

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Batna 1

Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
Agronomiques

Spécialité : Sciences forestières

Présentée par

BELLOULA Salima

Thème

Caractérisation des facteurs écologiques influents sur le
dépérissement du cèdre de l'Atlas

- Cas des cédraies du massif des Aurès -

Soutenu le : 26/10/2020

Devant le jury :

Président :	BENMESSAOUD Hassen	Prof.	Université Batna 1
Rapporteur:	BEGHAMI Yassine	Prof.	Université Batna 1
Examineur :	BOUMARAF Belkacem	MCA	Université Biskra
Examineur :	RABHI Khellaf	MCA	Université Tizi ousou
Examineur :	ABDESSELAM Salah	Prof.	Université Batna 1
Examineur :	DEMNATI Fatima	MCA	Université Biskra

Année universitaire: 2019 / 2020

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout ALLAH tout puissant qui m'a comblé de ses bienfaits et m'a donné assez de force pour achever ce travail.

Je tiens à remercier Mr **Benmessaoud H.** (Professeur à l'Université de Batna1) d'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer mon profond respect et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de recherche Mr **Beghami Y.** (Professeur à l'université de Batna1). Je lui suis profondément reconnaissante de ses conseils, ses encouragements pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Mes respectueux remerciements vont de même à Mr **Boumaraf B.** (Maître de Conférences à l'Université de Biskra), Mr **Rabhi Kh.** (Maître de Conférences à l'Université de Tizi ouzou), **Abdesselam S.** (Professeur à l'Université de Batna1) et Mme **Demnati F.** (Maître de Conférences à l'Université de Biskra) pour avoir mobilisé de leurs temps, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je souhaite remercier tous les membres du Laboratoire LAPAPEZA (Laboratoire d'Amélioration des Productions Agricoles et Protection des Ressources en Zones Arides) d'université de Batna1. J'aimerais remercier aussi tous les "Laborantins et laborantine de département d'Agronomie sans oublier de citer **Sahraoui, Malik, Aboubou, Hadji**, pour leur aide et leurs gentillesse.

Mes remerciements s'adressent à Mr **Bensdira N.** (Directeur de E.R.G.R. AURES - Entreprise Régionale du Génie Rural Kais-Khenchela) pour le support technique et humains. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux officiers **Lalawna W., Laatar H., Mayouf E-H., Aghdi S.**, sans oublier les agents qui nous ont aidés et accompagnés sur le terrain. Nous sommes également reconnaissants aux officiers de la conservation des forêts de Khenchela.

Mes remerciements vont également à la directrice du centre de recherche CRSTRA de Biskra (Centre de Recherche Scientifique et Techniques sur les Régions Aride) d'avoir m'accueillir dans le laboratoire de pédologie pour l'analyse du Reserve Utile du sol. Un grand merci pour la responsable du laboratoire **Mme Menasria H. et Mr Otman T.** pour leurs aides.

Un très grand merci à tous mes amis (es) pour leurs encouragements, leurs soutiens et leurs gentillesse pendant ces années chacun à sa façon.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes amis (es) et mes collègues d'université de Bordj Bou Arréridj.

Enfin, je ne pourrais terminer sans remercier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont permis de mener à bien ce travail. Qu'ils soient assurés de ma profonde amitié.

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents, vous avez su guider mes pas, m'aider à devenir ce que je suis. Ma joie de vivre, ma force et mes réussites, c'est à vous que je les dois, merci d'être là dans les moments de doute. Merci de me supporter et quoique je puisse vous dédier ça ne sera jamais assez.

Un grand merci pour mes sœurs et frères pour leurs encouragements et leurs soutiens.

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer ...

A moi

Salima

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale	01
CHAPITRE I : Etat de recherche actuelle sur le cèdre de l'Atlas	
I.1. Introduction.....	04
I.2. Répartition et caractéristiques du cèdre de l'Atlas.....	04
I.2.1. Répartition du cèdre de l'Atlas.....	04
I.2.2. Caractéristiques botaniques et forestiers.....	05
I.2.3. Caractéristiques écologiques	06
I.2.3.1. Altitude	06
I.2.3.2. Exposition.....	07
I.2.3.3. Sol.....	07
I.2.3.4. Climat.....	08
I.2.3.5. Aire bioclimatique de développement.....	08
I.2.3.6. Associations végétales.....	09
I.2.3.7. Pathologie, champignons et animaux	09
I.2.3.8. Incendies, et actions anthropiques.....	10
I.2.4. Intérêt économique et écologique	10
I.2.5. Importance du climat sur le développement des espèces végétales.....	11
I.2.6. Régénération naturelle.....	12
I.2.7. Résistance du cèdre à la sécheresse.....	12
I.2.8. Conclusion partielle	13
I.3. Dépérissement Forestier.....	13
I.3.1. Définition	14
I.3.2. Facteurs du dépérissement et leurs mécanismes.....	15
I.3.3. Dépérissement forestier dans le monde.....	16
I.3.4. Dépérissement forestier en Algérie - la céderais des Aurès -.....	17
I.3.5. Complexité de l'étude de dépérissement forestier	19
I.3.6. Dépérissement et le changement climatique	20

I.6. Conclusion.....	21
----------------------	----

CHAPITRE II : SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CONTEXTE

ÉCOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Introduction	22
II.2. Etude du milieu physique d'Aures.....	22
II.2.1. Situation géographique.....	22
II.2.2. Contexte écologique.....	23
II.2.2.1. Relief.....	23
II.2.2.2. Sols.....	23
II.2.2.3. Géologie	24
II.2.2.4. Couvert végétal.....	25
II.2.2.5. Potentiel Agricole.....	25
II.3. Etude du milieu physique des stations.....	26
II.3.1. Station de Chélia.....	26
II.3.1.1. Situation de la zone d'étude.....	26
II.3.1.2. Topographie.....	27
II.3.1.3. Géologie.....	27
II.3.1.4. Pédologie.....	28
II.3.1.5. Végétation	28
II.3.2. Station d'Ouled Yagoub.....	29
II.3.2.1. Relief.....	29
II.3.2.2. Géologie et Pédologie.....	29
II.3.2.3. Végétation.....	30
II.4. Climat.....	31
II.4.1. Précipitation.....	31
II.4.2. Température.....	32
II.4.3. Autre facteurs climatiques.....	33
II.4.3.1. Vents.....	33
II.4.3.2. Orages.....	32
II.4.4. Caractéristiques du Climat	34
II.4.4.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen.....	34
II.4.4.2. Quotient pluviométrique d'Emberger et étage bioclimatique.....	36
II.5. Conclusion.....	36

CHAPITRE III : Analyse spatio-temporelle DU dépérissement du cèdre de l'Atlas

III.1. Introduction.....	38
III.2. Matériels et méthodes	39
III.2.1. Matériels	39
III.2.2. Démarche méthodologique.....	41
III.3. Résultats et discussion.....	42
III.3.3.1. Cartes des NDVI.....	42
III.3.3.2. Cartes de détection du changement.....	46
III.3.3.3. Cartes de la classification supervisée.....	52
III.4. Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : Etude pédologique

IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Analyses chimiques pédologiques.....	56
IV.2.1. Matériels et méthodes	56
IV.2.2.1. Mesure de la profondeur	56
IV.2.2.2. Analyses du sol	57
IV.3. Réserve Utile du Sol (RU)	58
IV.3.1. Matériels et méthodes	59
IV.4. Résultats et Discussion.....	60
IV.4.1. Résultats	60
IV.4.2. Discussion.....	69
IV.5. Conclusion.....	73

CHAPITRE V : Synthèse dendroécologique sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas

V.1. Introduction.....	74
V.2. Matériels et méthodes	74
V.2.1. Collecte des données	74
V.2.2. Matériels utilisés	75
V.2.3. Démarche méthodologique	75
V.2.3.1. Choix des placettes	75
V.2.3.2. Variables calculées.....	76
A. Surface terrière à l'hectare (G/ha)	76

B. Densité à l'hectare.....	77
C. Hauteur dominante (H_{dom})	77
D. Diamètre moyen.....	77
E. Diamètre et hauteur de l'arbre de la surface terrière moyenne (Dg).....	77
F. Taux de mortalité ($M\%$).....	77
V.3. Résultats et discussion.....	78
V.3.1. Résultats.....	78
V.3.1.1. Analyse diamétrique.....	78
V.3.1.2. Analyse statistique	81
V.3.1.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)	81
V.3.1.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	84
V.3.1.3. Description des groupes.....	85
V.3.2. Discussion.....	90
V.4. Conclusion	95
Conclusion Générale	96

Références Bibliographiques

Annexes

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
Chapitre II : Situation géographique et contexte écologique de la zone d'étude		
II.1	Répartition des précipitations moyennes mensuelles	32
II.2	Répartition des températures moyennes mensuelles	32
Chapitre III : Analyse spatio-temporelle du dépérissement du cèdre de l'Atlas		
III.1	Classification des niveaux de NDVI	46
Chapitre IV : Etude pédologique		
IV.1	Valeurs propres	60
IV.2.	Données statistiques des placettes saines et dépéris	68
Chapitre V : Synthèse dendroécologique sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas		
V.1	Valeurs propres	81

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
Chapitre I : Etat de recherche actuel sur le cèdre de l'Atlas		
I.1	Aire de répartition du Cèdre de l'Atlas (M'hirit ,1993)	5
I.2	Dépérissement du Cèdre de l'Atlas au niveau des monts des Aurès (S. Belloula).	18
Chapitre II : Situation géographique et contexte écologique de la zone d'étude		
II.1	Carte de situation régionale de la zone d'étude (S. Belloula, 2018).	23
II.2	Carte géologique des Aurès (Lafitte, 1939 ; Benmessaoud, 2010)	25
II.3	Carte de situation, Chélia (Source : Google Earth).	27
II.4	Carte de situation, Ouled Yagoub (Source : Google Earth).	29
II.5	Diagramme ombrothermique de Gaussen (Batna : 1985-2018).	35
II.5	Diagramme ombrothermique de Goussen (Khenchela : 1983-2017).	35
Chapitre III : Analyse spatio-temporelle sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas		
III.1	Interface d'Erdas Imagine.....	40
III.2	Interface de Qgis 2.18.....	40
III.3	Cartes de NDVI du mont d'Ouled Yagoub (1987-1995-2003-2016)	44
III.4	Carte de NDVI du mont de Chélia (1995-2003-2016)	45
III.5	Carte de détection du changement du mont de Chélia (1987-1995)	47
III.6	Carte de détection du changement du mont de Chélia (1995-2003)	47
III.7	Carte de détection du changement du mont de Chélia (2003-2016)	48
III.8	Carte de détection du changement du mont d'OuledYagoub (1987-1995)	48
III.9	Carte de détection du changement du mont d'OuledYagoub (1995-2003)	49
III.10	Carte de détection du changement du mont d'Ouled Yagoub (2003-2016)	49
III.11	Histogramme d'estimation des surfaces du cèdre de l'Atlas (Aurès, Algeria)..	51
III.12	Classification Supervisée du cèdre de l'Atlas dans les monts Chélia (Aurès)...	53
III.13	Classification Supervisée du cèdre de l'Atlas dans les monts Ouled Yagoub (Aurès)	53

Chapitre IV : Etude pédologique

IV.1	Marmite de Richards.....	59
IV.2	Cercle de corrélation.....	62
IV.3	Projection factorielle des placettes	63
IV.4	Dendrogramme des placettes.....	65
IV.5	Biplot	67
IV.6	Exemple de quelques profils réalisés au niveau des mont Chélia (a, b)	71
IV.7	Exemple de quelques profils réalisés au niveau des monts d'Ouled Yaagoub (a, b)	72

**Chapitre V : Synthèse dendroécologique sur le dépérissement
du cèdre de l'Atlas**

V.1	Carte d'emplacement des placettes d'échantillonnage.....	76
V.2	Distribution des individus en fonction des classes de diamètre dans les Monts d'Aurès (Chelia "A" et Ouled Yagoub "B").....	79
V.3	Structure du peuplement selon le diamètre des arbres dépérit.....	80
V.4	Cercle de corrélation.....	82
V.5	Projection factorielle des placettes	83
V.6	Dendrogramme des placettes.....	85
V.7	Projection factorielle des placettes.....	87
V.8	Coupes illicites.	88
V.9	Surpâturage.....	89
V.10	Présence de la régénération du cèdre de l'Atlas.....	94

INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION GÉNÉRALE

La forêt joue un rôle clé sur les plans économiques et environnementaux. À l'heure actuelle, dans la rive Sud, à l'inverse de la rive Nord de la méditerranée, l'écosystème forestier se caractérise par une fragilité et un dysfonctionnement (Quézel, 2003). La région méditerranéenne dans sa globalité héberge une biodiversité et des structures forestières originelles (Quézel, 2003). Cet écosystème, fortement perturbé depuis le 13^e siècle. Ces écosystèmes ont subi de profonds changements dans leur répartition et dans leur composition (Stegner *et al.*, 2019).

Ils sont menacés par la réduction de la fourniture attendue des services écosystémiques, culturels et économiques essentiels (Fettig *et al.*, 2013 ; Gauthier *et al.*, 2014 ; Hajjar et Kozak, 2015). Ils ont été, vraisemblablement, appauvri en espèces végétales et animales, et que seules les espèces tolérantes vis-à-vis de l'intervention humaine ont pu survivre (Diederich, 1991).

Ces dernières décennies, de nombreuses forêts souffrent du dépérissement forestier (Allen, 2010 ; Barthod & Fournier, 2019). Parallèlement, les forêts de conifères de montagnes méditerranéennes affichent un ralentissement de la croissance, un dépérissement et une mortalité (Camarero *et al.*, 2015).

Ce dépérissement est un problème d'actualité, inquiétant et en propagation dans le monde. Beaucoup de causes sont données, nous citons principalement comme cause: l'intensification de la sécheresse, insectes parasites et agents pathogènes, déficit nutritionnel, l'agriculture itinérante, l'élevage extensif, l'exploitation forestière, la carbonisation et les incendies, la croissance et la pression démographique, les changements climatiques, les avancées technologiques, actions sylvicoles inappropriées les limites et les insuffisances de l'administration forestière, les mesures politiques (Boudy, 1950 ; Aussenac et Valette, 1982 ; Aussenac et Finkelstein, 1983 ; Becker, 1987 ; Lebourgeois *et al.*, 1997 ; Bellassen, 2008 ; Bogaert *et al.*, 2011 ; Camarero *et al.*, 2011 ; Ongolo & Karsenty, 2011 ; Rakotondrasoa, 2013 ; Avakoudjo *et al.*, 2014 ; Tchatchou, 2015 ; Amoussou *et al.*, 2016 ; Gillet *et al.*, 2016 ; Biao, 2019 ; Imorou, 2019).

En Algérie, la plupart des forêts sont de protection. Ces forêts sont touchées aussi, comme toutes les forêts du monde, par ce dépérissement forestier. Les forestiers, chercheurs et scientifiques se trouvent, alors, devant des problèmes qui sont mal diagnostiqués. Le cèdre de l'Atlas est parmi les espèces les plus touchés par ce fléau.

Selon Boudy (1950), Le dépérissement du cèdre est apparu entre 1879 et 1888. Ensuite, vers les années quatre-vingt (Bentouati, 2008 ; Kherchouche, 2015). La majorité des forêts de

cèdre sont soumis et subissent encore divers facteurs de dégradation (précipitations irrégulières, les coupes illicites, pâturage, piétinement, feux de forêts, défrichement et terrassement etc.) (Bentouati, 2008 ; Beloula, 2010; Beghami, 2015). À l'heure actuelle, les cédraies subissent un dépérissement intense qui s'est aggravée.

La cédraie algérienne occupe une superficie de 40.000 ha dont la majorité de ces cédraies se trouvent dans les Aurès (Benabid, 1993). Elle possède une grande valeur écologique, floristique, socio-économique et patrimoniale (Abdessamed, 1981 ; Terrab *et al*, 2006 ; M'hirit et Benzyane, 2006 ; Rhanem, 2011 ; Beghami 2013). De plus, cette espèce emblématique est endémique des montagnes Nord africaines dont la région d'étude (Aurès).

Aujourd'hui, le cèdre de l'Atlas est considéré comme une espèce en voie de disparition et ses populations continuent à diminuer (UICN, 2017).

D'une manière générale, le massif aurassien se manifeste par une dégradation très avancée due aux différents facteurs qui jouent, simultanément ou individuellement, un rôle néfaste sur nos forêts. Ces cédraies aurassienne ont subi une régression et une mortalité plus intenses du fait qu'elles occupent une zone soumise aux conditions écologiques marginales.

Le problème de nos cédraies est le responsable de choisir d'étudier le dépérissement du cèdre de l'Atlas et les causes responsables de ceci. Et Le peu des études existantes pour expliquer ce phénomène en relation avec le stress hydrique (Halitim, 2006), l'entomologie (Beghami, 2010 : Talbi, 2010), géomatique (Beloula, 2010), dendrochronologie (Kherchouche, 2015). De plus, la grande controverse entourant les causes de sa mort a suscité davantage la curiosité des scientifiques à lui consacrer leur effort. Cet arbre à une longévité considérable est extrêmement vulnérable au changement climatique et à la teneur en eau du sol (Linares *et al.*, 2011).

Le dépérissement du cèdre de l'Atlas a connu une extension importante sur toutes les forêts, ce phénomène est suivi par une destruction irréversible et définitive des peuplements. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer la cause de dépérissement du cèdre de l'Atlas, où l'idée générale c'est que le changement climatique est le facteur majeur de ce phénomène.

Les événements climatiques extrêmes sont exceptionnellement difficiles à prévoir. En effet, prévoir l'impact des conditions climatiques extrêmes sur la performance, la croissance des arbres et les réactions des espèces reste un défi (Hu *et al.*, 2019 ; Marcon *et al.*, 2019).

Depuis le début des années quatre vingt, de fortes sécheresses ont été liées au dépérissement et à la mortalité du cèdre de l'Atlas (Bentouati, 2008 ; Mokrim, 2009 ; Allen *et al.*,

2010 ; Beghami *et al.*, 2012). Des sécheresses intenses peuvent se traduire par des dysfonctionnements écophysologiques irréversibles et la mort des arbres (Aussenac et Guehl, 1994).

Dans la présente étude, nous envisagerons de réaliser un travail multidisciplinaire qui nous permettra de comprendre le phénomène du dépérissement du cèdre de l'Atlas afin de répondre sur (Quel est son cadre spatio-temporel ? Quel est l'influence du sol ? Est ce que l'ensemble des facteurs dendro-écologique ont un influence directe sur notre phénomène ?).

Notre objectif est d'exploiter différents types de données (facteurs écologiques, dendrométriques, pédologiques, données spatiales afin de répondre aux questions et pour évaluer et expliquer l'évolution et les facteurs qui peuvent influencer directement sur le dépérissement.

Pour atteindre notre objectif, deux régions aurassiennes sont choisies : les monts de Chélia et d'Ouled Yagoub. Et différents travaux ont été envisagés:

- Etude dendrométrique ;
- Etude pédologique pour des analyses physico-chimiques du sol et le calcul de réserve utile (RU) du sol ;
- Etude géomatique pour cartographier, détecter et suivre la dynamique spatio-temporelle du cèdre de l'Atlas.

Pour répondre à ces principaux objectifs, cette étude sera structurée en cinq chapitres. Le premier chapitre sera consacré à une synthèse sur l'état actuel des recherches sur le cèdre de l'Atlas et son dépérissement.

Les caractéristiques géographiques, topographiques, climatiques, édaphiques de la zone d'étude feront l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présent l'étude spatio-temporelle des cédraies dépérit ainsi que la présentation de son état de santé actuel.

Le quatrième chapitre sera consacré à une étude pédologique des différents profils effectués au niveau des placettes échantillonnées et le calcul de Reserve utile (RU) du sol forestier. Une synthèse dendroécologique, corrélations entre les données dendrométriques et écologiques, fait l'objet du cinquième chapitre.

À la fin de ce travail, une conclusion générale comporte une synthèse de nos résultats ainsi que des perspectives et des recommandations.

Chapitre I

ETAT DE RECHERCHE ACTUEL SUR LE CÈDRE DE L'ATLAS



Chapitre I

ETAT DE RECHERCHE ACTUEL SUR LE CÈDRE DE L'ATLAS

I.1. INTRODUCTION

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*, Manetti) est une essence forestière endémique d'Afrique du Nord (Maroc, Algérie). Ces dernières années, Il subit une dégradation intense nommée le dépérissement. c'est est un phénomène irréversible qui a touché tous les espèces forestières.

L'objectif de ce chapitre vise d'abord à indiquer la répartition, l'écologie et les caractéristiques du cèdre de l'Atlas et mettre en évidence le dépérissement forestier, ses causes et son amplification.

I.2. RÉPARTITION ET CARACTERISTIQUES DU CEDRE

I.2.1. Répartition du cèdre de l'Atlas

Le cèdre de l'Atlas se trouve dans son aire naturelle au niveau de l'Algérie et du Maroc. Il est absent en Tunisie. C'est une espèce, économique et écologique importante des méditerranéennes (Maire, 1926 ; Emberger, 1935 ; Benchekroun, 1993 ; M'hirit et Benzyane, 2006 ; Terrab *et al.*, 2006 ; Linares *et al.*, 2011 ; Rhafouri *et al.*, 2014 ; Quézel et Médail, 2017).

Le cèdre de l'Atlas a été depuis longtemps l'une des espèces de reboisement les plus utilisées dans la région méditerranéenne (Ripert et Boisseau, 1994). Il fut introduit pour la première fois en 1862, en France (Toth, 1971 et 1994). Il fut également introduit en Italie en 1964 (Brunetti *et al.*, 2001, Andrea et Roberto, 1994), en Espagne et aux États Unis (M'hirit, 1994), en Bulgarie en 1876 (Delkov et Grozev, 1994), en Hongrie en 1955 (CSABA, 1994), en Tunisie (Dahman et Khouja, 1994) et au Portugal en 1935 (Toth, 2005).

L'aire naturelle du cèdre de l'atlas est très disjointe et très morcelée à travers le Maghreb l'Atlas marocain (130000 ha), le Rif (15000 ha) et l'Atlas algérien (40000 ha) (M'hirit et Blerot, 1999) (Figure I.1).

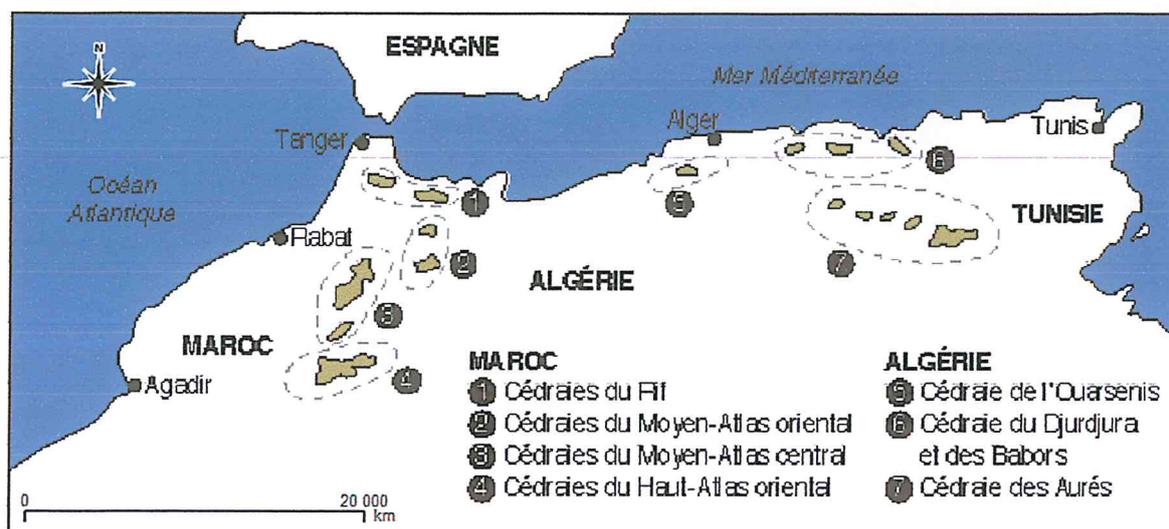


Figure I.1 : Aire de répartition du cèdre de l'Atlas (M'hirit, 1993)

En Algérie, les cédraies couvrent environ 300 km², elles se divisent en deux types : Les cédraies sèches qui sont sous influences climatiques sévères car soumises directement aux influences sahariennes (Aurès et Belezma 17000 ha ; Hodna 8000 ha ; Théniet el Had 1000 ha) et les cédraies humides qui bénéficient d'un climat particulièrement favorable (Babor 1300 ha ; Djurdjura 1200 ha ; Atlas Blideen 1000 ha) (Faurel&Laffitte, 1949 ; Boudy, 1950 ; Pradal, 1979 ; Aussenac, 1980 ; Abdessamed, 1981 ; Benabid, 1993).

Selon Abdessamed (1981) la surface totale de la cédraie algérienne est estimée à 23 254 ha, alors qu'elle est estimée à 24 522 ha par M'hirit (1994) ; Harfouche et Nedjahi (2003) et Roche (2006), dont plus de 1 260 ha sont perdus.

I.2.2. Caractéristiques botaniques et forestières

Le cèdre de l'Atlas est un arbre de grande taille. Il est susceptible de dépasser les 50 m de hauteur et atteindre les 3m de circonférence (Gaussen, 1967). Son port pyramidal au stade jeune, présente des ramifications de premier ordre souvent redressées. Il est droit ou conique pendant son jeune âge et devient tortueux dès que l'individu est âgé. A l'âge adulte, il prend une forme tabulaire (Gaussen, 1967). Son cône est cylindrique à sommet aplati ou déprimé (Debazac., 1964 ; Toth, 1971 et Riou-Nivert, 2007). Il mûrit en 2 ans (Boudy, 1952) et sa longévité peut dépasser les 1000 ans (Boudy, 1950 ; Toth, 1978). Son écorce divisée en petites écailles est crevassée profondément (Toth, 1971, 1981). Son système racinaire très étendu, ramifié, pivotant et oblique

(Boukcim *et al.*, 2001) colonise les sols humides et profonds (Toth, 1970 ; Ripert, 2007) ce qui lui assure sa stabilité selon Boudy (1950). Ses graines sub-triangulaires sur 10 à 15 mm, sont tendres et très résineuses avec de larges ailes (Debazac, 1964 ; Toth, 1971). Leur germination sur 10j est assurée à partir de températures avoisinant les 10°C (Lepoutre, 1964). Les aiguilles longues de 1 à 2cm, rigides à apex aigu, persistantes et en rosette sont isolées sur les jeunes rameaux longs et sur les pousses de l'année (Boudy, 1950 ; Toth, 1971). Les inflorescences mâles sont d'un jaune verdâtre alors que les inflorescences femelles sont d'un vert pâle (Debazac, 1964). Selon (Arbez *et al.*, 1978), les rameaux longs de couleur grise jaunâtre pubescente ne portent que des aiguilles isolées pendant la première année alors que les rameaux courts sont trapus, insérés sur les précédents et terminés par un bouquet d'aiguilles très nombreuses et serrées. La ramure est horizontale, mais les branches ne sont pas étagées en verticilles (Boudy, 1952).

