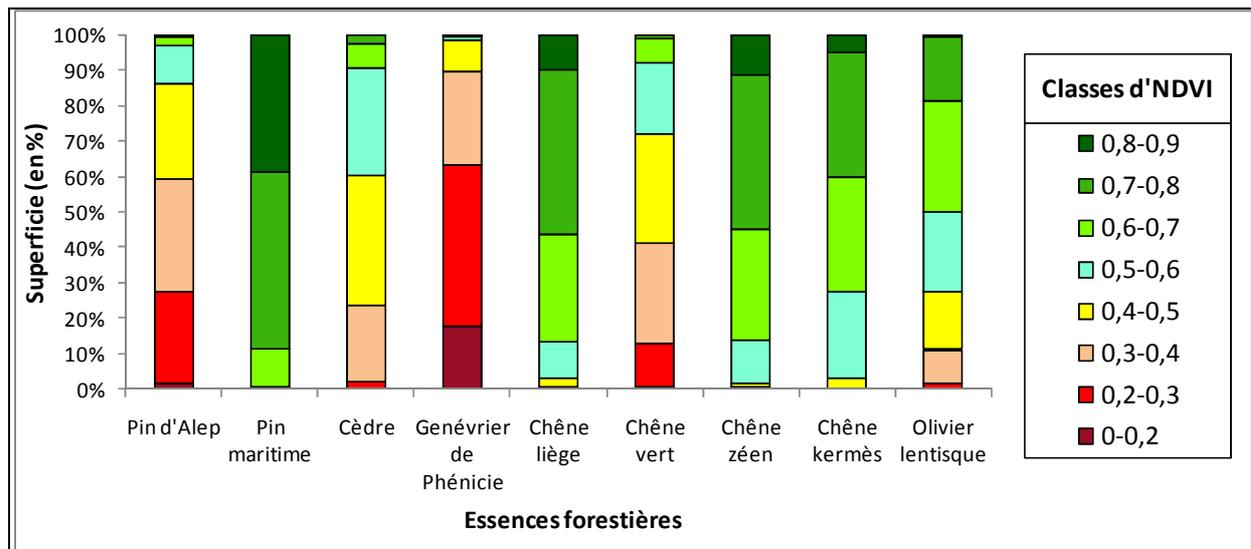


Fig.108 : Superficies (en %) de différentes classes d'NDVI moyenne de chaque écosystème forestier

Le calcul de l'écart type est très intéressant car il donne une excellente mesure de la variabilité temporelle de la santé de la végétation forestière et ils nous permettent aussi de cibler les écosystèmes forestiers qui subissent des déforestations ou des stress (biotiques ou abiotiques) empêchant le fonctionnement de l'activité végétative.

Les zones forestières où la végétation est stressée sont facilement identifiables sur la figure 109, elles sont colorées en rouge. Les zones en vert indiquent des régions pour lesquelles l'NDVI présente un pic relativement peu marqué.

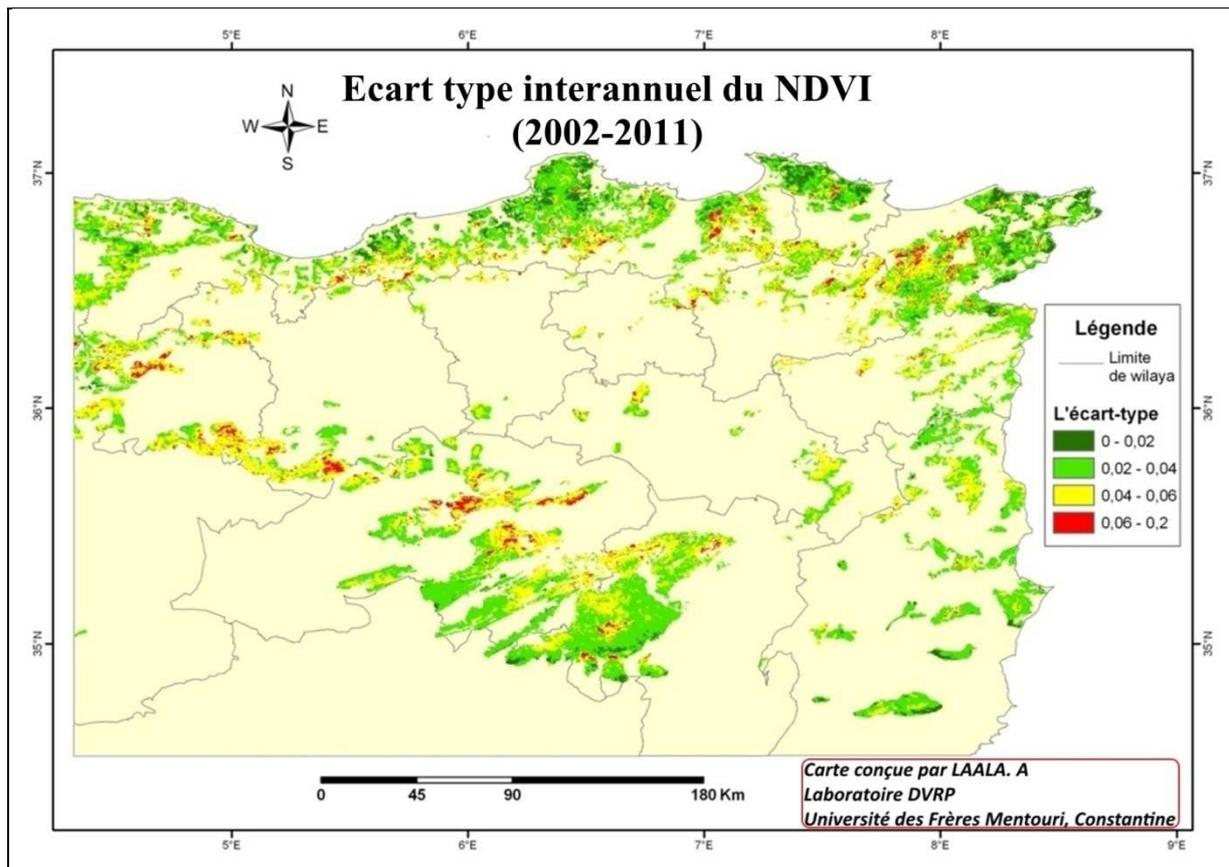


Fig.109 : Ecart type interannuel d'NDVI calculé pour la période (2002-2011)

Les résultats obtenus montrent que 94.97% des superficies forestières 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'Est algérien regroupe des formations forestières caractérisées par une certaine stabilité de leurs activités végétatives. Le reste des superficies forestières (5.03%) affiche des fortes valeurs d'écart type d'NDVI (supérieures à 0.06). Ces parcelles forestières sont localisées au niveau de la forêt de l'Oued Soudan (El-Taref), Faid Ed-Deba et Ouled Bergouga (Skikda), Tababor (entre la wilaya de Bejaia et Sétif), Beni-Yadel et Hodna (Bordj Bou-Arreridj), Boutaleb (Sétif), Belezma, Bouarif et l'Est de la forêt d'Ich Ali (Batna) (fig.109). Les données annuelles de l'indice NDVI au niveau de ces massifs sont irrégulières et présentent des pics importants à travers les années.

L'écosystème forestier qui présente un maximum de pixels où l'écart type inter-annuel d'NDVI est important est celui de l'olivier lentisque. Ces pixels caractérisent une superficie de 11.8% de la surface totale de cette essence forestière. Il est suivi 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%).

5.2.2. 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 forestier 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 110, on remarque une nette variation saisonnière de l'activité photosynthétique qui reste toujours soutenue dans la partie Nord.

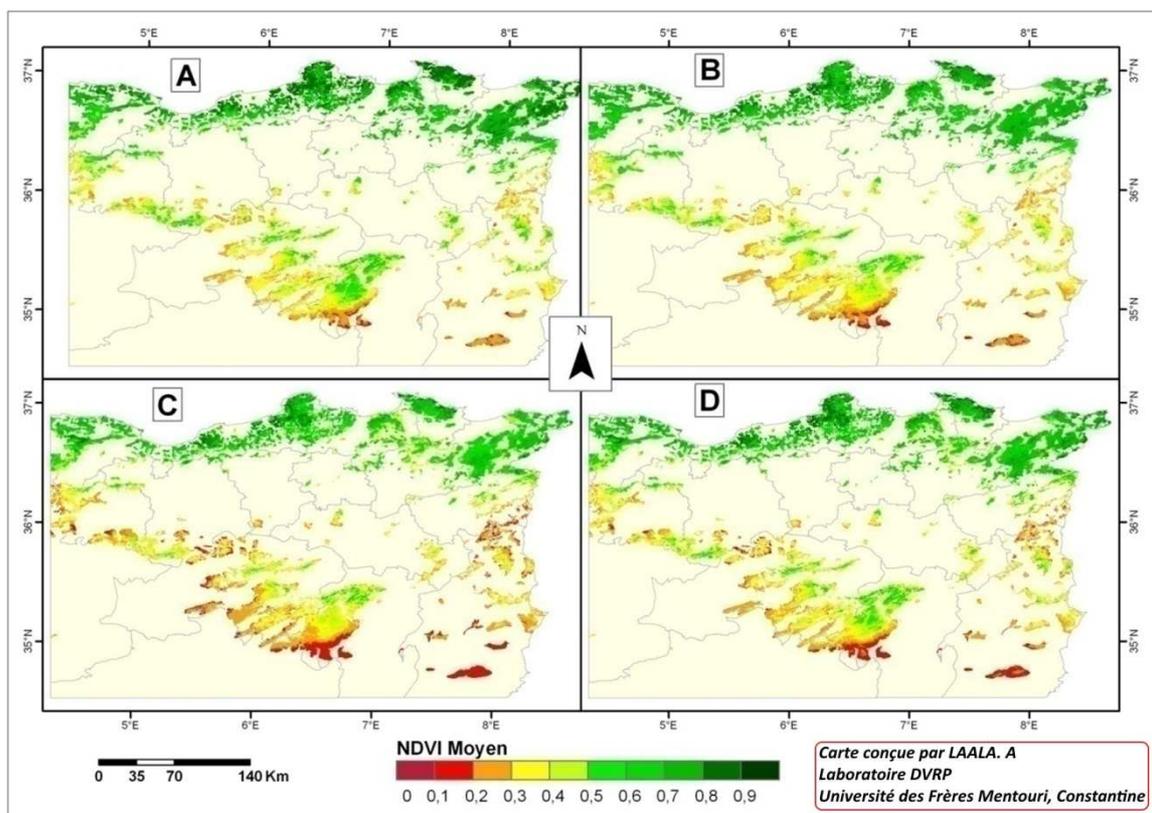


Fig.110 : NDVI saisonnier moyen calculé pour la période (2002-2011) au cours de :
A : l'hiver, B: le printemps, C: l'été, D: l'automne.

Contrairement au cycle naturel de la végétation où la saison végétative est celle du printemps, la végétation forestière dans notre cas montre une plus forte activité végétative au cours de la saison hivernale et cela pour tous les écosystèmes forestiers étudiés. Par contre, la saison estivale marque les valeurs les plus faibles de l'indice NDVI (fig.110).

Pour la variabilité inter-saisonnière, on peut remarquer des valeurs d'écart type non négligeables (0.06-0.23), mentionnées en rouge sur la figure 111, traduisant l'extrême variabilité intersaisonnière de l'activité végétative et indiquent l'irrégularité et l'hétérogénéité de l'indice NDVI. Pour les quatre saisons de l'année, les forêts suivantes affichent des valeurs notables d'écart type d'NDVI: Beni-Yadel, Bibans (Bordj Bou-Arredj), Ouled Bergouga, Faïd Ed Deba (Skikda), Belezma, Bouarif, Hodna, Ich Ali (Batna), Chelia (Khenchela). En revanche, durant la saison hivernale, une grande superficie de la forêt d'Akfadou, Beni Rhobi, Taksbet (wilaya de Bejaïa), Babor et Tababor, Tafat et Ouled Rezoug (wilaya de Sétif), Beni Medjalled et Guerrouche (Jijel) affiche des fortes valeurs de ce paramètre statistique.

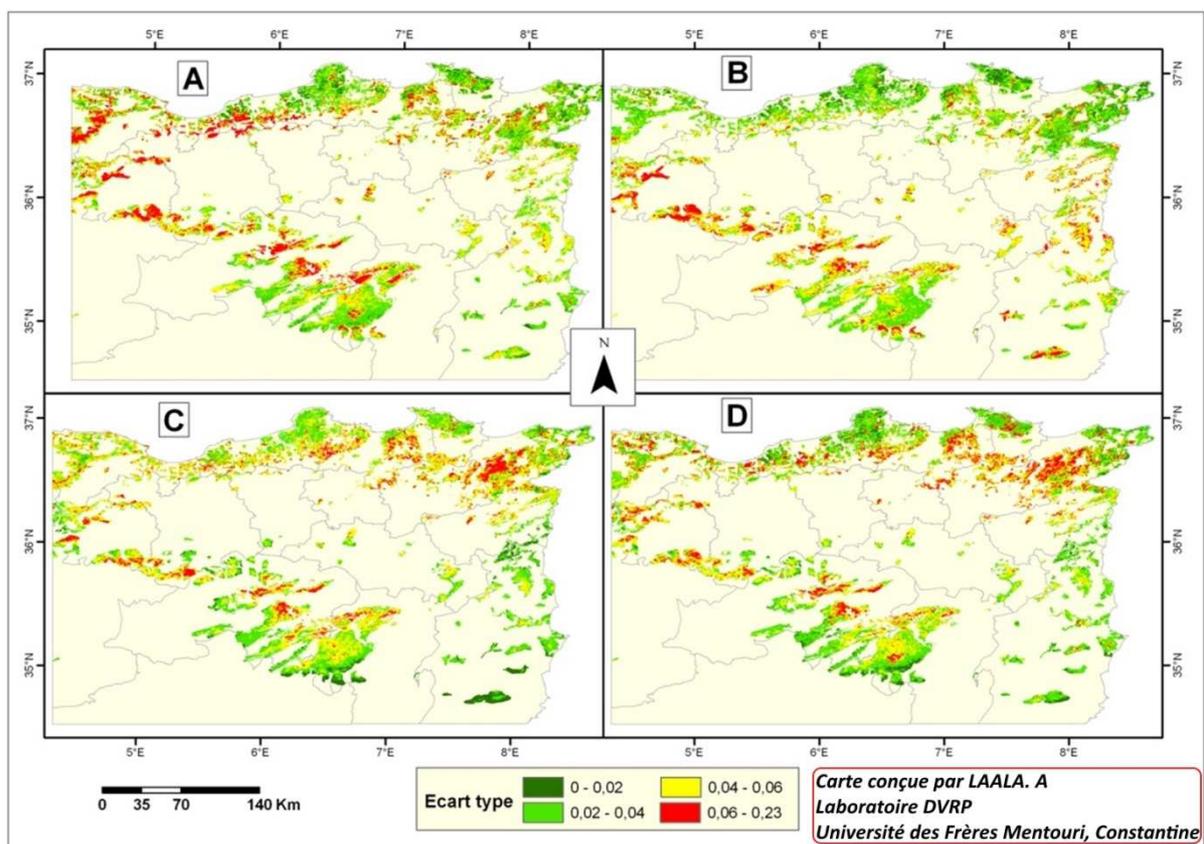


Fig.111 : Ecart type inter-saisonnier d'NDVI calculé pour la période (2002-2011) au cours de : A : l'hiver, B: le printemps, C: l'été, D: l'automne

Pendant la saison hivernale, le maximum des pixels où l'écart type d'NDVI dépasse le seuil de 0.06 est enregistré au niveau des forêts de cèdre. Ces pixels représentent 60.7% de la surface totale de cette essence forestière. Cependant, durant la saison estivale, 22.64% de la surface totale des forêts d'olivier lentisque affiche des fortes valeurs d'écart type d'NDVI.

5.3. 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 16, 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%.

Tab.16 : Pourcentage des pixels forestiers par classe d'NDVI calculés 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. Chez les feuillus, cette classe présente un gain égale à 6.7%, elle passe de 58.5% pour la 1^{ère} période à 65.2% pour la 2^{ème} période (tab.16).

Concernant la variabilité temporelle des valeurs d'NDVI, on peut remarquer que les fortes valeurs de l'écart type inter-annuel de cet indice caractérisent une superficie forestière égale à 37.8% durant la première période, ce qui montre l'intensité de la variabilité de l'NDVI durant les 5 ans (2002-2006) (fig.124). Les forêts concernées par cette irrégularité sont: la forêt de Beni Yadel, Hodna, Boutaleb, Ich Ali, Belezma, Tababor, Guerrouch, Oled Bergougga, Faid Ed-Deba et Oued Soudane (fig.112). Cette surface, de forte valeur de l'indice NDVI, diminue durant la deuxième période pour atteindre seulement 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 la période (2006-2011).

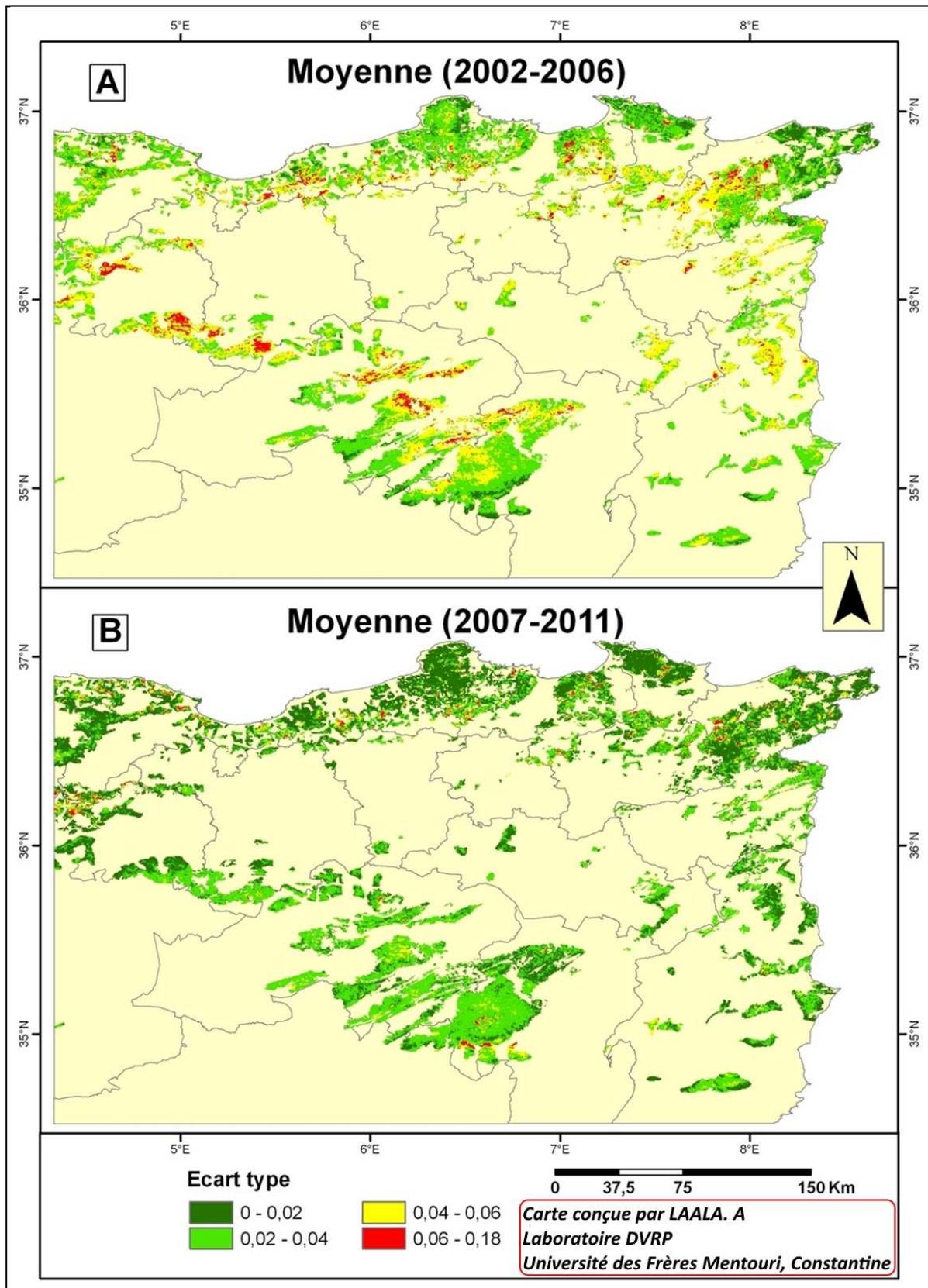


Fig.112 : Ecart type inter-annuel d'NDVI calculé pour les deux sous-périodes (2002-2006) et (2007-2011). La légende située en bas est valable pour les deux cartes

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. L'écosystème forestier qui affiche une forte irrégularité de l'activité végétative, durant la première sous-période, est celui de l'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. Cette surface diminue durant la deuxième sous-période pour atteindre 3.2%.

La figure 113 présente l'écart type inter-saisonnier d'NDVI calculé pour les deux sous-périodes. Les zones forestières où la végétation est stressée sont facilement identifiables sur cette figure, elles sont colorées en rouge. Les valeurs d'écart type d'NDVI dépassent 0.06 durant la première période et peuvent atteindre pour quelques pixels de l'Est algérien plus de 0.2. Les forêts qui marquent cette grande dispersion des valeurs d'NDVI durant la saison hivernale sont: Beni-Yadel, Dreat, Akfadou, Beni Rhobi, Babor, Tababor, Beni Medjalled, Guerrouche, Arres, Hodna, Boutaleb, Ich Ali, Bouarif, Chelia et Ouled Yagoub. Ainsi, l'écosystème forestier qui présente une surface importante où la valeur d'écart type d'NDVI dépasse le 0.06 est celui du Cèdre. Cette surface représente 58.8% de sa superficie totale durant la 1^{ère} période et elle diminue durant la 2^{ème} période pour atteindre 27.6%.

Globalement, 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 de l'indice NDVI, calculées pour la saison estivale, ne caractérisent 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 totale des forêts de l'Est algérien.

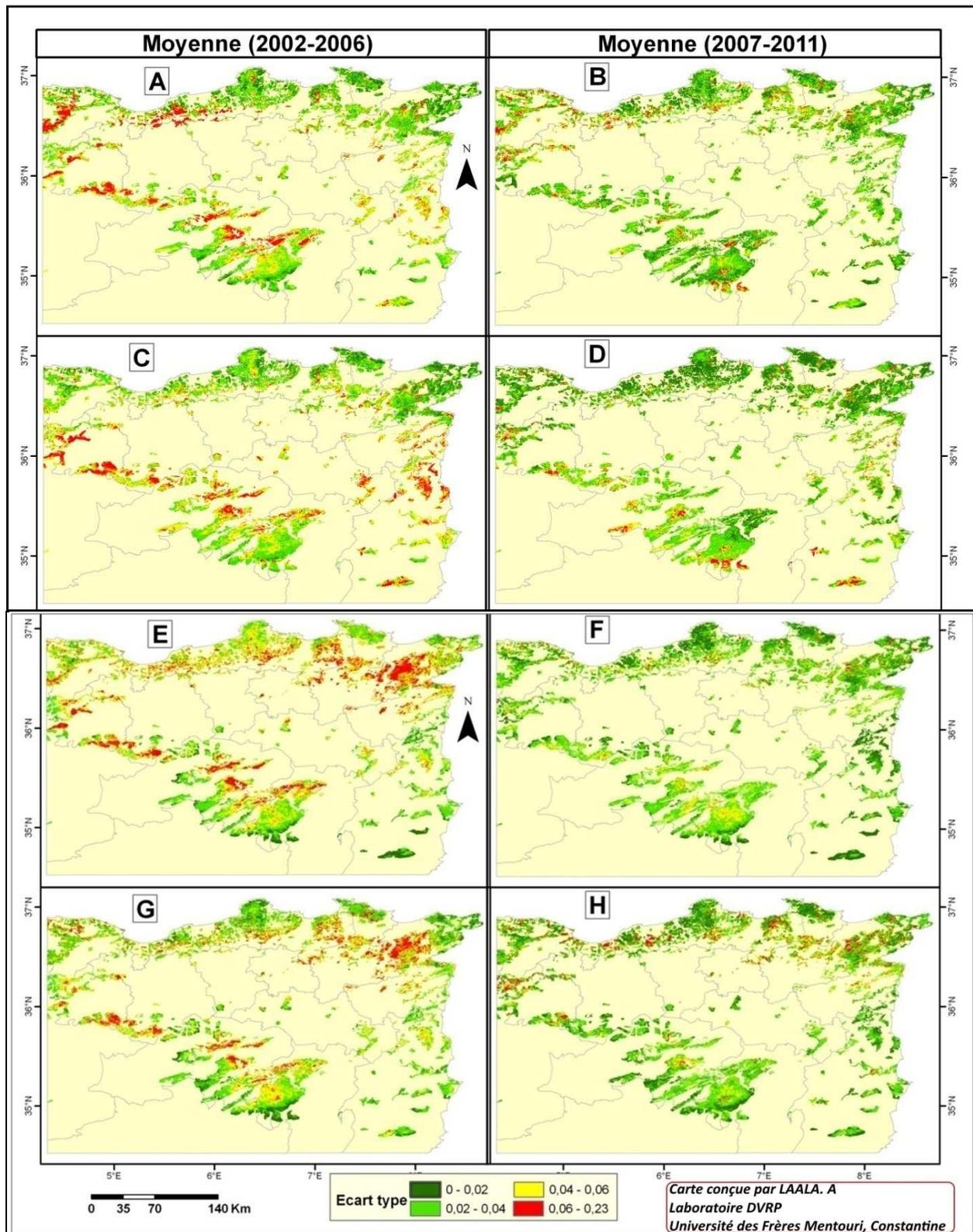


Fig.113 : Ecart type inter-saisonnier d'NDVI calculé pour les deux sous-périodes (2002-2006) et (2007-2011). A, B : l'hiver, C, D: le printemps, E, F: l'été, G, H: l'automne.

5.4. Tendance de l'indice NDVI pour la période (2002-2011) :

La figure 114 présente la tendance de l'activité photosynthétique de la végétation forestière de l'Est algérien pour la période 2002-2011. Elle est calculée pour chaque pixel de la zone d'étude. Les zones forestières avec tendances positives de l'NDVI sont très étendues, elles caractérisent 87.42% de la superficie forestière totale, ce qui indique une nette progression dans la couverture forestière de l'Est algérien durant la période (2002-2011). Cependant, les massifs forestiers qui présentent une régression sont de faible superficie (7.13% par rapport à la surface totale étudiée). Parmi ces forêts, on peut citer celles de Feid El Rarnoug, Edough, Bougafoune, Beni Khatab, Melaha, Biban, Ounnourra, Ich Ali, Beni Amloul et Djebel Boudjellal.

D'autre part, les zones statistiquement stables et sans changement significative de l'NDVI sont minoritaires et représentent uniquement 5.45% de la surface totale des forêts de l'Est algérien (tab.17).

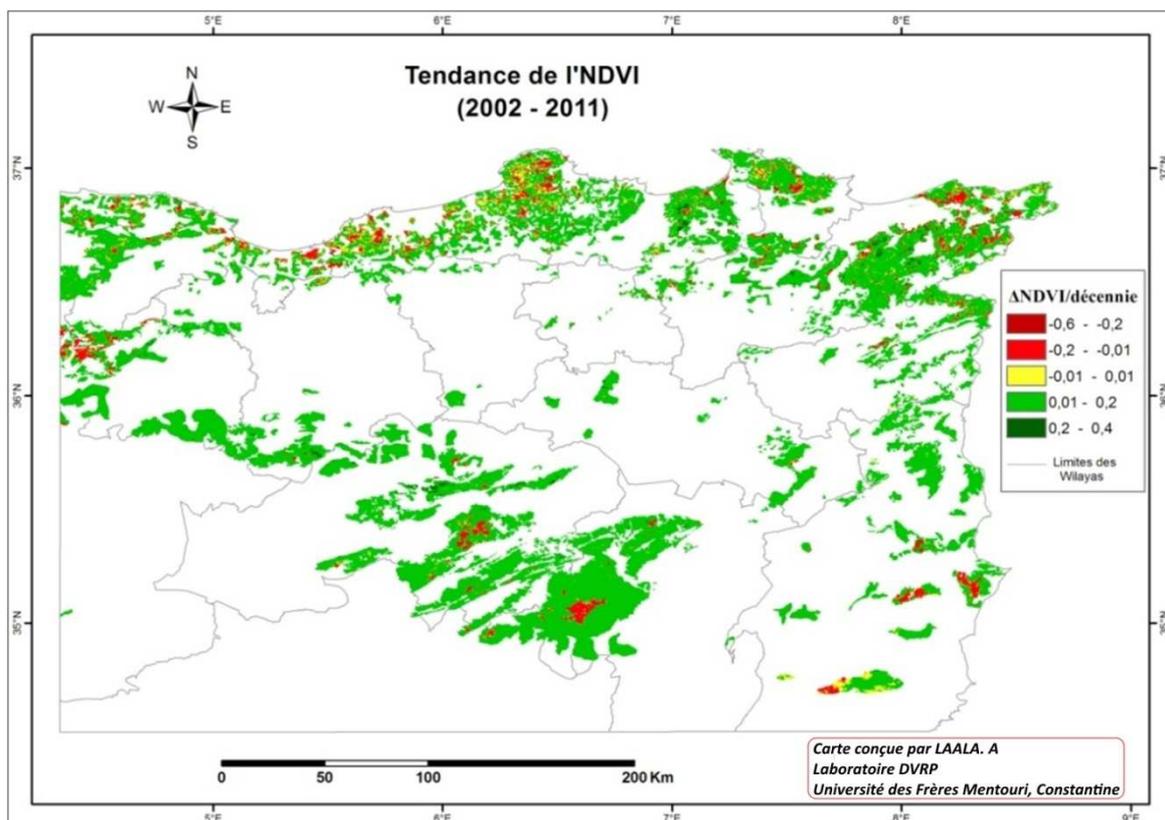


Fig.114 : Tendance de l'NDVI sur la période 2002-2011

L'analyse géographique des résultats montre que, quelle que soit la wilaya considérée, le bilan de développement de la végétation forestière est toujours positif pour la décennie (2002-2011) (tab.17). La wilaya de Jijel est la wilaya la plus touchée par la diminution de l'indice NDVI

avec une superficie de 13.7% de la surface forestière de cette wilaya. Cependant, 98.83% de la surface forestière de la wilaya de Mila affiche une forte augmentation de l'indice NDVI sur la période étudiée.

Tab.17 : Superficies forestières des wilayas affectées par les différentes classes de tendance de l'NDVI

| Wilayas | Tendance négative (en%) | Sans changement (en %) | Tendance positive (en %) | Bilan (en %) |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| OEB | 1,15 | 0,93 | 97,92 | 96,77 |
| Batna | 3,03 | 1,32 | 95,65 | 92,63 |
| Bejaia | 10,89 | 8,22 | 80,89 | 70,01 |
| Biskra | 4,45 | 1,90 | 93,66 | 89,21 |
| Tébessa | 7,26 | 6,81 | 85,93 | 78,66 |
| Jijel | 13,70 | 15,52 | 70,78 | 57,09 |
| Sétif | 1,74 | 1,63 | 96,63 | 94,89 |
| Skikda | 9,38 | 9,69 | 80,92 | 71,54 |
| Annaba | 11,59 | 9,73 | 78,69 | 67,10 |
| Guelma | 3,48 | 2,56 | 93,96 | 90,48 |
| Constantine | 4,32 | 3,78 | 91,89 | 87,57 |
| B.B.A | 9,09 | 2,24 | 88,67 | 79,59 |
| El-Tarf | 12,82 | 8,26 | 78,93 | 66,11 |
| Khenchela | 5,30 | 0,92 | 93,78 | 88,48 |
| Souk Ahras | 4,27 | 3,77 | 91,96 | 87,70 |
| Mila | 0,44 | 0,73 | 98,83 | 98,39 |
| Msila | 1,09 | 0,15 | 98,76 | 97,67 |
| L'Est algérien | 7,13 | 5,45 | 87,42 | 80,29 |

Le calcul des surfaces forestières touchées par les trois classes de tendances a été réalisé aussi pour chaque écosystème forestier. La figure 115 montre que la moitié de la superficie régressée est occupée par le chêne liège. Les feuillus avec un pourcentage des superficies dégradés de 67.98% sont très touchées par cette régression que les résineux.

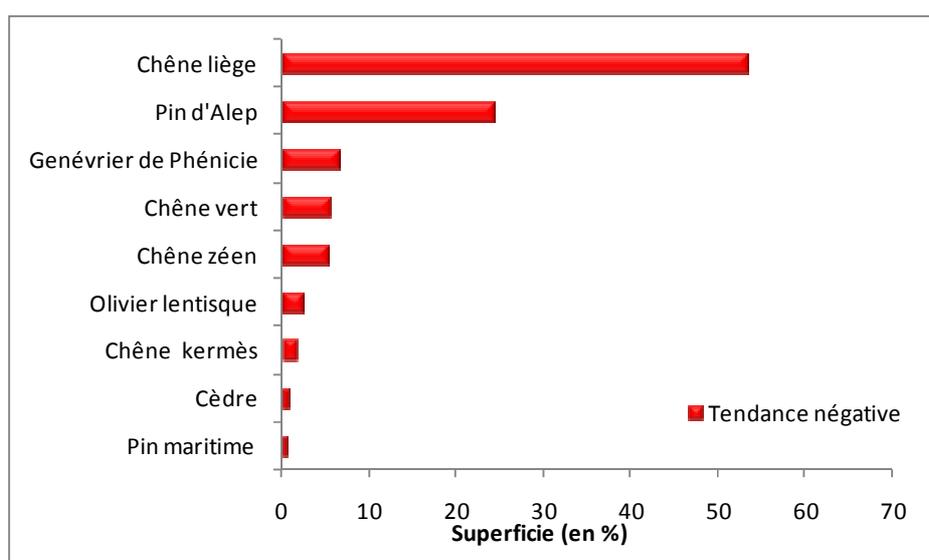


Fig.115 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l'Est algérien affectées par une tendance négative de l'NDVI par rapport à la surface totale régressée

Parmi les wilayas étudiées, celle qui présente le maximum des pixels avec des tendances négatives de l'NDVI est la wilaya d'El-Tarf (3282 pixels), soit une superficie de 20512,5ha (fig.116). Donc, les forêts de cette wilaya ont connu, durant la décennie (2002-2011), une baisse sensible de leur superficie égale à 12.82% de la surface forestière de cette wilaya, soit 1.2% de la couverture forestière totale de l'Est algérien.

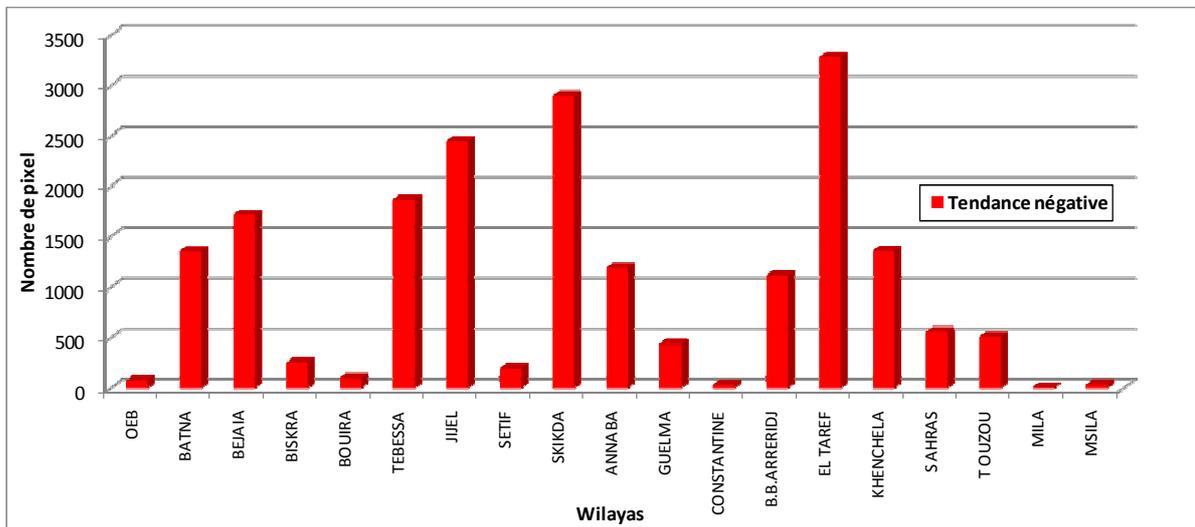


Fig.116 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance décroissante de l'NDVI

Les plus fortes valeurs de régression de l'NDVI (-0.2 -0.6) sont observées au niveau de la forêt de Faid El Rarnoug, Boufhal, El Frine, Ouerda, Oued Soudan, où elles caractérisent une superficie notable de 937,5ha (fig.117).

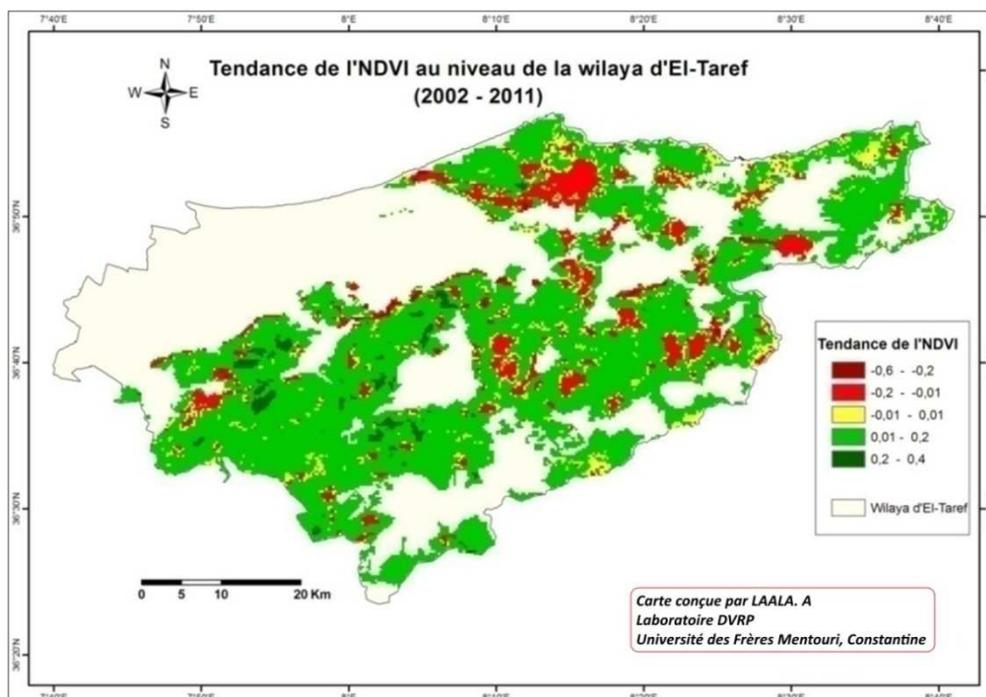


Fig.117 : Tendance de l'indice NDVI au niveau de la wilaya d'El-Tarf pour la période 2002-2011

Par ailleurs, le minimum des superficies forestières qui affichent une tendance croissante de l'NDVI est observé pour les massifs du pin maritime (0.24%), alors que le maximum est enregistré pour le chêne liège (33.35%) (fig.118). Cette tendance positive traduit une évolution de l'activité photosynthétique des arbres, ce qui est susceptible d'être liée aux phénomènes d'acclimatation et des processus physiologiques d'adaptation des essences forestières de ces parcelles forestières faces aux conditions du milieu.

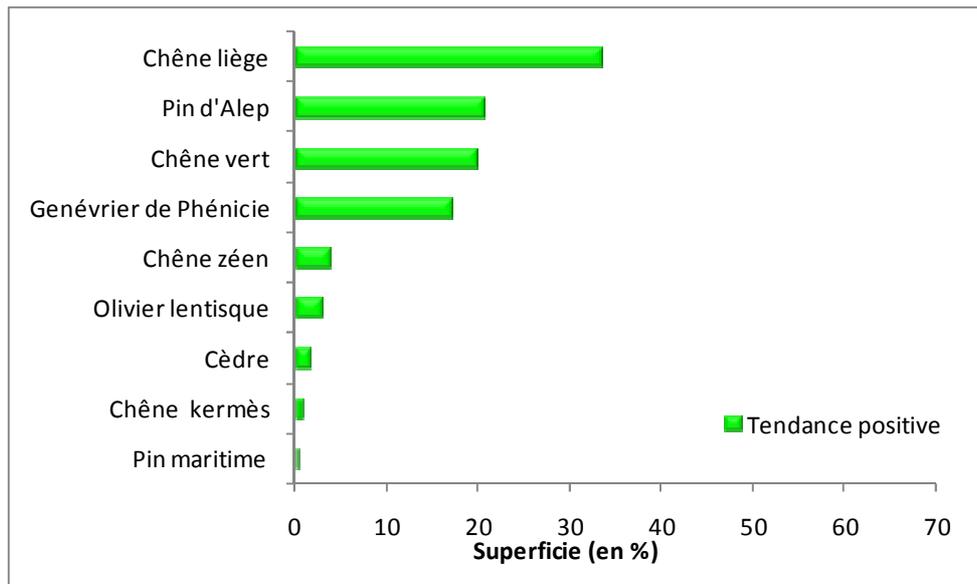


Fig.118 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l'Est algérien affectées par une tendance positive de l'NDVI par rapport à la surface totale progressé

En termes de wilayas, le maximum de pixel avec une tendance positive est enregistré au niveau de la wilaya de Batna (42819 pixels, soit 267618,75ha) (fig.119). Ce qui indique une densification du couvert ligneux au niveau de cette wilaya. Cette surface progressée occupe 95.65% de la surface forestière de la wilaya de Batna et 15.72% de la couverture forestière totale de l'Est algérien. Le reste des wilayas semblent également en voie de régénération mais avec une certaine variabilité inter-wilaya où le nombre de pixels à tendance progressive de l'NDVI variant de 680 pixels (enregistrés au niveau des massifs forestières de la wilaya de Constantine) à 24953 pixels (affichées pour la wilaya de Skikda).

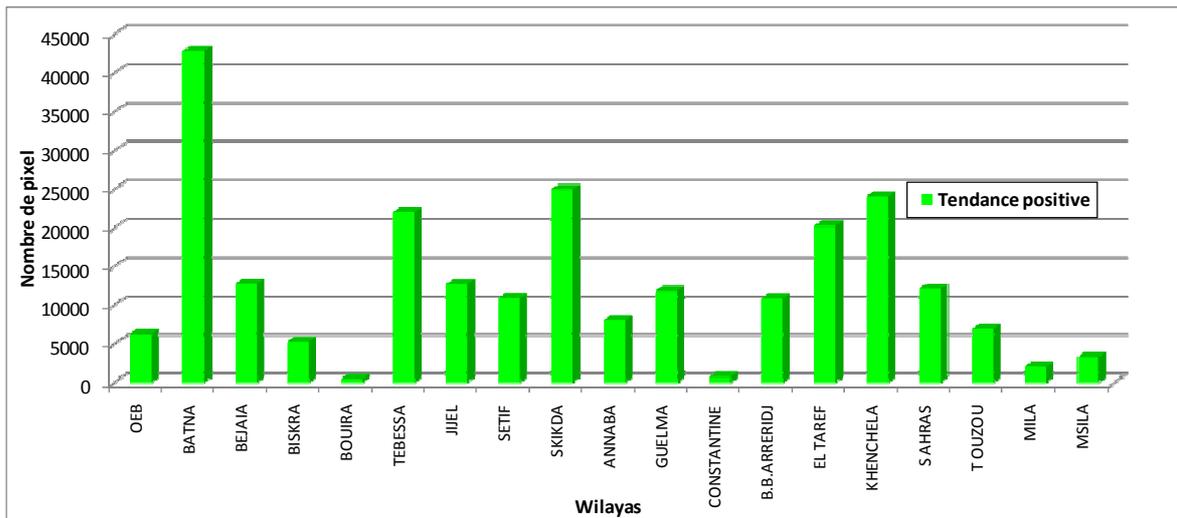


Fig.119 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance positive de l'NDVI

Pour la wilaya de Batna, les parcelles forestières de forte régénération (tendance d'NDVI > 0.2) se localisent au niveau de la forêt de Belezma indiquant une densification du couvert ligneux au niveau de ce massif forestier (fig.120).

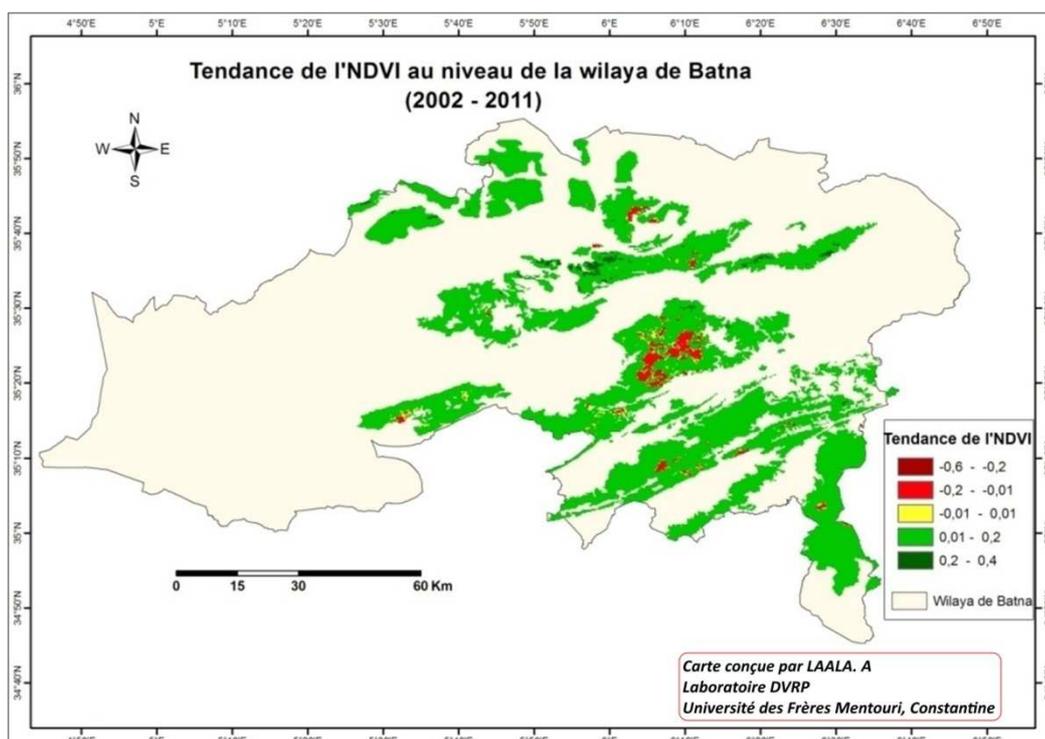


Fig.120 : Tendance de l'NDVI au niveau de la wilaya de Batna pour la période 2002-2011

Ainsi, l'étude a révélé une certaine stabilité de l'activité photosynthétique des essences forestières étudiées où l'indice NDVI a connu une légère fluctuation sur une période de dix ans. Le maximum des superficies stables a été observé pour le chêne liège (60.97%), alors que pour le reste des écosystèmes forestiers, cette stabilité de l'NDVI représente un pourcentage inférieur

à 10% de la surface totale (fig.121). Ces valeurs peuvent s’expliquer par l’action de gestion et de protection réalisées par les conservations des forêts des wilayas.

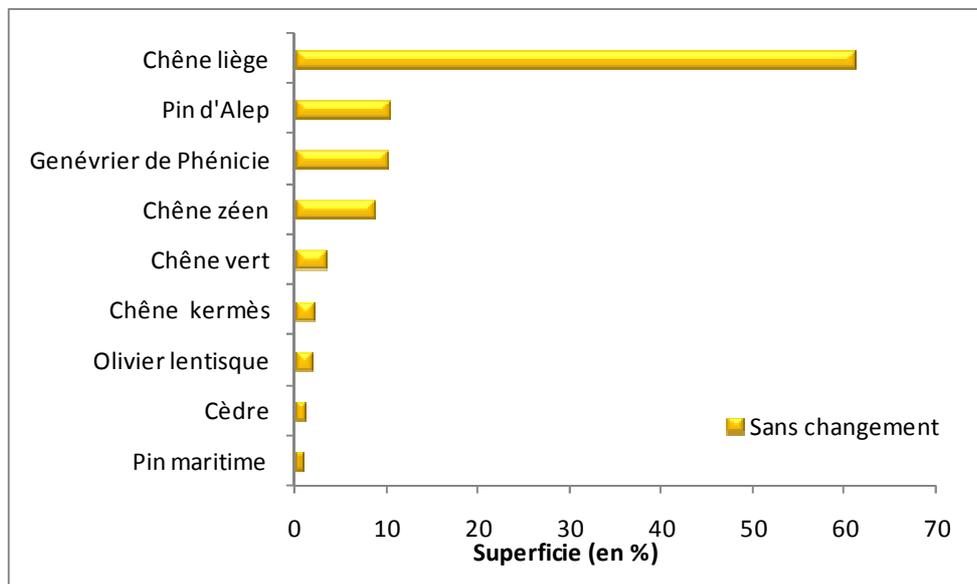


Fig.121 : Superficies (en %) des écosystèmes forestiers de l’Est algérien affectées par une tendance nulle de l’NDVI par rapport à la surface totale stable

On remarque, d’après la figure 122, que Skikda est la wilaya qui affiche le maximum des pixels non affecté par aucune tendance (2989 pixels, soit une surface de 18681,25ha). Ces pixels représentent 80.92% de la surface forestière de cette wilaya (fig.122 et 123).

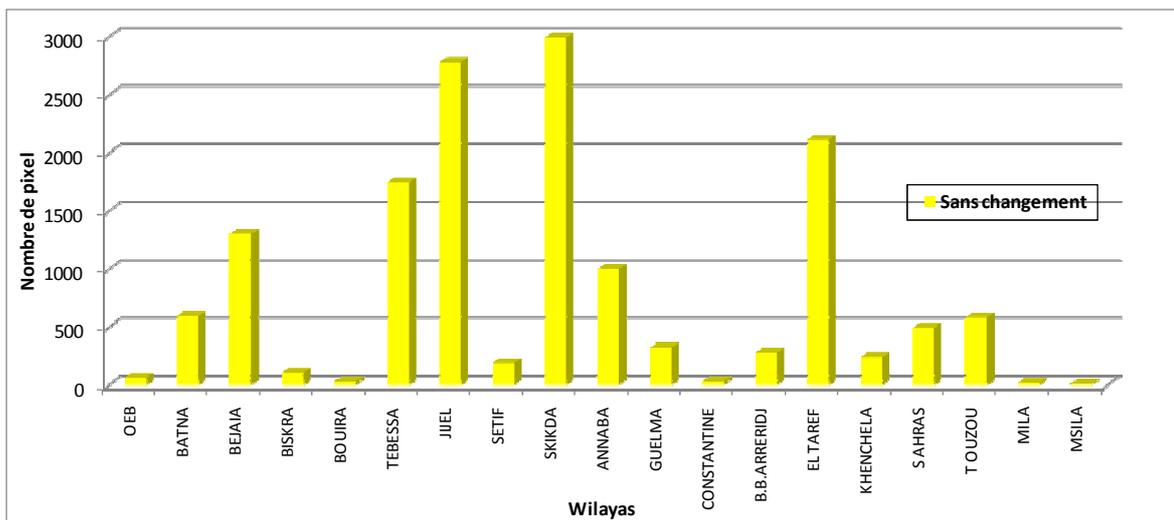


Fig.122 : Répartition par wilaya du nombre de pixel à tendance non significative de l’NDVI

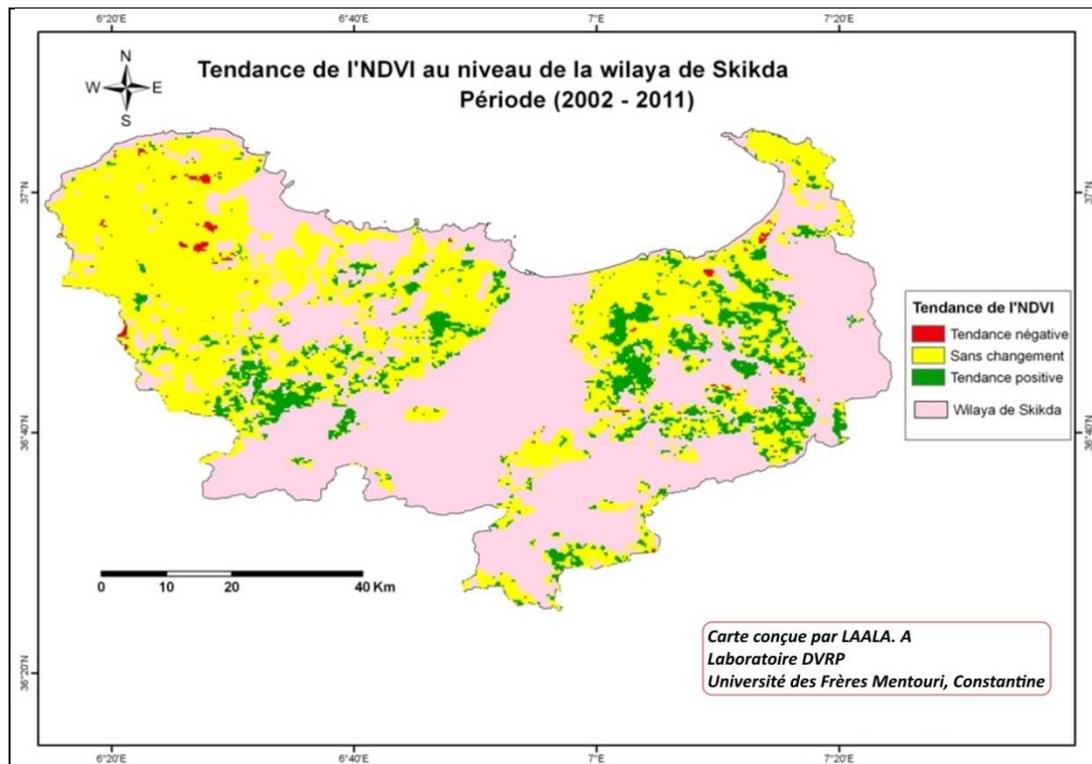


Fig.123 : Tendance de l'NDVI au niveau de la wilaya de Skikda pour la période 2002-2011

Globalement, le bilan de la tendance de l'NDVI est positif pour tous les écosystèmes forestiers de l'Est algérien (fig.124). Il caractérise 84.77% de la superficie totale des résineux et 77.53% de celle des feuillus.