Le cèdre de l'Atlas est une essence monoïque. Les fleurs mâles et femelles évoluent sur le même arbre. L'inflorescence mâle et femelle ne se constitue pas en même temps. Sa pollinisation se produit en automne, suivie de la formation du cône à l'automne de la deuxième année. Durant la troisième année, se produit la maturation des cônes et leur désarticulation (Boudy, 1952).

1.2.3. Caractéristiques écologiques

Le cèdre de l'Atlas est un arbre essentiellement montagnard, bien adapté au climat froid. Les caractéristiques écologiques du cèdre, les plus importantes sont : l'altitude, le climat et le sol (Boudy, 1950).

1.2.3.1. Altitude

Les limites altitudinales d'une cédraie sont en fonction des conditions climatiques et du relief. On distingue ainsi trois types de cédraies : Les cédraies basses (< 1800m), les cédraies moyennes (1800 - 2100 m) et les cédraies hautes (>2100 m). En Algérie, la cédraie peut descendre jusqu'à 900 m (Quezel, 1980) alors que dans le haut-Atlas oriental (Maroc) il peut aller jusqu'à 2500 m (M'hirit, 1982 ; Abourouh, 1994)

L'optimum écologique du cèdre se situe vers 1800 m (Boudy, 1950). D'après Achhal *et al.* (1980), cet optimum se situe entre 1600 m et 2000 m. Au-delà de 2000 m, il est remplacé généralement par le genévrier thurifère (Demarteau, 2006).

L'altitude joue un rôle important dans les processus de régénération naturelle du cèdre, à basse altitude, les hivers plus doux favorisent la régénération, alors qu'en haute altitude, les hivers rudes retardent la germination ce qui est le plus souvent incompatible avec la survie des plantules (Lepoutre, 1963 ; Lepoutre, 1965 ; Nedjahi, 1988).

I.2.3.2. Exposition

L'exposition joue un rôle important dans la répartition du cèdre. Le cortège floristique ainsi que la croissance, la fructification et la régénération changent d'un versant à un autre d'une même montagne.

Selon Seltzer (1946) et LeHouérou (1975), il existe des relations entre l'exposition et l'altitude d'une part et la pluviométrie d'autre part et préconisent entre 20 et 40 mm d'accroissement de la pluviométrie annuelle par 100 m de dénivelée selon l'exposition des versants.

En Algérie, les plus belles cédraies évoluent sur les versants Nord et Nord-ouest, mieux arrosés et plus exposés aux vents humides, contrairement aux versants Sud balayés par des vents chauds et secs « Sirocco » et un ensoleillement plus fréquent (Emberger, 1935).

I.2.3.3. Sol

Le cèdre s'accommode à tous les sols qu'il colonise facilement (Boudy, 1952 ; Lepoutre, 1963). A noter toutefois certaines préférences pour les sols profonds qu'ils soient meubles ou caillouteux (Toth, 1971). Il pousse mieux sur les calcaires plus ou moins compactés que sur les schistes calcaires ou gréseux et en grès. Il peut croître aussi bien sur sol acide que sur sol basique (Alexandrain et rigolot, 1992). Il redoute les sols mal drainés, asphyxiants et hydromorphes, au détriment de la texture argileuse qui lui est défavorable (Schoenberger, 1970 ; Toth, 1971 ; 1981), ses préférences vont pour les textures légères mieux prisées par les jeunes semis (Pradal, 1979).

Si à travers certains monts d'Algérie, on le retrouve sur des sols gréseux, des schistes et sur des sols calcaires (Bariteau *et al*, 1990 in Khanfouci, 2005), des sols bruns fersialliques et calcaires (Abdessemed, 1984). Dans les Aurès, le cèdre de l'Atlas évolue sur des sols bruns ou des rendzines formés sur du grès blanc, des dolomies et des marnes (Schoenberger, 1970 ; Abdessemed, 1981), comme il évolue aussi sur des sols bruns fersialitiques, ou des sols bruns eutrophes sur grès (Benarab, 1996).

I.2.3.3. Climat

Température, facteur écologique limitant et important, contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionné par conséquent la répartition des végétaux (Ramade, 1984). Selon Gaussen (1955) in Manso *et al* (2015) les valeurs optimales moyennes annuelles varient entre 8°C et 10°C (Aures) allant jusqu'à 12 °C (Maroc). Selon Boudy (1950) et Pujos (1964) les valeurs sont de l'ordre de 8 à 14 °C. Putod (1979) a signalé que le cèdre dans ses pays d'origine vit avec des extrêmes absolus de (- 25 °C et + 35 °C) et Riou-Nivert (2005) ajoute que le cèdre peut résister à de très basses températures (-20°C).

Si les températures trop hautes peuvent avoir une influence sur la vie du cèdre et peuvent compromettre sa régénération, les températures trop basses peuvent tuer des peuplements entiers (Lapie, 1909 in Abdessemed, 1981).

Précipitation, joue un rôle prépondérant sur la croissance du cèdre (Toth, 1987). Confirmé par Schoenberger (1970) et Mediouni & Yahi (1994), le cèdre n'est pas exigeant pour la pluviométrie, il évolue dans des tranches comprises entre 450 mm/an (400 à 500 mm dans les Aurès) à 1700 mm/an (1400 mm dans les babors).

Les cédraies du pourtour méditerranéen subissent un climat présentant un à trois mois biologiquement secs dans l'année (Quezel, 1976).

I.2.3.5. Aire bioclimatique de développement

La répartition géographique des cédraies est le résultat de composantes particulièrement climatiques (Faurel, 1947). Comme il est généralement une espèce demi-ombre, il trouve son optimum écologique dans le climat méditerranéen humide à hiver froid (Quezel, 1976) et s'étend jusqu'au sub-humide inférieur à hiver froid (M'hirit, 1982, Till ; 1985) et été sec (Aussenac *et al.*, 1981 ; Aussenac, 1984). Selon Debazac (1964) sa plasticité lui permet de se développer sous climat méditerranéen humide (Rif), sub-humide (Moyen Atlas) ou semi-aride (Aurès, Grand Atlas oriental) sans toutefois se départir des autres étages bioclimatiques caractérisés soit par de la fraîcheur (subhumide et perhumide) soit très froids (semi-aride supérieur) (Nedjahi, 1988 ; M'hirit, 1982 ; Derridj, 1990 et Pons, 1998).

En Algérie, selon Boudy (1950) il situe son aire géo-climatique dans les étages *semi-aride à hiver froid* (Boutaleb, Chélia et Djebel Azreg) ; *Sub-humide à hiver froid* (Theniet El had et le nord du Belezema) ; *Humide frais* (Monts du Djurdjura) et le *Per-humide* (Babor, Chréa).

I.2.3.6. Associations végétales

L'association floristique du cèdre de l'Atlas varie avec l'étage bioclimatique. Selon Boudy (1952), le faciès peut être: *a) humide* : monts des Babor et le moyen Atlas marocain caractérisé par le chêne vert, le chêne Zeen et de l'IF avec absence du genévrier thurifère et de nombreuses autres espèces ; ou *b) relativement sec* ce qui est le cas des monts des Aurès, des monts du Hodna, Theniet El Had et du grand Atlas oriental marocain qui présentent les espèces suivantes : *Pinus halepensis* Mill, *Juniperus oxycedrus*, *Juniperus thurifera*, *Ampalodesma mauritanica*, *Fraxinus xanthoxyloides*, *Acer monspessulanum*, *Sorbus aria*, *Quercus ilex*, *Crataegus monogyna*, *Taxusbaccata*.

I.2.3.7. Pathologie, champignons et animaux

Les attaques d'insectes seraient des phénomènes aggravants consécutifs aux événements climatiques. Les dommages encourus entraînent une dépréciation de la qualité des produits sylvicoles, altèrent la diversité biologique et le fonctionnement des écosystèmes forestiers (Laurent & Lecomte, 2007 ; Flot *et al.*, 2007).

Plusieurs espèces d'insectes existent dans les cédraies du bassin méditerranéen et commettent des dégâts (Fabre, 1976). Les chercheurs de l'INRA signalent des peuplements de cèdre de l'Atlas du Nord par un riche complexe d'insectes phytophages, entre autres la chenille processionnaire, la tordeuse du cèdre, le Puceron de cèdre, et les champignons (Bariteau *et al.*, 1992).

La chenille processionnaire du cèdre (*Taumatopea bonjeani*), ravageurs des aiguilles signalées dans les cédraies à Azrou au Maroc en 1921 (Agenjo, 1941), sa présence a été détectée en 1982 dans la cédraie du Bélezma, présence confirmée à la suite d'investigations poussées (Gachi *et al.*, 1986 ; Gachi, 1989) ; la chenille Processionnaire du pin (*Thaumetopeae pityocampa*) qui attaque les aiguilles des jeunes pousses (Boudy, 1950) ; la tordeuse du Cèdre dont le caractère néfaste durant le printemps, sur l'arbre en entier et ce indépendamment de son âge et de sa situation dans le massif forestier (Mouna, 1986 ; Ladjal, 2007), le chalcidien semivivore (*Megastigmus pinsopinis*) insecte parasite de la graine en particulier durant les années de faible production (Toth, 1978) ; le Puceron de cèdre (*Cedrobium loportei*) : producteur d'un miellat collant aux feuilles et gênant l'assimilation chlorophyllienne.

Parmi les champignons qui causent des dégâts redoutables au cèdre nous avons entre autres *Polyporus officinalis* qui cause des altérations plus au moins graves (Boudy, 1952) ; *Armillaria milla*, qui se développe surtout sur les arbres affaiblis en attaquant surtout les racines et le tronc (Malki, 1992).

En plus des insectes et des champignons, le sanglier est considéré comme l'animal qui endommage la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas par son mode de nourriture et notamment par le piétinement qui se fait particulièrement sous couvert.

Les bovins lâchés librement causent de terribles dégâts en piétinant et en compactant le sol (Belkhiri, 1993). Ils broutent les parties terminales vertes des jeunes cèdres qui en grandissant donnent des individus avec des paramètres dendrométriques en dessous de la moyenne (faible production, hauteurs insuffisantes).

D'une manière générale, le pâturage incontrôlé constitue l'une des principales causes de la destruction des cédraies.

I.2.3.8. Incendies, et actions anthropiques

L'incendie est généralement indirecte (action de l'homme). Elle n'est pas directe car de toutes les espèces qui composent la forêt méditerranéenne, le cèdre est le moins inflammable et le moins combustible. En peuplement dense, le cèdre élimine toute végétation herbacée, de ce fait il est peu propice au feu (Boudy, 1950 ; Toth, 1970).

L'homme constitue un facteur important d'aggravation l'accentuation de la sécheresse par la dégradation des terres en zones sèches (Thomas, 1995). L'homme, par son action (coupes illicites, défrichements, parcours incontrôlés) a contribué à la régression des formations végétales en général et de la cédraie en particulier. Ce dernier est considéré de ce fait comme l'ennemi du cèdre de l'Atlas (Abdessemed, 1981 ; El Yousfi, 1994).

Les branches d'arbres sains sont coupées par les riverains pour leurs besoins en bois (construction des habitations, charrettes, etc.) et pour nourrir le bétail pendant la mauvaise saison.

I.2.4. Intérêt économique et écologique du cèdre

Le cèdre est une essence capable de remplir plusieurs rôles à la fois et cela malgré les conditions écologiques souvent difficiles et la surface restreinte occupée Toth (1980). Maintien d'un équilibre biologique en protégeant et en améliorant le sol (Toth, 1990).

La qualité du bois du cèdre est supérieure à celle des pins. Elle lui assure toutes sortes d'utilisations (construction de chalets, charpente, poteaux, placage, meubles rustiques (M'hirit et Benzyane, 2006), fabrication de sarcophages et de cercueils (De Vilmorin, 2003). Il peut même fournir de la térébenthine (Becker *et al.*, 1983).

Il sert également à la protection contre l'incendie, feuillage peu inflammable (Alexandrian, 1992 ; Aussenac et Valette, 1982), avec élimination de la végétation herbacée très inflammable (Toth, 1990).

Toutes ces qualités d'adaptation, a priori aux conditions climatiques et édaphiques justifient son utilisation et son reboisement (Toth, 1990 ; Bariteau *et al.*, 1992).

I.2.5. Importance du climat sur le développement des espèces végétales

Le climat est représenté par un ensemble de facteurs dont les plus importants sont la pluviométrie et la température. D'autres facteurs entre autres, l'humidité, l'insolation et le vent présentent une importance relative permettant d'expliquer certaines situations qui en dépendent (bioclimatiques, comportement des êtres vivants animaux et végétaux, etc..) locales ou régionales (Ramade, 1991).

La maîtrise de certains facteurs climatiques tels que la pluviométrie sachant que la disponibilité en eau est le premier des facteurs du milieu qui contrôlent la croissance des arbres (Loustau *et al.*, 2005).

Les espèces végétales sont plus sensibles aux températures maximales de la saison chaude et aux températures minimales de la saison froide (M'hirit, 1982). Les hautes températures peuvent avoir une influence sur la vie du cèdre et peuvent compromettre sa régénération, les températures trop basses peuvent tuer des peuplements entiers (Lapie, 1909 *in* Abdessemed, 1981). En montagne, la température devient un facteur important et limitant dans la répartition des végétaux. Au cours des cent dernières années, la température moyenne à la surface de la terre a augmenté d'environ 0.74 °C, donc le réchauffement du système climatique est sans équivoque (Rego, 2006 *in* Rached-Kanouni *et al.*, 2012).

I.2.6. Régénération naturelle

Selon Toth (1980), le problème principal des cédraies naturelles est le manque de régénération. Ce problème peut être imputé à priori en deux constats ; climatiques et socio-économiques qu'impute Boudy (1952) au pâturage excessif, au retard dans le développement de la couche herbacée, au manque d'humidité et à la présence des futaies vieillissantes.

Selon Pujos (1964), l'absence d'une réglementation forestière favorise le pâturage qui devient incontournable et/ou incontrôlable à terme. La réglementation forestière devrait à cet effet tenir compte de conditions socio-économiques locales.

Selon Toth (1984), la plupart des cédraies sont localisées dans des régions qui présentent des conditions climatiques défavorables (années sèches successives) mettant ainsi la régénération du cèdre à rudes épreuves. Boudy (1952), note que dans l'Aurès, un cycle humide est une condition indispensable pour la régénération naturelle du cèdre. Addar *et al.* (2016) ajoute que le problème de régénération est plus marqué au niveau des cédraies de basse altitude et en expositions chaudes, déficitaires en eau.

I.2.7. Résistance du cèdre à la sécheresse

La résistance à la sécheresse du cèdre réside dans son développement racinaire, profond et rapide (Grieu et Aussenac, 1988 *in* Ducrey, 1993). Selon Ducrey (1993), le cèdre ne contrôle pas très efficacement ses pertes en eau. Son adaptation à la sécheresse réside dans sa bonne croissance radiaire et sa capacité à prospecter le sol en profondeur, ce qui explique relativement son bon comportement sur sols calcaires superficiels. Comme le cèdre résiste en outre à des stress hydriques très importants, il peut supporter des dessèchements atteignant les moins 40 bars. Ce qui n'est pas confirmé par Pradal (1979) estimant que le stress hydrique se manifeste à partir de moins 16 bars. A moins 30 bars les tissus ne peuvent plus retenir leur eau de constitution intra-cellulaire et les arbres meurent rapidement.

D'après Lamhameadi et Chebouki (1994), la présence de champignons ectomycorhiziens dans plusieurs sites de la cédraie peut conférer aux jeunes semis une tolérance à la sécheresse. Ladjal (2001) a analysé le comportement écophysologique de plants du cèdre de l'Atlas âgés de 3 ans obtenus à partir de graines récoltées au sein de la cédraie artificielle française et conclut que cette espèce est adaptée à la sécheresse.

I.2.8. Conclusion partielle

Bien que le cèdre de l'Atlas se trouve dans son aire de prédilection et malgré sa rusticité, les constats de dépérissement ne font aucun doute quant à sa confrontation face à des multiples problèmes d'ordre climatiques et d'ordre anthropiques, nettement confirmés par de nombreux auteurs. Il est certain que leur approche en vue de situer le ou les facteurs contraignants, suivant des degrés spécifiques, à fait confuse un bon nombre de ces auteurs, sur certaines négations comme sur certaines vérités dont la complexité de leur résolution due aux relations complexe des facteurs, poserait à cet effet un problème durable.

I.3. DEPERISSEMENT FORESTIER

Le dépérissement est l'une des manifestations les plus inquiétantes de la dégradation des forêts. Le dépérissement et la mortalité des arbres liés au climat sont un phénomène récurrent qui a été signalé dans diverses communautés forestières à travers le monde (Williamson *et al.*, 2009 ; Allen *et al.*, 2010). Il existe plusieurs facteurs qui influent sur les écosystèmes forestiers, qui peuvent agir indépendamment ou en combinaison (Lindner *et al.*, 2010 ; Requardt *et al.*, 2007), dont les effets se superposent ou se succèdent (Drénou et Cantero, 2019).

Les forêts sont particulièrement sensibles aux changements climatiques, car la longue durée de vie des arbres ne permet pas à une adaptation rapide aux changements environnementaux (Lindner *et al.*, 2010), par rapport au rythme rapide du changement climatique actuel (Ash *et al.*, 2017 ; Visser, 2008), et le maintien du bon fonctionnement des écosystèmes forestiers (Laurent *et al.*, 2006).

Le facteur causal commun dans ces cas d'étude semble être la sécheresse et / ou des températures élevées, augmentant ainsi le risque de mortalité des arbres en réponse au réchauffement climatique et au séchage en cours (Boisvenue *et al.*, 2006), L'augmentation de la fréquence, de la durée et de la gravité de la sécheresse et du stress thermique associés au changement climatique pourrait modifier considérablement la composition, la structure et la biogéographie des forêts dans de nombreuses régions (Bert, 1992 ; Gonzalez *et al.*, 2010 ; Lévy et Becker *et al.*, 1987 ; Thuiller *et al.*, 2008).

Changement climatique, un problème préoccupant pour les chercheurs. Ce changement climatique pourrait modifier considérablement la composition, la structure et la biogéographie des forêts dans de nombreuses régions (Thuiller *et al.*, 2008 ; Gonzalez *et al.*, 2012 ; Linares *et*

al., 2011). Il modifie également la phénologie (Klein *et al.*, 2013 ; Adams *et al.*, 2015 ; Hoffmann and Sgro, 20011), la morphologie (Ciais *et al.*, 2005; Filewod et Thomas, 2014; Carnicer *et al.*, 2011), la variabilité génétique (Aitken *et al.*, 2008 ; Schultz *et al.*, 2012 ; Rehfeldt *et al.*, 2014) et la régénération (Sodhi *et al.*, 2009). Ces changements commencent à apparaître dans les régions sèches et humides (Allan *et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2012 ; Chou *et al.*, 2013).

I.3.1. Définition

Le terme dépérissement ou le déclin des forêts a été introduit dans le début des années 1980 pour décrire la mort progressive des forêts que l'on croyait se produire en Europe centrale en raison de la pollution atmosphérique (Kandler et Innes, 1995 ; Johnson et Jacob, 2010).

Le dépérissement forestier ou plus particulièrement le dépérissement des forêts » a constitué un thème environnemental de premier ordre au cours des années 1980 (Landmann, 1994). Le dépérissement des arbres forestiers est un phénomène complexe dont les facteurs responsables peuvent être très diversifiés et non aisément identifiables et hiérarchisables (Mouna, 2009). Un dépérissement est un processus évolutif, faisant intervenir de multiples causes qui agissent en synergie (Fiot *et al.*, 2007), ces facteurs agissent de façons consécutives ou concomitantes et provoquent l'affaiblissement de l'arbre et parfois même sa mort (Houston, 1967,1980 ; Dussureault 1985 *in* Laflamme, 1992). Ils peuvent être de causes purement naturelles, humaines ou une combinaison des deux (Fiot *et al.*, 2007 et Requardt *et al.*, 2007) et peut être une réponse naturelle écologique des arbres qui poussent dans des conditions inappropriées (Manion, 1981 *in* Boutte, 2007). Il se traduit pour l'arbre par une perte de vitalité progressive et des mortalités d'organes pérennes (branches, rameaux notamment chez les feuillus) ou des pertes prématurées d'aiguilles chez les conifères (Fiot *et al.*, 2007). Il est un phénomène complexe implique l'environnement, l'arbre et les facteurs nuisibles (Wargo, 1996).

On observe que le nombre de cas graves recensés à travers le monde a plus que quadruplé en 25 ans et que la tendance est en hausse quasi-constante (Allen *et al.*, 2010).

I.3.2. Facteurs du dépérissement et leurs mécanismes

La mortalité des arbres à grande échelle affecte fondamentalement une série diversifiée de processus environnementaux et de services écosystémiques (Breshears *et al.*, 2011). Pendant les accidents climatiques estivaux ou ultérieurement, quatre causes initiales de mortalité peuvent être évoquées (Mort de soif, mort de chaud, mort de faim et mort d'agression) (Venetier, 2012).

Les scientifiques évoquent le scénario conjugué de trois séries de facteurs responsables ; les **facteurs prédisposant**, agissent de façon durable et pérenne sur le peuplement (potentiel génétique, tassement du sol, appauvrissement en minéraux, changements climatiques, âge, station à faibles réserves en eau, sénescence du peuplement, site à exposition sud, ...); les **facteurs déclenchants** abiotiques ou biotiques, agissent sur une courte durée (regroupent des variables qui provoquent des stress de forte intensité mais qui agissent à court terme). accidents climatiques, pullulation d'insectes défoliateurs, sécheresse, concentration en sel, pollution, virus,...) et les **facteurs aggravants**, conduisant souvent à une issue fatale (développement de parasites de faiblesse, champignons parasites, insectes xylophages,...) (Sinclair, 1964, 1967 ; Delatour, 1983 et 1990 ; Andre et Laudelout, 1992 ; Malaisse *et al.*, 1993 ; Gagnon *et al.* , 1994 ; Manion, 1981 *in* Boutte, 2007 ; Catton *et al.*, 2007 ; SFEA, 2008).

A l'échelle des peuplements, les indicateurs basés sur l'aspect visuel de l'arbre permettent de diagnostiquer de manière rapide l'état sanitaire des arbres, afin d'appréhender plus aisément la vitalité d'un peuplement (Dobbertin, 2006). Selon Landmann *et al.* (1987) le « dépérissement forestier » est généralement apprécié par deux symptômes macroscopiques : la défoliation et le jaunissement du feuillage.

Les symptômes des dépérissements forestiers peuvent avoir été provoqués par des multitudes de conditions défavorables et/ou d'agressions fortes différentes.

Les arbres sont capables de réagir aux influences exercées par divers agents par des signes apparaissant sur leurs parties aériennes (Hartman *et al.*, 1991). Aiguilles qui roussissent puis tombent l'année suivante, cimes dénudées, colorations anormales, déficits foliaires, branches mortes sont les signes du dépérissement de la forêt méditerranéenne (Gazonneau, 2007). On constate que, lorsque plusieurs de ces contraintes se conjuguent (conditions stationnelles difficiles, pollution, salinité, vent) des phénomènes plus importants de dépérissement peuvent apparaître (Stammitti, 1992 *in* Garrec, 1994).

Les symptômes de dépérissement sont regroupés comme suit (Hartman *et al.*, 1991):

- Symptômes sur aiguilles et feuilles : chute prématurée « défoliation précoce », éclaircissement, dénudement de rameaux, de parties ou de la totalité de la couronne. Décoloration (jaunâtre et blanchâtre (chloroses), brunâtres), flétrissement, anomalies de croissance, déformation.
- Symptômes sur bourgeons, pousses et rameaux : chute des pousses, décoloration jaunâtre, flétrissement, anomalie de croissance, déformations,...
- Symptômes sur tronc et branches : chute, décoloration jaunâtre, flétrissement, écoulement de gomme ou de résine, anomalie de croissance, déformations, plaies ouvertes/cicatrisées,...

Landmann (1994), ajoute les symptômes suivants : En ce qui concerne la croissance : Réduction de la croissance de quelques années à plusieurs décennies avant l'apparition des symptômes visibles. En ce qui concerne leurs caractéristiques spatio-temporelles : dispersion au hasard (localement) des individus dépérissant (par opposition à l'action de certains pathogènes, dont l'action s'exerce de proche en proche), la persistance et l'aggravation des symptômes durant plusieurs années. Les champignons pathogènes tiennent actuellement une place importante dans ce phénomène (Jacob *et al.*, 1992).

I.3.3. Dépérissement forestier dans le monde

Les dépérissements forestiers déjà en accroissement dans le monde. Il est généralement communiqué au lieu des marges géographiques ou altitudinales d'un type de forêt ou d'une espèce forestière (Jump *et al.*, 2006).

On observe que le nombre de cas graves recensés à travers le monde a plus que quadruplé en 25 ans et que la tendance est en hausse quasi constante (Allen *et al.*, 2010). Il existe beaucoup d'exemples de dépérissement des espèces forestières cités par différents chercheurs et auteurs : Au **Maroc**, Dépérissement du chêne-liège, chêne indigène (Bakry et Abourouh, 1995), le cèdre de l'Atlas (Gazonneau, 2007) et en **Algérie** (Boudy, 1950).

Les symptômes décrits en **Italie** par Ragazzi *et al.* (1989) et Vannini *et al.* (1996) notamment sur *Quercus cerris*, suivent le scénario de déclin de *Quercus suber* au Maroc.

En **France**, le dépérissement des forêts du Pin maritime (Guyon, 1991), chêne pédonculé, chêne sessile, l'épicéa, hêtre (Laurent *et al.*, 2006 ; Yves, 2005 ; DSF, 2007), Sapin et d'Epicéa

(Landmann et Bonneau, 1995 ; Yves, 2005 ; Gauquelin, 2011) et Sapin (Chéret, 1987 ; Micaux, 2008 ; Cailleret, 2011), ajoutant le dépérissement du sapin en **Bretagne, Normandie** et aux **pays de la Loire**.

D'après Allen *et al.* (2010), des différents types de forêts, dans le monde entier, ont subi une mortalité provoquée par le stress climatique hydrique et thermique depuis 1970.

I.3.4. Dépérissement forestier en Algérie - la cédraie des Aurès -

Au niveau des Aurès, le cèdre de l'Atlas subit un dépérissement intense qui s'est aggravé ces dernières années. Ce phénomène concerne l'ensemble des cédraies des Aurès. Ce dépérissement n'est pas nouveau du fait qu'ils se situent dans des conditions écologiques marginales. Entre 1879 et 1888 une sécheresse exceptionnelle a déjà causé des dommages importants aux peuplements des Cèdres (Boudy, 1950), et une sécheresse de 1993 à 2002 (Bentouati & Bariteau, 2006 ; Kherchouche, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2013). Dans la majeure partie de la forêt, les peuplements sont soumis à divers facteurs de dégradation (précipitations irrégulières, exploitation forestière illégale, pâturage, piétinement, feux de forêts, etc.).