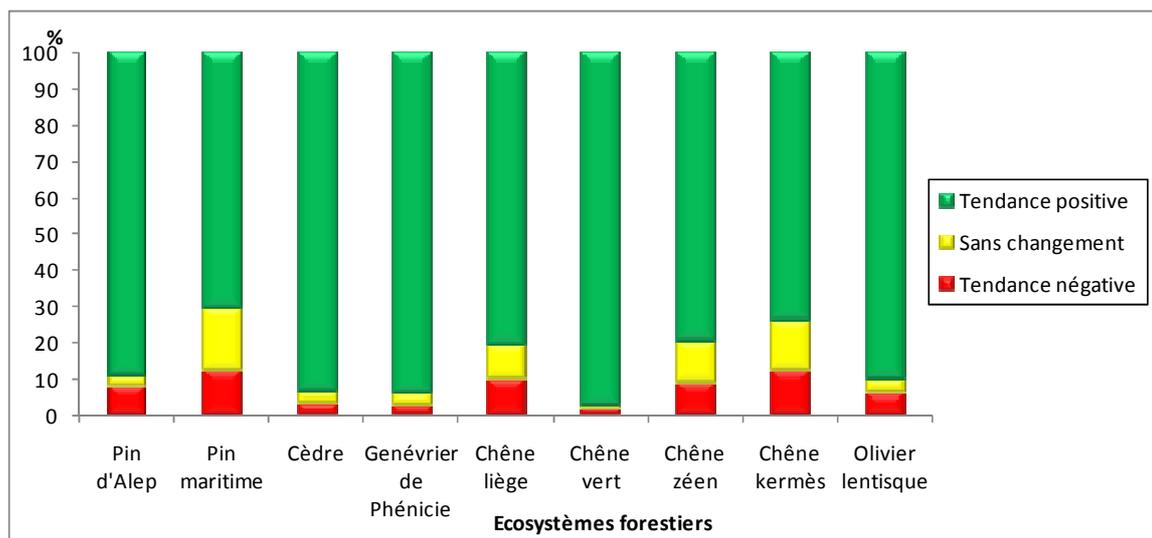


Fig.124 : Superficies des écosystèmes forestiers réparties par classe de tendance de l'NDVI

6. Sensibilité de la végétation forestière de l'Algérie orientale à la température :

Nous avons essayé d'analyser la variabilité de la relation entre l'activité végétative et les paramètres thermiques pour chaque écosystème forestier et pour chaque pixel forestier de la zone d'étude.

6.1. Interpolation des températures annuelles de la décennie 2002-2011 :

La méthode retenue pour l'estimation du champ thermique de la période 1982-2011 a été suivie aussi pour l'interpolation des températures annuelles de la décennie (2002-2011) puisque elle donne des résultats fiables et proches des valeurs observées avec une domination des résidus faibles et presque négligeable pour une vaste superficie de la zone d'étude.

Le tableau 18 montre la variation annuelle de l'indicateur RMSE et des résidus issus de l'interpolation des températures annuelles. Pour les températures maximales, l'écart entre les valeurs observée est calculée est plus important que celui des températures minimales. Ainsi, les valeurs de RMSE issus de l'interpolation des températures (minimales et maximales) sont relativement faibles. Elles échelonnent entre 0.99°C et 1.16°C, indiquant la variance relativement faible entre les températures observées et calculées.

Tab.18 : Indicateur RMSE et résidus issus de l'interpolation des températures minimales et maximales annuelles

| | Année | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|--------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T Min | Résidu moyen | 1,16 | 1,17 | 1,14 | 1,23 | 1,03 | 1,05 | 1,06 | 0,99 | 1,09 | 1,01 |
| | RMSE | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,11 | 1,01 | 1,03 | 1,03 | 0,99 | 1,05 | 1,00 |
| T Max | Résidu moyen | 1,26 | 1,14 | 1,04 | 1,33 | 1,22 | 1,29 | 1,28 | 1,24 | 1,34 | 1,29 |
| | RMSE | 1,12 | 1,07 | 1,02 | 1,15 | 1,10 | 1,13 | 1,13 | 1,11 | 1,16 | 1,14 |

Les cartes thermiques issues de l'interpolation des températures annuelles de la période (2002-2011) sont présentées dans les figures 12, 13 et 14 de l'annexe2).

6.2. Analyse de régression entre les variables thermiques et l'indice NDVI :

Nous avons essayé de déterminer les variables thermiques influençant le plus significativement l'activité photosynthétique de chaque écosystème forestier considéré comme spatialement homogène. L'analyse de régression linéaire nous permet de déterminer le modèle explicatif de la variation de l'NDVI. Il faut signaler ici qu'en climatologie, rares sont les cas où un phénomène est directement expliqué par un seul et même facteur.

D'après le tableau 19, on constate que, quel que soit l'écosystème forestier étudié, le coefficient de corrélation est toujours négatif entre l'NDVI et toutes les variables thermiques étudiées. Il oscille entre -0.78 et -0.27, reflétant une plus grande variation de degrés de sensibilité des écosystèmes forestiers à la variabilité thermique.

Tab.19 : Analyse de régression entre l'NDVI annuel et les variables thermiques

| Ecosystèmes forestiers | Variables explicatives (x) | L'équation de régression | Coefficient de corrélation (r) | P value | Signification |
|---|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------|---------------|
| Pin d'Alep | Tmin annuelle | NDVI = 0,751 - 0,0439 Tmin | -0.72 | 0,02 | * |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,03 - 0,0288 TMAX | -0.45 | 0,19 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,37 - 0,0638 Tmoy | -0.78 | 0,01 | ** |
| Pin maritime | Tmin annuelle | NDVI = 0,896 - 0,0102 Tmin | -0.34 | 0,34 | NS |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,12 - 0,0154 TMAX | -0.45 | 0,20 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,06 - 0,0165 Tmoy | -0.45 | 0,20 | NS |
| Cèdre | Tmin annuelle | NDVI = 0,668 - 0,0390 Tmin | -0.64 | 0,05 | * |
| | Tmax annuelle | NDVI = 0,893 - 0,0195 TMAX | -0.51 | 0,13 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,03 - 0,0426 Tmoy | -0.71 | 0,02 | * |
| Genévrier de Phénicie | Tmin annuelle | NDVI = 0,687 - 0,0479 Tmin | -0.77 | 0,01 | ** |
| | Tmax annuelle | NDVI = 0,640 - 0,0153 TMAX | -0.33 | 0,35 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,03 - 0,0467 Tmoy | -0.68 | 0,03 | * |
| Chêne liège | Tmin annuelle | NDVI = 1,06 - 0,0304 Tmin | -0.49 | 0,15 | NS |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,74 - 0,0455 TMAX | -0.60 | 0,07 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,55 - 0,0489 Tmoy | -0.63 | 0,05 | * |
| Chêne vert | Tmin annuelle | NDVI = 0,820 - 0,0561 Tmin | -0.75 | 0,01 | ** |
| | Tmax annuelle | NDVI = 0,867 - 0,0200 TMAX | -0.36 | 0,31 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,30 - 0,0607 Tmoy | -0.71 | 0,02 | * |
| Chêne zéen | Tmin annuelle | NDVI = 0,848 - 0,0163 Tmin | -0.27 | 0,45 | NS |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,40 - 0,0325 TMAX | -0.53 | 0,11 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,35 - 0,0421 Tmoy | -0.53 | 0,12 | NS |
| Chêne kermès | Tmin annuelle | NDVI = 0,950 - 0,0200 Tmin | -0.65 | 0,04 | * |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,00 - 0,0140 TMAX | -0.32 | 0,36 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,13 - 0,0244 Tmoy | -0.59 | 0,07 | NS |
| Olivier lentisque | Tmin annuelle | NDVI = 1,04 - 0,0396 Tmin | -0.42 | 0,23 | NS |
| | Tmax annuelle | NDVI = 2,93 - 0,101 TMAX | -0.75 | 0,01 | ** |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,96 - 0,0791 Tmoy | -0.63 | 0,05 | * |
| Toute la forêt de l'Est algérien | Tmin annuelle | NDVI = 0,925 - 0,0432 Tmin | -0.69 | 0,03 | * |
| | Tmax annuelle | NDVI = 1,25 - 0,0325 TMAX | -0.54 | 0,10 | NS |
| | Tmoy annuelle | NDVI = 1,49 - 0,0611 Tmoy | -0.78 | 0,01 | ** |

Tous les résineux présentent la température moyenne annuelle comme la meilleure variable explicative de la variation de l'NDVI sauf le genévrier de Phénicie. Par exemple, l'NDVI du pin d'Alep est conditionné par la variation de la température annuelle moyenne qui explique 60% de sa variation. Lorsque la température moyenne annuelle passe de 16°C durant l'année 2002 à 15°C durant l'année 2011, l'indice NDVI du pin d'Alep augmente de 0.35 à 0.41, soit un gain de 0.0638 d'NDVI (hausse de 6%). D'autre part, on aura une augmentation de l'NDVI de cette essence de 4% si la température minimale diminue de 1°C.

En ce qui concerne les feuillus, la meilleure variable explicative pour l'olivier lentisque est la température maximale, où la corrélation entre cette variable thermique et l'activité photosynthétique de cet écosystème peut atteindre 0.75. Pour le chêne vert et le chêne kermès, le pouvoir prédictif du modèle est important si le régresseur est la température minimale.

Pour la totalité des écosystèmes forestiers de l'Est algérien, la corrélation est très fortement négative entre l'NDVI et la température moyenne (-0.78), ce qui signifie que cette dernière explique 61% de la variabilité de cet indice. En deuxième position vient la température minimale et enfin la température maximale en dernière position où le pouvoir prédictif de la corrélation est faible (29%) (tab.19).

6.3. Cartographie du coefficient de corrélation :

L'étude de la corrélation entre les températures et l'NDVI, en moyennant les valeurs de ces variables pour chaque écosystème forestier, cache la variabilité spatiale de ce paramètre statistique, pour cela on a essayé de cartographier le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson au niveau de chaque pixel des massifs forestier de l'Est algérien.

6.3.1. Corrélation entre la température minimale et l'indice NDVI :

La figure 125 montre la variabilité spatiale du coefficient de corrélation calculé entre les températures minimales et l'indice NDVI des forêts de l'Est algérien.

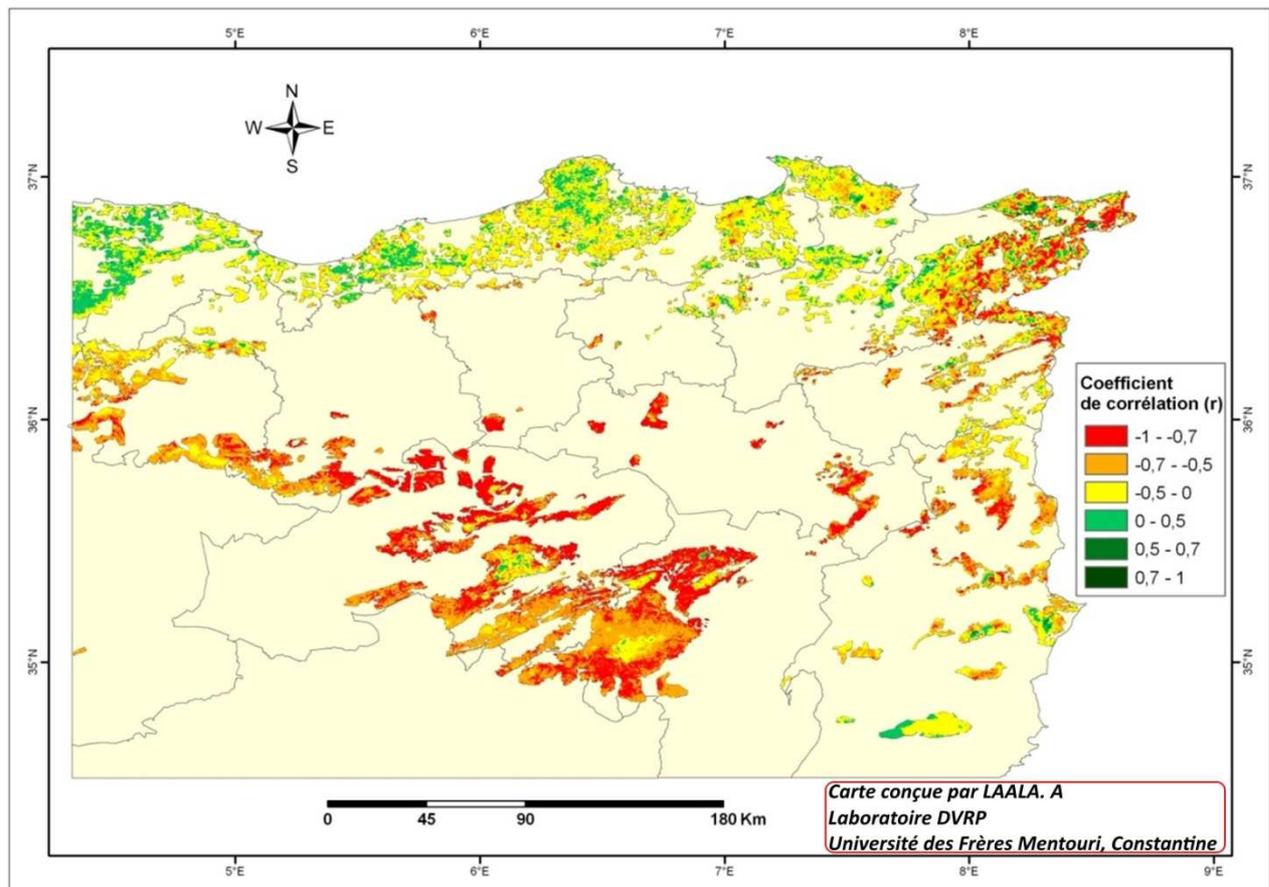


Fig.125: Coefficient de corrélation spatialisé entre la température minimale et l'indice NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien

La moitié de la surface totale des écosystèmes forestiers de l'Est algérien est caractérisée par un coefficient de corrélation significatif et fortement négatif ($r < -0.5$) entre les deux variables étudiées (fig.126). Elle se concentre particulièrement dans le Sud et le Nord-Est de la zone d'étude (fig.125) et particulièrement au niveau de la forêt de la Calle, El-Ksob, El Frine, El Oubeira, Khannguet Aoun, Ouerda, l'Oued Soudan, Fedj El Makta, Bouredine, Djebel Boukhadra, Bou Rbaia, la forêt domaniale de Ouled Abd El-Nour, Dreat, Mansourah, ainsi que tout les massifs forestiers de la wilaya de Batna, Khenchela et Oum El Bouaghi. Dans cette situation, l'augmentation de la température minimale provoque une baisse remarquable des valeurs du NDVI de ces écosystèmes forestiers, ce qui indique que, dans les régions arides et semi-arides, la température minimale est le facteur limitant essentiel de la production primaire qui conditionne le fonctionnement de l'activité photosynthétique.

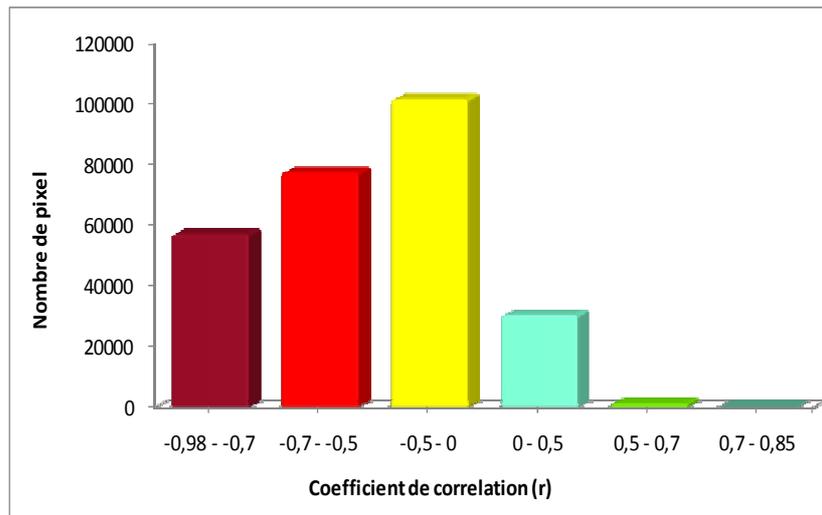


Fig.126. Nombre de pixel de chaque classe de corrélations entre la température minimale et l'NDVI

D'un autre côté, une superficie forestière de 8162.5ha, localisée essentiellement dans l'Est (au niveau de la forêt de Feid El Rarnoug et la forêt d'El Frine de la wilaya d'El Taref) montre une corrélation significative et fortement positive ($0.5 < r < 0.85$) entre l'NDVI et la température minimale. Le maximum de cette superficie appartient à l'écosystème forestier du chêne kermès où il caractérise 2.06% de la surface totale de cette forêt (fig.125). On peut dire que ces zones forestières où la production de la biomasse végétale est faible (faibles valeurs de l'NDVI) correspondent aux régions relativement froides.

Le reste des superficies forestières de l'Est algérien (49.17%) est caractérisé par un coefficient de corrélation non significatif ($-0.5 < r < 0.5$). Il se localise principalement dans les wilayas du littorale (fig.125). On constate donc que la température minimale ne paraît pas importante pour la végétation forestière dans ces régions côtières. Au maximum, elle explique seulement 25% de la variation du NDVI, le 75% de la variance peut être attribuée à l'intervention d'autres facteurs.

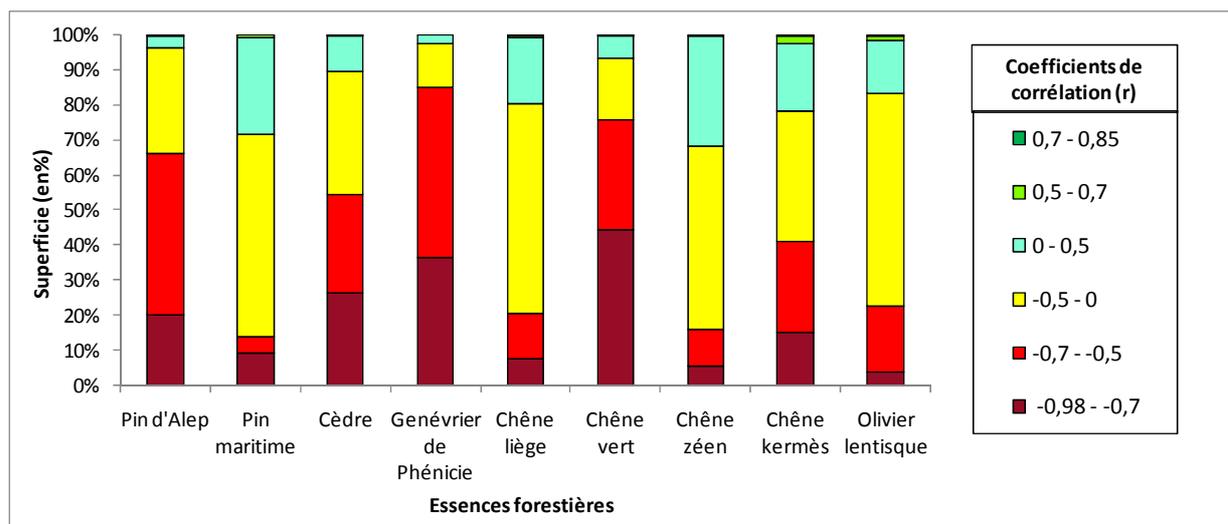


Fig.127: Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température minimale et l'NDVI

Le maximum des superficies forestières où la corrélation est significativement négative entre les deux variables étudiées est observé au niveau des forêts de genévrier de Phénicie. Il représente 84.9% de sa surface totale (fig.127). Il est suivi par le chêne vert (75.71%), le pin d'Alep (65.91%), le cèdre (54.33%) et le chêne kermès (40.84%). Au niveau de ces massifs forestier, plus les températures minimales augmentent, plus la production de la chlorophylle et la biomasse végétale s'abaissent et vice-versa.

6.3.2. Corrélation entre la température moyenne et l'indice NDVI:

Le coefficient de corrélation calculé entre la température moyenne et l'indice NDVI oscille entre -0.98 et 0.79. Les valeurs les plus faibles, non significatives, sont observées au niveau des massifs forestiers littoraux et sublittoraux où elles caractérisent 124163 pixels (fig.128), soit 46.3% de la surface forestière totale de l'Est algérien. Ce qui nous indique que la température moyenne au niveau de ces parcelles forestières est non corrélée à la production de la biomasse végétale.

Les valeurs fortement significatives sont affichées au niveau de 144174 pixels répartissent dans les massifs forestiers de l'Est et le Sud de la zone d'étude (la forêt de la Calle, El-Ksob, El Frine, El Oubeira, Khannguet Aoun, Ouerda, l'Oued Soudan, Fedj El-Makta, Rezgoune, Bouredine, Djbel Boukhadra, Bou Rbaia, Djbel Aamamat El Kebir, Ain Mlila, Chettaba, Ich Ali, Chelia, Ouled Yagoub, Beni Amloul, Metlili, Bouarif, Belezma et Boutaleb). Ces valeurs significatives témoignent donc de l'importance de la température moyenne pour l'activité photosynthétique de la végétation forestière de ces zones.

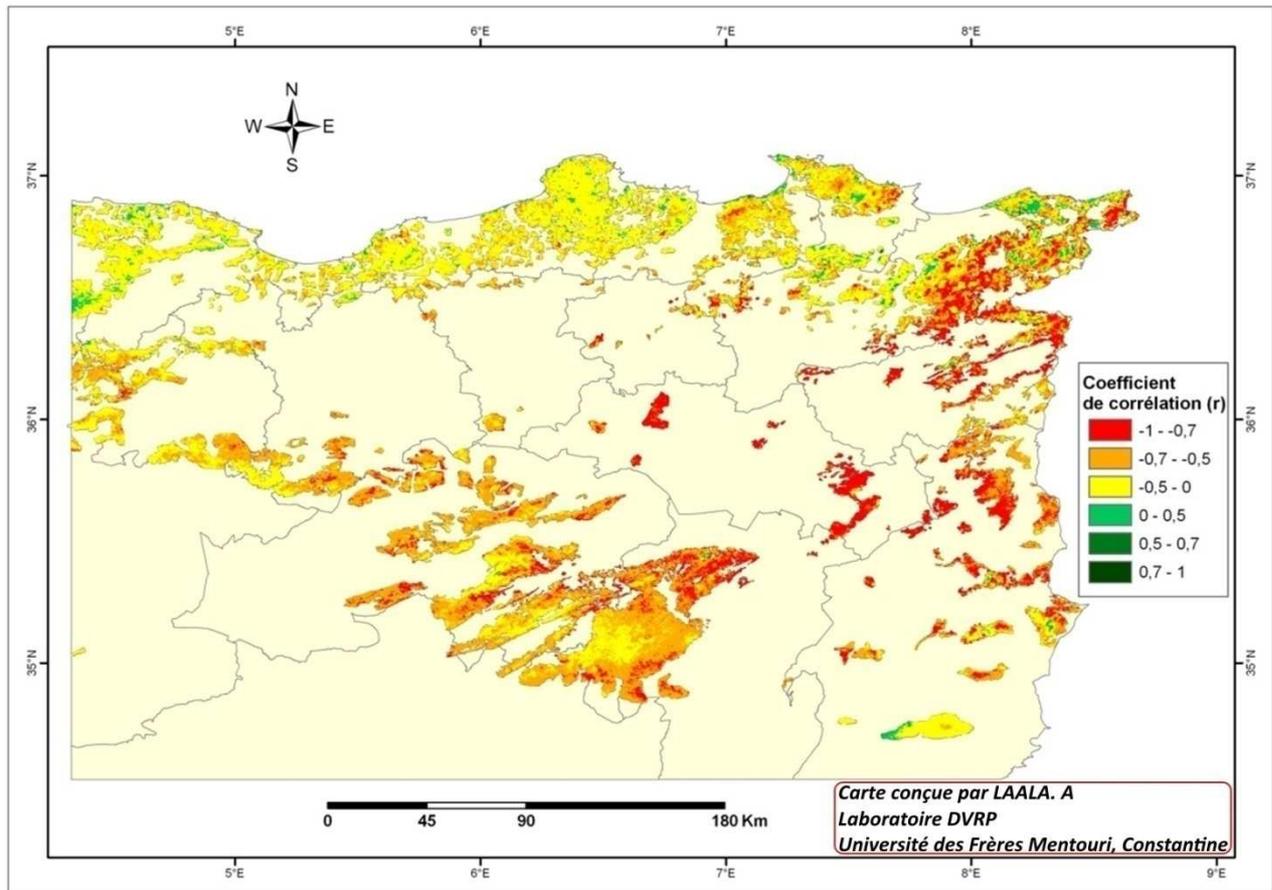


Fig.128: Coefficient de corrélation spatialisé entre la température moyenne et l'NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien

La classe modale en termes de corrélation significative est celle oscillant entre : -0.5 et -0.7 qui caractérise 99712 pixels (fig.129). La présence de ces valeurs négatives démontre bien la relation entre la végétation forestière et la température moyenne qui varient en opposition de phase, c'est dire la valeur d'NDVI décroît lorsque la température moyenne augmente et vice-versa.

D'autre part, les superficies forestières qui affichent une corrélation significativement positive ($r > 0.5$) sont minoritaires (fig.129), elles représentent seulement 0.12% de la surface totale des forêts, ce qui révèle qu'au niveau de ces massifs, localisés particulièrement au Nord-Est de la zone d'étude, l'indice NDVI est sensible à la variation de la température moyenne où la diminution de ce paramètre climatique entraîne une chute remarquable des valeurs de l'NDVI.

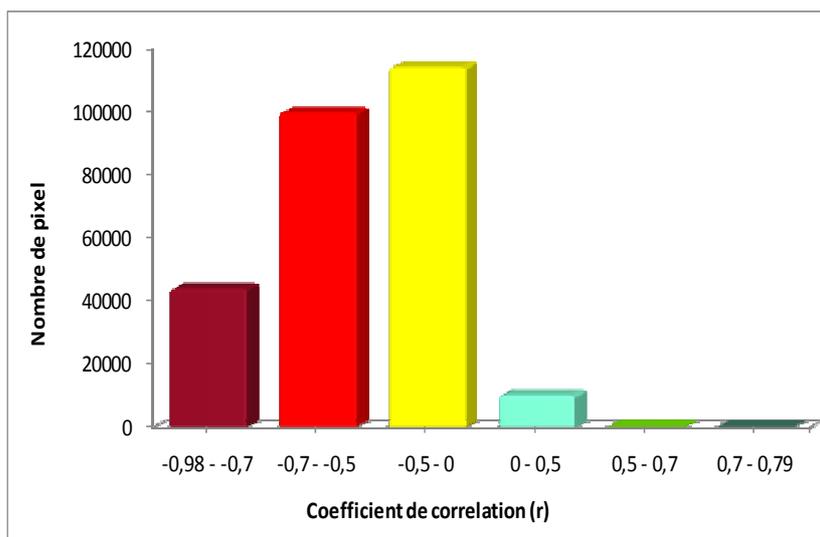


Fig.129 : Nombre de pixel de chaque classe de corrélation entre la température moyenne et l'NDVI

Les superficies forestières où la corrélation est significativement négative varient en fonction de l'écosystème forestier étudié, le maximum de ces superficie est observé chez les forêts de pin d'Alep (39518 pixels, soit un surface de 72,75% de sa superficie totale) (fig.130).

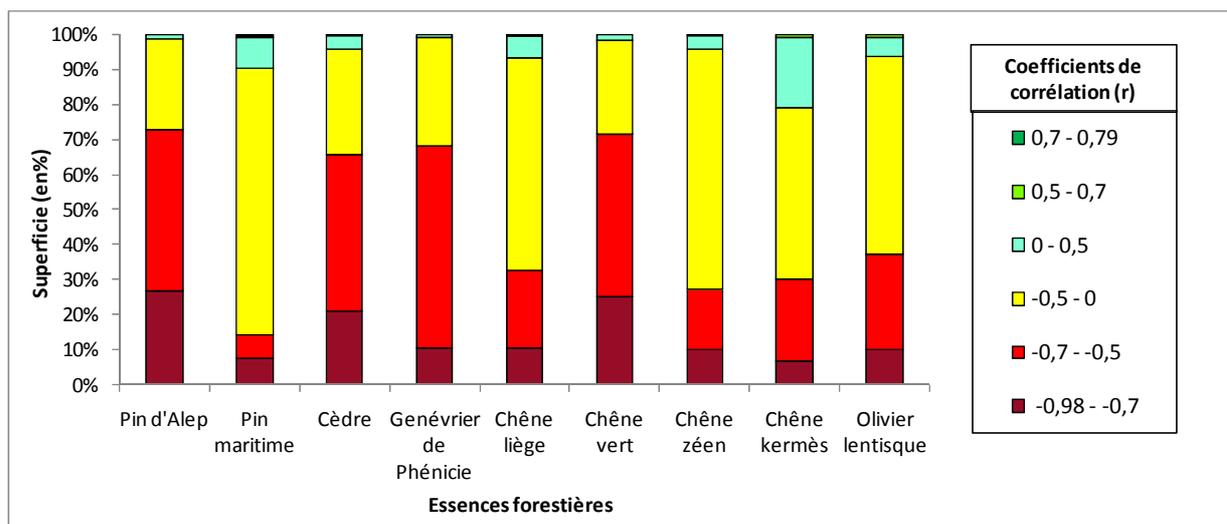


Fig.130 : Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température moyenne et l'NDVI

6.3.3. Corrélation entre la température maximale et l'indice NDVI :

La figure 131 présente la corrélation calculée entre la température maximale et l'activité photosynthétique de la végétation forestière de l'Est algérien.

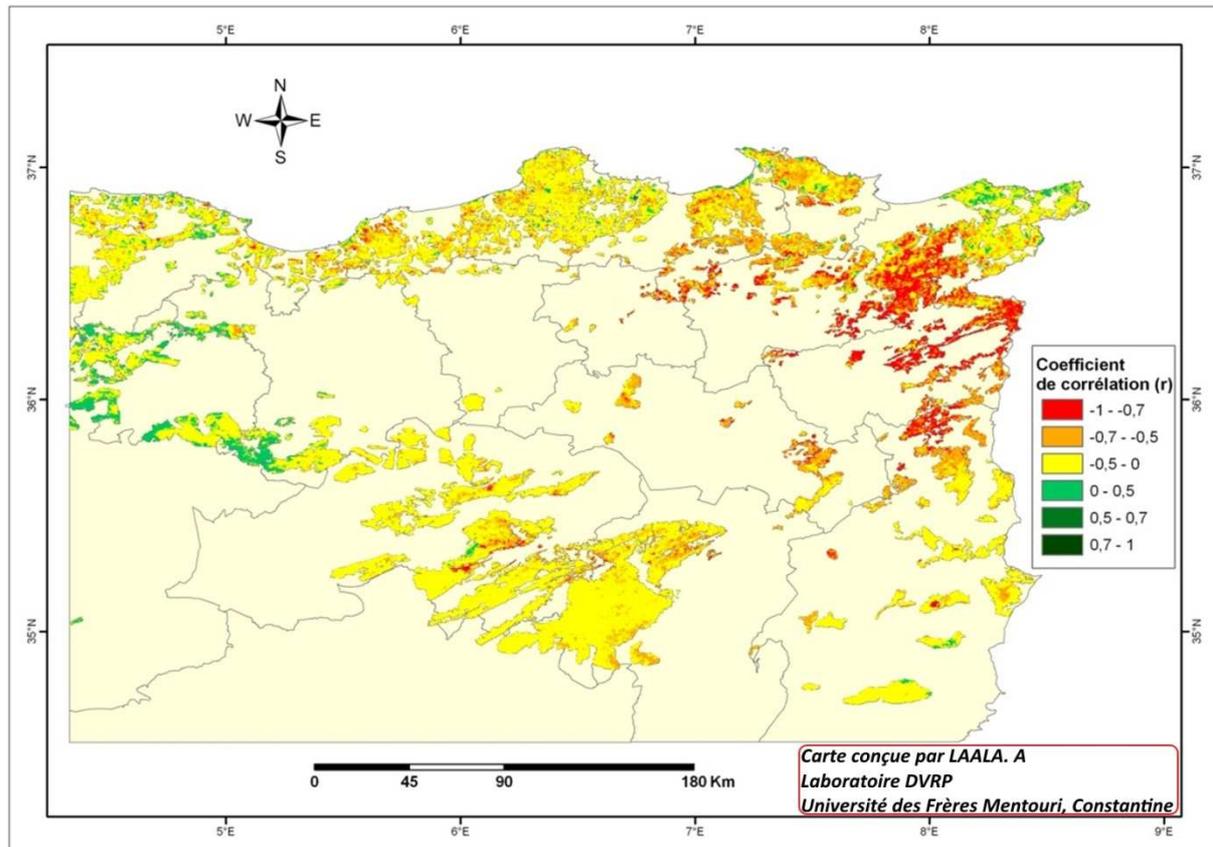


Fig.131 : Coefficient de corrélation entre la température maximale et l'NDVI des écosystèmes forestiers de l'Est algérien

Une corrélation significative et fortement négative ($r < -0.5$) est observée entre la température maximale et l'NDVI des massifs forestiers localisés particulièrement dans le Nord-Est de la zone étude (fig.131) tels que la forêt d'Ouerda, Oued Soudan, Fedj El Makta, Rezgoune, Bouredine, Mahbouba, Djbel Graout, Ain El-Kelb, Beni Ahmed et Beni Mezzeline.

Cette corrélation négative caractérise 29.13% de la surface totale des forêts étudiées, ce qui signifie que l'activité photosynthétique de ces massifs diminue avec l'augmentation de la température maximale. Il ressort aussi après le dénombrement des pixels que la classe de corrélation significativement positive ($r > 0.5$) est négligeable et ne représente que 0.06% de la surface totale des écosystèmes forestiers étudiés (fig.132).

D'autre part, une vaste superficie forestière est caractérisée par une corrélation non significative entre les deux variables étudiées (Tmax et l'NDVI). Elle représente 70.81% de la totalité des surfaces forestières (fig.132). Elle se concentre dans le Sud et l'Ouest de la zone d'étude (fig.131). Cette remarque suggère qu'au niveau de ces zones, l'indice NDVI est

indifférent à la variation de la température maximale. Il se peut que des variables climatiques autres que la température maximale aient une meilleure corrélation avec l'NDVI.

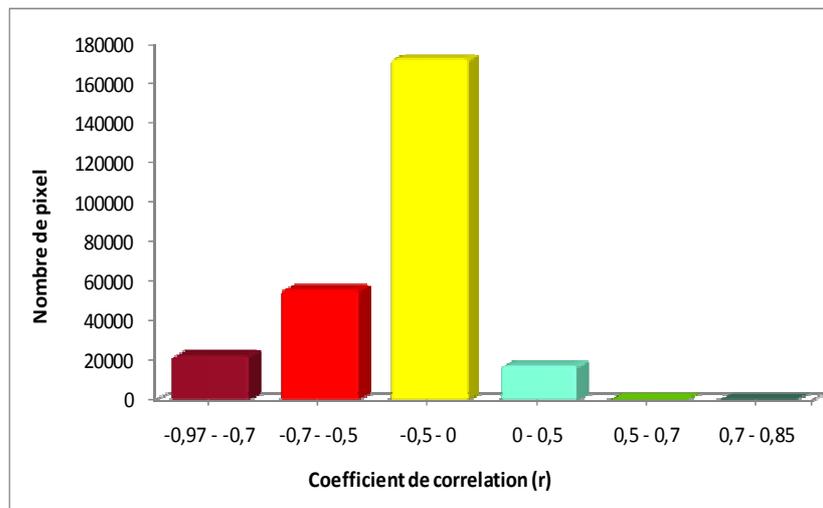


Fig.132 : Nombre de pixel de chaque classe de corrélations entre la température maximale et l'NDVI

Pour les feuillus, la corrélation significativement négative caractérise 56.14% de la surface totale de l'olivier lentisque. Quant aux résineux, cette superficie est de 32% pour le cèdre et même pour le pin d'Alep (fig.133).

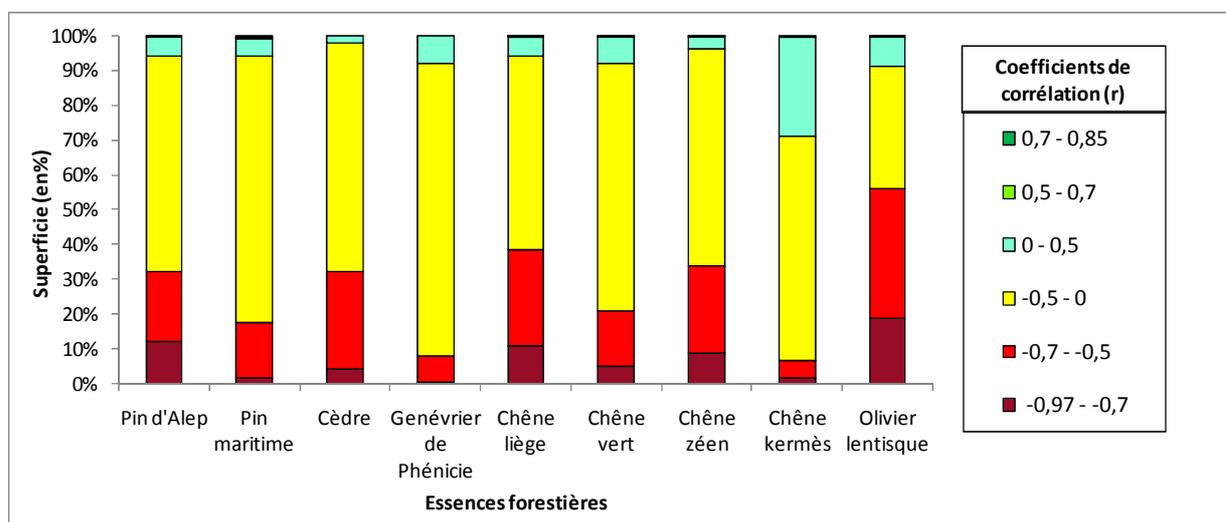


Fig.133 : Superficie (en%) des écosystèmes forestiers selon les différentes classes de corrélation calculées entre la température maximale et l'NDVI

Discussion:

L'objectif de cette section était d'analyser la variabilité spatio-temporelle de l'activité photosynthétique des peuplements ligneux de l'Est algérien et par conséquent cartographier le lien entre la productivité de biomasse forestière et les différents paramètres thermiques.

- **Evolution spatio-temporelle du couvert forestier de l'Est algérien :**

Le suivi de la dynamique des écosystèmes forestiers dans l'Est algérien est un apport important pour la compréhension de leurs variabilités saisonnières et inter-annuelles et pour quantifier l'intensité des fluctuations thermique dans cette vaste zone.

Selon Pettorelli *et al.*, (2005), l'indice 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. Son utilité pour décrire le couvert forestier se base sur le fait que ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge.

Il ressort de notre étude, d'après les valeurs d'NDVI, que l'activité photosynthétique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien varie annuellement et saisonnièrement. Elle est plus marquée pour les peuplements feuillus que pour les peuplements résineux. Ceci peut être expliqué par le feuillage de ces écosystèmes 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 peu développé.

A l'échelle annuelle, tous les écosystèmes forestiers étudiés présentent des comportements communs concernant la variation interannuelle de l'activité photosynthétique. Pour toutes les forêts étudiées, le maximum des valeurs d'NDVI est enregistré durant l'année

2004, représentant la production maximale de la végétation forestière de l'Est algérien. En revanche, en 2002 on a pu enregistrer une faible productivité aussi bien pour les résineux que pour les feuillus. Ainsi, durant l'année 2005, toutes les formations forestières affichent une réduction rapide de la quantité de la chlorophylle synthétisée. Durant la même année, les températures minimales et maximales de la majorité des wilayas analysées présentent une anomalie remarquable.

D'autre part, la carte qui représente l'NDVI moyen annuel calculé sur la période (2002-2011) donne une idée sur la répartition spatiale de l'intensité de l'activité photosynthétique moyenne annuelle des forêts de l'Est algérien. Cette expression cartographique fait ressortir une décroissance de l'activité chlorophyllienne et de la biomasse forestière du Nord vers le Sud, ce qui reflète l'effet prépondérant de la latitude qui est considérée comme une variable explicative de la variation de la température et qui peut conditionner l'intensité de l'activité végétative des écosystèmes forestiers. Cette carte montre que les parcelles forestières les moins vigoureuses se situent essentiellement au Sud de l'Est algérien, à partir de la latitude $35^{\circ}30'$, ce qui signifie que les conditions climatiques et particulièrement thermiques de ces régions sont moins propices à la croissance des essences forestières.

Ainsi, le paramètre statistique de dispersion (l'écart type) calculé à partir des séries temporelles de l'indice NDVI durant la période 2002-2011, a permis, d'une part, de comprendre la variabilité temporelle de la végétation forestière et d'autre part, de géolocaliser spatialement les parcelles forestières qui connaissent des anomalies de l'activité chlorophyllienne. Les fortes valeurs d'écart type indiquent une végétation forestière stressée, à l'inverse, les valeurs faibles montrent une régularité annuelle de l'activité végétative des écosystèmes forestiers.

Un pic de stress de la végétation forestière est perceptible dans quelques parcelles se traduisant par un écart type notable de l'NDVI. Ce qui signifie que ces zones sont caractérisées par des fortes variabilités interannuelles de la production de la biomasse forestière. L'importante superficie où les données annuelles de l'indice NDVI sont irrégulières a été observée pour l'olivier lentisque. Selon Prasad *et al.*, 2008, les espèces forestières à feuilles persistantes restent sur l'arbre pendant plus d'une année, ce qui donne des faibles coefficients de variation de l'NDVI. En revanche, les espèces à feuilles caduques perdent toutes leurs feuilles pour au moins deux à quatre mois de chaque année ce qui entraîne un important coefficient de variation de l'NDVI.

A l'échelle saisonnière, l'activité végétale est toujours soutenue dans le Nord de la zone d'étude avec un maximum enregistré durant la saison hivernale. Ceci nous laisse à supposer que soit l'activité chlorophyllienne des arbres est d'avantage lié à la précipitation hivernale qu'à la température, soit le réchauffement marqué durant la saison hivernale améliore l'intensité photosynthétique.

Les feuillus sont dominés par des valeurs d'NDVI saisonnières supérieures au seuil de 0.6, alors que la quasi-totalité des superficies des résineux affichent des faibles 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.

Ainsi, les variations inter-saisonnières de l'activité végétative sont très marquées surtout pour la saison hivernale, durant laquelle l'activité photosynthétique de plus de la moitié des forêts de cèdre est irrégulière et marque des pics à travers les années. Ce qui signifie qu'au niveau de la cèderaie de l'Est algérien, il y a des parcelles forestières qui connaissent des hausses et des baisses de la production forestière durant cette saison.

L'analyse temporelle des séries d'NDVI révèle une tendance à la hausse de cet indice pour une notable superficie des résineux et des feuillus. Ce qui nous indique une amélioration de la productivité foliaire et de l'activité photosynthétique des espèces arborées durant la période (2002-2011). Ces résultats traduisant donc l'installation des conditions plus favorables à la croissance et au développement des écosystèmes forestiers. A l'échelle mondiale, Kawabata *et al.*, (2001) étudient la tendance (annuelle et saisonnière) de l'activité de la végétation mondiale durant la période 1982-1990 et son relation avec la température et les précipitations. Les résultats obtenus montrent une tendance positive de l'activité végétative dans des vastes régions de moyenne et de hautes latitudes de l'hémisphère Nord. D'après ces auteurs cette situation résulte d'une augmentation progressive de la température au niveau de ces régions.

La démarche adoptée pour estimer la tendance spatiale nous a permis d'identifier les zones forestières connaissant une augmentation ou une dégradation de la végétation durant la décennie (2002-2011). Les zones subissant une dégradation occupent 7.1% de la superficie forestière totale, alors que les superficies forestières qui présentent une tendance à la hausse de

l'NDVI sont notables, elles représentent 87.4% de la surface totale. Ces zones étaient dégradées durant le début de l'année 2002 et qui semblent avoir été bien couvertes durant ces dernières années. Nos résultats suggèrent que les écosystèmes forestiers de ces zones montrent une certaine résilience au réchauffement climatique signalé dans cette étude.

En termes de wilaya, le maximum des superficies dégradées est enregistré au niveau de la wilaya d'El-Tarf (soit 12.8% de sa surface forestière). De façon globale, la régression du couvert forestier est plus marquée pour les peuplements feuillus que pour les résineux. Ce qui signifie que les feuillus sont très sensibles à la variabilité climatique et particulièrement thermique.

Finalement, nous sommes conscients que la période de dix ans (2002-2011) est très courte pour étudier précisément la tendance d'une série statistique à long terme, mais cette étude constitue une approche préliminaire qui aide les forestiers à mieux localiser les parcelles forestiers qui tendent vers une régression.

- **Relation entre l'activité végétative des peuplements ligneux de l'Est algérien et les paramètres thermiques :**

L'identification de la relation entre la biomasse forestière et la température est indispensable pour comprendre les influences de la variabilité de ce paramètre sur les écosystèmes forestiers de l'Est algérien durant une période déterminée.

L'indice de végétation de différence normalisée (NDVI), fourni par les images satellitaires, est une approche empirique pour mesurer l'activité physiologique des plantes, dans la mesure où une dégradation de la végétation se traduirait par une diminution de la valeur d'NDVI. L'utilisation de cet indice est très répandue en télédétection appliquée à la foresterie : évaluation de la déforestation, suivi des feux de forêts, de la désertification et même des ravages causés par les insectes (Jepsen *et al.*, 2009).

Il ressort de notre étude que toute augmentation des températures par rapport à la moyenne entraîne une diminution importante de l'activité photosynthétique des écosystèmes forestiers de l'Algérie orientale qui se traduit par une chute significative des valeurs de l'indice NDVI. Cette corrélation négative décelée entre la température et l'NDVI peut être expliquée par la forte covariance négative existant entre les températures et les précipitations.

Une étude similaire réalisée par Guo *et al.*, (2014) montre que l'NDVI des forêts de la Mongolie-intérieure (la Chine) est positivement corrélé aux températures minimales, maximales

et moyennes et cela durant le mois d'Avril et Mai. Cependant cette corrélation est significativement négative entre l'indice et les températures minimales durant le mois de Juillet, Août et Septembre. Cette étude révèle que l'augmentation de la température accélère la croissance et le développement des arbres forestiers au début de la période de croissance, mais l'élévation de la température minimale peut ralentir leur croissance.

De tels résultats ont déjà été mentionnés au cours de l'étude de Wang *et al.*, (2001) qui constate une corrélation négative entre les températures (minimal, maximales et moyenne) de la saison de croissance et l'indice NDVI moyenne des forêts des États-Unis. Nos résultats concordent aussi avec ceux de Fang *et al.*, (2014) qui signalent une corrélation négative entre l'NDVI des prairies canadiennes et la température, ce qui signifie que dans ces régions, la température élevée provoque une réduction de la croissance.

Plusieurs travaux ont montré que l'indice NDVI est affecté par les variations des paramètres climatiques et particulièrement par les précipitations et les températures (Shilong *et al.*, 2004 ; Wang *et al.*, 2003 ; Kaspersen *et al.*, 2011 ; Guo, 2003 ; Hao *et al.*, 2012 ; Ichi *et al.*, 2002, Smith et Choudhury, 1990; Ehrlich et Lambin, 1996 ; Song, 2008). Ces deux paramètres climatiques jouent un rôle important dans la croissance, le développement et la répartition de la végétation naturelle (Brovkin, 2002; Borchert, 1998 ; Suzuki *et al.*, 2006 ; Mather et Yoshioka, 1968; Wang *et al.*, 2003; Suzuki et Masuda, 2004). Des recherches antérieures ont montré que la température est le facteur limitant qui conditionne la croissance de la végétation dans l'hémisphère Nord et les régions de haute latitude (Schwartz *et al.*, 2006;. Menzel *et al.*, 2006).

Nos résultats corroborent les observations faites en 2002 par Ichi *et al.*, qui étudient la relation (NDVI-Climat) à l'échelle mondiale. Ils constatent une corrélation positive entre les températures et l'NDVI annuel des régions de haute et de moyenne latitude Nord (l'Europe et l'Asie) et une autre corrélation négative enregistrée entre ces deux paramètres pour les régions de faible latitude Nord et de l'hémisphère Sud (Sud d'Amérique, Nord de l'Australie). Selon ces auteurs, l'augmentation de l'NDVI dans les zones situées aux moyennes et hautes latitudes Nord est liée à l'augmentation de la température, alors que la diminution de cet indice dans les régions semi-arides Sud est liée à la diminution des précipitations durant les périodes critiques. Selon Song (2008), la diminution de la latitude engendre toujours une diminution de l'intensité de corrélation entre la température et l'NDVI et une intensification de la corrélation entre l'NDVI et les précipitations. Piao *et al.*, (2011) et Tanja *et al.*, (2003), ont montré aussi que dans les régions

de hautes latitudes où la température est relativement basse, la croissance de la végétation est très sensible à la variabilité de la température durant le début de la saison de croissance.

En termes d'écosystèmes forestiers, le chêne vert, l'olivier lentisque et le pin d'Alep sont les essences forestières les plus sensibles à la variabilité respectivement de la température minimale, maximale et moyenne. L'NDVI de ces écosystèmes présente une corrélation négative avec les variables thermométriques. Selon Alward *et al.*, (1999); Yang *et al.*, (1997) ; Yang *et al.*, (1998), les températures minimales et maximales exercent une influence considérable sur la croissance de la végétation.

Il est important de signaler ici qu'il y a d'autres recherches qui constatent une corrélation positive entre la température et l'indice NDVI. A titre d'exemple, on peut citer les travaux de Song (2008) et Fanghua *et al.*, (2012), réalisés au niveau de la Chine, qui signalent que la température est corrélée fortement et positivement avec l'NDVI. Ainsi, nos résultats sont en désaccord avec celles de Fanghua *et al.*, (2012) qui montrent que l'NDVI de la végétation forestière de la partie supérieure du bassin du fleuve jaune de la Chine est corrélé positivement avec les températures mensuelles avec une liaison très forte remarquée pour les températures minimales. Cette relation positive est également observée par plusieurs études réalisées pour des régions de moyenne et de haute latitude (Guo *et al.*, 2014; Weishou *et al.*, 2011; Kowabata *et al.*, 2001; Lim *et al.*, 2004). Cette situation résulte de l'augmentation progressive de la température durant la saison de croissance qui provoque une nette amélioration de la photosynthèse (Euskirchen *et al.*, 2006; Black *et al.*, 2000; Nemani *et al.*, 2003).

Nous avons également noté, d'après le calcul du coefficient de corrélation, que le pin maritime, le chêne liège, le chêne zéen et l'olivier lentisque sont considérées comme des essences forestières indifférentes à la variation de la température minimale. Donc, il semblerait que ce paramètre thermique ait une importance minime par rapport aux températures maximales. D'autre part, les résineux comme le pin d'Alep, le pin maritime et le genévrier de Phénicie sont des essences thermophiles indifférentes à la variation des températures maximales. En fait, une hausse des températures maximales ne serait pas un frein à la croissance de ces espèces.

Globalement, l'activité photosynthétique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien sont conditionnée essentiellement par la variation de la température moyenne et minimale. Le Sud et l'Est de notre zone d'étude renferment la majorité des massifs forestiers qui sont très sensibles à la variabilité des températures minimale et moyenne, alors que les superficies forestières où la

température maximale est considérée comme un facteur limitant, se localisent principalement dans l'Est et au niveau de quelque pixels du Sud. Les arbres de ces zones disposent donc deux options pour faire face aux effets notables du réchauffement climatique décelé dans cette étude: l'adaptation à ce nouvel environnement ou la migration vers des conditions environnementales et notamment thermiques plus favorables. Si ces deux options sont vouées à l'échec, l'extinction constitue la troisième réponse des essences forestières de l'Est algérien face aux variabilités et au réchauffement de cette région. A l'échelle temporelle, les arbres en question doivent manifester des traits d'adaptations morpho-physiologiques (changement de phénotype, synthèse de proline et des sucres solubles, du quercitol,...), phénologique (retard ou avance de certains événements phénologiques comme le débourrement, la floraison ou la sénescence). A l'échelle spatiale, ces arbres forestiers doivent se déplacer vers des habitats favorables à leurs croissances et à leurs développements tout en modifiant les limites chorologiques de leurs aires de répartition biogéographique.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives :

L'objectif principal de ce travail était de déterminer la variabilité spatio-temporelle de la température dans le Nord Est algérien et par conséquent comprendre l'interférence entre la fluctuation de ce paramètre climatique et la végétation forestière. La question de variabilité thermique dans l'Est algérien, englobant la quasi-totalité du patrimoine forestier de la nation, a été examinée sous divers angles.

A l'échelle temporelle, le calcul de l'anomalie thermique au cours de ces dernières décennies et la cartographie des tendances de quelques variables thermométriques ont permis de créer une image régionale alarmante de l'évolution des températures dans l'Est algérien. Pour les 15 wilayas étudiées, les années considérées comme froides représentent 40 à 57% des années étudiées, alors que celles chaudes peuvent constituer jusqu'à 63% des années analysées. De plus, l'analyse de longues séries de la température maximale révèle un réchauffement notable généralisé sur l'ensemble du territoire, notamment pour la wilaya de Batna. Les différentes valeurs de la tendance suggèrent que le réchauffement n'a pas affecté les wilayas de façon homogène. En revanche, les températures minimales présentent des tendances à la baisse qui peuvent atteindre $-2^{\circ}\text{C}/30\text{ans}$ et des tendances à la hausse variant entre 0.5 et $1.7^{\circ}\text{C}/30\text{ans}$.