La végétation et le sol des régions arides se sont adaptés à des conditions de sécheresses récurrentes au cours des siècles et des millénaires passés acquérant une capacité à récupérer leurs caractéristiques après perturbation (Le Houérou, 1995).

La cédraie reste soumise à des pressions multiples conduisant à une évolution régressive des écosystèmes (Moussafir, 2007). Ce sont des forêts qui ne régénèrent plus, ces futaies sont condamnées à disparaître (Boudy, 1950), sont actuellement en état de simple survie et destinées à disparaître dans les prochaines décennies (Quezel, 1998).

L'intensité du dépérissement varie selon la station. Les peuplements les plus touchés sont ceux situés à basse altitude où le cèdre est en mélange avec le chêne vert, il touche non seulement les cèdres âgés, mais aussi les jeunes bouquets d'arbres (Bentouati, 2007), situés dans des conditions de mauvaise alimentation en eau comme les fortes pentes, sols superficiels et arbres déchaussés.

Le dépérissement des forêts s'accélère depuis 5 ans, principalement par accentuation de la sécheresse (Bariteau, 2003), probablement d'autres facteurs d'affaiblissement tels que les insectes défoliateurs ou champignons, comme l'armillaire observée chez les arbres dépérissants

ou morts, interviennent par la suite (Bentouati, 2007). L'arbre devient rapidement l'hôte des insectes et des maladies. Le dépérissement est inévitable (Lamontage, 2000).

La sécheresse prolongée de ces dernières années, ainsi que l'âge avancé des peuplements seraient les principaux facteurs ayant prédisposé le cèdre au dépérissement. L'exposition de ces massifs aux influences sahariennes a accéléré la mortalité des arbres (Bentouati, 2007).

Le dépérissement se traduit en général, à l'échelle d'un arbre, par des symptômes bien visibles au niveau du houppier : mortalité d'organes, réduction de la qualité et de la quantité du feuillage. Pour ce qui est du cèdre de l'Atlas, le dépérissement commençait par la cime de l'arbre et progressait vers la partie inférieure (descente de la cime) avec un certain écoulement de la résine sur les troncs (Figure I.2).



Figure I.2 : Dépérissement du cèdre de l'Atlas au niveau des monts des Aurès (S. Belloula, 2016).

Etat du dépérissement, est un paramètre se traduisant par le taux de perte de feuillage au niveau du houppier. Ce critère est souvent utilisé pour établir le bilan de santé des peuplements forestiers, appelé aussi : indice de transparence du houppier (Becker, 1987 ; Bert et Becker, 1990 ; Gandolfo et Tessier, 1994 ; D'Eon *et al.*, 1995 ; Thomas *et al.*, 2002). Il est basé sur une

observation visuelle, en découpant le houppier en quatre parties, en commençant par la partie supérieure « cime », jusqu'au la base du houppier vivant (D'Eon *et al.*, 1995). La partie dépérie correspond à la partie transparente qui a perdu son feuillage. En se basant sur ce critère, cinq classes de défoliation ont été définies :

- I : défoliation moins de 25% (légère).
- II : défoliation entre 25 et 50% (modérée).
- III : défoliation entre 50 et 75% (élevée).
- IV : défoliation supérieure à 75% (grave).
- V : arbre mort sur pied (100%).

I.3.5. Complexité de l'étude de dépérissement forestier

Le dépérissement forestier est en fait un processus évolutif difficile à appréhender.

L'étude du dépérissement des arbres est complexe, puisqu'il s'agit bien souvent d'évaluer plusieurs facteurs (abiotiques et biotiques) agissant simultanément sur le peuplement forestier et pendant une longue période (Benoit, 2005). Pour Lanier *et al.* (1976), l'étude des dépérissements forestiers présente de grandes difficultés en raison de la complexité des trois domaines dans lesquels ils se manifestent à savoir le sol, l'atmosphère et l'environnement biologique des arbres touchés.

Les symptômes du dépérissement forestier sont multiples et variables, certains symptômes peuvent être attribués à plusieurs facteurs différents, qui résultent une difficulté de savoir exactement le facteur qui attribue ce phénomène.

Chaque cas de dépérissement est induit généralement par un ensemble de facteurs agissant simultanément, ou les uns après les autres dans le processus de détérioration des arbres (Lanier *et al.*, 1976 ; Manion, 1981 *in* Ciesla, 1993), et parfois mal connue (DSF, 2007).

Il est donc très difficile de savoir quel facteur s'avère décisif dans une situation donnée (Gartner, 1988), De ce fait, il devient très difficile de déterminer l'ordre de l'intervention de chacun des éléments mis en cause, et la tâche est encore plus ardue s'il s'agit de définir la part des responsabilités de chacun d'eux dans le processus (Lanier *et al.*, 1976) ; dans bien des cas, les agents contributifs sont jugés responsables du phénomène alors qu'ils ne sont que des interventions secondaires.

I.3.6. Dépérissement forestier et le changement climatique

Les changements climatiques prennent une importance grandissante dans la recherche environnementale et pourraient être un des moteurs principaux de changement écologique dans les prochaines décennies (Parmesan, 2006 ; Lawler *et al.*, 2009 ; Virkkala *et al.*, 2008).

L'Afrique du Nord sera parmi les régions les plus touchées par le changement climatique (Quézel et Médail, 2017 ; Chebil *et al.*, 2011 ; Grami et Rejeb, 2015).

Le changement climatique et l'altération des cycles biogéochimiques modifient le déterminisme environnemental des espèces impactant en premier lieu leur physiologie, puis leur phénologie et de façon ultime leur distribution (Vitousek *et al.*, 1997 ; Norby, 1998 ; Hughes, 2000 ; Parmesan, 2006).

Le changement climatique impacte aussi le cycle de vie des organismes vivants (Penuelas *et al.*, 2002 ; Menzel *et al.*, 2006 ; Parmesan, 2006). En effet, la durée de la période de végétation s'est allongée dans l'hémisphère Nord au cours du 20^e s. (e.g. +29 et +10.8 jours, respectivement, en zones méditerranéennes et tempérées (Menzel & Fabian, 1999 ; Penuelas *et al.*, 2002). La floraison des arbres ainsi que la fructification ont été avancées (e.g. -6 et -9 jours, respectivement, pour la floraison et la fructification depuis 1952 et 1974 en zone méditerranéenne (Penuelas *et al.*, 2002 ; Menzel & Dose, 2005 ; Gunderson *et al.*, 2012).

Depuis les années 2000, les preuves d'un impact global du changement climatique provoquent une dégradation des écosystèmes forestiers et des changements des aires de distributions biogéographiques, et un déplacement vers les pôles et les sommets des montagnes (Walther *et al.*, 2002 ; Parmesan & Yohe, 2003 ; Root *et al.*, 2003 ; Walther *et al.*, 2005). Le déplacement altitudinal de la flore a été confirmé par de nombreuses observations similaires partout dans le monde (Pauli *et al.*, 1996 ; Colwell *et al.*, 2008 ; Kelly & Goulden, 2008 ; Parolo & Rossi, 2008 ; Jump *et al.*, 2017).

Elle correspond à une migration des aires potentielles de répartition des espèces végétales de plusieurs centaines de kilomètres vers le Nord et de plusieurs centaines de mètres en altitude (Badeau *et al.*, 2005). Au cours d'événements extrêmes tels que la canicule de 2003 en Europe, ils ont observé que des espèces fragilisées peuvent aussi dépérir (Pauly et Belrose, 2005). L'impact de ce changement peu visible sur les essences forestières (Davis *et al.*, 1986 ; Lenoir *et al.*, 2008 ; Lenoir, 2009 ; Allen *et al.*, 2010 ; Lenoir *et al.*, 2010 ; Zhu *et al.*, 2012).

L'évaluation de la réponse potentielle de la croissance des arbres forestiers au changement climatique et à la sélection de provenances optimales sont essentielles pour améliorer le taux de survie des populations d'arbres confrontées au changement climatique

(Harsh *et al.*, 2017). Ce changement climatique qu'augmente la période de végétation (Menzel & Fabian, 1999).

En effet, la durée de la période de végétation s'est allongée dans l'hémisphère Nord au cours du 20^e s. (p. ex. +29 et +10.8 jours, respectivement, en zones méditerranéennes et tempérées (Menzel & Fabian, 1999 ; Penuelas *et al.*, 2002). La floraison des arbres ainsi que la fructification ont été avancées (p. ex. -6 et -9 jours, respectivement, pour la floraison et la fructification depuis 1952 et 1974 en zones méditerranéennes (Penuelas *et al.*, 2002 ; Menzel & Dose, 2005 ; Gunderson *et al.*, 2012). Même si l'effet du changement climatique sur la dormance, la germination et la viabilité des graines n'est pas encore totalement compris, celles-ci sont aussi impactées et devraient avoir de fortes implications pour la dynamique des populations et la migration des espèces à plus large échelle (Ooi *et al.*, 2009 ; Walck *et al.*, 2011 ; Ooi *et al.*, 2012 ; Ooi, 2012). Elle correspond à une migration des aires potentielles de répartition des espèces végétales de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord et de plusieurs centaines de mètres en altitude (Badeau *et al.*, 2005). Des études similaires, réalisées en Amérique du Nord, convergent et concluent que des espèces migrent vers de plus hautes latitudes ou en altitude, lorsque la topographie le permet (Forister *et al.*, 2010 ; Hurlbert et Liang, 2012 ; Walther *et al.*, 2002).

I.6. CONCLUSION

Sur le plan écologique, les zones semi arides sont comptées parmi les zones les plus fragiles pour le cèdre de l'Atlas. Les peuplements sont soumis à divers facteurs de dégradation (coupes illicites, pâturage, piétinement, ...). Ils n'ont guère eu des opérations sylvicoles appropriées pour leur renouvellement.

Actuellement, ils subissent une forte dégradation qui s'est aggravée ces dernières années. Il est primordial de mettre en évidence les facteurs déterminants du dépérissement forestier afin de minimiser l'impact du climat par une gestion sylvicole bien adaptée (Beloula, 2010).

Malheureusement, ce n'est pas seulement le cèdre de l'Atlas qui est en état de dépérissement, d'autres espèces tels que le pin d'Alep, chêne vert souffrent aussi suite aux sécheresses répétées.

L'avenir d'existence du cèdre de l'Atlas est incertain dans son air naturel. Et cela, nous exigeront de poser la question suivante : Est-ce que le cèdre de l'Atlas est vraiment en voie de disparition ? Pour répondre à cette question, cela mérite une étude pluridisciplinaire et une connaissance approfondie de la zone d'étude.

Chapitre II

SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CONTEXTE ÉCOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE



Chapitre II

SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CONTEXTE ÉCOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. INTRODUCTION

L'Aurès est une prolongation Est de l'Atlas saharien, et un assemblage de plusieurs montagnes les plus escarpées de l'Afrique du Nord (Laffitte, 1939). C'est la région la plus élevée dans le Nord de l'Algérie avec une altitude de 2328 m (Ras-Keltoum, Chelia).

L'Aurès est connu par des forêts montagneuses qui présentent une biodiversité des essences qui les occupent. Le cèdre de l'Atlas est parmi les espèces les plus dominantes.

L'objectif de ce chapitre est la description écologique, pédologique et climatique de la zone d'étude (Ouled Yagoub et Chélia).

II.2. ETUDE DU MILIEU PHYSIQUE D'AURES

II.2.1. Situation géographique

La zone d'étude se situe sur les deux wilayas de batna et de khenchela, prolongement de la chaîne des monts des Aurès dans sa partie nord-est.

Elle est limitée au Nord par la ligne Batna-Khenchela, à l'Est par la ligne Khenchela-Sidi-Nadji et à l'Ouest par la ligne Batna-Biskra (Figure II.1).

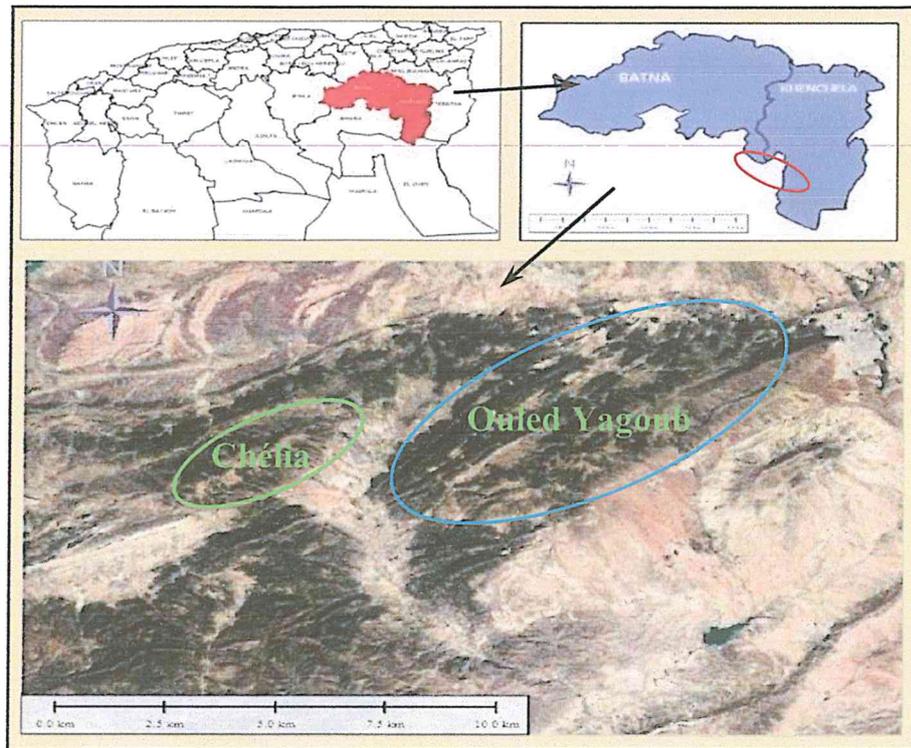


Figure II.1 : Carte de situation régionale de la zone d'étude (S. Belloula, 2018).

II.2.2. Contexte écologique

II.2.2.1. Relief

Tout en surplombant de vastes plaines, notre zone d'étude présente un relief, généralement accidenté avec des sommets constitués par des dômes arrondis et un ensemble de plis montagneux avec une multitude d'axes à orientations diverses ouvertes sur de larges vallées.

Selon Lafitte (1939), Le caractère particulier de ces montagnes, leur a valu d'être la seule région naturelle de l'Afrique du Nord à laquelle l'usage ait conservé son nom sans interruption depuis « l'époque romaine ».

II.2.2.2. Sols

Les sols de la région des Aurès, restent dans leur ensemble insuffisamment connus des pédologues. Les rares approches du bureau national d'études pour le développement rural (BNEDER, 2001) et ministère de l'agriculture et du développement rural (MADR, 2003) pour la différenciation des principaux substrats ont permis de dégager une configuration sommaire mettant en exergue la constitution suivante :

Les sols alluviaux basiques, ils se caractérisent par une profondeur importante, une charge caillouteuse moyenne (galets et cailloux), une texture équilibrée sablo-limono-argileuse, une capacité d'échange cationique importante, un pH légèrement alcalin, calcaire.

Les sols insaturés humifères, ils caractérisent les parties accidentées et ils sont de texture limono-sabloargileuse. Les carbonates y sont rares.

Les sols salins (halomorphes), ce sont des sols profonds à texture lourde, non structurés, compactes et moins aérés.

Les sols calcaires humifères, ils se situent sous couvert forestier. Ils sont fortement caillouteux (cailloux et pierres).

Les sols éoliens d'ablation, ils se caractérisent par une faible profondeur, une charge caillouteuse élevée et une structure moins favorable.

Les sols éoliens d'accumulation, ils se localisent sur les formations sableuses fixées. Ils sont peu évolués reposant sur substrats altérés.

Les sols calciques, ce sont des sols assez profonds saturés à plus de 90% par du calcium, le pH est légèrement basique à alcalin. La structure est grenue ou finement polyédrique.

II.2.2.3. Géologie

Selon Lafitte (1939), les principales formations géologiques marquant la région des Aurès peuvent être décrites selon les trois séries suivantes :

Série secondaire est constituée par les principales formations décrites comme suit :

Le jurassique - Le trias caractérisé par des formations de roches gypseuses et de sel gemme avec des marnes bariolées (cas des régions de Menaâ, Medina, Tazoult, ...); **Le Himmeridjien**, localisé dans les régions de Oued el-abiad, Djebel El-Azreg et Nara; **Aptien**, marnes grès masses calcaires, calcaires à orbitolites (djebel Fedjouj); **l'Albien** et le **Cénomani** existent dans tous les anticlinaux de l'Aurès sur des assises du crétacé inférieur caractérisé par des grès et des calcaires (cas de Djebel Bouarif, Djebel Ich-Ali, El-Azreg, Ahmar khaddou, Chelia); **le Turonien** occupe de très grandes surfaces au nord/ouest de l'Aurès entre Djebel Ich-Ali et Djebel Iguedelen et au sud de Djebel Celia. Il se caractérise par du calcaire et des marnes; **Le sénonien** existe dans tous les anticlinaux de la région avec des crêtes constituées un faciès calcaire massif (cas de Metliti, Igguedeen, Beni-Ferah).

Séries tertiaires est très bien représentée dans tous les synclinaux de l'Aurès. Elle est formée essentiellement de marnes, poudingue, galets et grès de calcaires avec des bancs, marnes et calcaires marneux; **Le Néogène** : Il est développé dans les plaines facilement accessibles de la périphérie des Aurès entre Biskra et Kantra; **Le**

Miocène marin constitué par des dépôts côtiers dans les vallées des Aurès. Dans la vallée d'Oued Abdi on trouve le calcaire, du grès et des marnes ; **Miocène Helvétien**, marnes argiles près en couches minces calcaires jaunes (vallée d'El Kantara, poste optique de Selloum); **Le Néogène continental** est formé de grès, de sables, d'argiles rouges et de poudingues rouges. **Éocène**, Schistes et calcaires marneux (environs de Khenchela) ; **Oligocène**, conglomérats gréseux, schistes marneux (environs de Chemora) ; **Pliocène**, marnes et grès lacustres avec gypses (nord du Hodna, Sahara).

Série quaternaire est un terrain récent et largement répandu à la périphérie de l'Aurès mais qui sont rares dans le centre du massif. On rencontre aussi des éboulis situés au pied des crêtes constituant un ensemble de blocs qui reposent sur les marnes au pied du relief.

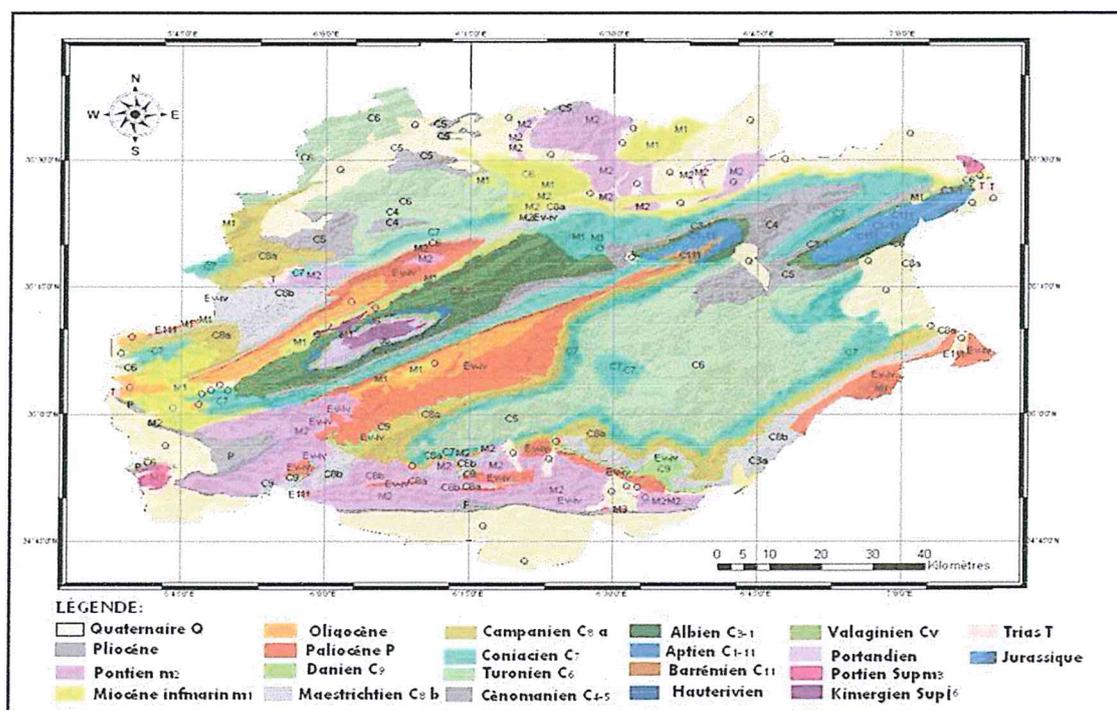


Figure II.2 : Carte géologique des Aurès (Lafitte, 1939 ; Benmessaoud, 2010)

II.2.2.4. Couvert végétal

Le massif des Aurès se caractérise par des formations végétales diversifiées développées mettant en évidence un étagement et une stratification avec des délimitations tant distinctes qu'intermédiaires juxtaposées selon leur dominance biophysique. Les sommets dominés par la formation de « cédraies » surplombent celles plus associées ou se juxtaposent des populations de chênes, de pins et de genévriers, prolongées plus en aval par un maquis relativement dégradé soumis à une exploitation anarchique et non protégée contre un élevage non organisé (Abdessemed, 1981).

A noter l'existence d'enclaves steppiques à base d'alfa (*stipa* sp), d'armoïse (*artémisia* sp), etc. Ces dernières peuvent constituer des espaces de parcours appréciables, bien qu'elles soient d'une qualité inégale, et souvent dégradées.

II.2.2.5. Potentiel agricole

La région d'étude présente un potentiel agro-sylvo-pastoral d'un impact socio-économique non négligeable. Ce dernier (potentiel) trouve sa qualification et sa valeur, tant du point de vue quantitatif que qualitatif, dans la spécificité des caractéristiques physiographiques soit des vallées fertiles à prédilection agricole et prémonitoires d'un développement durable intégré soit des versants de montagnes avec leurs peuplements variés à base de pins, de chêne, de genévrier et de cèdre avec en intermédiaire avec les plaines, s'étendent des bas versants moins accidentés à prédilection pastorale (Abdessemed, 1981).

II.3. ETUDE DU MILIEU PHYSIQUE DES STATIONS

La zone d'études se divise en deux stations : celle du mont de Chélia, la seconde est d'Ouled Yagoub.

II.3.1. STATION DE CHÉLIA

II.3.1.1. Situation de la zone d'étude

Le mont du chélia (35°18 et 35°22 lat. N. et 6°37 et 7°05 long. E.), est situé au nord du massif des Beni-Imloul. Il est limité au Nord par des parcelles forestières et agricoles limitrophes de l'Oued Tahla, au Sud par Oued El Asker et la route reliant Bouhmama à Médina, à l'Ouest par de hautes pelouses et à l'Est par la série Kantina (Figure II.3).

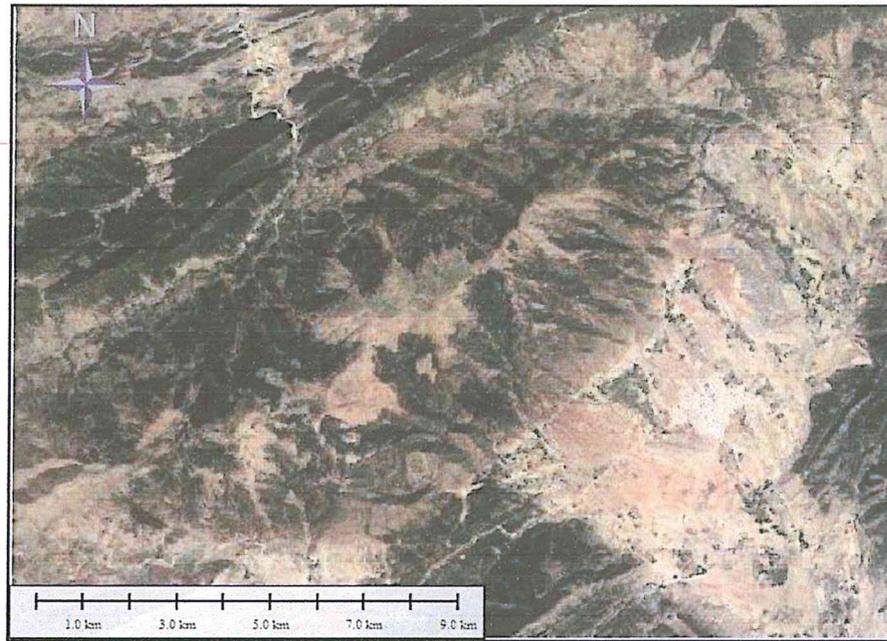


Figure II.3 : Carte de situation, Chélia (Google Earth, 2018).

II.3.1.2. Topographie

Le massif montagneux du Chélia est à orientation sud-ouest à nord-est avec une altitude moyenne de 1815 m avec pour point culminant le mont « Ras keltoum » (2326 m). Son relief très accidenté cerne toutefois un grand nombre de vallées et d'oueds où s'est agglomérée une population pratiquant une agriculture de subsistance.

II.3.1.3. Géologie

Selon Lafitte (1939), Faurel *et al.* ; (1949) et Schonenberger (1970), les cédraies de Chélia sont développées sur des formations de grès et de dolomies datant du Crétacé Inférieur.

L'étude réalisée dans le cadre du Grand projet Aurès, par la GTZ (bureau d'étude allemands, 1982) a permis de décrire les formations en place lesquelles seraient constituées par du grès entremêlés de calcaire dans des proportions différentes, ou un calcaire avec des intercalations gréseuses, qui datent du Barrémien de l'aptien et de l'albien. Sur le versant nord et au dessous de 1500 m d'altitude on rencontre des formations de plaques de schistes. Contrairement au versant sud les stations de schiste sont très rares et sont recouvertes d'éboulis effrités de calcaire ou de marnes. On rencontre ces formations schisteuses sur des pentes peu inclinées et boisées de chêne vert ou du pin d'Alep (BNEDER, 2001). D'une façon générale le grès constitue dans la plupart des cas, la roche-mère de ce massif.

II.3.1.4. Pédologie

L'étude pédologique réalisée par la GTZ (1982) aura permis de caractériser les sols du mont du Chélia comme ayant une faible profondeur, à faible évolution et non lessivés, caractérisés par l'humus de type mull calcique avec un horizon A₀ très mince. La texture est limono-argilo-sableuse à pH légèrement neutre (GTZ., 1982). L'absence d'un véritable horizon B peut s'expliquer par la localisation des sols sur les fortes pentes subissant une forte activité érosive favorisée surtout par la dégradation du tapis végétal. La charge caillouteuse est élevée en profondeur surmontant un matériau parental de type marno-calcaire.

II.3.1.5. Végétation

La superficie occupée par la végétation a été estimée à 3986 ha (Office national des forêts 'ONF', 1990), cèdre de l'Atlas (2040 ha), pin d'Alep (757 ha), chêne vert (983 ha), Parcours (1960 ha) et enclave (82 ha).