A l'échelle saisonnière, l'étude révèle une tendance à la hausse notable pour les températures maximales et des tendances positives et négatives de moindre importance décelées pour les températures minimales, ce qui contribue à l'intensification de l'amplitude thermique annuelle qui affiche des tendances à la hausse dépassant 5°C .

La même remarque a été constatée pour les trois régions homogènes issues de la typologie thermique des wilayas qui affichent des tendances à la hausse pour toutes les variables thermiques étudiées sauf pour la température minimale qui marque une légère baisse pour la région (B) englobant les wilayas des hauts plateaux et du Nord Est et la région (C) constituée de la wilaya de Biskra et Msila. Ces analyses chronologiques témoignent l'évolution considérable des conditions climatiques et particulièrement thermique de la région qui tend à se réchauffer depuis 1982.

A l'échelle spatiale, la synthèse de l'ensemble des résultats statistiques, issus de l'interpolation des températures, sous un système d'information géographique (SIG) nous a permis de représenter, sous forme des cartes, le champ thermique de l'Est algérien. En effet, la

méthode de régression seule est mal adaptée à l'interpolation des températures. L'expression cartographique des résultats statistiques affirme que la 2^{ème} méthode qui combine la régression multiple avec le krigeage est la méthode retenue pour l'interpolation de la température au niveau de l'Algérie orientale à partir bien sûr des variables explicatives décrivant le relief.

On dispose donc des informations importantes, sous forme de cartes thermiques, qui illustrent la variabilité spatiale du principal paramètre bioclimatique et qui peuvent contribuer, sous SIG, aux différentes analyses. Le croisement de ces cartes avec celles de la végétation forestière nous a permis d'identifier les exigences thermiques de chaque écosystème forestier de l'Est algérien. Une meilleure connaissance de l'écologie climatique et notamment thermique des espèces facilite, d'une part, la compréhension de leurs distributions actuelles et d'autre part, la prévision de l'avenir de la sylve algérienne qui est de plus en plus confrontée aux aléas naturels (réchauffement). Ces cartes thermiques constituent donc une source d'information qui aide les forestiers à choisir l'essence forestière à planter dans certains sites.

D'autre part, l'étude de la dynamique de la végétation à l'échelle saisonnière et annuelle s'est révélé un bon moyen d'investigation de la température et de ses variabilités au niveau de l'Est algérien. Les images satellitaires de moyenne résolution (MODIS) nous ont permis de suivre l'état de la végétation forestière par le biais de l'indice de végétation (NDVI). Elles montrent que l'intensité de l'activité photosynthétique annuelle et saisonnière diminue selon un gradient latitudinal du Nord au Sud. Ainsi, l'évolution interannuelle de l'indice NDVI révèle une forte variabilité en mettant en évidence une activité photosynthétique intense enregistrée durant l'année 2004 et cela pour tous les écosystèmes forestiers étudiés. Cette irrégularité s'accompagne également d'une tendance à la hausse de la production en biomasse forestière de presque 87.4% de la totalité des superficies forestières et cela depuis le début 2002.

Ainsi, la spatialisation de la tendance de l'NDVI durant la période 2002-2011, affiche une régression évidente au niveau de 7.1% de la surface totale des écosystèmes forestiers de l'Est algérien. Le document cartographique issu de cette analyse constitue un apport pour les décideurs et les forestiers. Il leur permet d'identifier le type d'écosystème forestier le plus menacé et géolocaliser aussi les massifs forestières qui présentent une forte régression. Ces zones peuvent être considérées comme prioritaires, d'une part, pour une étude approfondie et multidisciplinaire afin de mieux déterminer les facteurs écologiques (biotiques ou abiotiques) responsables de cette notable dégradation et d'autre part, pour la mise en place d'une stratégie de protection durable.

Le dernier objectif de notre étude consistait à identifier la relation existant entre la végétation forestière et la température. Les résultats obtenus à l'échelle moyenne de chaque écosystème forestier sont en adéquation avec ceux calculés à l'échelle de chaque pixel. Ils montrent que la meilleure variable explicative de la variation de l'activité photosynthétique de la totalité des forêts étudiées demeure la température moyenne qui peut expliquer plus de 60% de la variabilité de l'indice NDVI, vient ensuite la température minimale avec un pouvoir prédictif de moindre importance (48%). Ces résultats confirment l'effet prépondérant des températures moyennes et minimales sur la vitalité et le fonctionnement de la végétation forestière. On peut les considérer donc comme des facteurs limitant qui conditionnent de ce fait la répartition et la productivité des écosystèmes forestiers de l'Est algérien.

Au terme de cette étude, on peut dire qu'il est possible de dériver une information pertinente sur la végétation forestière de l'Algérie orientale à partir de l'utilisation des images satellitaires et les différentes techniques du système d'information géographique (SIG). Ces dernières nous permettent de localiser spatialement les parcelles forestières les plus sensibles à la variation thermique.

Ainsi, les cartes issues de cette étude se heurtent néanmoins à des faiblesses sur le plan de la précision géographique. Un certain nombre de formations forestières (maquis, garrigues,...) ne figurent pas dans ces cartes. Ces points faibles sont imputables à l'insuffisance des données de référence, tant en termes d'exhaustivité (absence de données détaillées sur certaines wilaya) qu'en termes d'homogénéité (cartes de végétation et données thermiques issus de différents institutions et organismes, échelles d'analyse différentes..). Pour un territoire aussi vaste que l'Est algérien, la base de données doit permettre de tenir compte des particularités territoriales, et pour cela, être basé sur le maximum d'informations de terrain.

Finalement, ces premiers résultats ne sont que des approches préalables à une étude approfondie et très détaillée des aspects traités. En termes de perspectives et pour un meilleur suivi du patrimoine forestier de l'Est algérien et de sa réponse à la variabilité des paramètres thermiques, il serait intéressant de :

- d'acquérir d'autres types d'image satellitaire plus récente et de haute résolution pour l'acquisition d'informations plus détaillées, ce qui permettra de suivre la végétation forestière à une échelle très fine.

- d'installer plusieurs stations météorologiques pour un meilleur suivi des variables climatiques et également pour une meilleure modélisation.
- d'appliquer d'autres méthodes d'interpolation assez robustes, toute en utilisant, comme régresseur, d'autres variables qui peuvent conditionner la variabilité spatiale de la température.
- d'utiliser d'autres indices de végétation (DVI, SAVI, PVI, MSAVI, TSAVI, etc.) pour mieux appréhender la dynamique des massifs forestiers.
- d'améliorer la précision géographique et thématique de la cartographie forestière pour obtenir une caractérisation détaillée des formations forestières et sub-forestières de la zone d'étude.
- d'intégrer de données pédologiques et climatiques qui pourraient également contribuer à améliorer les résultats.
- d'appliquer la méthodologie de cette étude sur le reste du territoire algérien pour élaborer une stratégie nationale de protection.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdelguerfi A. (2003).** Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à l'évaluation et la réduction des risques menaçant les éléments de la diversité biologique en Algérie. Rapport de synthèse, 93p.
- Abdessemed K. (1982).** Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif de l'Aurès et du Belezma. Etude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse Doc. Ing. Fac. Des sciences et techniques, St Jérôme Aix Marseille, 200p.
- Ahrens M. J., and Ingram D. L. (1988).** Heat tolerance of citrus leaves. *Hort Sci*, 23: 747-748.
- Aissani B., et Laborde J.P. (1983).** Les pluies extrêmes et leur cartographie automatique dans la région algéroise. Document préliminaire. Conférence sur le climat méditerranéen et les ressources en eau, Eau verte – Eau bleue, Marseille, 8p.
- Alward R. D., Detling J. K., and Milchunas D. G. (1999).** Grassland vegetation changes and nocturnal global warming, *Science*, 283: 229–231.
- Amutha R., Muthulaksmi S., Baby Rani W., Indira K., and Mareeswari P. (2007).** Physiological Studies on Evaluation of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Genotypes for High Temperature Stress. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(4): 245-251
- Arnaud M., et Emery X. (2000).** Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Hermès, Paris, 221p.
- Askri H., Belmecheri A., Benrabah B., Boudjema A., Boumendjel K., Daoudi M., Drid M., Ghalem T., Docca A. M., Ghandriche H., Ghomari A., Guellati N., Khennous M., Lounici R., Naili H., Takherist D., et Terkmani M. (2005).** Géologie de l'Algérie, Conférence sur l'évaluation des puits, Contribution de SONATRACH Division Exploration, Ministère de l'Energie. Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement, p5-7.
- Aussenac G., et Guehl J. (1990).** Ecophysiologie du cèdre (*Cedrus* sp.). Conséquence pour la sylviculture station de sylviculture et de production INRA, Nancy, 191-139.
- Badeau V., Dupouey J.L., et Desprez-Loustau M. L. (2004).** Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises et distribution géographique et impact des champignons pathogènes forestiers. Rapport final du projet CARBOFOR, 137p.
- Baret F., Clevers J., et 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): 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 : 71-73.
- Barry R.G. (1992).** Mountain weather and climate. Routledge, Chapman & Hall, London, 1992, 402p.
- Beaubien E. G., et Freeland H. J. (2000).** Spring Phenology Trends in Alberta, Canada: Links to Ocean Temperature, *International Journal of Biometeorology*, 44: 53-59.
- Bedel J. (1986).** Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. Option Méditerranéennes. Série étude CIHEAM 86/1; 127-156
- Beek P. S. A., Atzberger C., Hogda K. A., Johansen B., et 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): 321-334.

- Benavides R., Montes F., Rubio A., & Osoro K. (2007).** Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146 (3) : 173-188.
- Benderradji M.H., Alatou D, Arfa A.M.T., Benachour K. (2006).** Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation Impact du phénomène en Algérie. *New Medit* (4): 19-21.
- Benslimane M., Hamimed A., El Zerey W., Khaldi A., et Mederbal K. (2008).** Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *Revue Vertigo*, 8 (3): 125-142.
- Bensouiah R. (2004).** Politique forestière et lutte contre la désertification en Algérie. Du barrage vert au PNDA. *Forêt méditerranéenne*, 25 (3) : 191-198
- Berry J., & Bjorkman O. (1980).** Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Ann Rev Plant Phys*, 3 : 491-543
- Black T. A., Chen W. J., Barr A. G. (2000).** Increased carbon sequestration by a Boreal deciduous forest in years with a warm spring, *Geophysical Research Letters*, 27 (9): 1271–1274
- BNEDER. (2009).** Plan national de développement forestier (PNDF), Rapport de synthèse nationale, 87 p.
- Boden T. A., Kaiser D. P., Sepanski R. J., & Stoss F. W. (1994).** Trends 93: A compendium of data on global change ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis, 984p
- Bonan G. B., Shugartn H. H. (1989).** Environmental factors and ecological processes in boreal forests. *Annu. Rev. Ecol. Syst*, 20: 1-28
- Borchert R. (1998).** Responses of tropical trees to rainfall seasonality and its long-term changes. *Climatic Change*, 39: 2-3.
- Boudy P. (1955).** Economie forestière Nord africaine T : 4. description forestière de l'Algérie et de la Tunisie Ed. Larose, 453p
- Boudy P. (1952).** Guide du forestier en Afrique de Nord, Ed .La Maison rustique, Paris, 509p
- Boussard J., Chabane M. (2011).** Communication dans le cadre de la 5èmes Journées de recherches en sciences sociales à AgroSup Dijon, les 8 et 9 décembre 2011. La problématique des céréales en Algérie Défis, enjeux et perspectives,16p
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. (2000).** Évolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. *Revue forestière française*, 52, :73-90
- Briffa K. R., Shishov V. V., Melvin T.M., Vaganov E. A., Grudd H., Hantemirov R. M., Eronen M., Naurzbaev M. M. (2008).** Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across northwest Eurasia. *Phil Trans. R. Soc. B*, 363: 2269-2282.
- Brooks J.R., Flanagan L.B., Ehleringer J.R. (1998).** Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses. *Can. J. For. Res.* 28: 524-533.
- Brovkin V. (2002).** Climate-vegetation interaction. *J. Phys. IV, EDP Sciences, Les Ulis.* 12: 52-57
- Burroughs W. J. (2007).** Climate change : a multidisciplinary approach (2nd Ed.). Cambridge University Press, UK, 390 pp.
- 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.

- Cantat O., Le Gouée P., Bensaïd A. (2009).** Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques. Journées de Climatologie, Besançon, 12-13, Mars 2009, 81-100.
- 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.
- CEDEAO. (2008).** Atlas de l'Intégration Sous-régionale en Afrique de l'Ouest, série Environnement. Le climat et les changements climatiques, 24p.
- Christidis N., Stott P. A., Brown S., Karoly D.J., Caesar J. (2007).** Human contribution to the lengthening of the growing season during 1950-99, *J. Climate*, 20: 5441- 5454.
- Chuine I., Cambon G., et Comtois P. (2000).** Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models, *Global change biology*, 6: 943-952.
- Colombo S. J. (1998a).** Plant physiological responses to a changing environment. In *The impact of climate change on Ontario's forests*. S.J. Colombo, L.J. Buse, M.L. Cherry, C. Graham, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C.S. Papadapol, W.C. Parker, R. Scarr, M.L. Ter Mikaelian, M.D. Flannigan, Ontario Forest Research Institute, Forest research paper, 143, 50p
- Colombo S. J. (1998b).** Climatic Warming and Its Effect on Bud Burst and Risk of Frost Damage to White Spruce in Canada, *Forestry Chronicle*, 74: 567-577.
- Come D. (1992).** Les végétaux et le froid. HERMANN, Editeurs des sciences et des arts, 78-103
- Cornic G., Badeck F. W., Ghashghaie J. and Manuel N. (1999).** Effect of temperature on net CO² uptake, stomatal conductance for CO² and quantum yield of photosystem II photochemistry of dehydrated Pea leaves. In Sanchez-Dias M, Irigoyen JJ, Aguirreolea J, Pithan K, *Crop development for cool and wet regions of Europe*. European Commission Press, Luxembourg, 287-297
- Cote M. (1993).** L'Algérie ou l'espace retourné. Ed Média Plus, Constantine, 362p
- Courault D., Monestiez P. (1999).** Spatial interpolation of air temperature according to atmospheric circulation patterns in the south-east of France, *Int. J of climatology*, 19: 365-378.
- Davis M. B. (1989).** Lags in vegetation response to global warming. *Climate Change*, 15: 75-82.
- Davis M.B., Shaw R.G. (2001).** Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science*, 292: 673-679.
- Dessens J., and Barés A. (1996).** Evolution of the maximum and minimum temperatures in France from 1891–1992, *J. Meteorol*, 21: 41-48.
- DGF. (2005).** Superficies, potentialités et bilan d'incendies des forêts algériennes, 104 pages
- Diarra D. (2010).** Impacts des changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Direction Nationale de la Météorologie, Bamako, Mali, 35p.
- Diaz H. F., and Pulwarty R.S. (1994).** An analysis of the time scales of variability in centuries-long ENSO-sensitive records. *Climate Change* 26: 317-342.
- Djebaili S., et al (1983).** Carte de l'occupation des terres, carte pastorale de l'Algérie, notice *.Biocénoses*, 2, 1-2, 132.
- Douguédroit A., et De Saintignon M. F. (1984).** À propos des Alpes françaises du Sud, un nouveau mode de représentation des températures moyennes en montagne : l'orothermo-gramme. *Revue de géographie alpine*, 62 (2) : 205-217.

- Ducousso A., et Déqué M. (2005).** Augmentation de l'effet de serre : constatations et prévisions - Forêt-entreprise, 162 : 15-19.
- Ducrey M. (1981).** Action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du douglas. *Ann. Sci. Forest.*, 1981, 38 (3): 317-329
- Easterling D. R., Horton B., Jones P. D., Peterson T.C., Karl T. R., Parker D. E., Salinger M. J., Razuvayev V., Plummer N., Jamason P., Folland C. K.(1997).** Maximum and minimum temperature trends for the globe, *Science*, 277: 364–367.
- Ehrlich D., Lambin E. F. (1996).** Broad scale land-cover classification and interannual climatic variability, *International Journal of Remote Sensing*, 17 (5): 845-862.
- Emberger L. (1955).** Une classification biogéographique des climats. *Rev. Tra . Lab. Geol . Bot. Et Zool. Fac. Sc. Montpellier*, 7: 1-43.
- Euskirchen E. S., McGuire A. D., Kicklighter D. W. (2006).** Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystems, *Global Change Biology*, 12 (4): 731–750.
- Fang X., Zhu Q., Chen H., Ma Z., Wang W., Song X., Zhao P., and Peng C. (2014).** Analysis of vegetation dynamics and climatic variability impacts on greenness across Canada using remotely sensed data from 2000 to 2009. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8: 1-14
- Fanghua H., Xuan Z., Wei O., Andrew K. S., Toxopeus A. G. (2012).** Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environmental Modeling & Assessment* 17 : 389-398.
- FAO. (2005).** Utilisation des engrais par culture en Algérie, 56p
- FAO. (2009).** Les impacts du changement climatique sur la santé des forêts. Document de travail sur la santé des forêts et la sécurité biologique, 194p
- Farah A. K. (2013).** Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Mémoire de magistère en Ecologie et Environnement. Université Constantine, p66.
- Foucart T. (2006).** Colinéarité et régressions linéaire. *Mathematics and Social Sciences*, 173(1), 5-25.
- Fratianni S., Brunatti S., Acquavotta F., Terzago S. (2009).** Tendances de températures et précipitations neigeuses en vallée Maira (Piemont Sud-Occidentale, Italie). *Geographia Technica. Numéro spécial*, 2009 : 187-192
- Gachi M. (1996).** La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Conférence Journée d'étude en protection des forêts C.F.A.T.S.- Jijel, 17 pp.
- Galoux A., Schnock G., Grulois J. (1967).** La Variabilité phénologique et les conditions climatiques. *Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique*, 100 : 309-314.
- Garbolino E. (2001).** Les plantes indicatrices du climat en France et leur télédétection Thèse de Doctorat, Université De Nice, 288p
- Gavilán R. (2005).** The use of climatic parameters and indices in vegetation distribution. A case study in the Spanish Sistema Central. *Int. J. Biometeorol*, 50: 111–120.
- Geiger R., Aron, R. H., Todhunter, P. (2003).** The climate near the ground. Rowman & Littlefield Publishers, Inc, sixth edition, 584p
- Ghazi A., et Lahouati R. (1997).** Algérie 2010. Sols et ressources biologiques. *Inst. Nat. Etudes de Stratégie Globale*, 45p.

- GIEC. (2007).** Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au Quatrième d'évaluation du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat – GIEC, 103p.
- Godard A., et Tabeaud M. (1993).** Les climats ; Mécanismes et Répartition, Collection Coursus, Ed Armand Colin, 192 p.
- Grabherr G., Gottfried M., and Pauli H. (1994).** Climate effects on mountain plants. *Nature* 369, 448.
- Guiot J. (1986).** Sur la détermination de régions climatiques quasi-homogènes. *Revue de statistique appliquée*, 34 (2): 15-34.
- Guo X. (2003).** Relationships between NDVI and climatological variability in the Prairie ecozone of Canada. *Prairie Perspectives*, 6: 32-46
- Guo L., Wu S., Zhao D., Yin Y., Leng G., and Zhang Q. (2014).** NDVI-Based Vegetation Change in Inner Mongolia from 1982 to 2006 and its Relationship to Climate at the Biome Scale. *Advances in Meteorology*, Volume 2014, 12 p
- Guyot G. (1997).** Climatologie de l'Environnement : de la plante aux écosystèmes. Enseignement des Sciences de la Vie. Masson. 505 p.
- Halitim A. (1988).** Sols des régions arides. OPU, Alger, 384p.
- Hamann A., & Wang T. (2006).** Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* 87: 2773-2786.
- Hammami R. (1985).** Exposé de lutte intégrée: La lutte intégrée en forêt de chêne liège. Inst. Nat. d'Agro. d'El-Harrach, 14p.
- Hao F., Zhang X., Ouyang W., Skidmore A. K., Toxopeus A. G. (2012).**Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environ Model Assess*, 17:389–398
- Harlow M., Jones C., Tucker C. (2006).** ArcGIS.9, Geoprocessing Commands Quick Reference Guide. (1a Ed.). United States of America. ESRI, 206p.
- Havaux M., & Lannoye R. (1985).** Effets des basses températures positives sur les réactions photochimiques primaires de la photosynthèse du maïs (*Zea mays* L., cv. « LG 9 »). *Agronomie*, 5 (4) : 331-337.
- Heller R., Esnault R., & Clance C. (1989).** Physiologie végétale. Nutrition. Tom1. 4^{ème} édition, p201
- Hess M., Niedzweidz T et Obrebska-Starkel B. (1975).** The methods of constructing climatic maps of various scales for mountains and upland territories exemplified by the maps prepared for Southern Poland. *Geogr. Polon.* 31: 163-187.
- Holben B. (1986).** Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* (7): 1417-1434
- Holdaway M. R. (1996).** Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging. *Climate Research*, 6 (3): 215-225.
- Houghton J. (2011).** Le réchauffement climatique. Un état des lieux complet. de boeck, 495p
- Huang J., Tardif J.C., Bergeron Y., Denneler B., Berninger F., Girardin M.P. (2010).** Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Glob. Change Bio*, 16: 711-731.
- Hufty A. (2001).** Introduction à la climatologie : le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. Les presse de l'université Lavale, 141 -143

- Ichii K., Kawabata A., and Yamaguchi Y. (2002).** Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (18): 3873-3878.
- Institut forestier du Canada. (1997).** Le changement climatique et les forêts. Des mémoires N°4 octobre 1997, p2.
- IPCC. (2001).** Bilan 2001 des changements climatiques: Rapport de synthèse. 205p
- Iverson L.R., Prasad A.M. (2001).** Potential changes in tree species richness and forest community types following climate change. *Ecosystems* 4: 186-199.
- Jedidi K., Bargaoui Z., et Benzarti Z. (2009).** Identification de zones pluviométriques homogènes d'un bassin versant à partir de l'information topographique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 22 (3) : 383-395.
- Jensen J. R. (2000).** *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 544p.
- Jepsen J. U., Hagen S. B., Hogda K. A., Ims R. A., Karisen S. R., Tommervik H., Yoccoz N. G. (2009).** Monitoring the spatio-temporal dynamics of geometrid moth outbreaks in birch forest using MODIS-NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 143: 1939-1947.
- Joly D., Bois B., Zaksek K. (2009).** Hiérarchie des facteurs topographiques qui commandent la variation spatiale des températures. Journées de Climatologie – Besançon, 12-13 mars 2009 - Climat et société : Climat et relief, 20p.
- Jones P. D., Wigley T. M. L., & Briffa K. R. (1994).** Global and hemispheric temperature anomalies-land and marine instrumental records, in Boden T. A., D. P., Kaiser, R. J. Sepanski et F. W. Stoss (eds). *Trends 93: A compendium of data on global change*. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis, 603-608
- Kadi Hanifi H. (1998).** L'alfa en Algérie. Thèse Doct. Science. USTHB, Alger, 270p
- Kadik B. (1987).** Contribution à l'étude du pin d'Alep (*pinus halepensis* Mill) en Algérie: écologie; dendrométrie, morphologie. Office des publications universitaires (Alger), 580p.
- Kaiser H. F. (1960).** The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20 : 141-151.
- Kaplan J. O. (2007).** Echos de la recherche: Réchauffement climatique Le rôle tampon des forêts: les modélisations de végétation ont apporté des révélations. *Forêt* 60 (4) : 22-23.
- Kaspersen P. S., Fensholt R., and Huber S. (2011).** A Spatiotemporal Analysis of Climatic Drivers for Observed Changes in Sahelian Vegetation Productivity (1982–2007). *International Journal of Geophysics*, 14p.
- Kelly P. M., Jones P. D., Wigley T. M. L., Bradley R. S., Diaz H. F., & Goodess C. (1985).** The extended Northern Hemisphere surface air temperature record: 1851-1984. Preprints, Third Conference on Climate Variations and Symposium on Contemporary Climate: 1850-2100, American Meteorological Society, Boston, États-Unis, 23-24.
- Kendall M. G. (1975).** *Rank Correlation Methods*, Charles Griffen, London, 156p
- Kerris T. (2001).** Réseau d'avertissement contre la spongieuse *Lymantria dispar* L. Institut national de la recherche forestière. Département de la protection des forêts, 14p
- Keyser A.R., Kimball J.S., Nemani S., Running S.W. (2000).** Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high-latitude forests. *Glob. Chang. Biol.* 6: 185-195.