La séquence tant longitudinale que latitudinale et qui semble être expliquée par ce qu'on peut appeler un dualisme bio physiographique à l'origine tant des délimitations que des subdivisions et stratifications phyto-sociologiques que Schoenberger (1970) décrit comme suit :

La pelouse de haute montagne (2200 - 2300 m), la cédraie de haute montagne (2000-2200 m), la cédraie à chêne vert (1600-2000 m), la pinède à chêne vert (1400-1500 m), la pinède à romarin (< à 1400 m). D'après Schoenberger (1970), le pin d'Alep, avec un sous-étage de chêne vert, représente l'essence climacique et forme une futaie pseudo-équienne, caractérisée par une proportion élevée d'arbres âgés.

Dans les peuplements dégradés, le chêne vert cède plus ou moins la place au ciste (*Cistus villosus*) (surtout après incendie), au romarin (*Rosmarinus officinalis*), à la globulaire (*Gloubularia alypum*), et à l'alfa (*Stipa tenacissima*).

La dégradation de la pinède permet au genévrier de phénicie (*Juniperus phenicia*) caractérisant l'étage semi-aride inférieur à hiver frais, de se développer avec le Diss (*Ampelodesma mauritanica*) qui appartient à l'étage subhumide inférieur.

II.3.2. STATION D'OULED YAGOUB

La cédraie des Ouled Yagoub ($35^{\circ}18'$ et $35^{\circ}22'$ lat. N et $06^{\circ}37'$ et $7^{\circ}05'$ long. E), est située à l'extrémité Nord-Est du massif des Aurès, dans sa partie orientale. Elle est limitée au Nord par la route Khenchela-Kais, au sud-ouest par la vallée d'Oued Mellagou, et est contournée au sud-est par les massifs de Chentgouma, Ain guiguel et Ain mimoun (Figure II. 4).

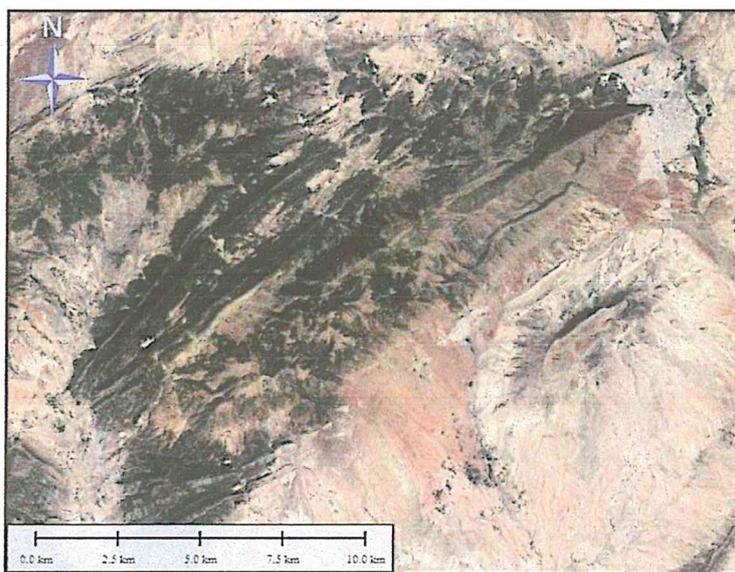


Figure II.4 : Carte de situation, Ouled Yagoub (Google Earth, 2018).

II.3.2.1. Relief

La cédraie des Ouled Yagoub présente un relief escarpé à orientation sud-est /nord-ouest surelevée par les principaux djebels : Bezez (2141 m), Aidel (2092 m), Feraoun (2093 m), Chentgouma (2112 m) et enfin Ras Sardoun (1700 m).

II.3.2.2. Géologie et Pédologie

Selon Faurel *et al.* (1949), dans la cédraie des Ouled Yagoub les substrats géologiques sont variés et à base de conglomérats gréseux-calcaires, calcaires, grès-siliceux, dolomie avec quelques poches de marne et de schiste.

Selon l'étude réalisée par le Bureau national d'études forestières (BNEF) (1983), les sols de la cédraie des Ouled Yagoub ne sont pas assez profonds en raison de leur lente évolution, ce qui leur donne l'aspect de sols relativement jeunes caractérisés par un horizon de surface très mince, à lessivage limité ou lent ayant pour conséquence la lente formation d'un véritable horizon B. A noter la formation d'un mull de type mull calcique, une texture limono-argilo-sableuse, une charge caillouteuse élevée dans l'horizon C, et une roche mère à dominance

gréseuse ou ferrugineuse ainsi que par des marnes ou du calcaire plus ou moins fissuré, dolomies ou calcaires dolomitiques.

II.3.2.3. Végétation

L'occupation estimée de la végétation au niveau du massif d'Ouled Yagoub (BNEF, 1983) est comme suit : cèdre de l'Atlas (3240.12 ha), pin d'Alep (1009.4ha), chêne vert (2968.34ha), parcours (2074.03ha).

Toujours, selon le BNEF (1983), l'aire de la cédraie des Ouled Yagoub se caractérise par cinq types de peuplements :

- *Les pelouses de haute montagne* (2000-2200 m), situées sur les crêtes et les sommets des montagnes, caractérisées par l'absence de toute végétation arborée ou arbustive avec la présence toutefois d'une végétation herbacée très basse et assez riche en espèces. Ces pelouses sont les lieux de prédilection des troupeaux de toute la zone qui pacagent surtout durant l'été et le printemps.

- *La cédraie de haute montagne* (1800-2000 m), caractérisée par l'absence de chêne vert. Elle croît dans des conditions difficiles à cause des vents violents. Les sols sont squelettiques et les fortes pentes semblent être à l'origine de la croissance et de la régénération. Les arbres sont trapus et regroupés en bouquets de densité irrégulière. Ce sont en général des peuplements de protection ou des zones improductives.

- *La cédraie à chêne vert* (1600-1800 m), peuplements plus répandus et bien-tenants avec des arbres bien élancés, dépassant souvent une hauteur de 20m. Il a été constaté que les peuplements se régénèrent bien dans des trouées créées soit à la suite d'incendie soit grâce à des coupes.

- *Le chêne vert* est en association soit avec le cèdre soit avec le pin d'Alep. Il est soit à l'état pur sous forme de taillis bien-venants, soit formant un maquis dégradé en présence du genévrier oxycèdre et du frêne dimorphe sur les versants sud et au voisinage des habitations.

- *La pinède à chêne vert* (1200-1500 m), localisée sur le djebel Tizi Ala à la limite de la série de djebel Feraoun. C'est une futaie qui se régénère bien, avec des arbres bien élagués, dépassant les 15 m de hauteur.

- *Essences secondaires* : Elles sont en association avec le cèdre ou le chêne vert ce sont particulièrement : l'if (*Taxus baccata*), l'érable de Montpellier (*Acer monspessulanum*), le sorbier (*Sorbus aria*), le frêne dimorphe (*Fraxinus dimorpha*), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), l'aubépine (*Crataegus lanciniata*).

II.4. CLIMAT

Le climat représente un des facteurs les plus importants. Son importance se manifeste par la répartition des biomes à l'échelle de la planète (Tuhkanen, 1980 ; Godron, 1984 et Braque, 1988), en effet il est utile de connaître la durée de la saison sèche, les quantités des précipitations et les différents facteurs climatiques (gelée, neige, vent...) pour avoir une idée précise sur le climat de la région.

La maîtrise de ce fait, de certains facteurs climatiques tels que les hauteurs pluviales sachant que la disponibilité en eau est le premier des facteurs du milieu qui contrôlent la croissance des arbres (Loustau *et al.*, 2005), la température, l'humidité relative, l'insolation et le vent) est prépondérante et est nécessaire pour comprendre le développement végétatif en place et expliquer les effets contraignants sur ce même développement.

Les données climatiques considérées dans notre étude portent sur une période de 33ans (1985-2018), ont été prélevées au niveau de la station météorologique de Batna.

Les données climatiques considérées dans notre étude portent sur une période de 34ans (1983-2017), ont été prélevées au niveau de la station météorologique de Khenchela (El-Hamma).

II.4.1. Précipitation

Sachant que la pluviométrie augmente au fur et à mesure qu'on s'élève en altitude et que les versants nord sont plus pluvieux que les versants sud ; (Seltzer, 1946, *in* Benissad, 1992), préconise une élévation de 40 mm pour 100 m d'altitude sur les versants exposés au nord alors que pour les versants sud, Le Houerou *in* Abdessemed (1981) donne une élévation de 20 mm pour la même altitude (100 m).

De grosses averses parfois très fortes et très intenses, sont fréquentes durant les périodes les plus chaudes étalées entre les mois de mai et septembre. Elles sont accompagnées parfois par de la grêle.

Pour la présente étude, les données climatiques utilisées proviennent :

- De la station d'Ain skhouna/Aéroport (Batna) pour une série d'observation (1984-2018).
- De la station météorologique (O.N.M) de Khenchela, située à environ 25Km au sud du périmètre d'étude pour une série d'observation (1983-2017).

Tableau II.1: Répartition des précipitations moyennes mensuelles

Station	Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Total
Batna (1985-2018)	P	32.46	24.87	31.91	40.54	31.10	19.35	8.02	16.13	31.57	25.42	32.17	35.21	328.75
Khenchela (1983-2017)	(mm)	41.06	32.08	42.35	50.89	44.22	30.16	13.13	32.31	42.74	38.82	43.77	41.29	452.85

La pluviométrie moyenne mensuelle calculée disponibles à la station météorologique d'Ain skhouna (Batna) est de 328,75 mm avec la valeur la plus basse (8,02mm) observée dans le mois de juillet. Cependant, l'analyse quantitative des apports pluviométriques annuels relevés sur cette même période indique une évolution irrégulière des précipitations d'une année à l'autre et met en relief une variation régressive dans son ensemble avec le temps.

La répartition moyenne mensuelle de la pluie est variable (Khenchela), ainsi, les données enregistrées montre que Juillet est le mois le plus sec (13.13mm) et qu'Avril est le mois le plus pluvieux (50.89mm).

La région d'étude est marquée par des précipitations irrégulières et par des périodes de sécheresse fréquente. D'ailleurs, il s'agit de l'une des caractéristiques du climat algérien qui tend vers l'aridité (Halimi, 1980).

II.4.2. Température

Représente un facteur limitant de toute première importance car elle conditionne la répartition de la totalité des espèces (Ramade, 2003).

Les espèces végétales sont plus sensibles aux températures maximales de la saison chaude et aux températures minimales de la saison froide (M'hirit, 1982).

Si les températures trop hautes peuvent avoir une influence sur la vie du cèdre et peuvent compromettre sa régénération, les températures trop basses peuvent tuer des peuplements entiers (Lapie, 1909 in Abdessemed, 1981).

Tableau II.2: Répartition des températures moyennes mensuelles

Station	Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Batna (1985-2018)	T (°C)	5.76	6.77	9.72	12.84	17.65	23.03	26.43	25.85	21.25	16.29	10.49	6.73
Khenchela (1983-2017)	T (°C)	8.40	9.47	12.30	16.57	22.38	28.48	32.83	32.26	26.32	21.59	14.09	8.68

En montagne, la température devient un facteur important et limitant dans la répartition des végétaux.

Batna : Les températures moyennes mensuelles enregistrent durant la période 1985 - 2018, un maximum de 26,43°C au mois de juillet. Le minimum des températures moyennes 5,76°C est enregistré au mois de Janvier (Tableau II.2).

L'analyse des variations des températures moyennes mensuelles de la région Khenchela (Tableau II.3) montre la température maximale est du mois de juillet (de l'ordre de 32.83°C). La température la plus froide est observée en janvier avec une valeur de 08.40°C.

Les températures moyennes enregistrent durant la période 1985 - 2018, un maximum de 25,8°C au mois de juillet. Le minimum des températures moyennes 5,8°C est enregistré au mois de Janvier.

II.4.3. Autres Facteurs Climatiques

II.4.3.1. Vents

C'est l'un des paramètres les plus importants et les plus caractéristiques du climat .il a une influence sur la température, l'humidité relative de l'aire et l'évapotranspiration par leur action les vents modifient le régime normal des pluies, provoquent des chablis et peuvent empêcher le développement d'espèces à enracinement superficiel.

Dans les Aurès les vents sont souvent de direction Sud, ou Est. En effet, ils prennent des directions diverses. On note surtout les vents secs. Le vent a une influence directe sur les températures et l'humidité et l'activation de l'évapotranspiration.

Selon leurs origines, les vents jouent des rôles opposés :

- Les vents du Sud (sirocco), chauds et secs surtout durant la période estivale où ils accentuent l'aridité. Ils soufflent pendant 20 jours au cours de l'année avec un pic de 5 jours pour le mois de juillet.
- Les vents dominants d'hiver Nord -Nord/Ouest qui sont des vents pluvieux et frais arrosent les faces Nord et Nord Ouest du Parc National.
- Les vents sont définis par leurs directions leurs intensités et leur vitesse. Ils augmentent l'ETP et par conséquent ils accentuent la sécheresse.

II.4.3.2. Orages

Caractérisés par de grosses averses donnant parfois des précipitations très fortes et très intenses, ces orages sont fréquents durant les mois les plus chauds (Mai à Septembre). Parfois ils sont accompagnés par la grêle.

L'enneigement : La durée et l'intensité des neiges sont irrégulières. Le nombre de jours de neige par année est de l'ordre de 20 à 30 jours. La neige peut persister sur les expositions nord au-delà du mois d'Avril.

Les gelées : Les gelées sont fortement influencées par l'altitude et engendrées par les basses températures. Elles sont fréquentes en hiver et surtout au printemps. Elles provoquent des graves dégâts sur les jeunes plantes.

La gelée s'observe à partir du mois de novembre pour atteindre le maximum durant la période de décembre à février. Leur fréquence, est assez importante surtout en période hivernale où les moyennes des minimas peuvent atteindre -1°C .

Comme les gelées sont fortement influencées par l'altitude et les basses températures, elles sont de ce fait assez fréquentes en hiver, à partir du mois de novembre pour atteindre le maximum entre décembre et février.

Le sirocco : La fréquence et l'intensité du sirocco sont unitiles en raison de son action néfaste sur les cultures. Il représente un danger pour les cultures de printemps.

Le sirocco, chaud et sec surtout durant la période estivale où ils accentuent l'aridité. Ils soufflent pendant 20 jours au cours de l'année avec un pic de 5 jours pour le mois de juillet (Batna). Le nombre moyen de jours de sirocco varie entre 1 à 1.66 entre septembre et juillet. Le point est observé en juillet avec 1.66 jours. Le total annuel est de 08 jours (Khenchela).

II.4.4. Caractéristiques du climat

II.4.4.1. Diagramme ombrothermique de Gaussen

Bagnouls et Gaussen (1953) considèrent qu'un mois est sec quand le total des précipitations exprimées en millimètre est égal ou inférieur au double de la température moyenne exprimée en degré celsius.

Le tracé du diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen à partir des données climatiques de la station d'étude, montre une période sèche qui s'étale sur presque cinq (5) mois à partir de Mai jusqu'au mois de Octobre pour Batna (Figure II.8) et une période sèche qui s'étale

sur trois mois et demi à partir de Juin jusqu'à la moitié du mois de Septembre pour Khenchela (Figure II.9).

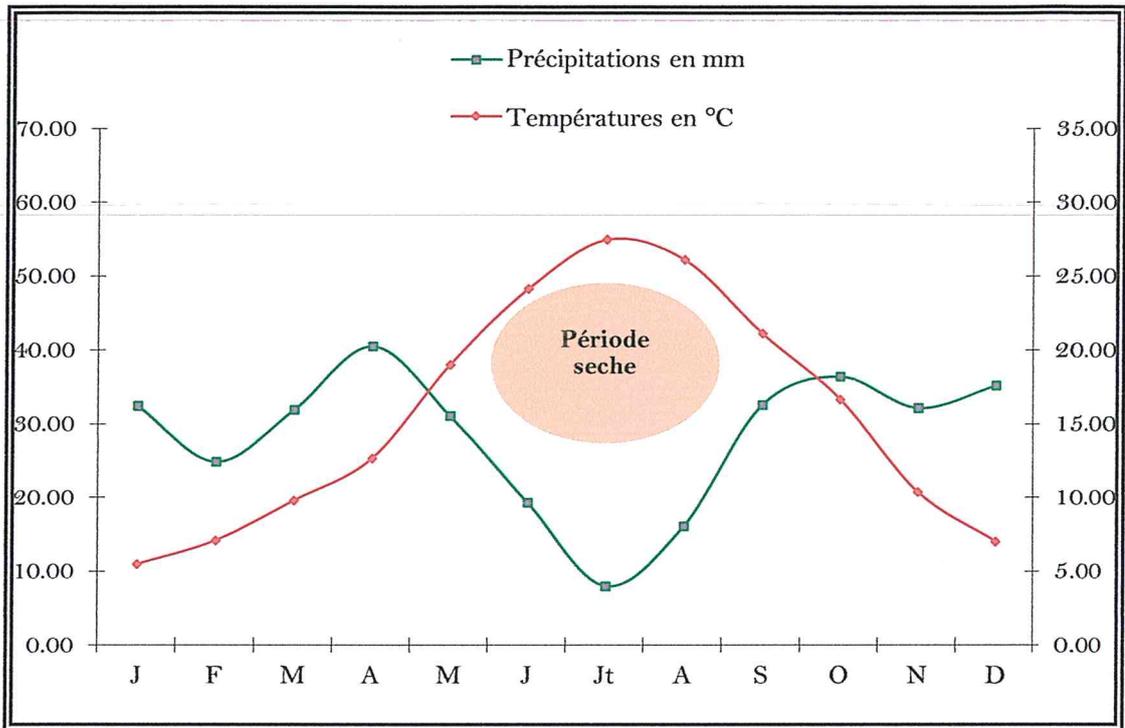


Figure II.5 : Diagramme ombrothermique de Gausson (Batna : 1985-2018).

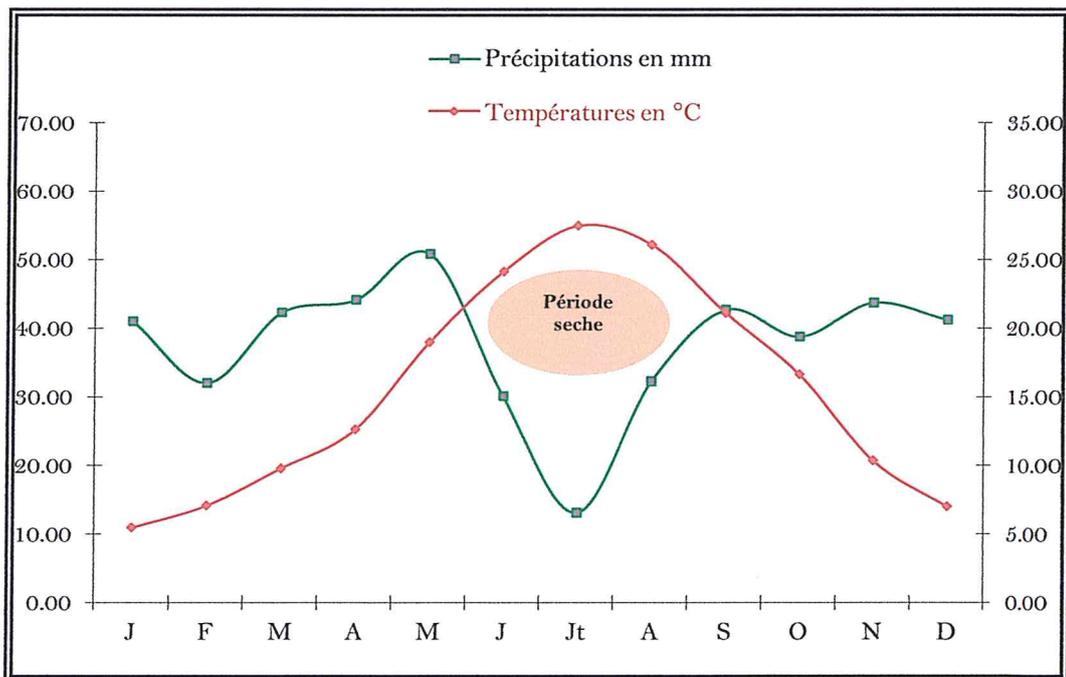


Figure II.6 : Diagramme ombrothermique de Gousson (Khenchela : 1983-2017).

II.4.4.2. Quotient pluviométrique d'Emberger et étage bioclimatique

En 1939, Emberger proposa une formule permettant le calcul de l'indice d'aridité.

Cette formule est : $Q = 1000 P / (M+m/2 (M-m))$

Ce quotient a été simplifié par STEWART (1969) (in Meddour, 1983), et propose

$$Q = 3,43 \times P / M-m$$

Où :

P : Précipitation annuelle. M : Température maximale du mois le plus chaud.

m : Température minimale du mois le plus froid.

Donc, dans notre zone d'étude on a :

Batna : P = 328,75 mm ; M = °C ; m = °C

$$Q = 3,43 * 328,75 / (34,5 - 0,3) \qquad \mathbf{Q2_{(1)} = 32,97}$$

Khenchela: P = 437, 19mm ; M = 34,7°C ; m = 2,74 °C

$$Q = 3,43 * 452,85 / (34,7 - 2,74) \qquad \mathbf{Q2_{(2)} = 48,60}$$

II.5. CONCLUSION

Le climat dans notre zone d'étude est méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride frais, avec des précipitations irrégulières et faibles (entre 328.75 et 452.85 mm/an). On y distingue deux périodes contrastées, une période humide et froide, l'autre sèche et chaude. Les précipitations estivales sont souvent des pluies torrentielles et les températures présentent des amplitudes importantes. Les mois de Janvier et Février sont les mois les plus froids durant toute l'année (0.3°C ; 2.74°C) et le mois de Juillet et Août sont les mois les plus chauds (34.5°C ; 24.7°C). Le vent est de direction dominante NW avec une présence du vent chaud (sirocco) pendant la période estivale qui peut accélérer le phénomène de l'érosion éolienne dans les zones dépourvues de couvert végétal.

De ce fait nous pouvons dire que le climat de l'Aurès est caractérisé par trois situations : sécheresse estivale, froid hivernal, et amplitude thermique importante.

Les conditions climatiques semblent jouer un rôle dans le dépérissement du cèdre de l'Atlas. L'ensemble de la région est soumis à des périodes de sécheresse (elles peuvent être longues, leur impact devenant très important malgré l'existence des années pluvieuses.

L'augmentation de la fréquence de ces sécheresses et la diminution notable de la moyenne annuelle des précipitations ont été présentées comme des causes probables du phénomène de dépérissement et elles risquent de changer radicalement la répartition des peuplements végétaux (Lévy et Becker, 1987 ; Bert et becker, 1990).

Selon El-tobi *et al.* (2009) ; Mokrim (2009) ; Zine El Abidine & Aadel, (2009) et Beloula (2010), la concurrence avec les chênes, pour les ressources en eau suite à plusieurs années de sécheresse, a probablement été la cause principale du déclin. Les sécheresses épisodiques et récurrentes prolongées combinées à des températures élevées sont parmi les principaux facteurs responsables de l'affaiblissement physiologique des arbres et une vulnérabilité accrue à d'autres processus de désintégration physiologique (Mcdowell *et al.*, 2008 ; Adams *et al.*, 2010 ; Choat *et al.*, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2013).

Le cèdre de l'Atlas est menacé par sa disparition si les perturbations climatiques persistent. Les forestiers, eux, assistent incapables face à la coupe massive du cèdre dépéris comme un traitement final, avec l'attente de la régénération naturelle.

l'analyse de séries historiques des relevés forestiers montre une remontée en altitude des espèces de sous-bois qui est corrélée à la température (Lenoir *et al.*, 2008)

L'évolution des cédraies et son cortège forestier dans le temps et dans l'espace et leur développement est nécessaire de les connaitre comme une première étude (cela se vois dans le chapitre suivant).

Chapitre III

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DU DÉPÉRISSEMENT DU CÈDRE DE L'ATLAS



Chapitre III

ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DU DÉPÉRISSEMENT DU CÈDRE DE L'ATLAS

III.1. INTRODUCTION

L'étude de l'évolution spatio-temporelle du dépérissement du cèdre de l'Atlas est nécessaire pour voir son dynamique dans le temps et dans l'espace.

Les images satellitaires sont très riches en informations de toutes sortes. L'information obtenue par les images satellitaire permet non seulement de créer et de mettre à jour des cartes, mais elle permet aussi d'analyser divers aspects du territoire. Elle permet d'étudier différent types d'indices.

Et afin d'atteindre l'objectif de ce chapitre, on a dirigé vers différent discipline comme la cartographie, Système d'information géographique et la télédétection dont l'utilisation de la méthode de comparaison diachronique des images satellitaires Landsat est maintenue.

Cartographie, nous a permis d'avoir une idée sur le relief de la zone d'étude et nous permettra de caractériser les habitats naturels suivant un gradient topographique. Ceci permettra également de comprendre la distribution spatiale des différentes formations végétales en fonction du gradient topographique. La cartographie de la zone d'étude et de la cédraie est réalisée à partir d'une carte de végétation (Khenchela, Batna) et des relevés de GPS.

Télédétection et SIG, afin d'étudier la dynamique des cédraies, le SIG et la télédétection sont les deux moyens les plus utilisés.

Il existe diverses méthodes pour lier et expliquer la structure, la composition et le fonctionnement de l'environnement. Parmi ces méthodes, les outils de la géomatique (télédétection, SIG) occupent une place de choix.

De nos jours, La télédétection offre un moyen de quantifier la fréquence et l'étendue des perturbations à l'échelle mondiale pour détecter et estimer le taux de conversion des terres (Desclée, 2006), pour prévoir la vulnérabilité des forêts et la propagation des insectes (Garrity, 2013). Cette approche est très efficace dans l'extraction du changement de forêt. La détection des changements, qu'elle soit bi-temporelle ou multi-temporelle, est l'une des principales applications des données de télédétection (Jianya *et al.*, 2008 ; Campbell et Wynne, 2011). La télédétection est devenue un outil important pour rassembler et surveiller la dynamique de la couverture

terrestre, et de nombreux algorithmes ont été développés pour détecter les changements de la couverture terrestre (Hansen et Loveland 2012 ; Tewkesbury *et al.*, 2015).

Depuis le début des années 1990, la télédétection spatiale à moyenne résolution (notamment avec les capteurs AVHRR, VEGETATION, MODIS) a montré son utilité pour suivre la dynamique temporelle du développement de la végétation terrestre et sa phénologie à échelle régionale ou continentale (Myneni *et al.*, 1997, Zhang *et al.*, 2003, Fisher et Mustard, 2007, Zurita-Milla *et al.*, 2009).

L'imagerie Landsat est largement utilisée pour la surveillance de la couverture terrestre et l'analyse de détection des changements. L'utilisation des analyses de séries chronologiques, comparer les indices de végétation et les modifications de la couverture terrestre permet une bonne amélioration de la surveillance et de la détection des changements globaux (El-Aziz, 2013 ; Jia *et al.*, 2014 ; Li *et al.* 2014 ; Chen *et al.*, 2015). Elles sont descriptives et apportent une information spatiale, beaucoup plus importante par rapport aux autres sources d'information (Pouchin, 2001).

Les capacités d'utilisation des images satellitaires pour l'identification des zones dépérissant, déforestation illégale, et la prédiction des zones susceptibles d'être déboisées dans le futur sont utilisées de plus en plus.

Les traitements d'images satellitaires utilisées, comme la classification d'indices de végétation (NDVI), permettent la caractérisation du couvert. La comparaison de deux cartes NDVI nous a permis une visualisation des changements de la zone d'étude.

III.2. MATERIELS ET METHODES

III.2.1. Matériels

- **Images satellitaires:** Les images utilisées sont de type Landsat téléchargeable à partir du serveur internet Glovis de l'*United States Geological Survey* (USGS), couvrant notre région d'étude, elles sont de saison sèche, sans nuages. D'une scène d'images satellitaires (1987, 1995, 2003 et 2016).
- **Cartes :** Topographique, de végétation, du sol.
- **Appareil photo** numérique de marque OLYMPUS (Full résolution : 14.5 Megapixels) pour la prise des photos sur le terrain.
- **ERDAS Imagine 9.2 :** est un puissant logiciel de télédétection et d'analyse d'images. Il combine la **télédétection** et les possibilités SIG, permettant ainsi de créer des données géospatiales, d'extraire le maximum d'informations et de **mettre à jour les données SIG**.

Parmi ces applications : l'analyse des données de n'importe quelle source. ERDAS IMAGINE simplifie la classification, l'orthorectification, le mosaïquage, la reprojection et l'interprétation des images.

Méthode de traitement des images satellitaires avec Erdas Imagine est comme suit: la visualisation et l'amélioration d'image, les corrections géométriques et la production de cartes, classifications, détermination NDVI, détection le changement d'occupation du sol (Figure III.1).

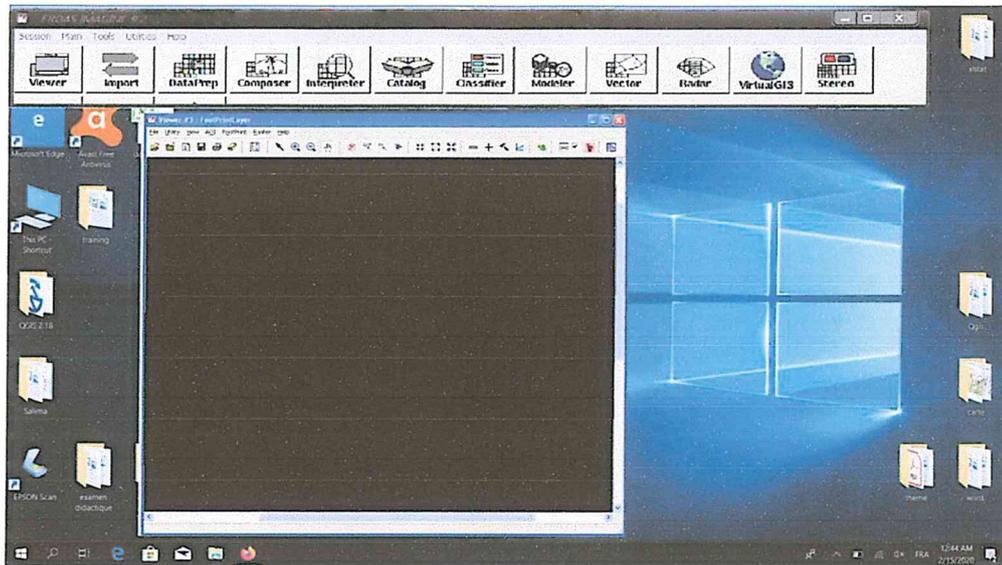


Figure III.1 : Interface d'Erdas Imagine

- **Qgis 2.18** : Quantum GIS, plus couramment appelé QGIS, un Système d'Information Géographique (SIG) « open source ». C'est un projet officiel de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo) destiné au traitement des données géographiques (Figure III.2).

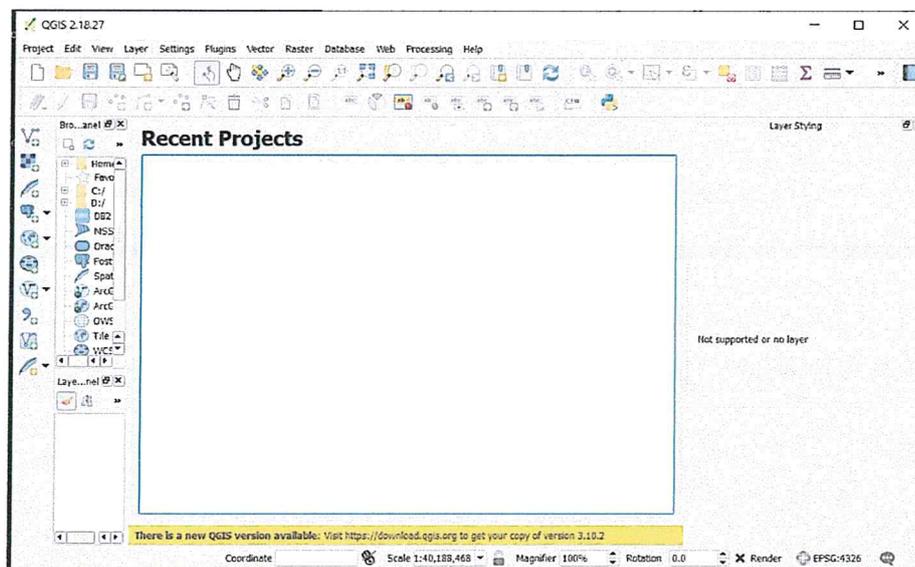


Figure III.2 : Interface de Qgis 2.18

III.2.2. Démarche méthodologique

-Prétraitement des images satellitaires

Il s'agit des opérations effectuées sur les images satellitaires (la correction et l'amélioration géométrique et radiométrique.

Sur l'image en composition colorée, la végétation apparaît en rouge, les parcelles découvertes de végétation et les étendues d'eau en noir.

- Corrections radiométrique, atmosphérique et géométrique

Dans une étude de détection de changements, les images utilisées doivent présenter des caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que les différences provenant de leur comparaison puissent être associées à de réels changements d'état du territoire et non à des artefacts liés aux images. Idéalement, les images doivent provenir du même capteur et la date d'acquisition doit varier le moins possible. En raison de considérations physiques et économiques, ces conditions idéales n'ont pu être rencontrées. Afin de contrer ces lacunes, les images ont d'abord fait l'objet de corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques. Les corrections géométriques ont été appliquées aux images afin de les géoréférencer dans le système de coordonnées UTM et de les rendre superposables pour permettre la comparaison des classifications et la détection des changements entre les dates.

- Calcul d'indices de végétation normalisés « NDVI »

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) est l'un des indices de végétation les plus largement utilisés (Tucker, 1979 ; Pirotti *et al.*, 2014 ; Bhandari, 2012) marqueurs de l'activité photosynthétique (Rouse *et al.*, 1974) utilisés comme indicateurs pour analyser l'évolution saisonnière de la végétation (Atzberger, 2013 ; Rembold *et al.*, 2013). Le NDVI est un indicateur efficace pour détecter les conditions de végétation en surface (par exemple, la biomasse); cet indice a été utilisé pour surveiller les changements spatiaux et temporels de la couverture végétale et de la production de biomasse, ainsi que pour évaluer les impacts des changements climatiques (température de l'air et précipitations, par exemple) sur la phénologie de la surface des sols à l'échelle régionale ou mondiale (Stow *et al.*, 2007; Verbesselt *et al.*, 2007 ; Ma *et al.*, 2010 ; Gao *et al.*, 2014 ; Zhang *et al.*, 2012 & Meiet *et al.*, 2015). Il est obtenu en calculant les bandes visible (VIS), et l'infrarouge proche (NIR) d'imagerie de télédétection disponibles en séries chronologiques avec une résolution spatiale moyenne à grossière (30m) (An *et al.*, 2014 ; Zhao *et al.*, 2014).

Les raisons de son utilisation fréquente tiennent principalement à sa simplicité de calcul, à son caractère normalisé et à sa réputation de moindre sensibilité vis à vis de facteurs externes tels que les propriétés optiques du sol, la géométrie de l'éclaircement ou les effets atmosphériques.

Le NDVI se calcule avec les bandes Rouges et Proches Infra Rouges selon la formule :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

La classification d'indices de végétation (NDVI) permet la caractérisation du couvert végétal. NDVI ayant des valeurs comprises en -1 et 1, l'indice reflète l'état de santé des plants, la vitalité, le feuillage et la quantité de végétation.

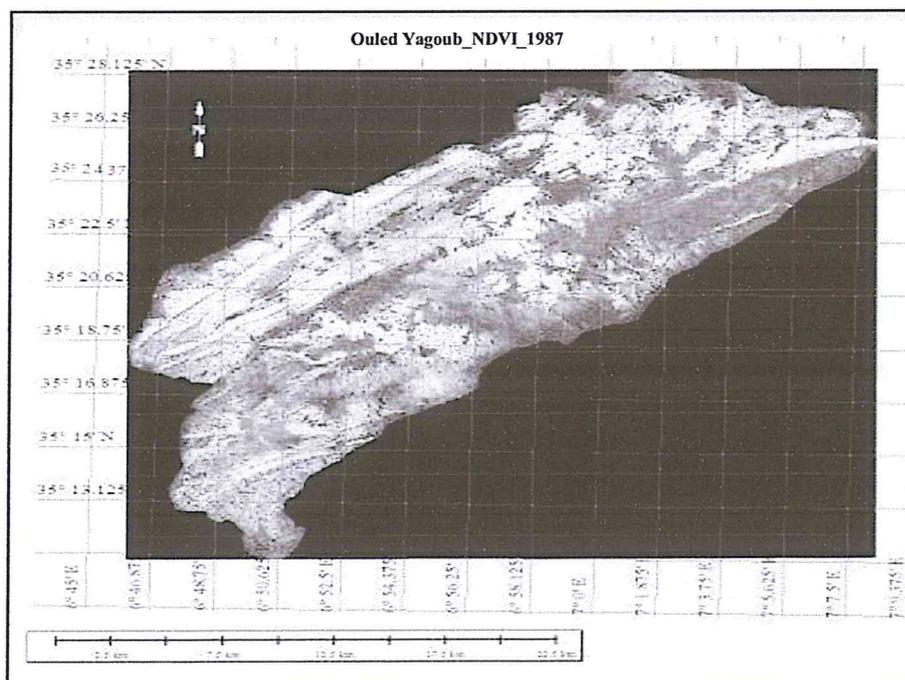
A partir d'indice de végétation (NDVI) et les prélèvements obtenus sur le terrain, nous pouvons localiser des surfaces présentant le dépérissement du cèdre.

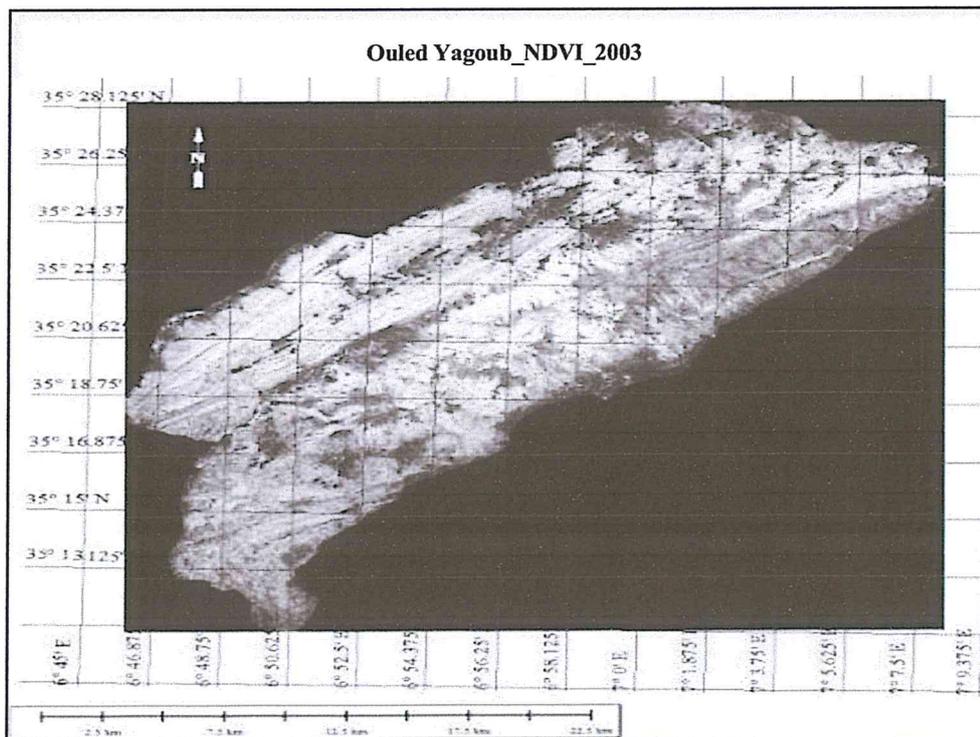
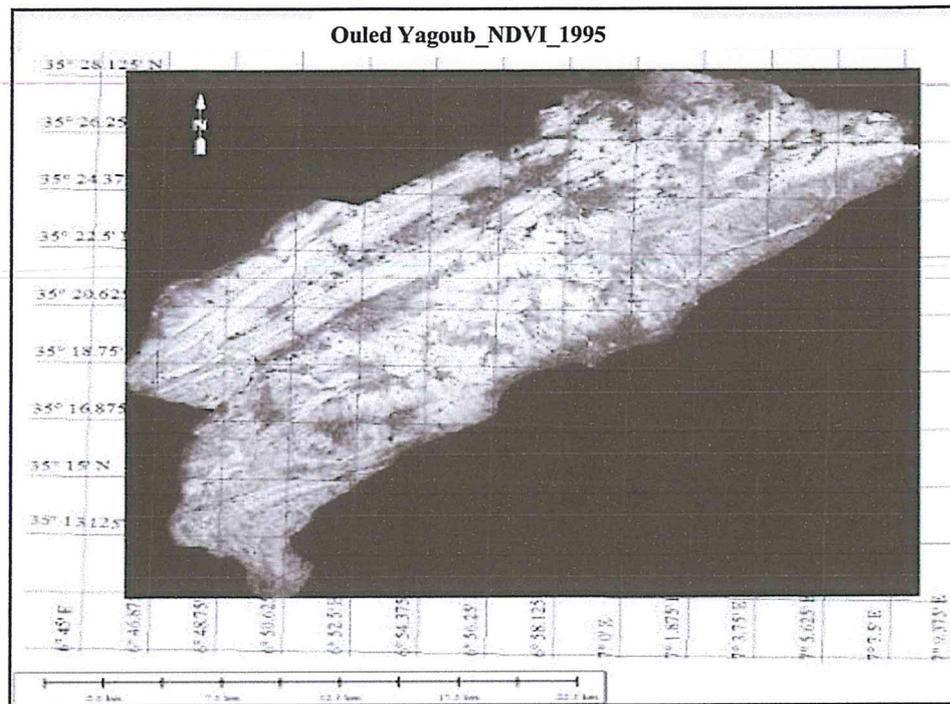
III.3. RESULTATS et DISCUSSION

III.3.1. Cartes des NDVI

Le NDVI donne des informations relatives à la qualité et à la densité de la végétation dans une zone donnée. Il nous permet de suivre l'évolution de l'activité photosynthétique.

Afin d'avoir des cartes de changement nous avons effectué différentes taches ; toutes les images ont été traitées et classifiées (1987, 1995, 2003 et 2016). Les cartes d'NDVI ont été réalisées sur l'ensemble des deux régions sont exception (Figure III.1).





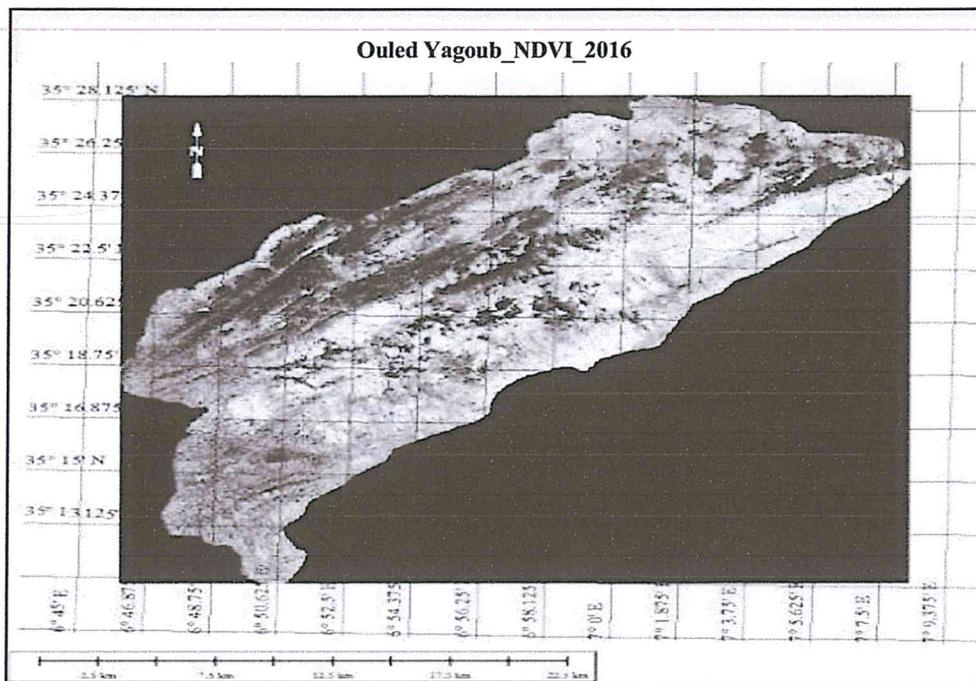
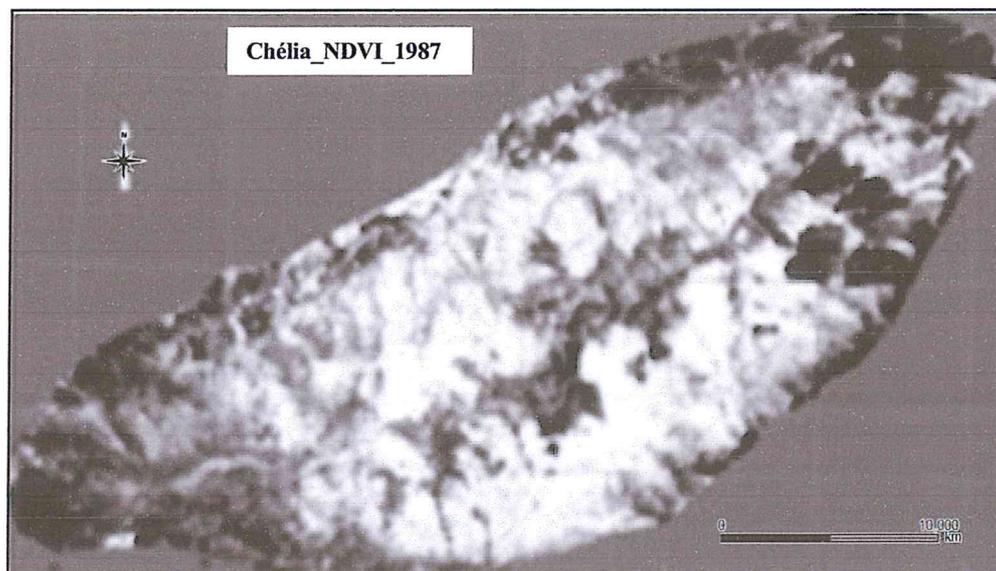


Figure III.3 : Cartes de NDVI du mont d'Ouled Yagoub (1987-1995-2003-2016)



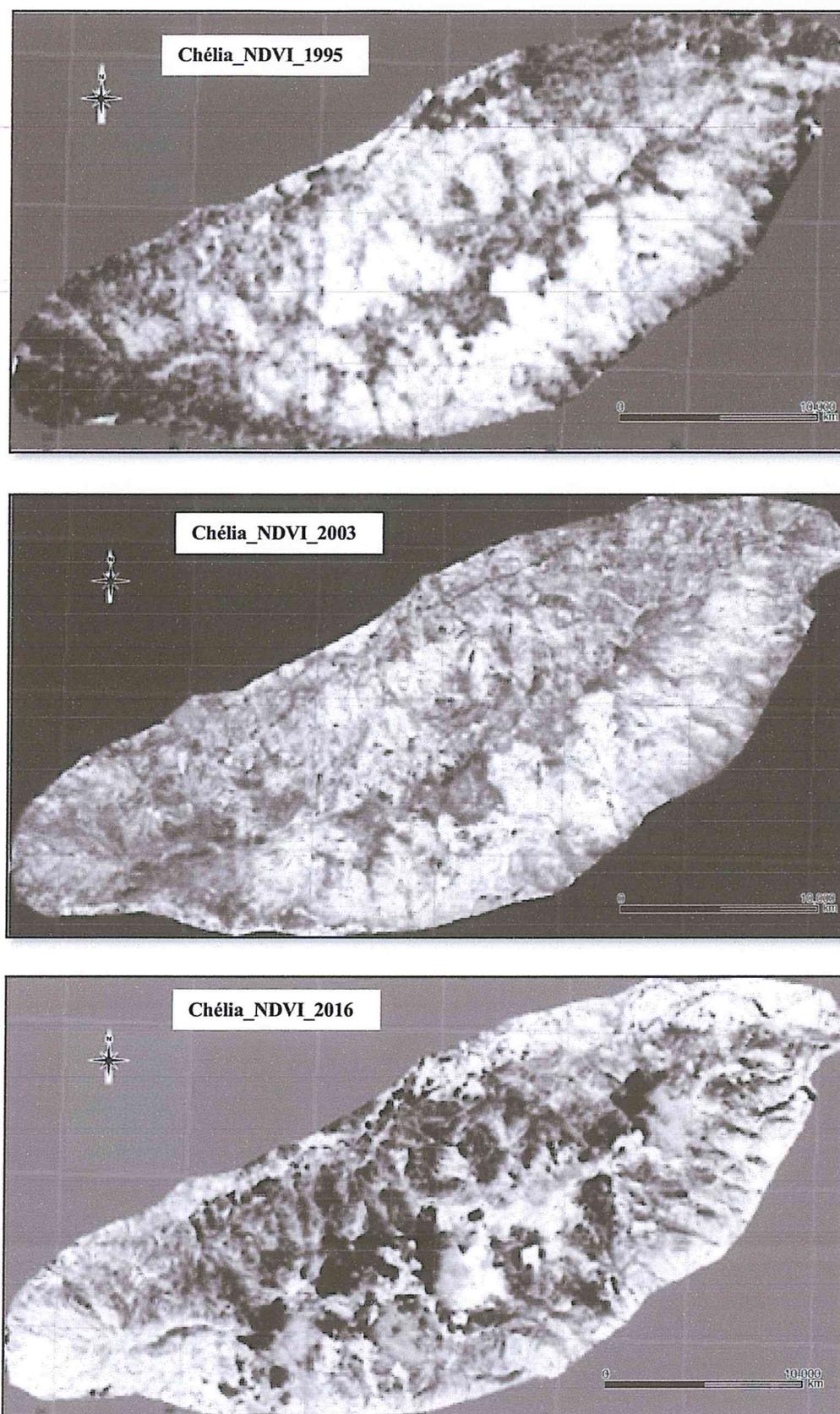


Figure III.4 : Carte de NDVI du mont de Chélia (1978-1995-2003-2016)

Tableau III.1 : Classification des niveaux de NDVI

Classes	Degré de dépérissement	Limites des classes (nuance de gris)
1	Très faible	0 à environ 55
2	Faible	55 à environ 100
3	Moyenne	100 à environ 150
4	Forte	150 à environ 200
5	Très forte	200 à 255

Les cartes NDVI ont permis d'illustrer préférentiellement la zone à couvert végétale par rapport aux autres. La visualisation de l'indice de végétation normalisée nous a permis de distinguer les formations forestières très denses, les formations peu denses et les zones très dégradées ou les sols nus (Figure III.1 et figure III.2).

Le tableau (III.1) montre les classes de dépérissement à partir des taux de NDVI (par pixel). Le taux maximum de NDVI est expliqué par une période pleine de croissance végétative (max de l'activité photosynthétique) et aussi disent qu'il y a une reprise de l'activité végétative.

Alors, où on trouve le taux min de NDVI est expliqué par le ralentissement de l'activité photosynthétique indiquant qu'il existe des facteurs néfastes pour les végétaux.

Les valeurs de NDVI les plus élevées correspondent aux zones où le peuplement est sain de haute et moyenne altitude, qui sont demeurées au-dessus du seuil de référence en termes d'intensité de vert tout au long de l'année. Cela est à partir des données des terrains. Ce seuil a une valeur approximative de 190 (Tableau III.1), et peut être associé à un écosystème à végétation persistante ou être employé pour distinguer les forêts des autres terres boisées.

Il est devenu nécessaire de conserver des semences et de développer des peuplements d'espèces endémiques d'une forte résistance au niveau des forêts dépériées.

III.3.3.2. Carte de détection du changement

À partir des cartes de NDVI élaborées. Nous avons réalisé des cartes de détection du changement. La superposition de deux cartes NDVI donne une carte de détection du changement entre deux années. Pour les cartes des changements, nous avons seulement effectué sur les forêts du cèdre de l'Atlas (Forêt homogène). La délimitation des cédraies est faite à partir de la carte de végétation (Figures III.5, 6, 7, 8, 9 et 10).