- Khous M. G. (1993).** Contribution à l'étude de l'écobiologie et du contrôle naturel du *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera, Lymantriidae) en chênaie verte de Djurdjura (Tikjda) Thèse de Magister en biologie I.S.N.; U.S.T.H.B. Algérie, 133p.
- Kimball J.S., McDonald K.C., Running S.W., Frohking S.E. (2004).** Satellite radar remote sensing of seasonal growing seasons for boreal and subalpine evergreen forests. *Remote Sensing of Environment* 90: 243-258.
- King A. W., Gunderson C. A., Post W. M., Weston D. J., Wulshleger S. D. (2006).** Plant respiration in a warmer world. *Science*, 302: 36-37
- Kirschbaum M. U. F. (2000).** Forest Growth and Species Distribution in a Changing Climate. *Tree Physiology* 20: 309-322.
- Kowabata A., Ichi K., & Yamaguchi Y. (2001).** Global Monitoring of Inter-annual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and its Relationship to Temperature and Precipitation. *Int. J. Remote Sensing*, 22: 1377-1382.
- Kurtz W.A., Stinson G., Rampley G. (2008).** Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increases disturbances? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2008 Jul 12; 363: 2259-2268.
- Lagarde J. (1995).** Initiation à l'analyse des données. Ed. Dunod. Paris, 157p
- Lambin E. F., And Ehrlich D. (1996).** The surface temperature - vegetation index space for land cover and land cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 17 : 463-487.
- Landmann G., Massu N., Badeau V., Frascaria L. N., Fernandez J., et Gosselin F. (2011).** Les écosystèmes forestiers, in : Massu, N. et G. Landmann, coord, *Connaissances des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine.* Ecofor CCBio, 179pp.
- Le Houerou, H. N. (1968).** La désertification du Sahara septentrional et des steppes limitrophes. *Annales Algériennes de Géographie*, 3(6) : 57-94.
- Lebart L., Morineau A., Piron M. (2004).** *Statistique Exploratoire Multidimensionnelle*, Dunod 2^{ème} édition, Paris, 439p.
- Leblanc D.C., Terrell M.A. (2009).** Radial growth response of white oak to climate in eastern North America. *Can. J. For. Res.* 39: 2180-2192.
- Lebourgeois F., Pierrat J.C., Perez V., Cecchini S., Ulrich E. (2011).** Rallongement de la saison de végétation des Hêtraies et des Chênaies françaises dans les prochaines décennies. Conséquences possibles sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. *Rendez-Vous Techniques*, n°33-34, été-automne, 39-46.
- Letreuch B. N. (1995).** Réflexion autour du développement du forestier : les zones à potentiel de production les objectifs, O.P.U, Algérie, 69p.
- Lhotellier R. (2007).** Spatialisation de la température de l'air en relief alpin : de la mesure à la validation. *Journées de Climatologie*, Grenoble, 22-23 mars 2007, *Climat et société : Mesures et modèles.*
- Lim C., Kafatos M., Megonigal P. (2004).** Correlation between atmospheric CO² concentration and vegetation greenness in North America: CO₂ fertilization effect. *Climate Research*, 28: 11-22
- Loarie S.R., Duffy P.B., Hamilton H., Asner G.P., Field C.B., and Ackerly D.D. (2009).** The velocity of climate change. *Nature*, 462:1052-1055.
- Lobell D. B., and Asner G. P. (2003).** Climate and Management Contributions to Recent Trends in U.S. Agricultural Yields. *Science*, 299: 999-1032

- Louamri A. (2009).** Cartographie des pluies annuelles dans le bassin-versant de l'oued Seybouse (Nord-est algérien) Sciences et Technologie N°30, Université Mentouri Constantine, Algérie, 43-52
- Louni D. (1994).** Les forêts Algériennes. Rev. Forêt méditerranéenne, T.XV, n°1, 60-64.
- Madoui A. (2002).** Les incendies de forêts en Algérie. Historique, bilan et analyse. Forêt méditerranéenne, 22 (1) : 23-34.
- Maire R. (1926).** Carte phytogéographique de l'Algérie et de la Tunisie. Notice Alger. Bacconier, 78p.
- Mann H. B. (1945).** Non Parametric Test Against Trend. Econometrika, 13 : 245-259.
- Mann M. E., Bradley R.S., Hughes M. K. (1998).** Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries, Nature, 392: 779–787.
- MATE. (2002).** Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) Janvier 2002, Algérie, 128p.
- Mather J. R., Yoshioka G. (1968).** The role of climate in the distribution of vegetation. Annals of the Association of American Geographers, 58: 29-41.
- McDonald A.J., Gemmell 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): 250-272.
- McKenney D.W., Pedlar J. H., Lawrence K., Campbell, K., Hutchinson M. F. (2007).** Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. Bioscience, 57: 939-948.
- Mebarki A. (2005).** Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : ressources en eaux, aménagement et environnement thèse doc Univ Mentouri Constantine; pp 349.
- Menzel A. (2003).** Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. Clim. Change, 57: 243-263.
- Menzel A., Fabian P. (1999).** Growing season extended in Europe. Nature, 397, 659p.
- Menzel A., Sparks T. H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavská O., Briede A., Chmielewski F. M., Crepinsek Z., Curnel Y., Dahl A., Defila C., Donnelly A., Filella Y., Jatzak K., Måge F., Mestre A., Nordli O., Peñuelas J., Pirinen P., Remišová V., Schneifinger H., Striz M., Susnik A., Van Vliet A. J. H., Wielgolaski F. E., Zach S., Züst A. (2006).** European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology, 12 (10): 1969-1976.
- Merle J. (1980).** Océan et climat. Les fonctions thermiques de l'océan dans la dynamique du climat. Trav, Doc. OSTROM. La météorologie, 87 : 85-95.
- Méthy M., Trabaud L. (1990).** Caractérisation de la résistance au froid de deux espèces sclérophylles méditerranéennes par la fluorescence de la chlorophylle. Ann.Sci.For, 47: 141-148.
- Miller W. F., Dougherty P. M. and Switzer G. L. (1987).** Effects of rising carbon dioxide and potential climate change in loblolly pine distribution, growth, survival and productivity, in The Greenhouse Effect, Climate Change and U.S. Forests. The Conservation Foundation, Washington DC, 157-189.
- Moisselin J. M., Schneider M., Canellas C., & Mestre O. (2002).** Les changements climatiques en France au XXe siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations, La Météorologie, 38 : 45-56
- Myneni R. B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R. R. (1997).** Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature 386: 698-702

- Nalder I. A., et Wein R.W. (1998).** Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(4): 211-225
- Nemani R. R., Keeling C. D., Hashimoto H. (2003).** Climate driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science*, 300 : 1560–1563.
- Niasse M., Afouda A., et Amani A. (2004).** Réduire la vulnérabilité de l’Afrique de l’Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : Eléments de stratégie régionale de préparation et d’adaptation, UICN, Gland (Suisse) et Cambridge (Royaume Uni), 71p.
- Ninyerola M., Pons X., Roure J.M. (2000).** A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques, *Int. J. Climatol*, 20: 1823–1841.
- Noetzli J., Gruber S. (2005).** Alpiner Permafrost ein Überblick. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt (München)* 70: 111–121.
- Norby R.J., Rustad L.E., Dukes J.S., Ojima D.S., Parton W.J., Del Grosso S.J., McMurtrie R.E. et Pepper D.A. (2007).** Ecosystem responses to warming and interacting global change factors. In Canadell, J.G., Pataki, D. et Pitelka, L., eds. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 23–36.
- ONERC. (2007).** Stratégie nationale d’adaptation au changement climatique, La Documentation française, Paris 2007, p14.
- ONF. (2007).** Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques. *Rendez-vous techniques de l’ONF*, hors-série n° 3, 102p.
- Ouelmouhoub S. (2005).** Gestion multi-usage et conservation du patrimoine forestier: cas des Subéraies du parc national d’Elkala (Algérie). Thèse, Mas. CIHEAM-IAMM, 20-29.
- Oukarroum A. (2007).** Vitalité des plantes d’orge (*Hordeum vulgare* L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne. Thèse Doctorat. Faculté des sciences de l’Université de Genève, 184p
- Ozenda P. (1991).** Les relations biogéographiques des montagnes sahariennes avec la région méditerranéenne. *Revue de Géographie Alpine*, 1: 43-53.
- Pachauri R. K., Reisinger A. (2007).** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland, 104p
- Pagney P. (1994).** Les climats de la terre. Masson, Initiation aux études de géographie. 166p.
- Parmesan C. (2006).** Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37: 637-669.
- 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.
- Piao S., Wang X., Ciais P., Zhu B., Wang T., and Liu J. (2011).** Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006, *Global Change Biology*, Vol 17 (10): 3228–3239
- Prasad K. V., Badarinath K. V. S., and Eaturu A. (2008).** Effects of precipitation, temperature and topographic parameters on evergreen vegetation greenery in the Western Ghats, India. *International Journal Of Climatology Int. J. Climatol*, 28: 1807–1819.

- Quereda J. S., Gil A. O., Olcina J. C., Rico A. A., Montón E. C., & Rabourdin S. (2005).** Changement climatique. Comprendre et agir. Delachaux et Niestlé, Paris, 286p.
- Quezel P. (1976).** Les forêts du pourtour méditerranéen. In Forêts et maquis méditerranéens: écologie, conservation et aménagement. Note technique MAB, 2: 9-33. UNESCO, Paris.
- Quezel P. (1980).** Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. Dans : Actualités d'Ecologie Forestière (éd. : PESSON), édition Gauthier Villars, Paris, 205-256.
- Quezel, P. (1986).** Les pins du groupe "halepensis": écologie, végétation, écophysiologie. Options méditerranéennes. Série Etude CIHEAM 86/1, 11-24
- Quezel P., & Barbero M. (1990).** Les forêts méditerranéennes, problème posés par leur signification historique, écologique et leur conservation. Acta botanica Malacitana, n°15, 145-178.
- Rached-Kanouni M. (2013).** Adaptation du chêne liège (*Quercus suber* L.) aux conditions extrêmes de température. Thèse Doctorat. Faculté des sciences de la nature et de la vie. Université Mentouri Constantine, p38
- Richard P.J.H. (1997).** Les climats annuels, la variabilité climatique et bioclimatique. Adresse sur le web: www.georg.umontreal.ca/donnees/geo3152.
- Ricklefs R., Relyea R. (2013).** Ecology: The Economy of Nature. W. H. Freeman; 7th Edition, 565p
- Rivas-Martínez S. (1996).** Geobotánica y bioclimatología. Universidad de Granada, 23-75.
- Rivas Martínez S., Asensi A, Díez Garretas B., Molero J., Valle F., Cano E., Costa M., López ML., Díaz T.E., Prieto J.A.F., Llorens L., Arco MJ., Fernández F., Sánchez Mata D., Penas Merino A., Masalles R.M., Ladero M., Amor A., Izco J., Amigo J., Loidi J., Molina Abril J.A., Navarro G., Cantó P., Alcaraz F., Bâscones JC., Soriano P. (2005).** Mapa de series, geoseries y geopermaseries de vegetación de España. La revista Itinera Geobotanica 17: 5-436
- RNE. (2000).** Rapport national sur l'état et l'avenir de l'Environnement. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Algérie, 253p.
- Robin M. (2002).** Télédétection : Des satellites aux SIG, Paris : Nathan, 2^e édition, 318p.
- Rodriguez-lado L., Sparovek G., Vidal-Torrado P., Dourado-Neto D., Macías-Vásquez F. (2007).** Modelling air temperature for the state of São Paulo, Brazil. Sci Agric, 64: 460-467.
- Roman-Amat B. (2007).** Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport à MM. les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 125p.
- Rouse J.W., And Haas R. H. (1974).** Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS. Third ERTS Symposium, published by NASA, Washington, 301-317.
- Roussel G. (2012).** Quelles sont les connaissances actuelles sur le changement climatique de l'échelle globale aux échelles régionales ? Etude réalisée par le Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne, 210p.
- Salama H. (2011).** Régionalisation pluviométrique du bassin Tensift (Maroc)». Larhyss Journal, 9: 111-119.
- Salinger M.J. (1980).** New Zealand climate: I, Precipitations patterns, II, Temperature patterns, Monthly Weather Review, 108: 174-193.
- Sauvage C. (1961).** Recherches géobotaniques sur les suberaies marocaines. Trav. Inst. Scientif. Cherif. Série botanique, 21, 461p.

- Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. (2006).** Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biol*, 12 (2): 343–351.
- Seguin B. (2007).** Les changements climatiques et les impacts observés sur les écosystèmes terrestres, RDV techniques hors-série n°3, 3-8
- Seigue A. (1985).** La forêt circum-méditerranéenne et ses problèmes. *Techniques agricoles et productions méditerranéennes*. G.P. Maisonneuve et Larose, 502p
- Seltzer P. (1946).** Le climat de l'Algérie. *Trav.Inst.Météorol. Phys. Gl, Alger*, vol1. 219p
- Shafer S. L., Bartlein P.J., Thompson R.S. (2001).** Potential changes in the distributions of Western North American tree and shrub taxa under future climate scenarios. *Ecosystems* 4: 200-215.
- Shilong P., Jingyun F., Wei J., Qinghua G., Jinhu K., and Shu T. (2004).** Variation in a satellite based vegetation index in relation to climate in China. *J. Veg. Sci*, 15: 219-226.
- Smith R. C. G., Choudhury B. J. (1990).** On the correlation of indices of vegetation and surface temperature over south-eastern Australia, *International Journal of Remote Sensing*, 11 (11): 2110-2113.
- Song D, Guo P, Sheng H (2008).** Spatial Distribution Pattern of MODIS-NDVI and Correlation between NDVI and Meteorology Factors in Shandong Province in China. *PIERS ONLINE*, 4 (2): 191-197.
- Steiner D. (1965).** A multivariate statistical approach to climatic regionalisation and classification. *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 82: 329-347.
- Stewart P. (1969).** Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. *Bull. Doc. Hist. nat. agro*, 24–25.
- Suzuki R., Masuda K. (2004).** Interannual covariability found in evapotranspiration and satellite-derived vegetation indices over northern Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 82(4): 1233–1241.
- Tabet S. (2008).** Le changement climatique en Algérie Orientale et ses conséquences sur la végétation forestière. *Mémoire de Magistère en Ecologie végétale*. Université Mentouri Constantine, 132p.
- Tabet-Aoul M. (2008).** Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb. *Note d'alerte du CIHEAM*, n°48 4 Juin 2008, 6p.
- Tanja S., Berninger F., Vesala T. (2003).** Air temperature triggers the recovery of evergreen boreal forest photosynthesis in spring, *Global Change Biology*, 9 (10): 1410–1426.
- Thompson I.D., Flannigan M.D., Wotton B.M., et Suffling R. (1998).** The Effects of Climate Change on Landscape Diversity: an Example in Ontario Forests. *Environmental Monitoring and Assessment*, 49: 213-233.
- Tir K. (2008).** Climagramme d'Emberger Analyse et correction dans quelques stations météorologiques de l'Est algérien. *Mémoire de Magistère en Ecologie Et Environnement*. Université Mentouri de Constantine, 113p.
- Toth J. (1984).** Effet des facteurs de l'environnement sur l'accroissement de cèdre de l'Atlas. *Bull. Société et Sci. Nat. Vaucluse*, 71-76.
- Touaibia B., Inegliz S., et Ould Amara A. (2006).** Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du centre de l'Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'Eau* 19(3) : 213-219.

- Touati B. (2010).** Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. Thèse de Doctorat d'Etat en Aménagement du Territoire, Université Mentouri Constantine, 384p
- Touazi M., et Laborde J-P. (2000).** Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 13 : 191-199.
- Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein T.A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B., and Zhai P. (2007).** Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L., Eds., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Tucker C.J., and Sellers P.J. (1986).** Satellite remote sensing of primary production, *International Journal of Remote Sensing*, 7 (11): 1395-1416.
- UNFCCC. (1992).** Convention Cadre des Nations unies sur les changements climatiques, 33p.
- Urli M. (2013).** Reponses des arbres forestiers aux changements globaux approches biogeographique et ecophysiologique. Thèse de Doctorat en Ecologie évolutive, fonctionnelle et des communautés. Université BORDEAUX, 278p.
- 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): 97-111.
- Vinnikov K. Y., Groisman P. Y., & Lugina K. M. (1994).** Global and hemispheric temperature anomalies from instrumental surface air temperature records, in Boden T. A., Kaiser D. P., Sepanski R. J., and Stoss F. W. (eds). *Trends 93: A compendium of data on global change*. ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis, 615-627.
- Walther G.R., Post E., Convery P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C, Fromentin J.M., Hoegh Guldberg O., Bairlein F. (2002).** Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- Wang J., Rich P. M., and Price K. P. (2003).** Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11): 2345-2364.
- Wang J., Price K.P., and Rich P. (2001).** Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 3827-3844
- Wang L., Payette S., Bégin Y. (2002).** Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec. *Can. J. For. Res.* 32: 477-486.
- Weishou S., Zhang H., Di J., Shouguang Y., Haidong L., Naifeng L. (2011).** The Response Relation between Climate Change and NDVI over the Qinghai-Tibet plateau. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59: 2216-2222
- Westergaard L., Eriksen E.N. (1997).** Autumn temperature affects the induction of dormancy in first-year seedlings of *Acer platanoides* L. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12: 11-16.
- Wigley T.M.L., Lough J.M., Jones P.D. (1984).** Spatial patterns of precipitation in England and Wales and a revised, homogeneous England and Wales precipitations series, *Journal of Climatology*, 4: 1-25.

- Wilmking M., Juday G.P., Barber V.A., Zald H.S.J. (2004).** Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds. *Glob. C. Bio*, 10: 1724-1736.
- Wilson H., and Hansen J. (1994).** Global and hemispheric temperature anomalies from instrumental surface air temperature records, in Boden T. A., Kaiser, D. P., Sepanski, R. J., et Stoss, F. W. *Trends 93: A compendium of data on global change*. ORNL/CDIAC- 65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis, 609-614.
- Wolfe J. (1978).** Chilling injury in plants – the role of membrane lipid fluidity. *Plant Cell Environ* 1: 241-247.
- Woodward F. I., Lomas M. R., Kelly C. K. (2004).** Global climate and the distribution of plant biomes. *Phil. Trans. R. Soc. Lon. B*, 359: 1465-1476.
- Yang L., Wylie B. K., Tieszen L. L., and Reed B.C. (1998).** Analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, 65 (1): 25–37.
- Yang W., Yang L., and Merchant J. W. (1997).** An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (10), 2161–2180
- Zeraïa L. (1982).** Le chêne-liège : phytosociologie, édaphologie, régénération et productivité. Institut National de Recherches Forestières, Alger, 159p.

Annexes

Annexe 1

Tab.1 : Localisation géographique des stations météorologiques

| Stations Météo | Longitude (en degré décimal) | Latitude (en degré décimal) | Altitude (en m) |
|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Annaba | 7,80 | 36,83 | 3 |
| Batna | 6,31 | 35,75 | 827 |
| Biskra | 5,73 | 34,80 | 86 |
| Constantine | 6,62 | 36,28 | 660 |
| El-Kalla | 8,43 | 36,88 | 15 |
| Guelma | 7,47 | 36,47 | 227 |
| Jijel | 5,75 | 36,80 | 2 |
| OEB | 7,12 | 35,87 | 889 |
| Sétif | 5,32 | 36,18 | 1009 |
| Skikda | 6,90 | 36,88 | 2 |
| Souk-Ahras | 7,97 | 36,28 | 680 |
| Tébessa | 8,12 | 35,42 | 821 |
| Msila | 4,50 | 35,67 | 441 |
| BBA | 4,67 | 36,07 | 929 |
| Béjaia | 5,08 | 36,75 | 2 |

Tab.2 : Types thermiques selon la classification de Rivas-Martinez (1996)

| Température moyenne annuelles (en °C) | Types thermiques | Groupes thermiques |
|--|-------------------------|---------------------------|
| > 26 | Très chaud | Chaud |
| de 21 à 26 | Chaud | |
| de 16 à 21 | Tempéré-chaud | |
| de 10 à 16 | Tempéré-frais | Tempéré |
| de 4 à 10 | Tempéré-froid | |
| de -2 à 4 | Froid | |
| de -18 à -2 | Très froid | Froid |
| < -18 | Extrêmement froid | |

Tab.3 : Modèles retenus avec la régression pas à pas (backward selection) sur les températures minimales mensuelles

| Mois | Altitude | Latitude | Intercept | R² ajusté |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| Janvier | - 0,00749 | NS | 7,995 | 86.66 |
| Février | - 0,00712 | NS | 8,158 | 86.06 |
| Mars | - 0,00660 | NS | 9,833 | 79.7 |
| Avril | - 0,00616 | NS | 11,970 | 72.2 |
| Mai | - 0,00678 | - 2,357 | 101.38 | 74.1 |
| Juin | - 0,00616 | - 2,931 | 126.04 | 68.2 |
| Juillet | - 0,00585 | - 2,991 | 131.10 | 60.9 |
| Août | - 0,006488 | - 2,560 | 116.16 | 68.9 |
| Septembre | - 0,00610 | NS | 20,314 | 73.5 |
| Octobre | - 0,00683 | NS | 16,803 | 86.6 |
| Novembre | - 0,00744 | NS | 12,599 | 88.7 |
| Décembre | - 0,00759 | NS | 9,212 | 88.5 |

Tab.4 : Modèles retenus avec la régression pas à pas (backward selection) sur les températures maximales mensuelles

| Mois | Altitude | Latitude | Intercept | R² ajusté |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| Janvier | - 0,00647 | NS | 16,79 | 97.1 |
| Février | - 0,00536 | NS | 17,35 | 82.9 |
| Mars | - 0,00572 | - 2,372 | 105,93 | 94.1 |
| Avril | - 0,00500 | - 3,279 | 141,38 | 93 |
| Mai | - 0,00317 | - 4,171 | 177,29 | 84.1 |
| Juin | - 0,00367 | - 4,64 | 198 | 79.5 |
| Juillet | - 0,00189 | - 4,52 | 197 | 76.4 |
| Août | - 0,00258 | - 3,74 | 169 | 72.8 |
| Septembre | - 0,00341 | - 2,925 | 136,62 | 75.2 |
| Octobre | - 0,00535 | - 1,719 | 89,11 | 88.4 |
| Novembre | - 0,00586 | NS | 21,49 | 93.9 |
| Décembre | - 0,00671 | NS | 17,71 | 97 |

Tab.5 : Tendances des températures annuelles (période 1982-2011). Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification de 5%.

| Stations | Tmin | Tmax | Tmoy | Amplitude thermique |
|-------------|------------|-------------|-------------|---------------------|
| Annaba | -0,3 | 0,70 | 0,22 | 0,96 |
| Batna | -0,2 | 3,03 | 1,43 | 3,21 |
| BBA | 1,7 | 2,26 | 1,97 | 0,59 |
| Bejaïa | 0,5 | 0,80 | 0,54 | 0,16 |
| Biskra | -0,1 | 1,11 | 0,52 | 1,17 |
| Constantine | 0,0 | 1,67 | 0,84 | 1,67 |
| Guelma | 0,0 | 1,42 | 0,71 | 1,42 |
| Jijel | -2,0 | 2,25 | 0,14 | 4,20 |
| El Taref | -0,8 | 2,39 | 0,79 | 3,20 |
| Msila | -1,2 | 0,74 | -0,25 | 1,97 |
| Oum Bouaghi | 1,0 | 0,63 | 0,82 | -0,38 |
| Sétif | -1,5 | 1,51 | 0,01 | 2,99 |
| Skikda | 0,5 | 1,64 | 1,07 | 1,13 |
| Souk Ahras | 1,5 | 0,49 | 0,98 | -0,99 |
| Tébessa | 1,4 | 1,79 | 1,21 | 0,13 |

Tab.6 : Tendances des températures saisonnières (période 1982-2011). Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification de 5%

| Stations | Hiver | | | Printemps | | | Été | | | Automne | | |
|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | Tmax | Tmin | Amp | Tmax | Tmin | Amp | Tmax | Tmin | Ampl | Tmax | Tmin | Ampl |
| Annaba | 0,25 | -0,4 | 0,65 | 1,34 | 0,18 | 1,15 | 0,63 | -0,52 | 1,16 | 0,6 | -0,31 | 0,91 |
| Batna | 2,74 | -0,51 | 3,25 | 4,13 | 0,35 | 3,79 | 3,21 | -0,24 | 3,45 | 2,05 | -0,31 | 2,35 |
| BBA | 1,46 | 1,2 | 0,26 | 3,37 | 2,53 | 0,84 | 2,46 | 2,1 | 0,84 | 1,78 | 0,84 | 0,94 |
| Bejaïa | 1,11 | 0,27 | 0,84 | 1,19 | 0,78 | 0,41 | 0,67 | 0,81 | -0,26 | 0,53 | -0,05 | 0,58 |
| Biskra | 0,51 | -0,68 | 1,2 | 1,99 | 0,45 | 1,55 | 1,29 | 0,61 | 0,68 | 0,63 | -0,64 | 1,27 |
| Constantine | 1,06 | -0,07 | 1,13 | 2,7 | 0,67 | 2,03 | 1,77 | -0,17 | 1,94 | 1,17 | -0,42 | 1,59 |
| Guelma | 0,87 | 0,04 | 0,82 | 2,14 | 0,34 | 1,79 | 1,65 | -0,11 | 1,76 | 1,03 | -0,28 | 1,31 |
| Jijel | 0,52 | -2,72 | 3,23 | 3,06 | -0,9 | 3,95 | 3,53 | -1,71 | 5,25 | 1,88 | -2,52 | 4,4 |
| El Taref | 1,4 | -1,02 | 2,42 | 2,22 | -0,1 | 2,33 | 2,63 | -1 | 3,63 | 3,3 | -1,14 | 4,43 |
| Msila | -0,04 | -0,58 | 0,54 | 1,37 | -1,62 | 2,99 | 1,71 | -1,74 | 3,45 | -0,1 | -1 | 0,9 |
| Oum Bouaghi | 0,93 | 0,09 | 0,84 | 0,11 | 2,08 | -1,96 | 1,26 | 1,07 | 0,2 | 0,2 | 0,83 | -0,63 |
| Sétif | 1,08 | -1,48 | 2,56 | 2,76 | -0,67 | 3,42 | 1,18 | -1,73 | 2,92 | 1,01 | -2,06 | 3,07 |
| Skikda | 1,08 | 0,44 | 0,64 | 1,93 | 1,05 | 0,88 | 2,15 | 0,55 | 1,61 | 1,4 | -0,01 | 1,41 |
| Souk Ahras | 0,18 | 0,59 | -0,41 | 1,4 | 1,99 | -0,59 | 0,04 | 2,09 | -2,04 | 0,32 | 1,25 | -0,93 |
| Tébessa | 1,03 | 0,89 | -0,11 | 2,38 | 1,58 | 0,79 | 1,7 | 1,59 | 0,1 | 1,66 | 1,15 | -0,23 |

Annexe 2

Rasters topographiques et géographiques utilisés comme variables explicatives de la température

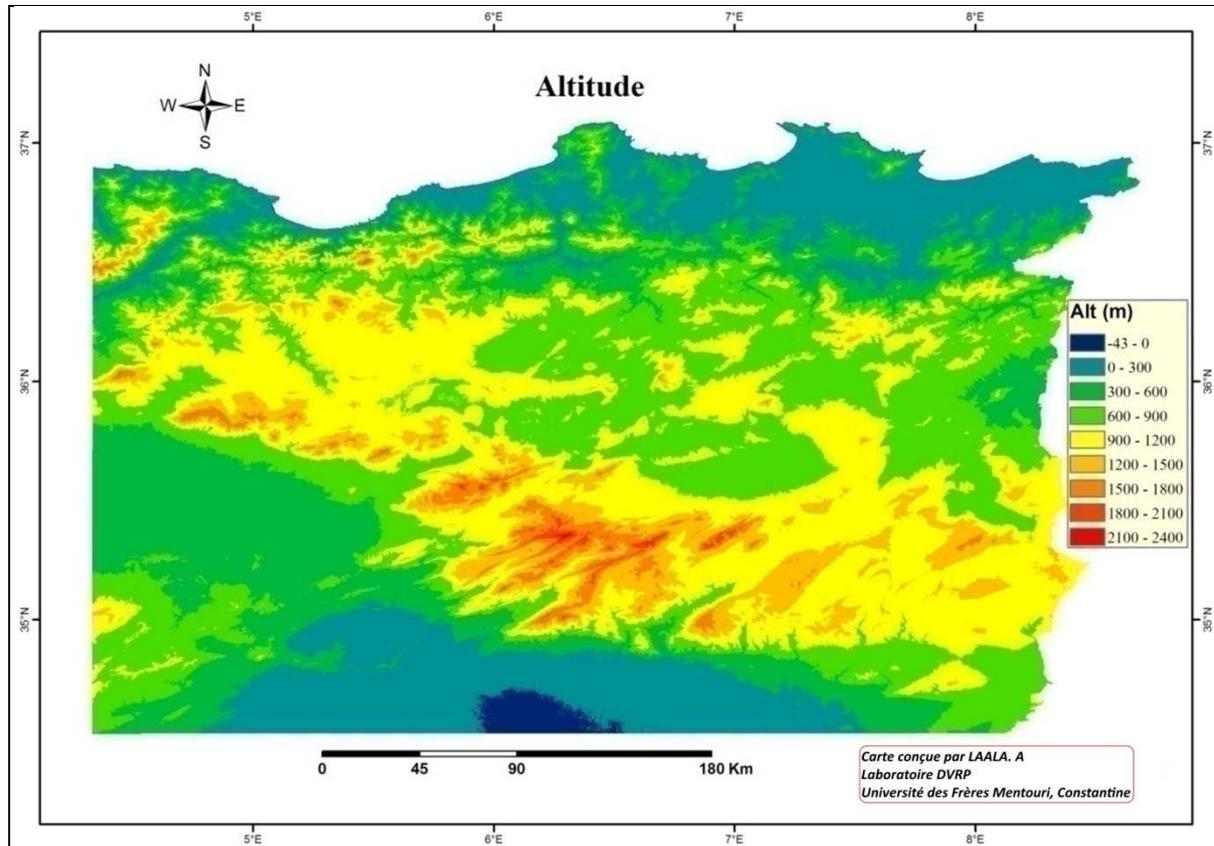


Fig.1 : Carte d'altitude de l'Est algérien

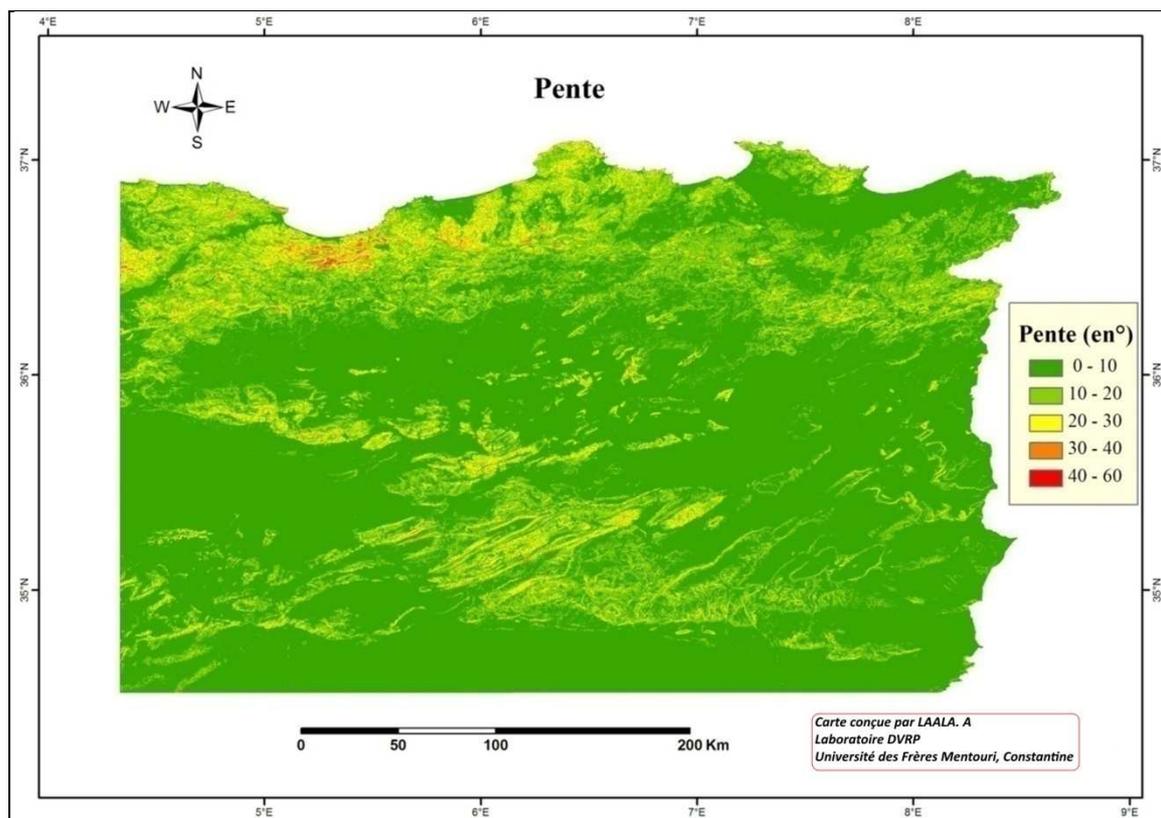


Fig.2 : Carte des pentes de l'Est algérien

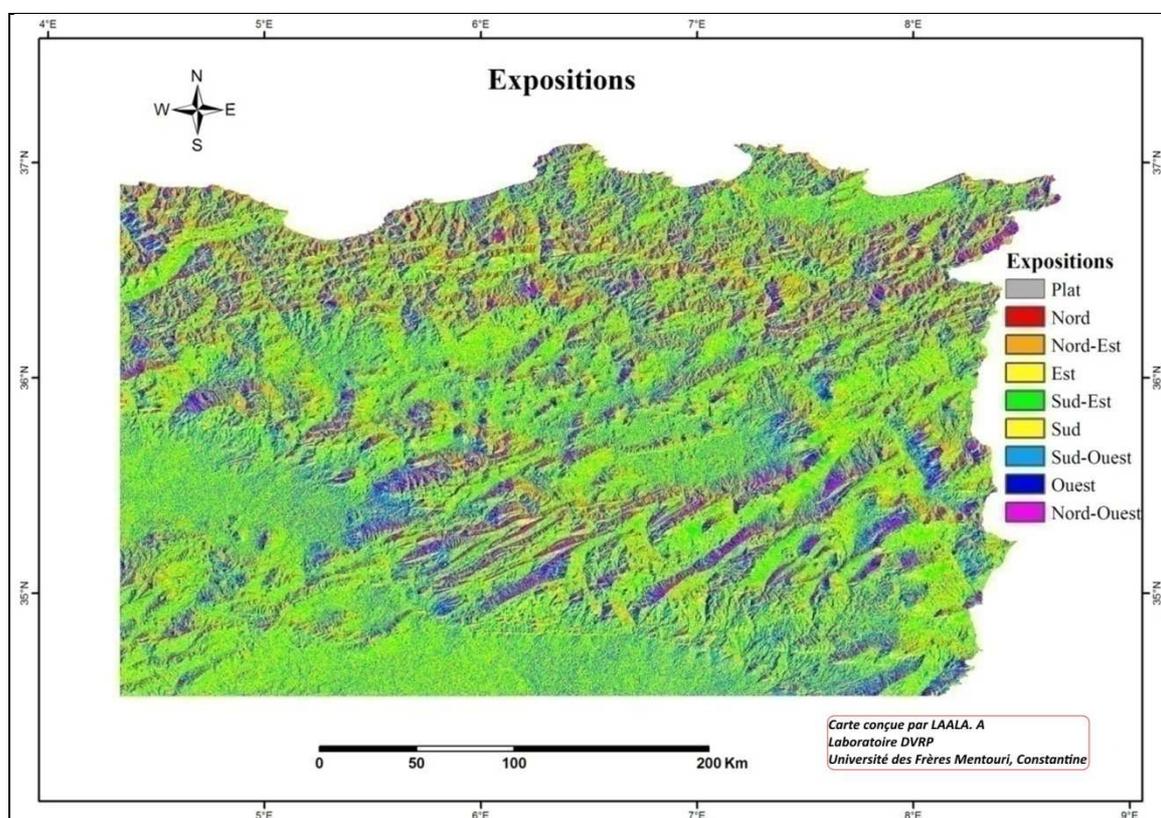


Fig.3 : Carte des expositions de l'Est algérien

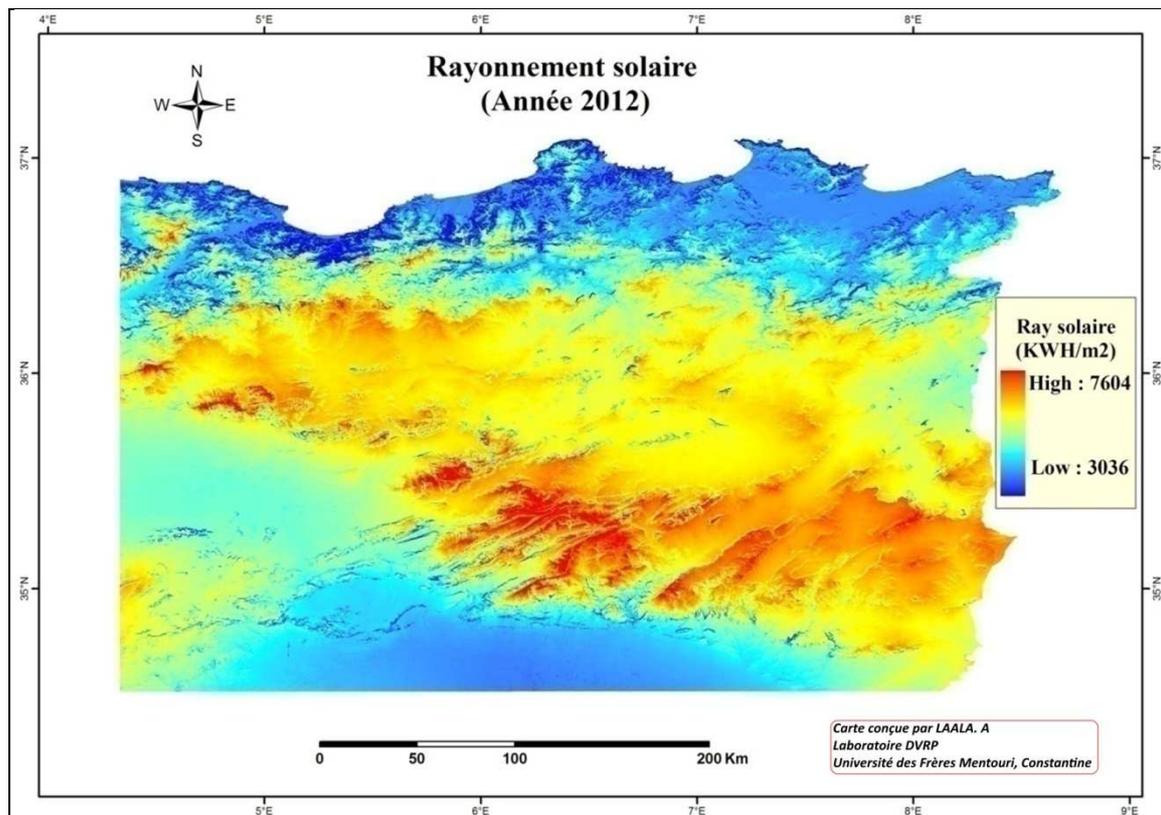


Fig.4 : Carte du rayonnement solaire de l'Est algérien

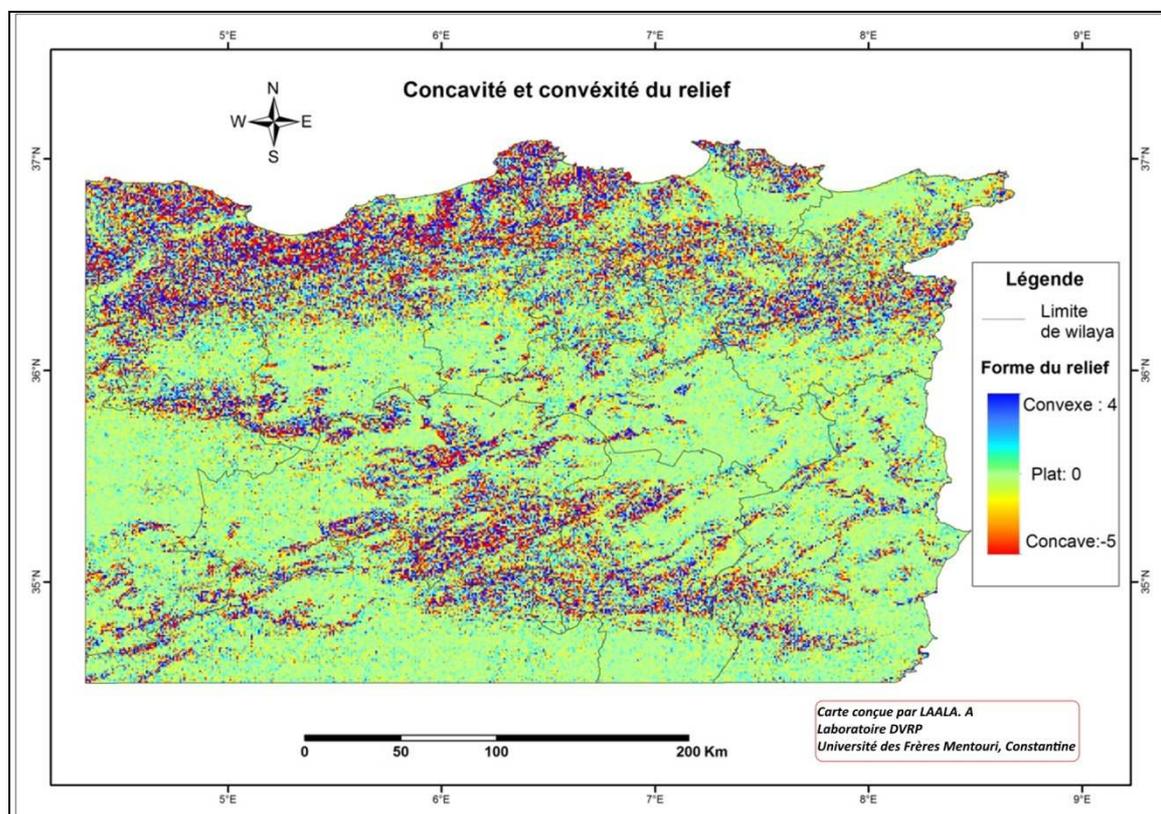


Fig.5 : Carte de la courbure générale du relief de l'Est algérien

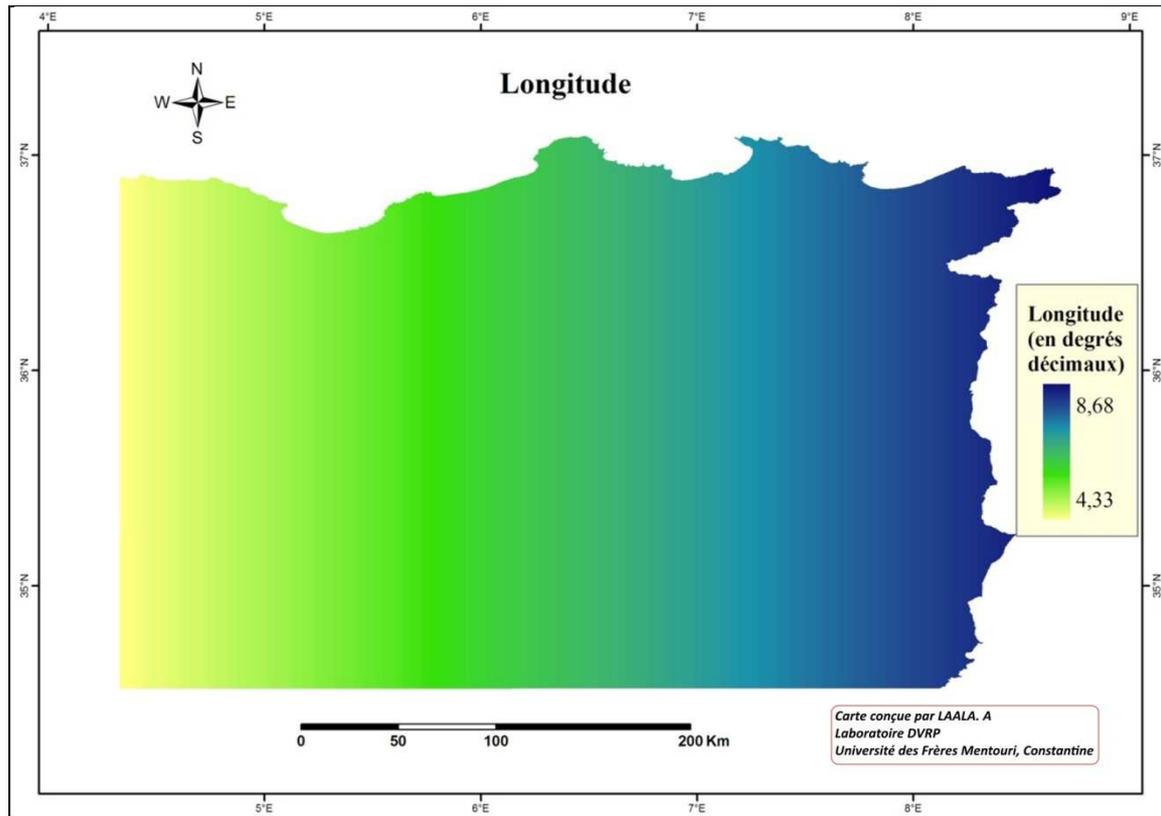


Fig.6 : Carte de longitude de l'Est algérien

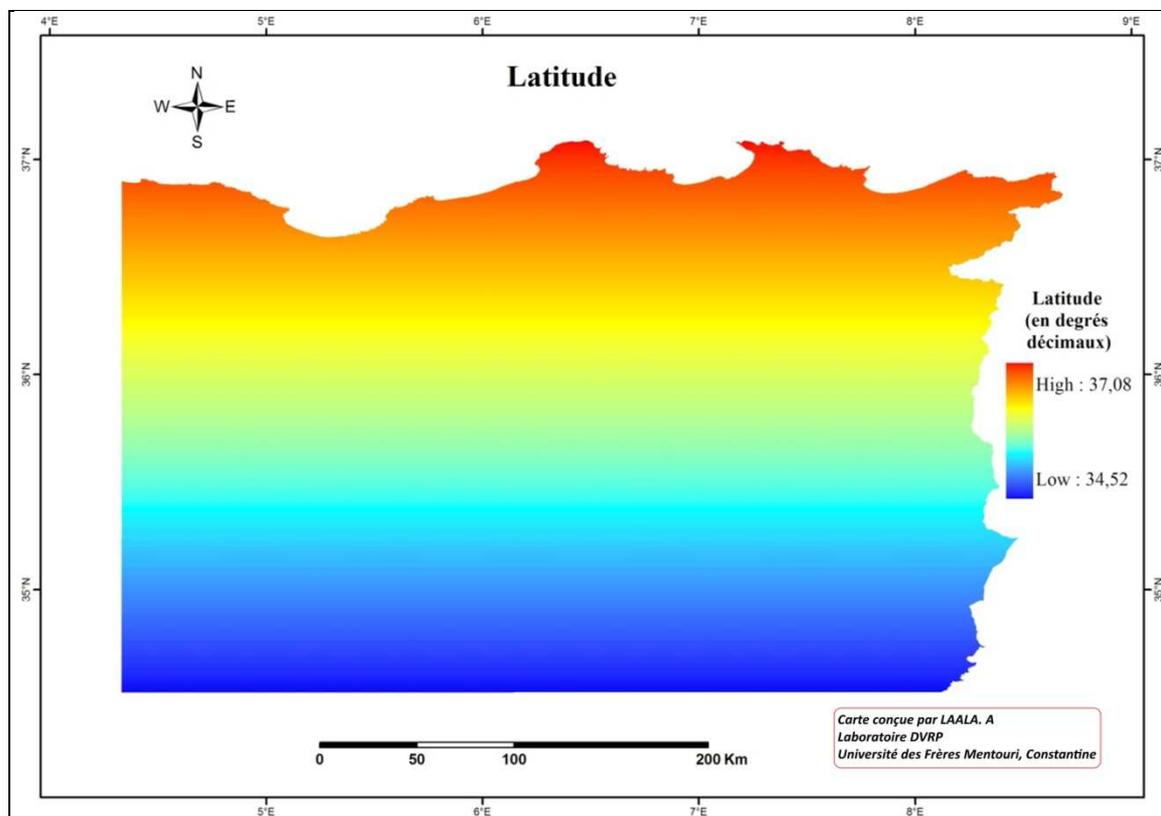


Fig.7 : Carte de latitude de l'Est algérien

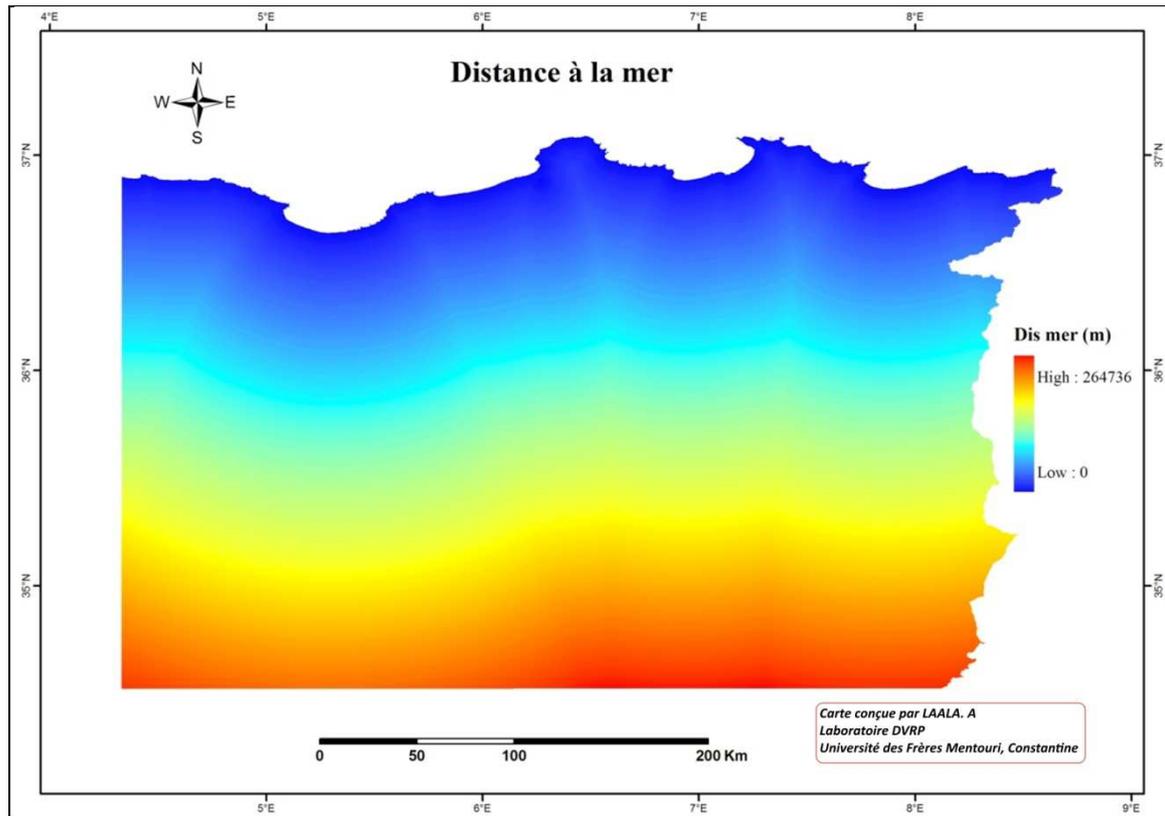


Fig.8 : Carte de la distance à la mer de l'Est algérien

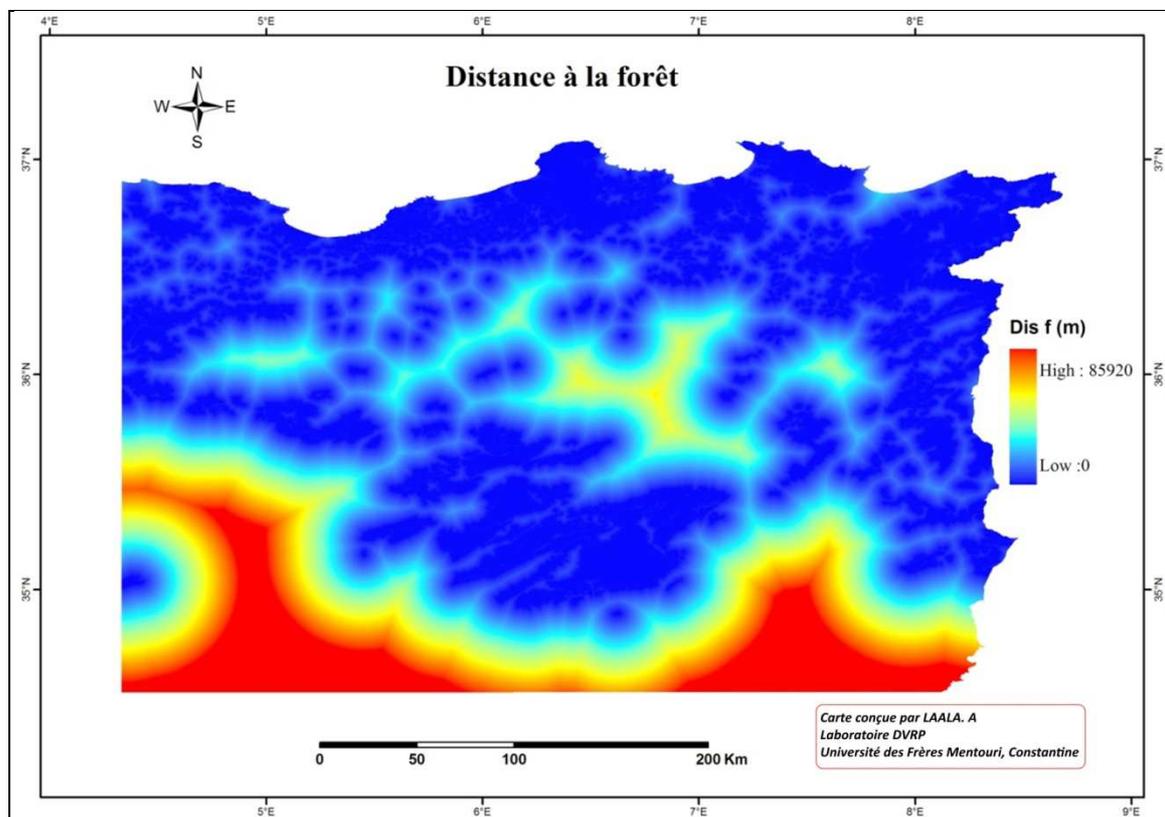


Fig.9 : Carte de la distance à la forêt de l'Est algérien

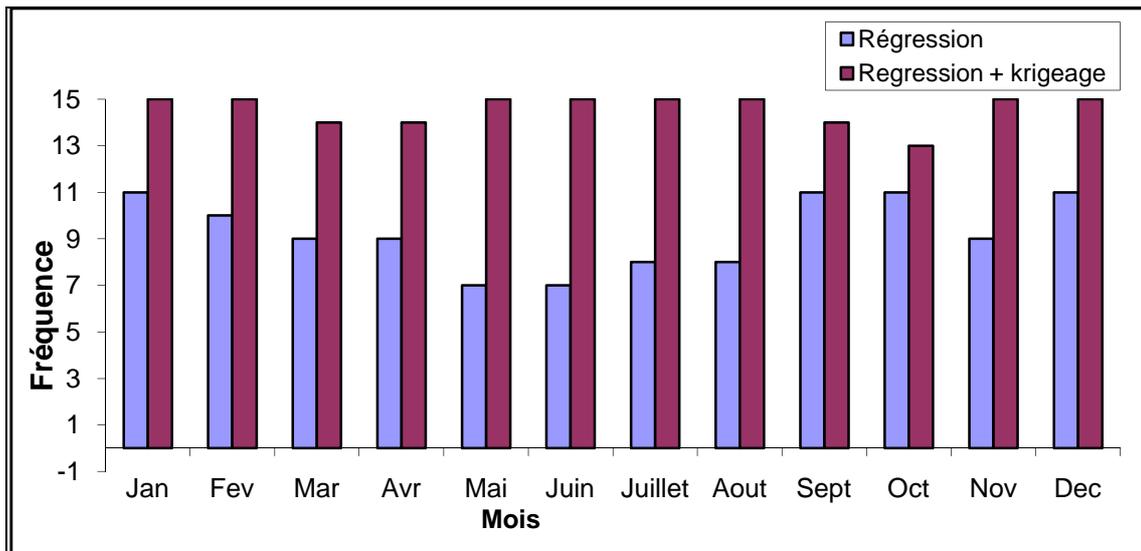


Figure 10 : Effectifs des résidus de la classe (-1°C + 1°C) issus de deux méthodes d'interpolation des températures minimales mensuelles