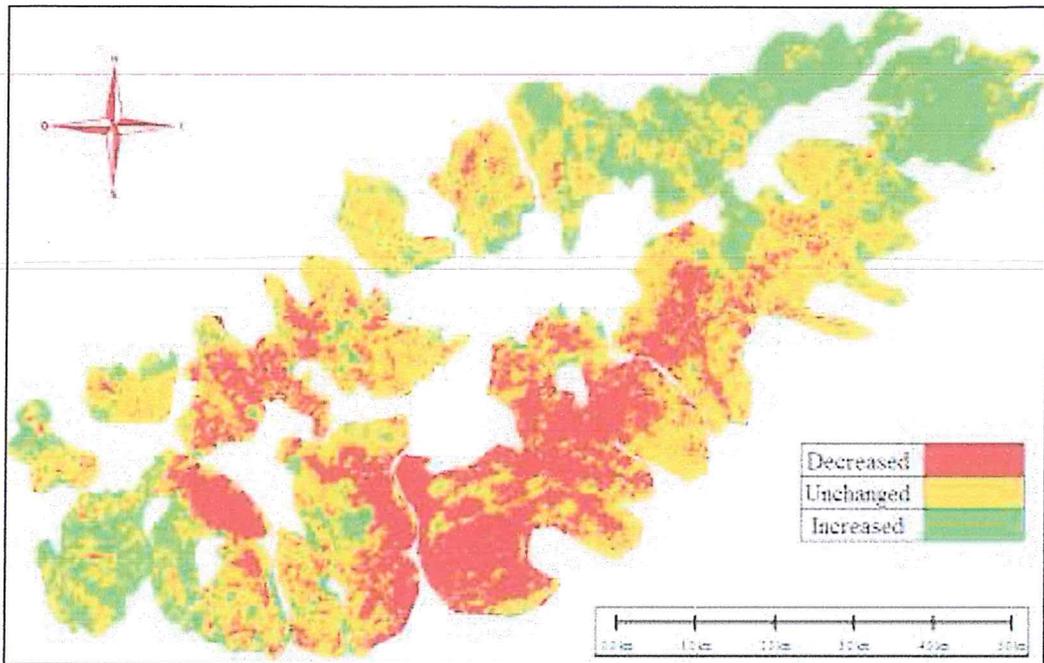


Figure III.5 : Carte de détection du changement du mont de Chélia (1987-1995)

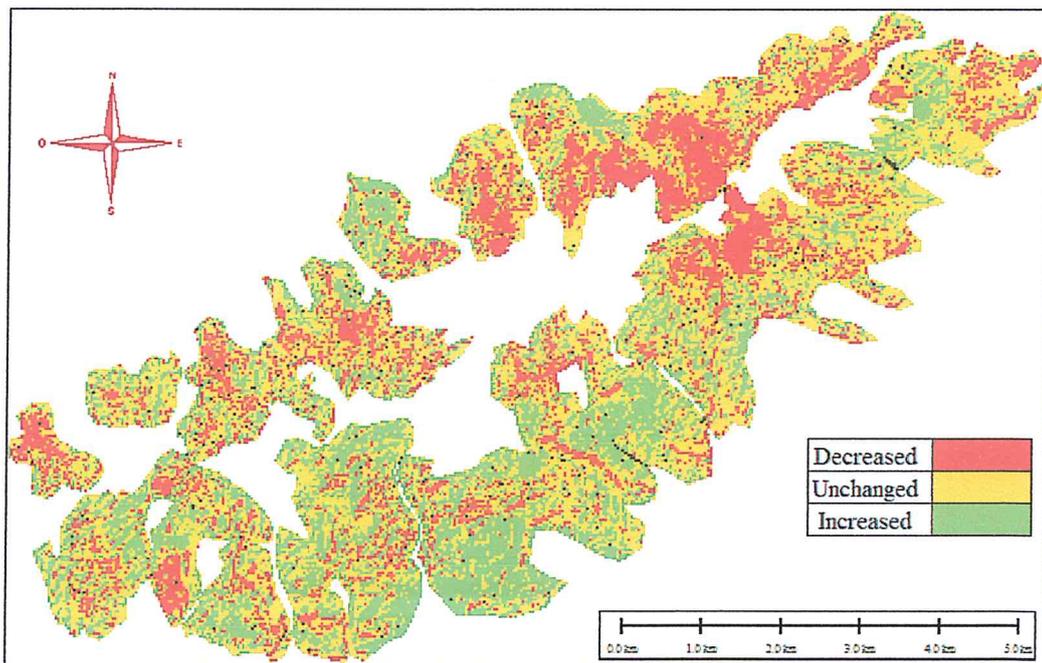


Figure III.6 : Carte de détection du changement du mont de Chélia (1995-2003)

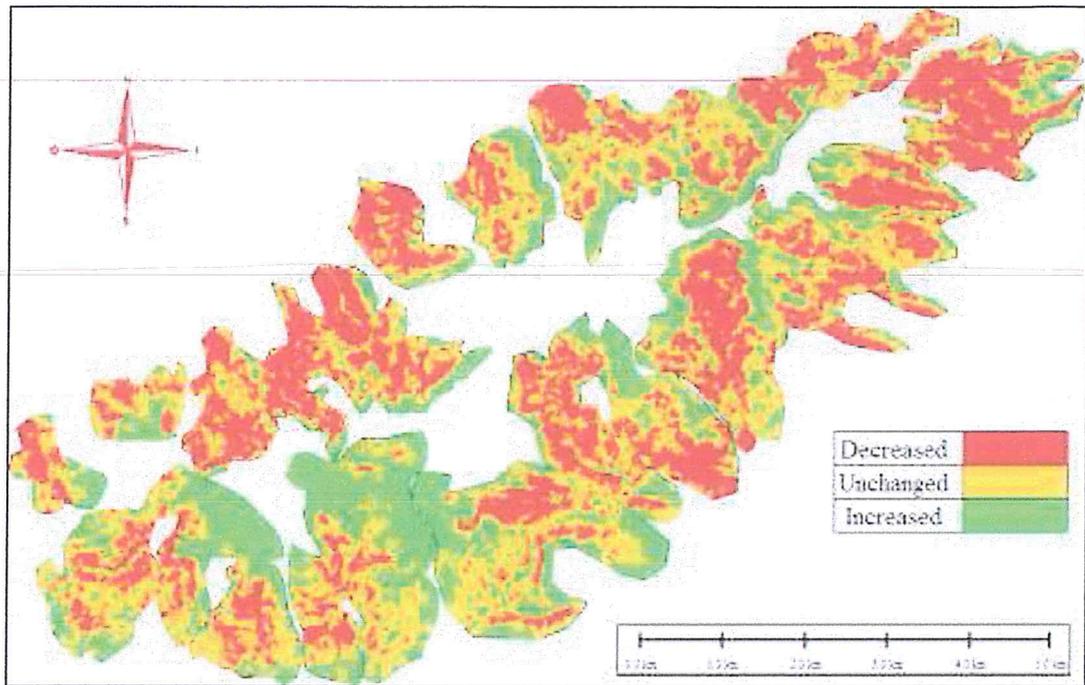


Figure III.7 : Carte de détection du changement du mont de Chélia (2003-2016)

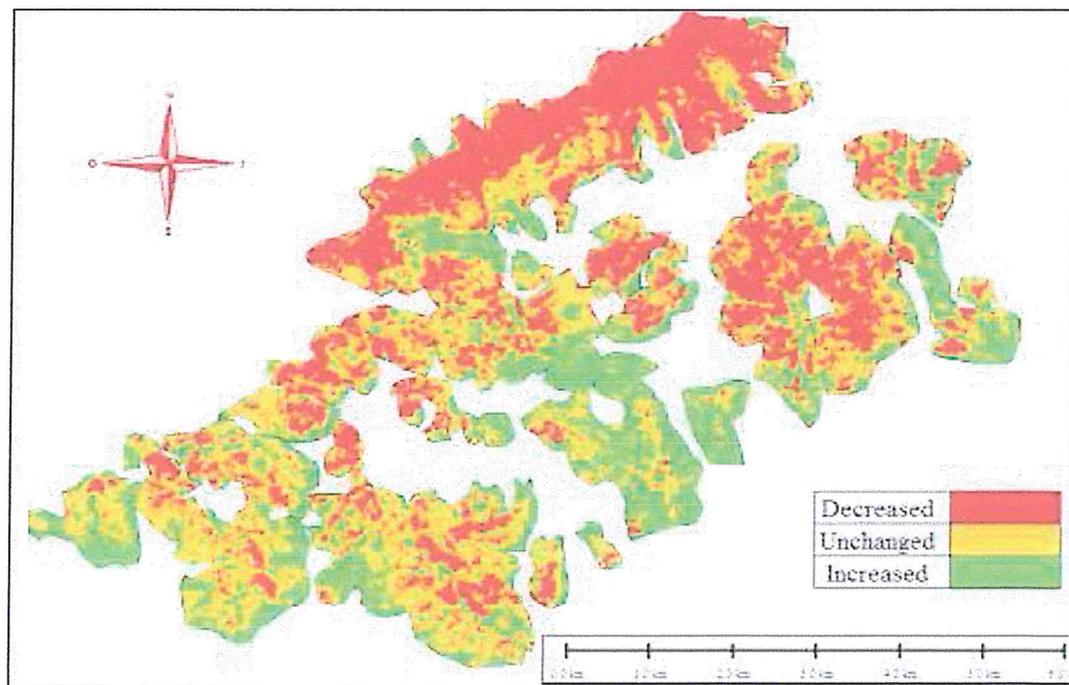


Figure III.8 : Carte de détection du changement du mont d'Ouled Yagoub (1987-1995)

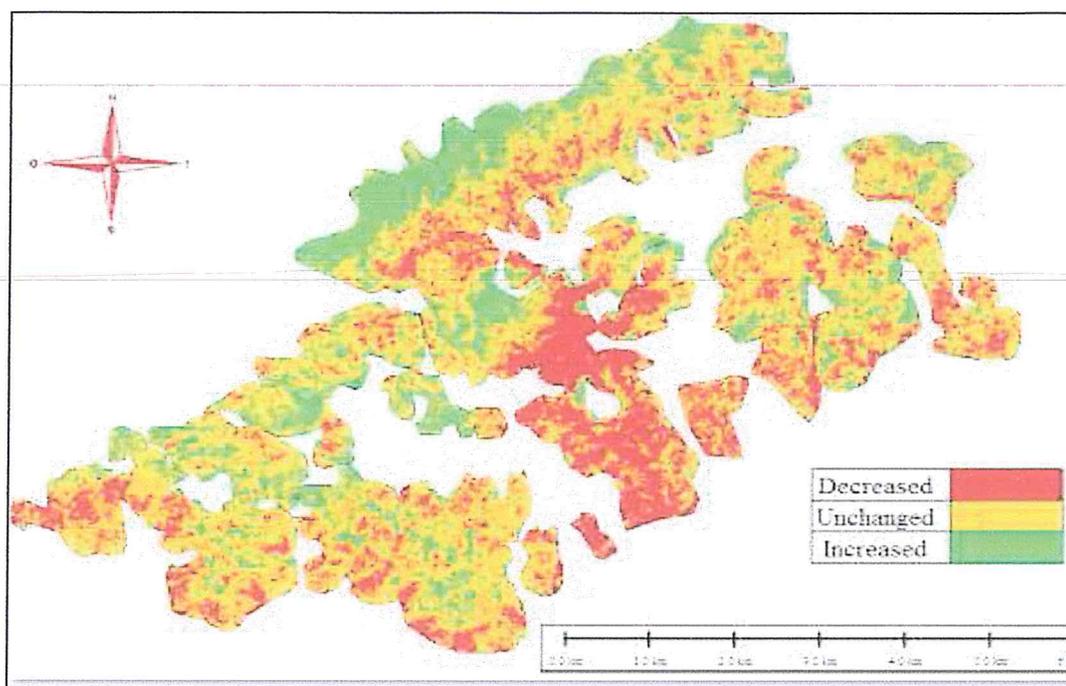


Figure III.9 : Carte de détection du changement du mont d'Ouled Yagoub (1995-2003)

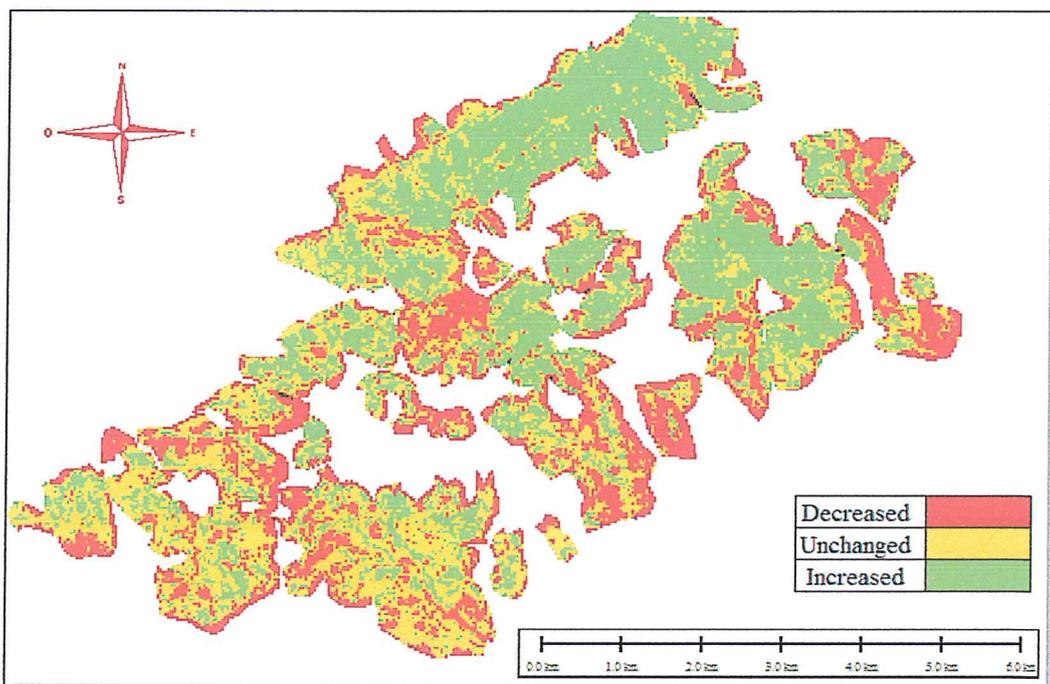


Figure III.10 : Carte de détection du changement du mont d'Ouled Yagoub (2003-2016)

Les cartes de détection du changement (Figure III.5, 6, 7, 8, 9 et 10) représentent trois taches : la couleur verte représente l'augmentation de la végétation, la couleur rouge représente où se trouve la régression de la surface du cèdre de l'Atlas alors que la troisième couleur (jaune) représente où la surface de la zone est non-changée. Dans l'ensemble, les cartes montrent une distribution irrégulière des tâches dans les deux zones et dans les différents périodes.

L'observation de la carte de détection du changement du Chélia pour la période (1987-1995) (Figure III.5) montre que les taches rouges se localisent dans les versants Sud, alors que la période (2003-2016) (Figure III.6) présente une propagation du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans tous les versants.

Les cartes du changement pour les monts d'Ouled Yagoub (Figures III.8, 9 et 10) présentent d'une période à une autre un changement bien visible dans la répartition de la régression et le développement du cèdre.

La plupart des versants sont touchés par la régression du cèdre (dépérissement des arbres), à haute altitude qu'à basse altitude mais ça n'empêche pas qu'il y-a un développement du cèdre de l'Atlas, une régénération et des arbustes dans la zone sans oublier le chêne vert, l'oxycèdre qui sont en train de remplacer; et occuper la place du cèdre.

La détection de changement sur la carte (Figure III.3) nous donne les informations sur la surface du cèdre, le vert correspond à l'augmentation du cèdre, le rouge correspond à la diminution du cèdre et le jaune à l'absence de changement. De manière générale, la diminution du cèdre de l'Atlas se manifeste de tous les côtés avec une intensité plus élevée du côté Sud. Cette diminution / augmentation du cèdre de l'Atlas est représentée dans la (Figure III.5) par une distribution irrégulière. La carte montrée à Chélia entre 1987 et 1995 (Figure III.5), la diminution (couleur rouge) se situe dans la partie Sud, également à Ouled Yagoub (2003-2016) (Figure III.10).

Les cartes de détection de changement, nous fournissent des informations sur la surface et le changement d'utilisation des sols du cèdre de l'Atlas, le vert correspond à l'augmentation du cèdre, le rouge correspond à la diminution du cèdre et le jaune à l'absence de changement. Les cartes de détection de changement de Chélia (Figure III.5) représentent une distribution irrégulière des augmentations / diminutions du peuplement de cèdre de l'Atlas. Dans la première période (1987-1995), la diminution du cèdre (couleur rouge) est présentée au niveau de toutes les parties avec un taux de (22,74%), alors que dans la deuxième période (1995-2003) le taux du rouge (25,48%) est beaucoup plus localisé du côté sud et une autre fois, on observe une

distribution irrégulière qui affecte tous les côtés avec une grande intensité présentée au cours de la période (2003-2016) avec un taux de (33,76%).

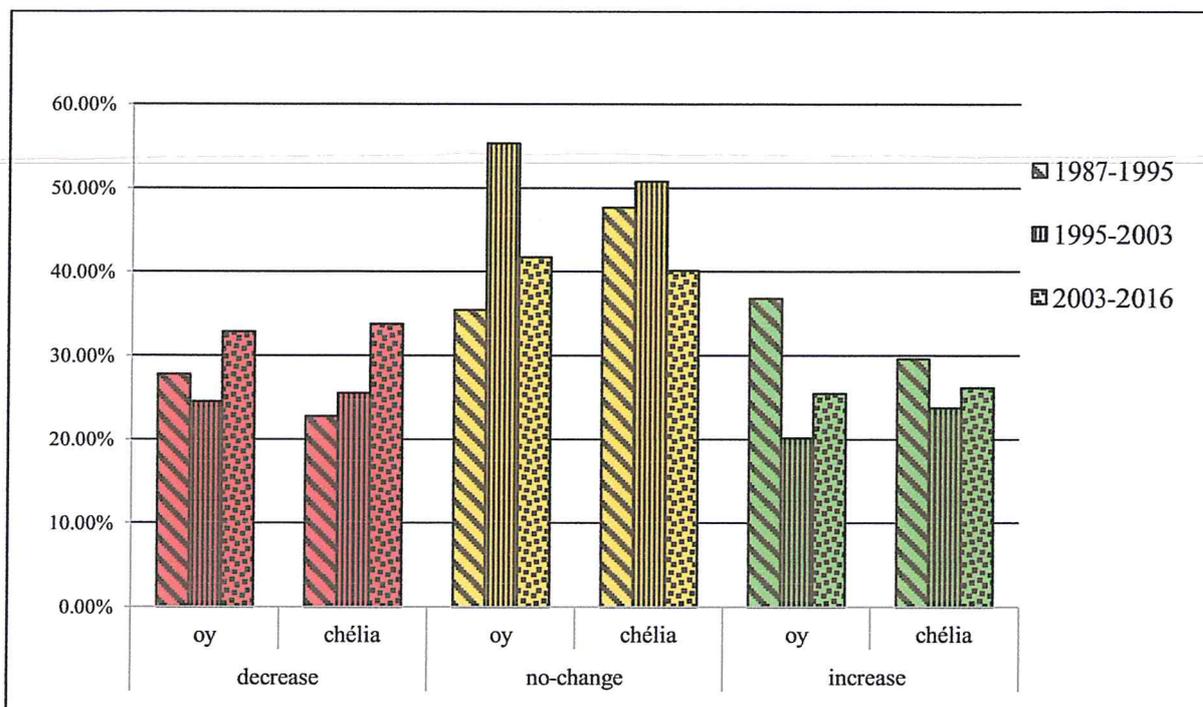


Figure III.11 : Histogramme d'estimation des surfaces du cèdre de l'Atlas (Aurès, Algeria).

Couleur verte : surface d'augmentation de la végétation ; couleur rouge : surface de régression; couleur jaune: zone où la végétation est non-changée

Pour trois périodes : (1987-1995), (1995-2003) et (2003-2016) pour les deux monts Chélia et Ouled Yagoub (Aurès, Algeria).

Les monts de Chélia présentent une augmentation de la régression d'une période à l'autre, elle atteint son maximum dans la troisième période avec un taux de 20.33% ; et le minimum est représenté dans la première période avec un taux de 1.12%.

Le dépérissement du cèdre au Mont de Chélia se traduit par une augmentation d'une période à l'autre, atteignant son maximum au niveau de la troisième période (2003-2016).

La dégradation du cèdre de l'Atlas au niveau de la région Ouled Yagoub montre que cette dégradation est réduite dans la deuxième période par une contribution à la première et troisième période avec un taux de (3,26%) et atteint son maximum de dégradation en troisième période avec un taux de 32,84%, avec un taux d'augmentation estimé à 8,32%.

Pour les deux périodes (1995-2003) et (2003-2016), la dégradation est toujours élevée en raison de la contribution à la croissance du cèdre avec un taux de (1,74%), (7,62%) et (4,36%)

(7,39%) respectivement, pour les monts Chélia et Ouled Yagoub. Au contraire, pour la période (1987-1995), l'augmentation du cèdre s'observe par une dégradation plus importante avec des taux (6,88%) et (9,02%) respectivement pour Chélia et Ouled Yagoub.

L'histogramme (Figure III.11) montre qu'il a été une stabilité assez importante dans la deuxième période (1995-2003) dans les deux zones (Chélia et Ouled Yagoub).

Nous devons dire que, dans chaque période de baisse, nous avons également une augmentation de cèdre dans les deux régions.

En général, on peut dire que l'utilisation de la télédétection facilite notre cheminement pour donner une vision de la détection des changements de développement et/ou de la diminution du peuplement forestier et de sa surface. Ces résultats, combinés à d'autres facteurs écologiques, nous permettent d'expliquer, de comprendre ce changement d'utilisation des sols et de servir de base au suivi et à la gestion du cèdre.

Nos résultats donnent une évaluation à chaque période lorsque le taux de dépérissement du cèdre de l'Atlas augmente dans le temps et dans l'espace. Les plus touchées sont l'exposition Sud (Beghami, 2012; Beloula, 2010). Cette étude montre à quel point l'imagerie de télédétection avec des données de terrain peut être plus facile et fournit des informations rapides pour détecter les changements dans la couverture terrestre, dans le temps et dans des zones relativement vastes.

On pourrait donc s'acheminer vers des dépérissements massifs de forêts en limites basses et Sud des aires de répartition des espèces, le renouvellement naturel n'ayant pas le temps de se produire dans ses zones.

III.3.3.3. Cartes de la classification supervisée

Dans le domaine de la télédétection il existe deux classification des images satellitaires : la classification supervisé et non supervisé. Dans notre cas, on a adopté la classification supervisée : son principe est de regrouper les pixels à des classes thématiques, basées sur des connaissances et des données de la zone à étudier. Les classes d'occupation du sol sont définies sur la base de notre objectif (la céderais).

À partir des données de terrain, nous avons classé notre zone en 3 classes : la première représente le cèdre en bonne santé, la seconde où le cèdre est dépérit et la troisième c'est la classe dont laquelle aire est non classifiée. À partir de chaque spectre de ces 3 classes élaborées et des caractéristiques de signature spectrale caractérisées, chaque type de classe permet au logiciel de classer avec précision le reste de l'image. Nous obtenons deux cartes de classification

supervisée des cèdres sains pour les zones intéressantes (Monts Chélia et Ouled Yagoub). Les cartes de la classification supervisée des images satellitaires d'occupation du sol des deux monts Chélia et Ouled Yaagoub sont représentées dans la figure (III.10).

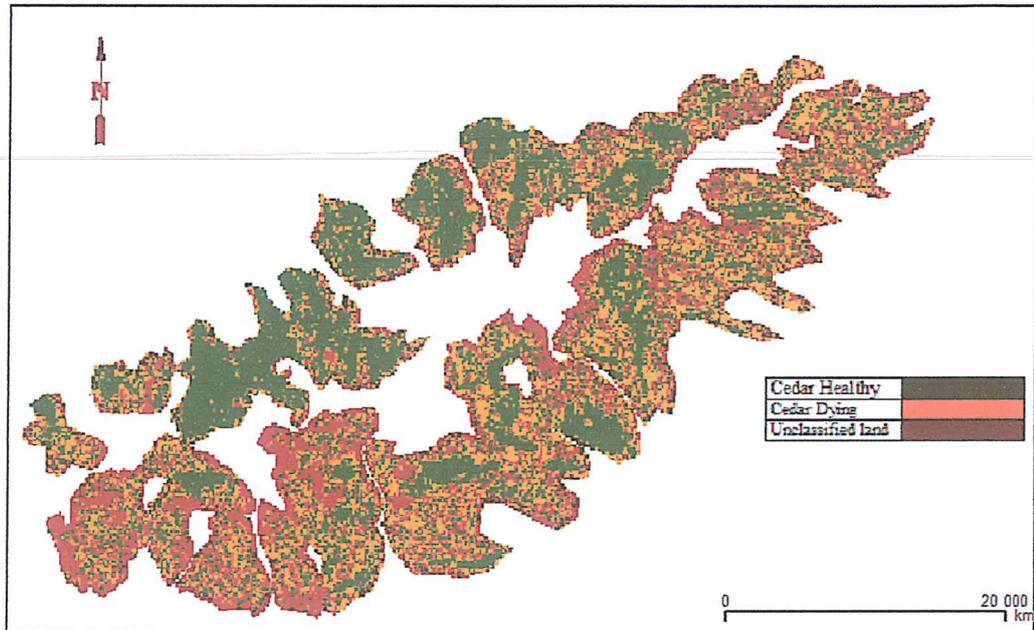


Figure III.12 : Classification Supervisée du cèdre de l'Atlas dans les monts de Chélia (Aurès)

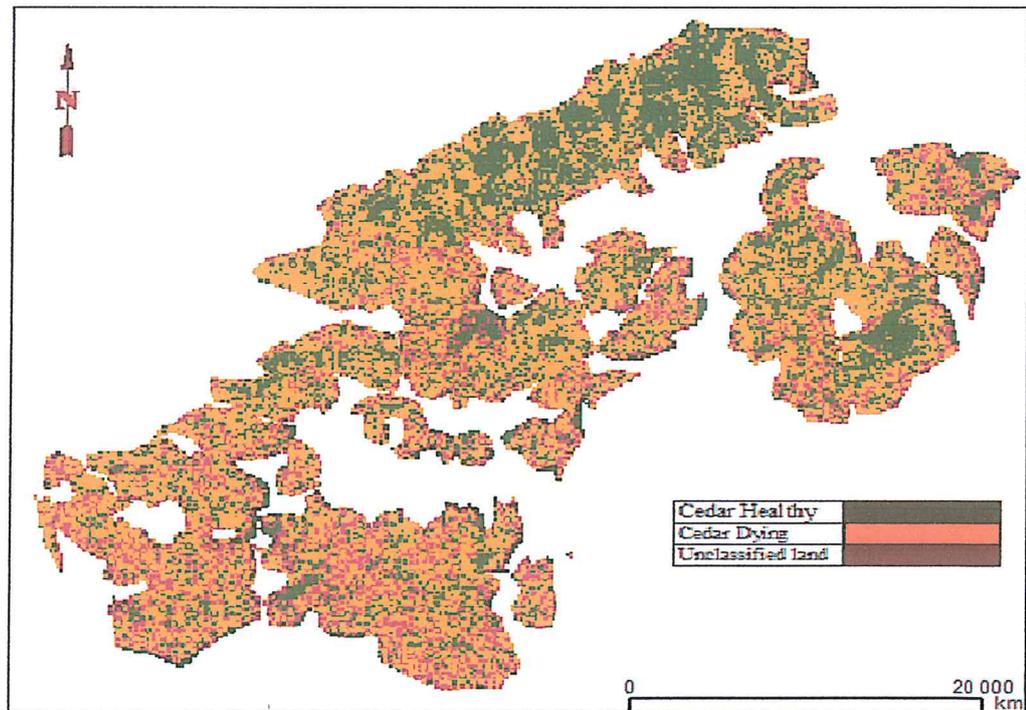


Figure III.13 : Classification Supervisée du cèdre de l'Atlas dans les monts d'Ouled Yagoub (Aurès)

Couleur verte : cèdre en bon état ; Couleur orange : cèdre dépérit ; Couleur marron : aire non classifiée

Les histogrammes (Figure III.11) présentent un développement dans la perte de la forêt entre les 3 périodes, avec un taux de 37.40%, 43.31%, 36.73% pour Chélia respectivement, et 33.84%, 28.20%, 42.09% pour les monts d'Ouled Yagoub. Dans toutes les périodes, le taux des surfaces (régression) est plus élevé que dans les régions (développement) sauf dans la période (1999-2007), avec une différence de 3.11% au mont d'Ouled Yagoub.