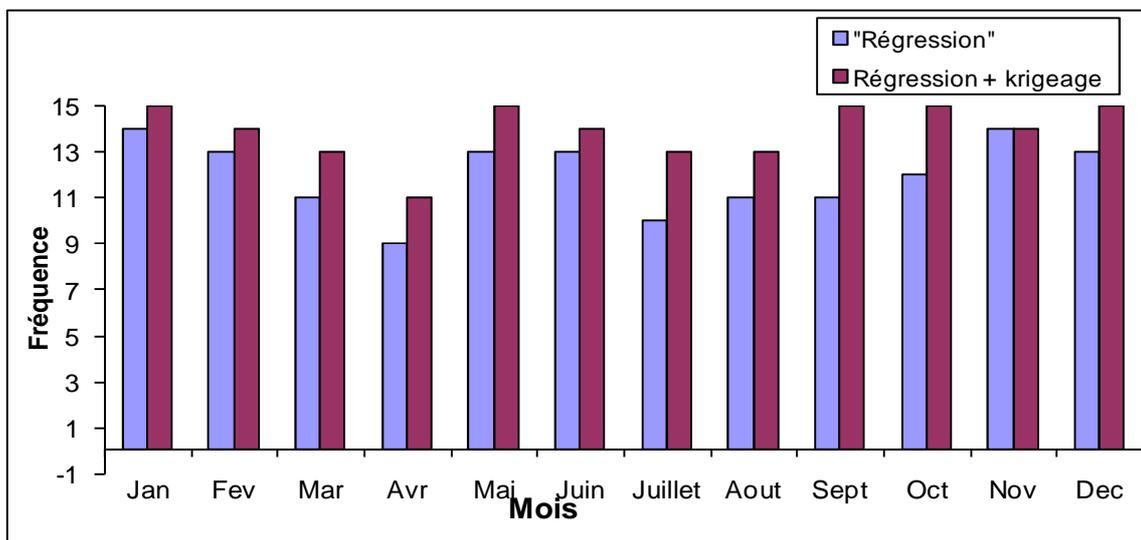


Figure 11 : Effectifs des résidus de la classe (-1°C + 1°C) issus de deux méthodes d'interpolation des températures maximales mensuelles

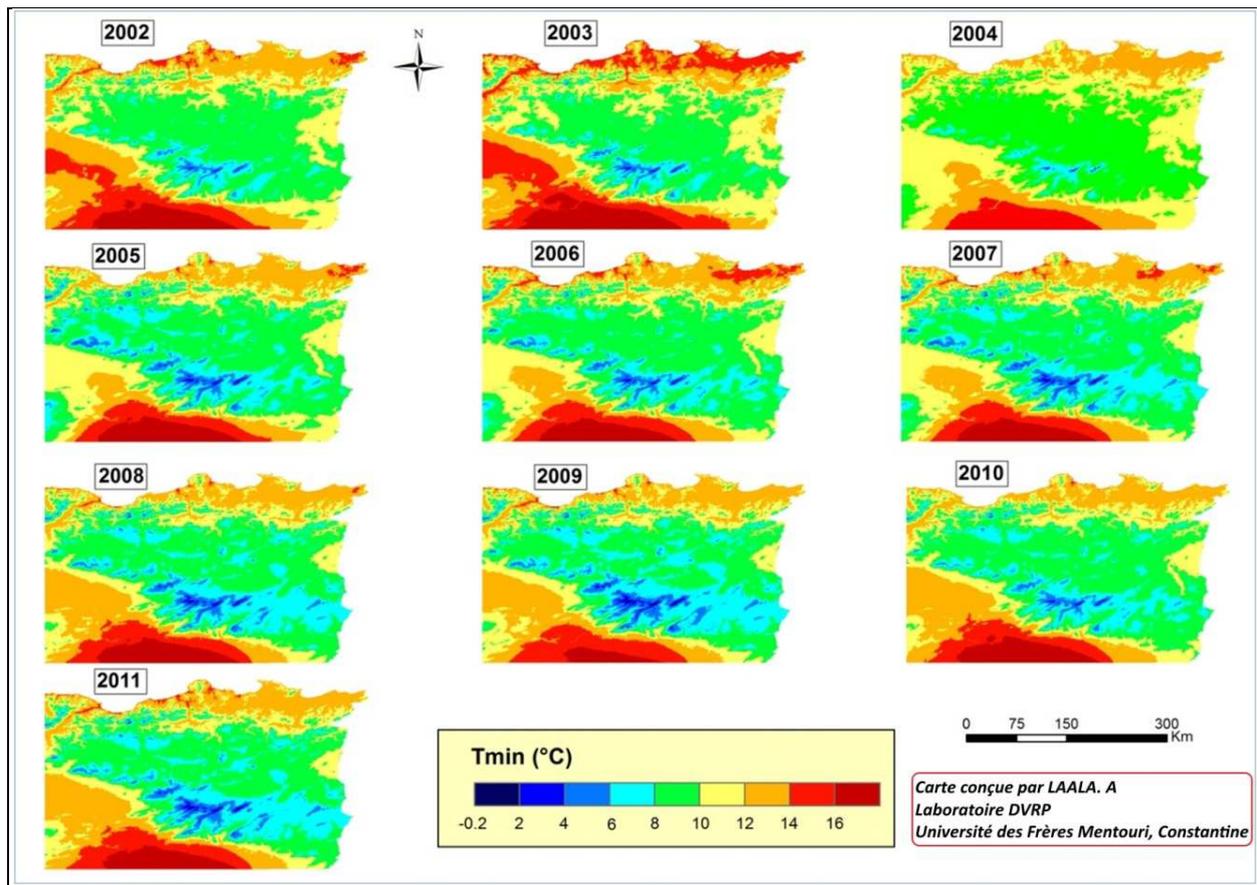


Fig.12: Températures minimales annuelles interpolées par la méthode (Régression+Krigage)

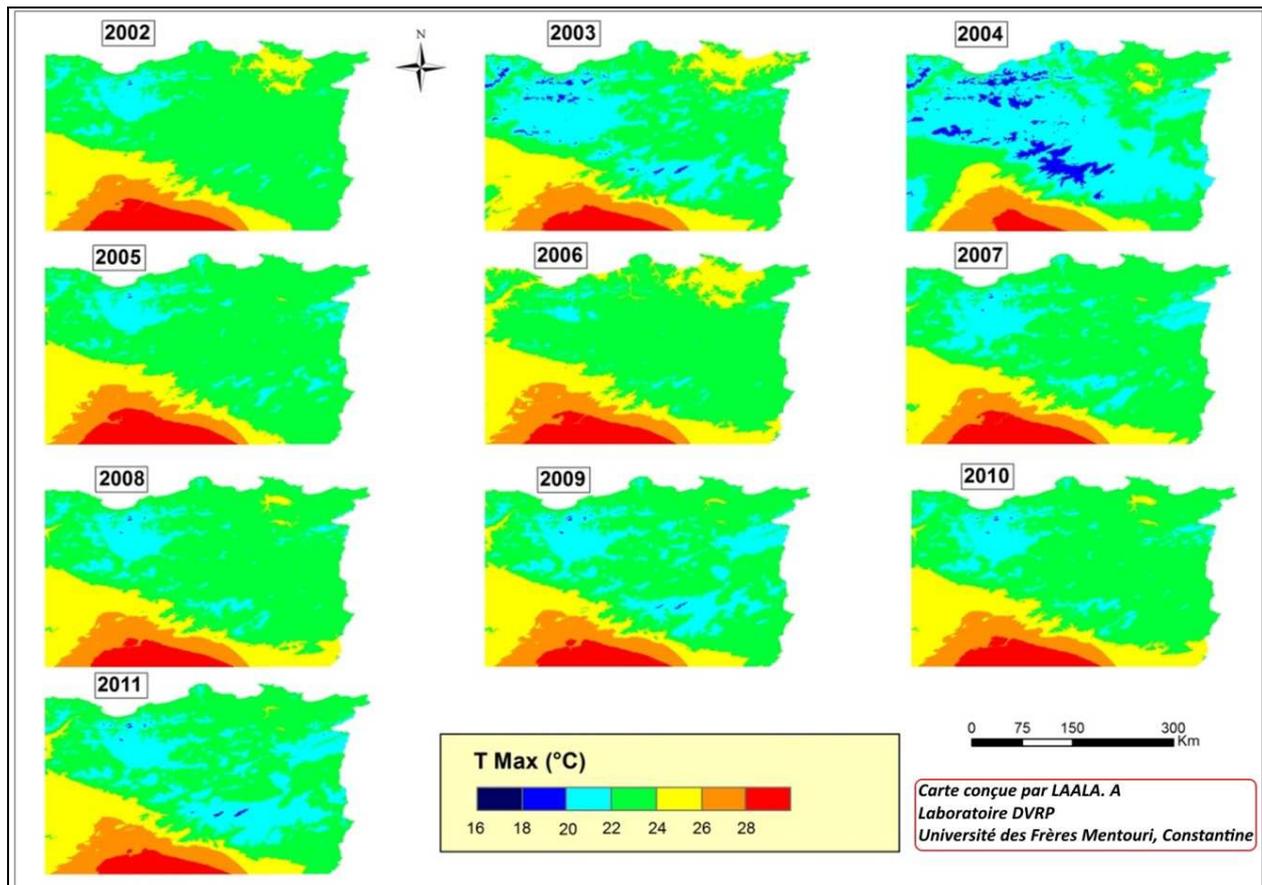


Fig.13 : Températures maximales annuelles interpolées par la méthode (Régression+Krigage)

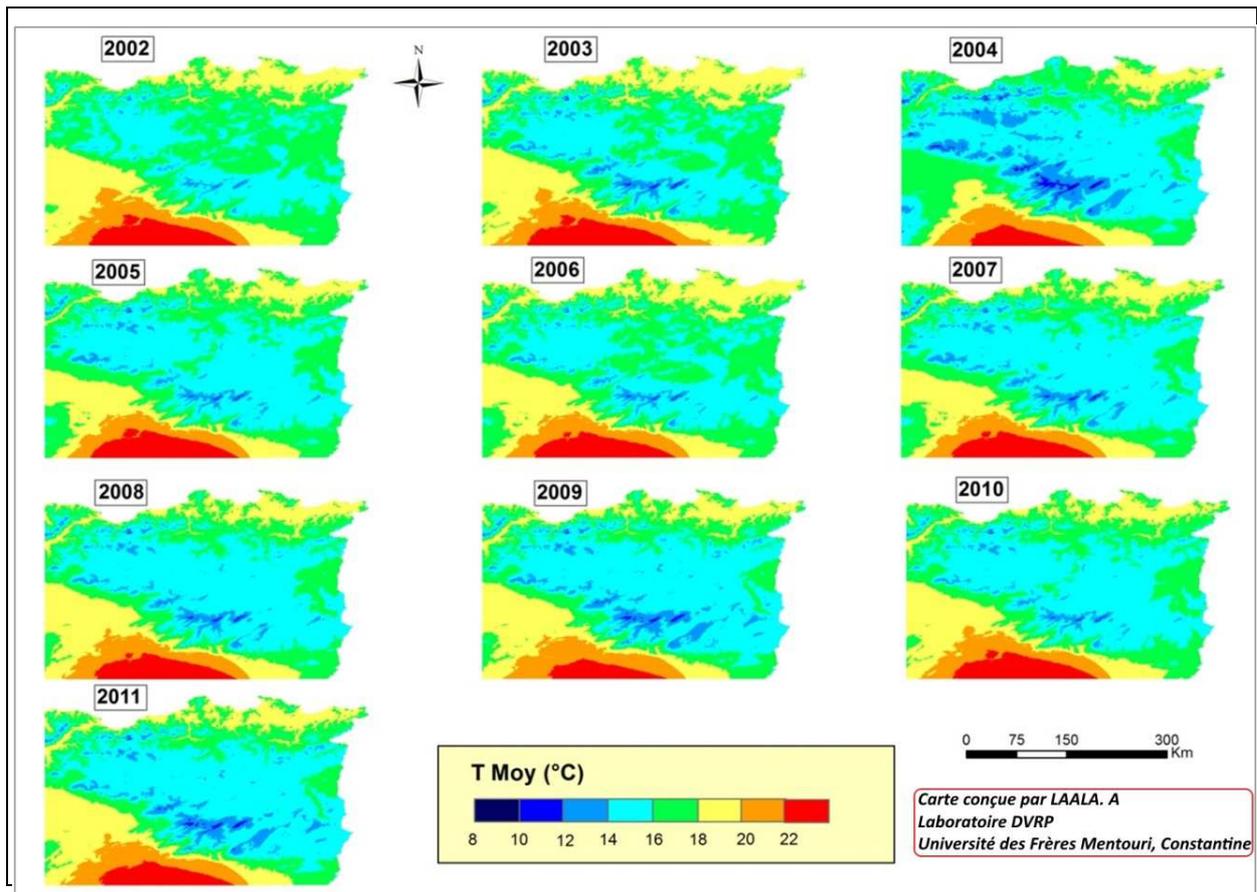


Fig.14 : Températures moyennes annuelles interpolées par la méthode (Régression+Krigage)

Résumé

Cartographie de la variabilité thermique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien

Résumé :

Le patrimoine forestier algérien est estimé à 4 millions d'hectares, comprenant les forêts, les maquis et les broussailles. Cette sylve est exposée aux aléas naturels et anthropiques qui provoquent une forte dégradation se traduisant surtout par une évolution régressive continue et par une perte substantielle de sa richesse. Parmi les menaces naturelles, on peut citer les conditions climatiques et particulièrement thermiques du milieu dans lequel les écosystèmes forestiers évoluent. En plus de son action sur les processus biologiques, sur la croissance et la phénologie des espèces, la température peut modifier aussi les aires de répartition biogéographique des écosystèmes.

Dans le cadre de cette étude nous avons analysé les températures afin de caractériser le climat thermique de l'Est algérien et les effets de sa variation sur la dynamique et l'activité photosynthétique des écosystèmes forestiers de cette vaste zone. Les données utilisées concernent les températures pour une période de 30 années consécutives (période 1982-2011) et l'indice spectral NDVI qui permet de détecter le signal photosynthétique au-dessus de la canopée.

L'analyse statistique des longues séries de température révèle que le réchauffement climatique observé à l'échelle planétaire est déjà perceptible à l'Est algérien. La majorité des wilayas étudiées sont exposées à cet aléa où la tendance est plus marquée pour la température maximale annuelle qui peut atteindre 3°C/30ans, soit une hausse de 0.1C°/année. Ainsi, l'estimation du champ thermique pour chaque pixel de l'Est algérien a été réalisée en utilisant des méthodes géostatistiques fondées sur une régression multiple entre la température et les variables explicatives décrivant le relief. A partir de ces données spatiales, les limites thermiques ont été définies pour chaque essence forestière étudiée. Enfin, les techniques du S.I.G et les images satellitaires ont permis d'une part, de suivre la dynamique de la végétation forestière, et d'autre part, d'établir des cartes qui précisent la relation existant entre la biomasse forestière et les paramètres thermiques. Ces cartes nous ont permis d'identifier 901087 hectares où les arbres sont très sensibles à la variation de la température moyenne, soit un pourcentage de 53.9% de la surface totale des écosystèmes forestiers étudiés. Ainsi, la température minimale conditionne l'activité photosynthétique des essences forestières sur une surface de 852406 ha, soit 50.8% de la superficie forestière totale. Cette expression cartographique est efficace, d'une part pour les forestiers dans la discrimination des parcelles forestières où le facteur thermique est le facteur limitant de leur productivité, d'autre part pour les décideurs afin de définir les véritables stratégies de gestion forestière du pays.

Mots clés : Variabilité, Température, Forêt, NDVI, SIG, MODIS, Est algérien, Cartographie.

خرطنة التغيرات الحرارية على مستوى الأنظمة البيئية الغابية للشرق الجزائري

الملخص:

تقدر الثروة الغابية للجزائر بـ4 ملايين هكتار، بما في ذلك الغابات، الأدغال والأحراش. تتعرض هذه الغابات للكثير من المخاطر الطبيعية و كذلك المخاطر البشرية المصدر التي تؤدي إلى تدهور شديد يتمثل أساسا في تراجع مستمر وخسارة كبيرة للثروة الغابية. من بين التهديدات الطبيعية يمكن أن نذكر الظروف المناخية وخاصة حرارة الوسط الذي تعيش فيه الأنظمة البيئية الغابية. زيادة على تأثيرها على سير العمليات الحيوية، على النمو و على الظواهر الدورية، يمكن أن تتسبب الحرارة أيضا في تغيير مناطق التوزيع الجغرافي للأنظمة البيئية.

في هذه الدراسة قمنا بتحليل الحرارة من أجل وصف البيئة الحرارية لشرق الجزائر ومدى تأثير تباينها على ديناميكية وفعالية التركيب الضوئي للأنظمة الغابية في هذه المنطقة الشاسعة. البيانات المستعملة تتمثل في درجات الحرارة المسجلة خلال 30 سنة متتالية (الفترة 1982-2011) وكذلك بيانات المؤشر الطيفي NDVI الذي يسمح لنا برصد إشارة البناء الضوئي لظلة الأشجار.

التحليل الإحصائي لبيانات درجة الحرارة يكشف أن الإحترار المناخي الذي سجل على مستوى العالم ملاحظ أيضا في شرق الجزائر. غالبية الولايات تتعرض لهذا الخطر حيث أن اتجاه التغير الحراري الأكثر تميزا هو لدرجات الحرارة السنوية القصوى التي قد تصل إلى 30م°/م°30، أي بزيادة قدرها 0.1م°/سنة. كذلك، تم تقدير الحقل الحراري لكل بكسل في شرق الجزائر باستخدام أساليب جيواحصائية التي تعتمد على إجراء تحليل الانحدار المتعدد بين درجات الحرارة والمتغيرات التفسيرية التي يمكن أن تحدد التضاريس. إنطلاقا من هذه البيانات المكانية، تم تعيين الحدود الحرارية لكل نوع من الأنواع الغابية المدروسة. في الأخير، تقنيات نظم المعلومات الجغرافية وصور الأقمار الصناعية سمحت لنا بمتابعة ديناميكية الغطاء الغابي من جهة، وإنشاء الخرائط التي تحدد العلاقة بين الكتلة الحيوية الغابية والمتغيرات الحرارية من جهة أخرى. هذه الخرائط ساعدتنا في تعيين 901087 هكتار حيث تكون الأشجار حساسة جدا لتغيرات درجات الحرارة المتوسطة، هذه المساحة تشكل نسبة 53.9% من المساحة الإجمالية للنظم الإيكولوجية الغابية المدروسة. كذلك، درجات الحرارة الدنيا تؤثر على عملية التمثيل الضوئي للأنواع الغابية لمساحة قدرها 852406 هكتار، أي ما يعادل 50.8% من مجموع المساحة الغابية الإجمالية. هذه الخرائط المنشأة فعالة من جهة في تحديد البقع الغابية حيث يكون العامل الحراري هو العامل المحدد للإنتاجية، ومن جهة أخرى ذات فائدة لصانعي القرار في تحديد الاستراتيجيات الناجعة لإدارة غابات البلاد.

الكلمات المفتاحية: التغيرات، الحرارة، الغابة، مؤشر الغطاء النباتي الخضري، نظام المعلومات الجغرافي، القمر الصناعي MODIS، شرق الجزائر، رسم الخرائط.

Mapping the thermal variability of forest ecosystems in Eastern Algeria

SUMMARY:

Algerian forest patrimony is estimated at 4 million hectares, including forests, Scrub and brush. This forest is exposed to natural and anthropogenic hazards that cause severe degradation resulting mainly in continued regressive evolution and a substantial loss of wealth. Among the natural threats is the climate conditions and particularly the temperature of the environment in which forest ecosystems evolve. In addition to its action on life processes, on growth and on phenology of species, temperature can change also the biogeographic areas of ecosystems.

In this study we analyzed the temperature to characterize the thermal environment of eastern Algeria and the effects of its variation on the dynamics and photosynthetic activity of forest ecosystems in this vast area. The used data is the temperatures for a period of 30 consecutive years (1982-2011) and spectral index (NDVI) which can detect the photosynthetic signal above the canopy.

Statistical analysis of long temperature series reveals that the warming observed worldwide is already noticed in eastern Algeria. The majority of the wilayas exposed to this hazard, where the trend is more pronounced for the annual maximum temperature, may reach 3 °C/30years, an increase of 0.1C°/year. Thus, the estimate of thermal field for each pixel in eastern Algeria was realized by using Geostatistical methods based on multiple regression between temperature and the explanatory variables describing the relief. From these spatial data, the thermal limits have been defined for each forest species. Finally, the technical of GIS and satellite images allowed us to monitor the dynamics of forest vegetation, and to build maps that define the relationship between forest biomass and thermal parameters. These maps helped us to identify 901087 hectares where trees were very sensitive to changes in the average temperature, with a percentage of 53.9% of the total area of the studied forest ecosystems. Thus, the minimum temperature affects photosynthesis of forest species in an area of 852406 ha with 50.8% of the total forest area. This cartographic expression is effective, firstly for forestry in the discrimination of forest plots where the thermal factor is the limiting factor of productivity and secondly for decision makers to define the forest management strategies of country.

Key words: Variability, Temperature, Forest, NDVI, GIS, MODIS, Eastern Algeria, Cartography.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|--------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| Nom : LAALA Prénom : AHMED | Date de soutenance : 30/11/2016 | | | | | | | | | | | | |
| <p style="text-align: center;">THEME</p> <p style="text-align: center;">Cartographie de la variabilité thermique des écosystèmes forestiers de l'Est algérien</p> | | | | | | | | | | | | | |
| Nature du diplôme : Doctorat en Sciences, Filière: Ecologie végétale, Option : Ecophysiologie et biotechnologie végétale | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Résumé :</p> <p>Le patrimoine forestier algérien est estimé à 4 millions d'hectares, comprenant les forêts, les maquis et les broussailles. Cette sylve est exposée aux aléas naturels et anthropiques qui provoquent une forte dégradation se traduisant surtout par une évolution régressive continue et par une perte substantielle de sa richesse. Parmi les menaces naturelles, on peut citer les conditions climatiques et particulièrement thermiques du milieu dans lequel les écosystèmes forestiers évoluent. En plus de son action sur les processus biologiques, sur la croissance et la phénologie des espèces, la température peut modifier aussi les aires de répartition biogéographique des écosystèmes .</p> <p>Dans le cadre de cette étude nous avons analysé les températures afin de caractériser le climat thermique de l'Est algérien et les effets de sa variation sur la dynamique et l'activité photosynthétique des écosystèmes forestiers de cette vaste zone. Les données utilisées concernent les températures pour une période de 30 années consécutives (période 1982-2011) et l'indice spectral NDVI qui permet de détecter le signal photosynthétique au-dessus de la canopée.</p> <p>L'analyse statistique des longues séries de température révèle que le réchauffement climatique observé à l'échelle planétaire est déjà perceptible à l'Est algérien. La majorité des wilayas étudiées sont exposées à cet aléa où la tendance est plus marquée pour la température maximale annuelle qui peut atteindre 3°C/30ans, soit une hausse de 0.1C°/année. Ainsi, l'estimation du champ thermique pour chaque pixel de l'Est algérien a été réalisée en utilisant des méthodes géostatistiques fondées sur une régression multiple entre la température et les variables explicatives décrivant le relief. A partir de ces données spatiales, les limites thermiques ont été définies pour chaque essence forestière étudiée. Enfin, les techniques du S.I.G et les images satellitaires ont permis d'une part, de suivre la dynamique de la végétation forestière, et d'autre part, d'établir des cartes qui précisent la relation existant entre la biomasse forestière et les paramètres thermiques. Ces cartes nous ont permis d'identifier 901087 hectares où les arbres sont très sensibles à la variation de la température moyenne, soit un pourcentage de 53.9% de la surface totale des écosystèmes forestiers étudiés. Ainsi, la température minimale conditionne l'activité photosynthétique des essences forestières sur une surface de 852406 ha, soit 50.8% de la superficie forestière totale. Cette expression cartographique est efficace, d'une part pour les forestiers dans la discrimination des parcelles forestières où le facteur thermique est le facteur limitant de leur productivité, d'autre part pour les décideurs afin de définir les véritables stratégies de gestion forestière du pays.</p> <p>Mots clés : Variabilité, Température, Forêt, NDVI, SIG, MODIS, Est algérien, Cartographie.</p> | | | | | | | | | | | | | |
| Laboratoire de recherche : Laboratoire de développement et valorisation des ressources phytogénétiques. | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Membres du jury :</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Président : Mr. BENDERRADJI Med El Habib</td> <td style="width: 50%;">Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1</td> </tr> <tr> <td>Rapporteur : Mr. ALATOU Djamel</td> <td>Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1</td> </tr> <tr> <td>Examineurs : Mr. BENTOUATI Abdallah</td> <td>Prof. Université Hadj Lakhdar Batna1</td> </tr> <tr> <td>Mr. HAFSI Miloud</td> <td>Prof. Université Ferhat Abbes Sétif1</td> </tr> <tr> <td>Mr. BAZRI Kamel Eddine</td> <td>MCA. Université des Frères Mentouri Constantine1</td> </tr> <tr> <td>Mr. BENMESSAOUD Hassene</td> <td>MCA. Université de Batna2</td> </tr> </table> | | Président : Mr. BENDERRADJI Med El Habib | Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1 | Rapporteur : Mr. ALATOU Djamel | Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1 | Examineurs : Mr. BENTOUATI Abdallah | Prof. Université Hadj Lakhdar Batna1 | Mr. HAFSI Miloud | Prof. Université Ferhat Abbes Sétif1 | Mr. BAZRI Kamel Eddine | MCA. Université des Frères Mentouri Constantine1 | Mr. BENMESSAOUD Hassene | MCA. Université de Batna2 |
| Président : Mr. BENDERRADJI Med El Habib | Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1 | | | | | | | | | | | | |
| Rapporteur : Mr. ALATOU Djamel | Prof. Université des Frères Mentouri Constantine1 | | | | | | | | | | | | |
| Examineurs : Mr. BENTOUATI Abdallah | Prof. Université Hadj Lakhdar Batna1 | | | | | | | | | | | | |
| Mr. HAFSI Miloud | Prof. Université Ferhat Abbes Sétif1 | | | | | | | | | | | | |
| Mr. BAZRI Kamel Eddine | MCA. Université des Frères Mentouri Constantine1 | | | | | | | | | | | | |
| Mr. BENMESSAOUD Hassene | MCA. Université de Batna2 | | | | | | | | | | | | |