Les terres non classifiées sont représentées par les espèces suivantes : *Quercus ilex*, *Juniperus oxycedrus*, *Fraxinus dimorpha*.

Une vérification de la carte de classification supervisée (2007-2016) a été faite à partir d'une requête effectuée sur terrain. La plupart des placettes sont identiques avec les régions où il y a régression ou développement des surfaces, à l'exception de quelques placettes. Cela est expliqué par les coupes faites dans ces placettes ainsi que le développement du chêne-vert qui est entrain d'occuper la place du cèdre de l'Atlas (Belloula, 2018 ; Sarmoum *et al.*, 2018).

Nos résultats donnent une évaluation pour chaque période où le taux de dépérissement du cèdre de l'Atlas est en augmentation dans le temps et l'espace. Cette étude montre, aussi, comment la télédétection facilite et donne/fournit des informations rapides sur l'occupation du sol dans le temps et pour des grandes surfaces.

Ce changement peut être dû à des processus naturels, tels que la succession écologique et les perturbations, naturelles ou anthropiques. Cette dynamique est le résultat des processus complexes et a une très grande importance pour les organismes vivants et pour l'homme. Les perturbations sont le moteur de la dynamique du paysage et agissent à toutes les échelles spatiales et temporelles. La dynamique peut être décrite par des changements dans le temps, des indices qui décrivent la structure et la composition du paysage (Schlaepfer, 2002 *in* Bamba, 2010). Colwell *et al.*, (2008) explique, le long du gradient altitudinal le changement de température varie cependant plus rapidement que le long du gradient latitudinal : environ 5 à 6.5°C par tranche de 1000 m d'altitude contre 6.9°C par 1000 km de déplacement latitudinal en zone tempérée. Une disparité qui implique qu'un déplacement potentiel de 10 m en altitude de l'aire géographique d'une espèce correspond à un déplacement latitudinal d'environ 10 km en moyenne pour compenser la même variation de température (Jump *et al.*, 2009).

Le cèdre de l'Atlas semble avoir progressivement migré vers le haut du fait du changement climatique cela confirmé par plusieurs chercheurs (Cheddadi *et al.*, 2015 ; Heiri *et al.*, 2006 ; Tinner et Theurillat, 2003 ; Walther *et al.*, 2005).

Les simulations du modèle indiquent un déplacement vers le haut de la limite inférieure de leur portée (Cheddadi *et al.*, 2017), vers des conditions plus humides (Abel-Schaad, 2018). Selon Bouahmed *et al.* (2019), le modèle de distribution des espèces (MDS) des forêts de cèdre de l'Atlas dévoile la disparition des forêts du Tell algérien dans le futur.

III.4. CONCLUSION

À partir des images satellitaires Landsat (de 30 m de résolution spatiale) la présente étude a permis de montrer l'importance de la télédétection dans la compréhension de la structure de la forêt des Monts Aurès.

Les processus de changement de la couverture végétale nous ont permis de comprendre que les activités anthropiques constituent le principal facteur potentiellement responsable de ce changement. Elles proposent des diagnostics ainsi que des analyses diachroniques pour expliquer l'évolution de dépérissement.

A partir des résultats trouvés et des cartes, nous constatons que suit :

- Une certaine migration ou dynamique du peuplement vers les sommets et vers le Nord ;
- Le chêne-vert et les autres espèces arbres et arbustes prennent la place du cèdre de l'Atlas ;
- L'incapacité des plantes à se déplacer vite et la vulnérabilité du cèdre mènent à la mort des individus ;
- L'observation indique que les individus fragiles qui se dépérissent au Nord ;
- La cédraie a connu ainsi une évolution suivant les pistes
- Actuellement, il existe des traces de pâturage même à haute altitude.

Les perturbations sont le moteur de la dynamique des forêts et agissent à toutes les échelles spatiales et temporelles. La forêt dévoile sur une difficulté à se reconstituer, les activités humaines ne font rien pour y atténuer. Les pressions exercées sur la forêt par les coupes illicites ne donnent pas la possibilité pour une restauration.

Nous pouvons constater que les techniques de la télédétection, de la cartographie avec des relevés de terrain permettant de comprendre les structures spatiales car l'indice NDVI a permis de détecter le changement/l'état de la structure spatiale de la cédraie.

Pour gérer cet état de perturbation, de dépérissement de la cédraie Aurassienne, que faut-il faire ?

Chapitre IV

ETUDE PÉDOLOGIQUE



Chapitre IV

ETUDE PÉDOLOGIQUE

IV.1. INTRODUCTION

Le sol forestier est un sol d'origine fertile par sa nature. La qualité des sols est un enjeu d'importance dans la conservation du fonctionnement et de la dynamique des écosystèmes. Selon Lepoutre (1964) plus le climat est sec, plus l'influence du sol est grande car il varie selon le climat.

Ce chapitre présente les différents types de analyses physico-chimiques (matériels et méthodes) faites. Les analyses effectuées sur nos échantillons sont concentrées sur quelques paramètres chimiques : pH, CE, le calcaire total et le phosphore à cause de leur importance et leur rôle. L'un sur les caractéristiques du sol et l'autre sur la santé de la végétation. Les analyses de sol effectuées visent à caractériser la composition du sol, de découvrir les risques de carences nutritionnelles. Aussi, nos échantillons ont été l'objet d'analyse de la réserve utile (RU) du sol. Ce présent travail constitue une première approche de l'étude de la relation entre le dépérissement et la réserve utile du sol des céderais. L'évaluation de la réserve en eau des sols devrait mener à une meilleure connaissance de la vulnérabilité des céderais.

L'objectif de ce chapitre est basé sur l'interprétation des résultats d'analyses chimiques du sol faites et sa réserve utile (RU), leur corrélation et leur effet sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas.

IV.2. ANALYSES CHIMIQUES PÉDOLOGIQUES

IV.2.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Profils pédologiques : 27 profils pédologiques ont été réalisés dans la zone d'étude. La profondeur des profils est en fonction de la profondeur de la roche mère.

Sur chaque profil des mesures et des analyses ont été réalisées. Les analyses chimiques sont présentées un par un (matériels et méthodes) :

IV.2.2.1. Mesure de la profondeur

La profondeur du sol joue un rôle sur le développement racinaire de l'arbre (Danjon & Fourcaud, 2009). La mesure de cette profondeur a été obtenue à l'aide d'un ruban métallique gradué.

IV.2.2.2. Analyses du sol

Pour les analyses physico-chimiques du sol, nous avons prélevé des échantillons de sol pour chaque horizon. Le niveau des horizons se distinguent généralement par leur couleur ou leur texture. Afin d'étudier l'influence du sol sur nos cédraines, des analyses de la composition physico-chimique ont été effectuées sur un échantillon de chaque niveau des horizons ainsi distingués.

Les échantillons de sol prélevés sont séchés à l'air libre et tamisés à un diamètre de 2mm et conditionnés dans des boîtes plastiques afin de les conserver.

- **Mesure de pH**

Le pH "potentiel Hydrogène" décrit l'acidité ou la basicité du sol. Cette variable définit notamment l'état du complexe adsorbant, c'est-à-dire que l'ensemble des colloïdes (composés humiques et argiles) (Duchaufour, 2001). Le pH est à la fois un indicateur du statut nutritionnel car ils contrôlent en partie la nutrition des plantes (Schoenholtz *et al.*, 2000) et de la toxicité des sols (toxicité aluminique en lien avec la concentration en aluminium (Cronan & Grigal, 1995).

La mesure du pH est effectuée par un pH-mètre sur une prise d'échantillon mise en solution dans l'eau distillée dont le rapport sol/eau est de 1/2,5 (Aubert, 1978).

Rapport 1/2.5 c'est-à-dire : 10g du sol → 25 ml d'eau distillée.

- **Mesure de la conductivité électrique (CE)**

La mesure de la conductivité électrique permet d'obtenir rapidement une estimation de la teneur globale des sels dissous (la salinité). Elle est mesurée dans l'extrait de sol à température donnée dont le rapport sol/eau (1/5). La valeur de la salinité du milieu est lue directement sur le conductimètre et s'exprime en milliMhos/cm² (Aubert, 1978). Un sol est considéré salé, lorsque la conductivité électrique de l'extrait saturé est supérieure à 4 ds / m à 25°C (Durand, 1983 ; Halitim, 1988).

- **Dosage du phosphore assimilable**

L'analyse du phosphore total du sol nécessite la transformation de formes relativement insolubles vers des formes solubles compatibles par la méthode d'attaque tri acides (acide nitrique, acide perchlorique et acide sulfurique) et la lecture effectuée avec un spectrophotomètre (Aubert, 1978).

Le phosphore total est calculé par la formule suivante : $PP = \frac{y \cdot V}{100} \cdot 100$ (%)

Avec : V : volume de la solution = 100 ml.

P : poids du sol = 1g.

y: valeur lue dans le spectrophotomètre.

- **Le calcaire total**

Le dosage du CaCO₃ total (%) est réalisé par la méthode volumétrique à l'aide du calcimètre de BERNARD, en décomposant les carbonates de calcium par l'acide chlorhydrique, et mesurant le volume de CO₂ dégagé.

IV.3. RESERVE UTILE DU SOL (RU)

L'eau des sols accessible aux plantes terrestres ne représente que 0,27% de l'eau douce présente sur Terre (Eviner et Chapin, 2002).

En région méditerranéenne, l'eau est le principal facteur limitant de la végétation forestière, non seulement par les irrégularités saisonnières et interannuelles des précipitations mais aussi en raison des caractéristiques édaphiques souvent défavorables : sols superficiels par suite de l'érosion, substrat calcaire compact à faible réserve en eau, difficilement pénétrable par les racines (Aussenac et Valette, 1982).

Le cèdre de l'Atlas, essence forestière demeure importante par sa production ligneuse (Toth, 1970); néanmoins avec les perturbations climatiques actuelles, l'espèce subit des stress importants qui influent négativement sur sa production ligneuse.

Le point de ressuyage ou la capacité au champ et le point de flétrissement permanent se sont deux états caractéristiques de l'eau. La différence des quantités d'eau retenue dans ces deux états représente la quantité d'eau réellement utilisable par les plantes (réserve utile: RU) (BON, 1978 ; Mathieu et Pielain 1998 ; Baize, 2000 ; Bréda *et al.*, 2002 ; Vauthier, 2011). La réserve utile (RU) d'un sol dépend de la profondeur du sol exploré par les racines (Zufferey, 2019), de ses capacités de rétention, liées à ses propriétés physiques qui déterminent essentiellement sa macroporosité (texture et densité) et à certaines propriétés chimiques (Halitim, 2006 ; Gobat *et al.*, 2010).

La capacité au champ à la teneur en eau du sol après ressuyage, lorsque tout écoulement a cessé, tandis que, le point de flétrissement permanent correspond au potentiel hydrique à partir duquel les racines ne peuvent plus extraire d'eau (Bréda *et al.*, 2002).

Le présent travail représente un premier état de référence de réserve utile du sol forestier Aurassien. La réserve utile (RU) du sol a pour but pour voir le milieu, si l'alimentation en eau est satisfaisante et convenable ou non.

IV.3.1. Matériels et Méthodes

Les sites d'échantillonnage ont été choisis de façon à couvrir les zones « sains/dépéris » dans les deux sites d'étude (Chélia et Ouled Yagoub).

L'analyse de la réserve utile (RU) du sol est faite au niveau du laboratoire pédologique du CRSTRA (Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides).



Figure IV.1 : Marmite de Richards

- **Protocol Expérimental**

Les échantillons des horizons ont été séchés et broyé d'une taille inférieure à 2 mm.

La détermination des humidités caractéristiques du sol s'est effectuée au laboratoire au moyen de la marmite de Richards (pouvant supporter des pressions entre 1 bar à 15 bars).

La presse de richards ou marmite de richards munie :

- D'une plaque poreuse reliée à un dispositif d'évacuation de l'eau extraite.
- Un système de contrôle de la pression constitué d'une vanne et d'un manomètre et d'un compresseur de capacité 1 à 15 bars, connecté à l'enceinte de la marmite.
- L'échantillon soit saturé d'eau.
- La disposition des échantillons sur la plaque poreuse (dans des disques) soit en contact.
- Ensuite scellée la casserole
- L'ouverture de la vanne sur la pression voulue.

- L'eau sera drainée progressivement au travers des pores microscopiques de la plaque poreuse vers le récipient d'évacuation externe de la marmite.

Après 24 h les échantillons sera pesée (le poids) ; les échantillons seront mis dans une étuve pendant une autre 24h ensuite elles seront une autre fois pesées.

Les données extraites du terrain ont fait l'objet d'une analyse statistique à l'aide du logiciel XLSTAT (2017). L'usage de l'analyse en composantes principales (ACP) est très répandu pour traiter des tableaux de relevés écologiques de type stations-variables environnementales (Baglinière *et al.*, 1987 ; Charraut *et al.*, 1996). Ainsi, la classification ascendante hiérarchique (CAH) pour la distinction des groupes d'homogénéité.

Les variables édaphiques avec les variables du milieu ont été analysées en composantes principales (ACP) afin de connaître les corrélations existante entre les facteurs et les variables étudiés afin d'expliquer le dépérissement.

Les variables quantitatives sont reportées telles qu'elles, par contre les variables qualitatives ont été codées. Le codage disjonctif complet permet de les recoder en classe semi quantitatives c'est-à-dire qu'on associé à chacune de ses modalités un nombre réel (Casin, 1999 *in* Beghami, 2013).

Avant de procéder à l'ACP un test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) est fait. C'est un test effectué pour connaître la variable qui perturbe et minimise le taux d'inertie (taux d'information données par les variables).

IV.4. RESULTATS et DISCUSSION

IV.4.1. Résultats

Les placettes échantillonnées se caractérisent par : basse altitude à haute altitude (1533 – 2036m) et (1500 à 2062m) pour les placettes saines et dépérit respectivement, terrains accidentés et caillouteux. Elles sont installées au niveau de tous les versants.

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisés (Annexe1) révèlent une légère différence entre les placettes saines et les placettes dépérit (la réserve utile, pH, CE, phosphore (P) et le calcaire total).

Les placettes sont caractérisées par un taux de pH estimé entre 8.15 et 8.89, il existe des taux de pH qui diffèrent d'un horizon à un autre dans le même profil.

Tableau IV.1 : Valeurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valeur propre	2,25	1,47	1,27	1,09	0,79	0,75	0,57	0,41	0,35
Variabilité (%)	25,06	16,38	14,21	12,15	8,77	8,43	6,40	4,60	3,97
% cumulé	25,06	41,44	55,65	67,80	76,58	85,01	91,42	96,02	100,00

Le tableau (IV.1) des variables propres est utilisé pour déterminer le nombre d’axes principaux à conserver après l’ACP. Ce tableau montre l’inertie portée par chacun des axes de l’ACP. La variabilité est répartie sur 9 Axes. La première ligne « Valeurs propres » correspond à l’inertie portée par chacun des axes.

La deuxième ligne « Variabilité » correspond au pourcentage (%) d’inertie portée par chacun des axes. On peut voir que la majorité de l’inertie est portée par les deux premiers axes F1 et F2 (environ 41.44 % cumulés). Alors la représentation sur les deux premiers axes factoriels est de bonne qualité.

➤ **Analyse en composantes principales (ACP)**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées. Elle permet d’explorer des jeux de données multidimensionnels constitués de variables quantitatives.

Cette étape permet de décrire les liaisons entre les variables et de résumer ces informations sur des axes factoriels synthétiques (Escofier et Pagès, 2008). L’ACP peut nous porter de nouvelles informations sur le dépérissement du cèdre de l’Atlas. Il est cependant utile d’ajouter une autre méthode de classification (Classification Ascendante Hiérarchique : CAH) qui regroupent les données étudiées en classes qui aident à reconnaître plus notre phénomène.

Les axes du graphique donnés par l'ACP ne correspondent généralement pas à l'une ou l'autre des variables mais à une combinaison optimale de plusieurs variables (Lemieux, 2006)

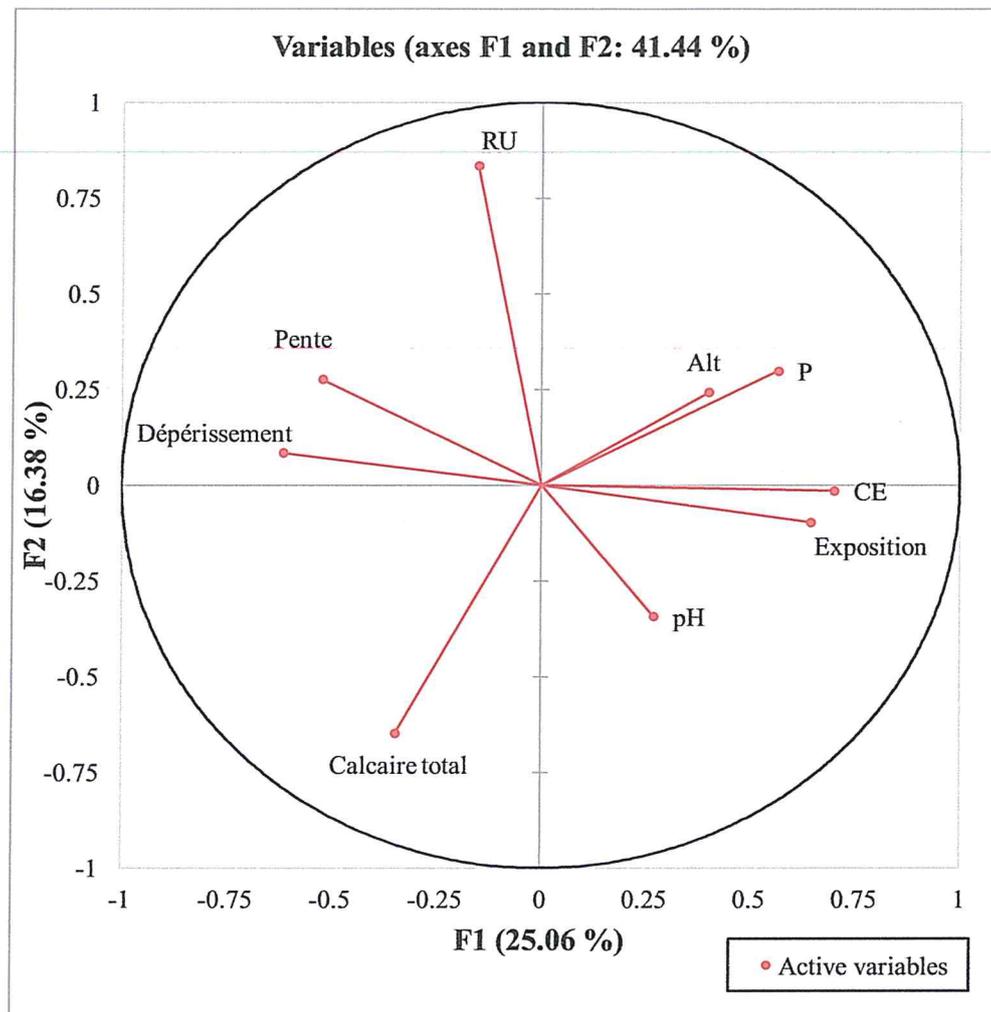


Figure IV.2 : Cercle de corrélation
 (Paramètre physico-chimique du sol et les facteurs du milieu)

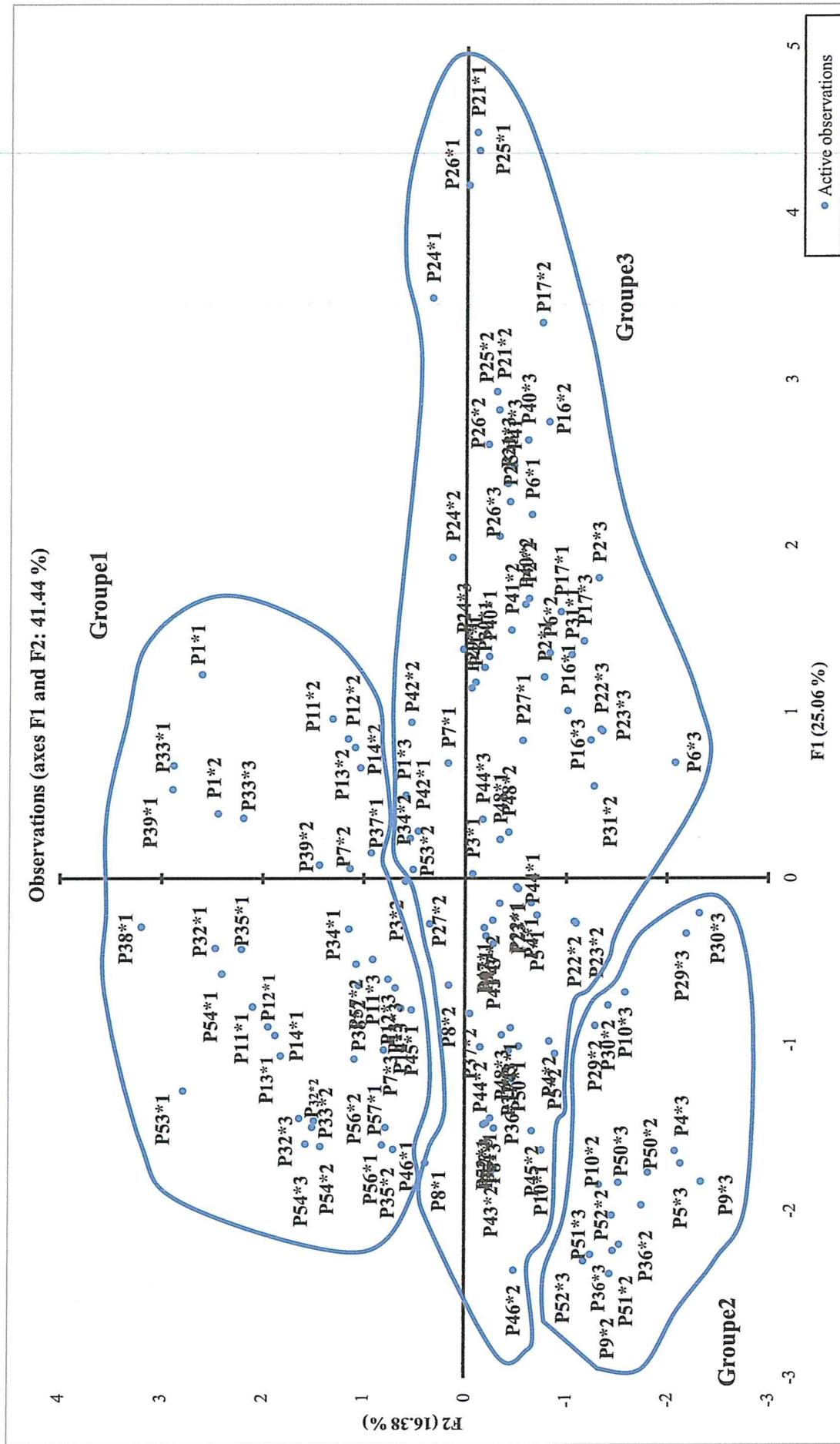


Figure IV.3 : Projection factorielle des placettes

➤ **Signification des Axes F1 et F2**

Le cercle de corrélation (Figure IV.2) présente les variables des sols étudiées (paramètre physico-chimique) avec les facteurs de la station. Les deux axes F1 et F2 donnent 41.44% d'information (il est noté que le pourcentage d'inertie entre variables et individus, dans notre cas neuf variables et plus que 50 individus -placettes-, le pourcentage d'inertie 33,33% est suffisant).

Les variables seront bien représentées sur un plan si elles sont proches du bord du cercle des corrélations, car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1 (Duby et Robin, 2006).

Le premier axe F1 donne un taux de 25.06 % d'information et est mieux présenté par l'exposition. Il est corrélé positivement avec l'altitude, pH, CE et le phosphore (P). Cela signifie que les peuplements sains sont présentés à haute altitude avec des versants les plus adéquats (Nord, Nord-est, Nord-Ouest). Et il est corrélé négativement avec le dépérissement, la pente, calcaire total et la réserve utile (RU).

Le deuxième axe F2 donne 16.38 % d'information et est mieux présenté par la RU. Il est corrélé positivement avec l'Altitude, la pente, le dépérissement, phosphore et la réserve utile (RU). Cela signifie que la réserve utile (RU) la plus significative est présentée dans le peuplement sain, à haute altitude et riche en phosphore. Et il est corrélé négativement avec l'exposition, pH, CE et le calcaire total. C'est-à-dire que les forts taux de dépérissement coïncident avec les pentes abruptes, les plus forts taux de calcaire et les valeurs les moins élevées de la réserve utile.

Dans l'ensemble du cercle de corrélation, les facteurs les plus présentés et qui ont une influence que ce soit positivement ou négativement sont la réserve utile (RU), l'altitude et l'exposition, la pente, le phosphore et le calcaire totale.

L'observation de la corrélation entre les variables étudiées (Figure IV.2) montre que le dépérissement a une forte corrélation avec la pente. Et les paramètres suivants ont une forte corrélation entre eux (l'altitude, le phosphore (P), exposition, CE et le pH). Pour les deux facteurs la réserve utile (RU) et le calcaire total montre une relation neutre avec le dépérissement. Une relation positive entre la réserve utile (RU) et l'altitude et une autre relation négative se voit entre la réserve utile (RU) et le calcaire total.

La projection des placettes (objets des analyses de la réserve utile) dans le plan factoriel (Figure IV. 3) montre que la répartition des placettes est homogène dans les quatre 4 quadrants. Les placettes les plus rapprochés sont similaires est subissent les mêmes conditions.

➤ Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sert à ressortir les groupes des placettes issues de l'ACP, leurs niveaux de similarité et tracer des limites claires entre ceux-ci. Elle est réalisée sur les coordonnées des placettes et des variables dans le plan factoriel (1X2) de l'ACP (Figure IV.2).

Le dendrogramme (Figure IV.4) fait ressortir 3 groupes de ressemblance. On dira que des individus se ressemblent si les points associés sont proches les uns des autres.

Le premier groupe est composé de 17 observations. Le deuxième groupe est composé de 20 observations. Le troisième groupe est composé de 23 observations.

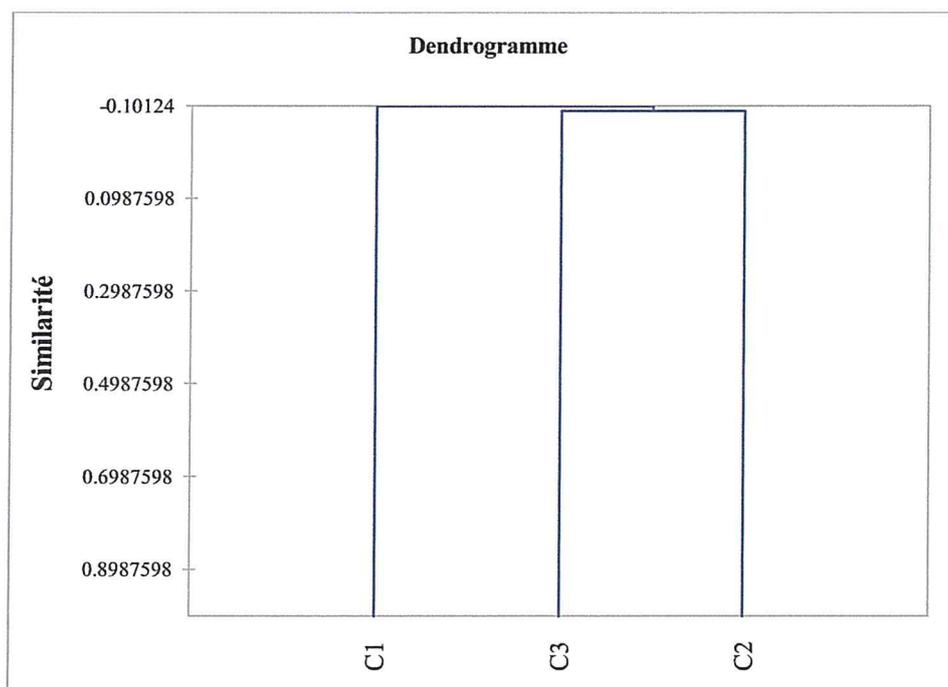


Figure IV.4 : Dendrogramme des placettes

➤ Description des groupes

L'ensemble de terrain est un terrain caillouteux avec des fortes pentes. La réalisation des profils était un peu difficile.

Le premier groupe : est présenté par 17 observations.

L'ensemble de ses placettes se caractérisent par des fortes pentes, et possédantes un taux élevé en réserve utile (RU).

Ce groupe regroupe les placettes saines et les placettes déperissantes au même temps, les placettes saines se trouvent à haute altitude.

Les placettes les plus remarquantes, se localise en haut des axes F1 (P33, P38 et P39) (Figure IV.5) se sont des placettes saines, d'un peuplement jeune. Elles présentent les taux élevés de la réserve utile (RU), l'ensemble des observations a un taux varie entre (10.56 et 16.59).

La conductivité électrique est comprise entre (0.02 - 3.19) avec un pH entre (5,86 - 6.95). Le phosphore est présent avec des faibles quantités (8.60) à fortes quantités (35.83).

Pour le calcaire total il n'est pas présent dans ce groupe sauf dans trois observations.

Le deuxième groupe, il regroupe 20 observations.

Ce groupe regroupe des stations hétérogènes dans leur caractéristique : une partie englobe des stations qui ont un profil caractérisé par un taux de déperissement le plus élevé avec des fortes pentes ; un taux de calcaire qui n'est pas négligeables. Une autre partie des stations présentées par l'influence des expositions Sud; un taux élevé en conductivité électrique (CE) comprise entre (0.12 - 3.78) et une fertilité phosphatée (8.60 - 31.53). Pour le calcaire total, ces stations présentent un taux de calcaire total entre (1.50 - 73).

Les taux de la réserve utile (RU) comprise entre (6.51 - 10.98).

Les observations les plus remarquantes, se localisent à l'extrémité de l'axe F2, à droite on trouve (P21, P24, P25 et P26), à gauche on trouve (P9, P46, P51 et P52) (Figure V.7).

Le troisième groupe, il regroupe 23 observations.

L'ensemble de ses placettes se caractérisent par un taux de déperissement le plus élevé ; une forte pente.

Des taux bas de réserve utile (RU) (6.56 - 6.97) ainsi que se sont les placettes qui ont un taux élevé en calcaire total (32 - 73).

Les placettes les plus représentatives se localisent à gauche de l'axe F2 (P9, P51 et P52) (Figure V.5).

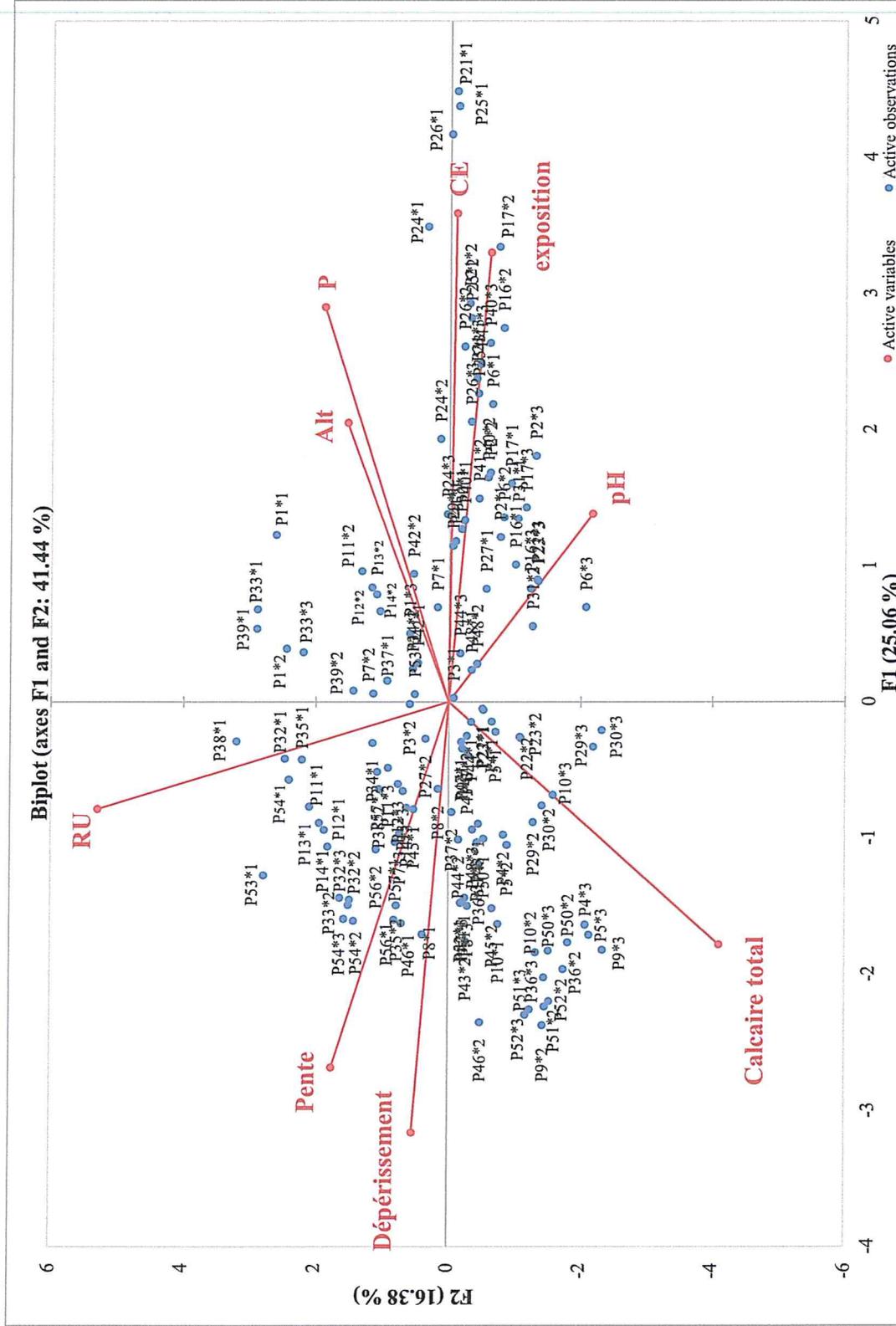


Figure IV.5 : Biplot

Tableau IV.2 : Données statistiques des placettes saines et dépéris

Variable	Placettes saines					Placettes dépéris				
	Min	Max	Mean	Variance	Ecart-type	Min	Max	Mean	Variance	Ecart-type
Alt	1533	2036	1743,75	27132,40	164,719	1500	2062	1791,91	13765,24	117,325
Pente	25	45	34,79	72,266	8,501	10	45	28,36	60,72	7,792
pH	5,65	7,54	6,49	0,131	0,362	5,86	7,63	6,54	0,12	0,359
CE	0,42	3,78	1,64	0,745	0,863	0,11	3,78	1,87	0,356	0,597
P	7,17	35,83	15,83	46,029	6,784	7,17	31,53	16,82	57,92	7,611
Calcaire tot	0	73	11,71	339,649	18,430	0	73	10,20	394,70	19,867
RU	6,56	16,59	9,48	6,137	2,477	6,51	13,74	8,16	10,49	3,240

Le tableau (IV.2) présente les données récapitulatives des placettes saines et dépéris (physico-chimique du sol). Les placettes saines sont caractérisées par un sol basaltique (pH entre 5,65 à 7,54), une conductivité électrique (0,42 à 3,78), des taux de phosphore entre 7,17 et 35,83 et des taux calcaire entre 0 et 73. La réserve utile du sol est entre 6,56 et 16,59.

Alors, pour les placettes dépéris sont caractérisées par un sol basaltique (pH entre 5,85 à 7,63), une conductivité électrique (0,11 à 3,78), des taux de phosphore entre 7,17 et 31,53 et des taux calcaire entre 0 et 73. La réserve utile du sol est de (6,51 à 13,74).

L'emplacement de toutes les placettes est entre 1500 à 2036m d'altitude avec des faibles à forte pentes.

Il existe des exceptions : Placettes dépérit marqué avec un taux en réserve utile (RU) égal à 13,74, indiquant qu'il existe d'autre facteur agissent sur la RU. Cette placette est caractérisée par un taux de calcaire nul, une haute altitude de 1804 m avec une pente de 45% et une exposition Sud.

Alors, la placette saine qui est marquée par un taux faible en réserve utile (RU) égal à 6,51. Elle est caractérisée par un taux de calcaire nul, phosphore (23,65), une haute altitude de 1536m, pente 25 et une exposition Nord.

IV.4.2. Discussion

Un sol est profond s'il atteint ou dépasse 80 cm, il est superficiel si son épaisseur n'atteint pas 20 cm (Bon, 1978). D'après les profils réalisés, le sol caractérisant nos placettes est moyennement profond.

pH : Il est connu que la plupart des sols du Chélia et Ouled Yagoub présenteraient des conditions d'une bonne assimilation des éléments nutritifs et notamment le phosphore, à cause d'un pH neutre ou légèrement basique (Abdessemed, 1980).

Malgré la diversité des stations, on n'a pas repéré de différence significative au niveau des pH bien que les sols subissent souvent des effets litières un peu différents.

Le substrat basaltique et la profondeur du sol stimule positivement l'accroissement radial du cèdre mieux que le calcaire (Said & Bakhyi, 2016).

La conductivité électrique (CE) : S'il se produit un phénomène de lessivage il reste limité au profil; et les sels ne sont pas exportés en dehors, ils ont au contraire tendance sous l'action de l'évaporation et du déficit d'humidité à se concentrer dans le profil et surtout dans les horizons superficiels (Massoumi, 1968).

La conductivité électrique (CE) d'un sol est influencée par plusieurs facteurs telles que la texture, la structure, la porosité, la teneur en eau (Michot, 2003 ; Friedman, 2005 ; Goulet & Barbeau, 2006 ; Allred *et al.*, 2008 ; Schneider, 2008).

L'étude de Halitim (2006) souligne que tous les constituants des sols des cédraies du Chélia qu'ils soient organiques ou minéraux, possèdent une charge électrique de surface. Cela confirme nos résultats trouvés (Figure IV.2).

Le calcaire total : influence directement deux paramètres : le pH et la structure du sol (Baize, 2018). Les profils étudiés présentent des teneurs variables en calcaire total variant entre 0 et 53%, avec un seul profil possédant un taux estimé par 73 (Annexe I). la présence de calcaire total localisé dans les forêts de pentes peut causer indirectement le dépérissement (Gaouas *et al.*, 1997) et la dynamique du phosphore dans les sols calcaires est un problème extrêmement complexe (Gervy, 1970). De nombreux résineux sont sensibles à la présence de calcaire dans le sol et les études furent également d'ordre physiologique (Piou, 1979). Et la plupart de nos cédraies se localisent sur des substrats calcaires. Et il réussit sur ces sols calcaires et caillouteux si seulement la profondeur recherchée par les racines est suffisante (Putod, 1979 ; Toth, 2005).

Les profils d'un taux de calcaire total élevé coïncident avec les placettes dépérissent. Au plan statistique, l'analyse de l'ACP montre une différence significative concernant l'effet conjugué des facteurs altitude, exposition sur le phosphore et la conductivité électrique (CE) des sols étudiés.

La réserve utile (RU) du sol, particulièrement affectée par les aléas météorologiques, contrôle une part importante de la productivité et surtout de l'état sanitaire des peuplements forestiers (Granier *et al.*, 1999 ; Ridremont *et al.*, 2012).

Il n'existe pas une relation directe entre la réserve utile (RU) et le calcaire total (Figure IV.2) ; elles sont reliées par l'effet de la texture du sol. Les résultats montrent que la teneur en réserve utile (RU) obtenue diffère entre les profils des placettes saines et dépérit. Aussi, les résultats trouvés d'un seul profil présentent des taux de la réserve utile (RU) significatifs entre les horizons. Et cela a une influence directe sur la régénération du cèdre de l'Atlas.

La réduction de la disponibilité en eau du sol, associée à une demande atmosphérique croissante en vapeur d'eau, devrait réduire la productivité de la forêt, déclencher des épisodes de dépérissement et augmenter la mortalité des arbres (Adams, 2017). L'installation d'une telle sécheresse à long terme induit des modifications sur les caractéristiques du sol ainsi que les caractéristiques physiologiques chez les arbres.

Pour assurer une bonne croissance des arbres, les sols doivent à la fois être fertiles, bien aérés et avec un bon pouvoir de rétention en eau. Un sol à trop fort pourcentage de cailloux aura une réserve en eau faible et ne permettra pas un ancrage suffisant du système racinaire des arbres entraînant un manque de stabilité du peuplement en cas de tempête (Vanpeene-Bruhier, 2003).

L'influence de l'altitude est bien observée sur la réserve utile, où on observe que le peuplement dépérit se localise dans les basses altitudes à forte pente. Selon Halitim (2006) les déficits hydriques sont d'autant plus précoces, plus longs et plus intenses qu'on se situe en basse altitude.

Le peuplement à faible réserve utile (RU) et à basse altitude peut subir une sécheresse édaphique pouvant influencer son fonctionnement physiologique normal (fermeture des stomates, diminution de l'activité photosynthétique) sur plusieurs années sèches successives (Levy *et al.*, 1994 ; Bréda *et al.*, 2004 ; Halitim, 2006).

La présence des placettes saines possédées un taux faible en réserve utile (RU) ou le contraire signifie qu'elles sont influencées par d'autres facteurs de la station. La réserve utile est influencée par la précipitation et l'évapotranspiration. Par le ruissellement des eaux et les expositions Sud (chauds et ensoleillés). Cela agissant directement sur l'état sanitaire de l'arbre.



Figure IV.6 : Exemple de quelques profils réalisés au niveau des mont Chélia (A et B)

(S. Belloula, 2016).



Figure IV.7 : Exemple de quelques profils réalisés au niveau des mont d'Ouled Yaagoub (a, b). (S. Belloula, 2016).

VI.5. CONCLUSION

Historiquement, les meilleurs sols sont les sols forestiers. Dernièrement, ces sols sont devenus fragile. Les résultats des analyses chimiques du sol faite (pH, conductivité électrique, phosphore et le calcaire total) ont révélé une légère différence entre les placettes saines et déperit. Cela peut s'expliquer par l'effet des substrats minéraux qui ont tendance à maintenir la réaction des sols proche de la neutralité. De telles valeurs ont été observées dans la cédraie du parc national du Belezma (Belloula, 2010).

Dans notre zone d'étude où la répartition des pluies et la période de sécheresse estivale est assez longue (jusqu'à 5 mois), la perte d'eau par ruissellement due à la texture légère est accentuée par le dommage du sol provoqué par le surpâturage (piétinement).

La réserve utile du sol varié d'un profil à un autre par des valeurs non négligeable. Cette variation dépend de la nature du sol, sa texture et par l'emplacement des placettes (altitude, pente et exposition).

La différence des taux de la réserve utile (RU) au sein d'un seul profil nécessite des études très approfondies dans l'espace et dans le temps.

Une étude approfondie et détaillées du sol forestier à cèdre est souhaitable. Des différents éléments nutritifs, minéraux, granulométrie, ..., etc. Tout ceci apporterait certainement d'autres résultats précieux pour interpréter encore l'effet du sol sur le dépérissement.

Le facteur sol n'est le seul a étudié pour voir son influence sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas, d'autre facteurs comme les facteurs dendrométrique et du milieu ont été envisagés a les réaliser dans le chapitre suivant.

Chapitre V

**SYNTHÈSE DENDROÉCOLOGIQUE
SUR LE DÉPÉRISSEMENT DU
CÈDRE DE L'ATLAS**



Chapitre V

SYNTHÈSE DENDROÉCOLOGIQUESUR LE DÉPÉRISSEMENT DU CÈDRE DE L'ATLAS

V.1. INTRODUCTION

La dendroécologie est l'une des disciplines qui s'intéresse au diagnostic des conditions de survies des peuplements forestiers.

la dendroécologie est un outil pour affiner les connaissances sur l'autécologie des essences forestières (Latte *et al.*, 2012). Elle est l'objet de l'étude des relations spatio-temporelles entre les végétaux ligneux et leur habitat. Elle se concentre sur l'influence des signaux environnementaux communs à tous les arbres d'une communauté et les perturbations à grandes échelles externes au peuplement (Latte *et al.*, 2015 ; Corona et Stoffel, 2013).

Le besoin d'une meilleure compréhension des fonctionnements et des mécanismes du dépérissement, nous conduisant à l'étude de plusieurs facteurs agissant sur le dépérissement. L'objectif de ce chapitre est de déduire les facteurs les plus influençant sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas. Et de connaître leurs relations avec notre phénomène.

V.2. MATÉRIELS et MÉTHODES

V.2.1. Collecte des données

Au niveau de la cédraie de Chélia et d'Ouled Yagoub (zone d'étude), plusieurs sorties ont été réalisées sur les différents versants.

Les types d'échantillonnages utilisés en foresterie sont : l'échantillonnage aléatoire et simple, l'échantillonnage systématique, l'échantillonnage stratifié, l'échantillonnage en grappes (Picard, 2006) et d'autre ... etc. Le choix d'un échantillonnage répond à des exigences du terrain ou à des objectifs bien précis (Glèlè & Lykke, 2016).

L'échantillonnage adopté dans la présente étude est de type subjectif. Le choix des placettes est basé sur : l'état sanitaire de la cédraie et les variables environnementales (altitude et exposition) pour caractériser toutes les gammes de la variabilité du milieu étudié. Cependant, de telles pratiques sont limitées par l'accessibilité au terrain.

V.2.2. Matériels utilisés

Le matériel utilisé lors de la récolte des données sont :

- Blum-leiss, pour mesurer la hauteur dominante des arbres;
- Un GPS, pour le positionnement des placettes (longitude, latitude);
- Compas forestier, pour mesurer les diamètres des arbres à 1.30m;
- Altimètre, pour mesurer les altitudes (mais les GPS disposent d'une fonction d'altimètre);
- Boussole, pour détecter l'orientation (les GPS disposent d'une fonction d'altimètre);
- Clisimètre, pour mesurer les pentes;
- Fiches d'inventaire et des crayons pour les données collectées et la description des placettes (Annexe3).

V.2.3. Démarche méthodologique

Au totale, soixante placettes sont effectuées dans l'ensemble des deux cédraies. Elles sont réparties comme suit : 31 au niveau du Chélia et 29 au niveau d'Ouled Yagoub (Figure V.1).

V.2.3.1. Choix des placettes

Il est connu que les placettes d'inventaire peuvent avoir une forme circulaire, carrée ou rectangulaire (Rondeux, 1999 ; Kangas & Maltamo, 2007).

Les placettes d'échantillonnage choisi sont des placettes de forme circulaire. Cette forme se justifiée par l'absence de directions privilégiées qui de plus se prête à une délimitation rapide et facile (Leleux, 1984 ; Dagnelie, 1998 ; Rondeux, 1999) concentriques à surfaces déterminées et prenant chacune en compte des arbres appartenant à des différentes catégories de grosseur (Brassel et Brändli, 1999 ; Salas-Gonzales *et al.*, 2001). Une placette circulaire possède un périmètre plus petit, ce qui signifie que moins de décisions sont à prendre concernant des arbres limitrophes (Mc Roberts *et al.*, 1992). La distance d'un arbre au centre de la placette peut être estimée « à l'œil » ou mesurée, selon les conditions de peuplement et la qualité d'appréciation visuelle des opérateurs (Bousson, 2002).

La délimitation de la placette est effectuée en fonction de la pente. En terrain pentu, la surface de chaque placette sera corrigée de la manière suivante :

La relation est : $R = \cos \alpha \times L$

Où : α : l'angle de la pente

L : longueur de rayon de la placette dans une terre plate d'une surface de 10 ares (17,83 m).

Les arbres inclus dans la placette sont numérotés et comptés. Celle-ci doit contenir au minimum 15 arbres.

Les placettes échantillonnées ont fait l'objet de différents prélèvements et mesures : coordonnées GPS, pente, altitude, exposition, relevés dendrométriques (diamètre à 1.30 m, hauteur dominante, nombre d'arbre), relevés floristique, profils pédologiques et la description sommaire de la placette.

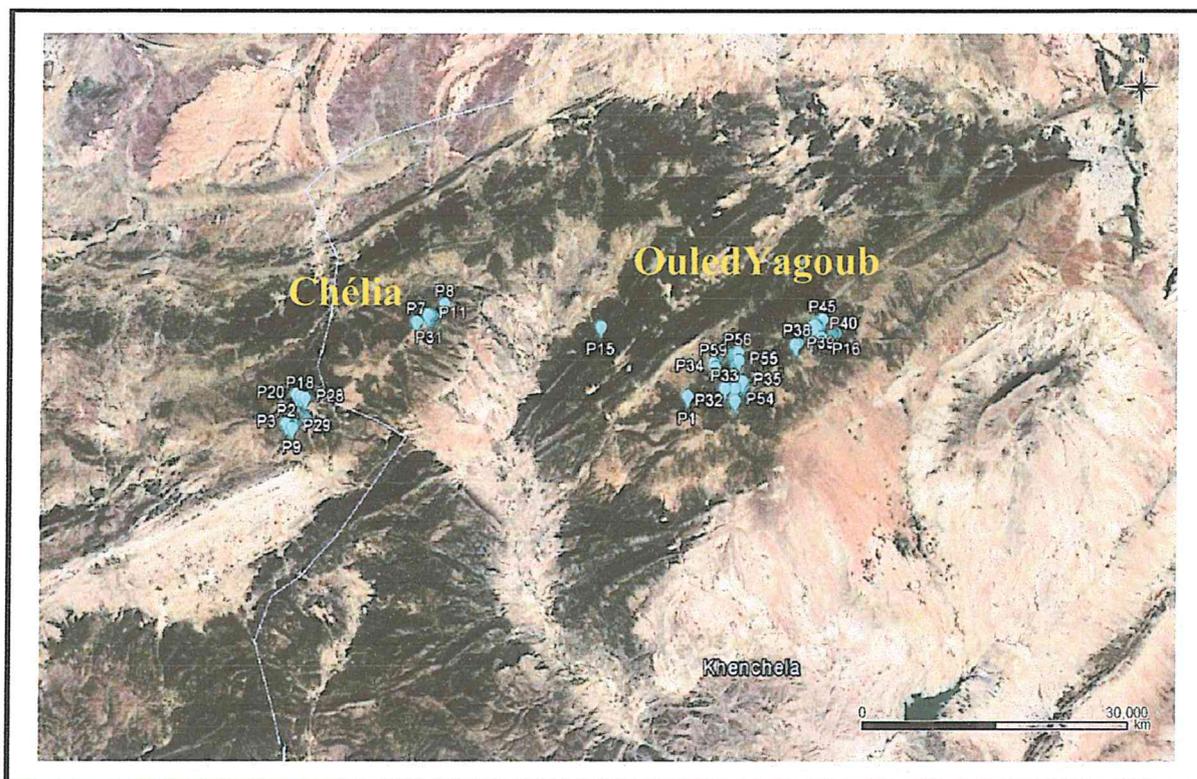


Figure V.1 : Carte d'emplacement des placettes d'échantillonnage.

V.2.3.2. Variables calculées

A. Surface terrière à l'hectare (G/ha)

La surface terrière G est le recouvrement basal représenté par la surface occupée par les parties aériennes des individus d'une espèce donnée au niveau du sol, ou à hauteur de poitrine dans le cas des arbres (Parde, 1961; Gounot, 1969). La surface terrière est un excellent critère de la densité de peuplement de sa croissance et de volume sur pied (Nedjahi, 1988).

Elle est calculée à partir de la somme des sections à 1,30 m du sol tous les arbres sur pieds à l'hectare :

$$G/ha = \pi \times \sum (d_i)^2 / 4s$$

B. Densité à l'hectare

C'est un paramètre en liaison directe avec la structure (le nombre de bois à l'hectare), la densité est en étroite relation avec les conditions du milieu. Elle agit directement sur la hauteur et le diamètre des sujets et contribue à la fluctuation du volume de bois (Parde, 1988).

La densité des peuplements joue un rôle important dans la croissance des arbres en conditionnant le partage des ressources disponibles entre les différents arbres du peuplement et donc le niveau de concurrence interindividuelle, plus la densité d'un peuplement est élevée, moins l'accroissement en diamètre des troncs et des branches est important (Périé *et al.*, 2006).

Elle est calculée comme suit :

$$N_{ha} = n/s$$

n : Nombre d'arbre par hectare ; S : Surface de la placette en hectares.

C. Hauteur dominante (H_{dom})

C'est un bon indice de fertilité de la station indépendamment des opérations sylvicoles ou de coupes réalisées (Hamilton, 1975). Elle est définie comme étant la hauteur moyenne des cent (100) plus gros arbres à l'hectare (Parde, 1961 ; Hamilton, 1975 ; Parde et Bouchon, 1988).

Elle varie d'une manière assez continue dans le temps à l'inverse des hauteurs moyennes habituelles (Palm, 1989).

D. Diamètre moyen

C'est le moyen arithmétique de tous les diamètres. Il est calculé par la formule :

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n d_{1,30} \text{ (cm)}$$

N : Nombre d'arbre de la placette ;

$d_{1,30}$: Le diamètre à 1.30 m.

E. Diamètre et hauteur de l'arbre de la surface terrière moyenne (Dg)

Le diamètre est calculé par la formule suivante : $dg = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{1,30}^2}$

Où : $d_{1,30}$: Diamètre de l'arbre à 1,30 m.

N : Nombre d'arbres par placette.

F. Taux de dépérissement mortalité (M%)

$M (\%) = Nd / N$ Où : N_d : nombre d'arbre dépérit par placette ;

N : nombre d'arbre par placette.

V.3. RESULTATS et DISCUSSION

V.3.1. Résultats

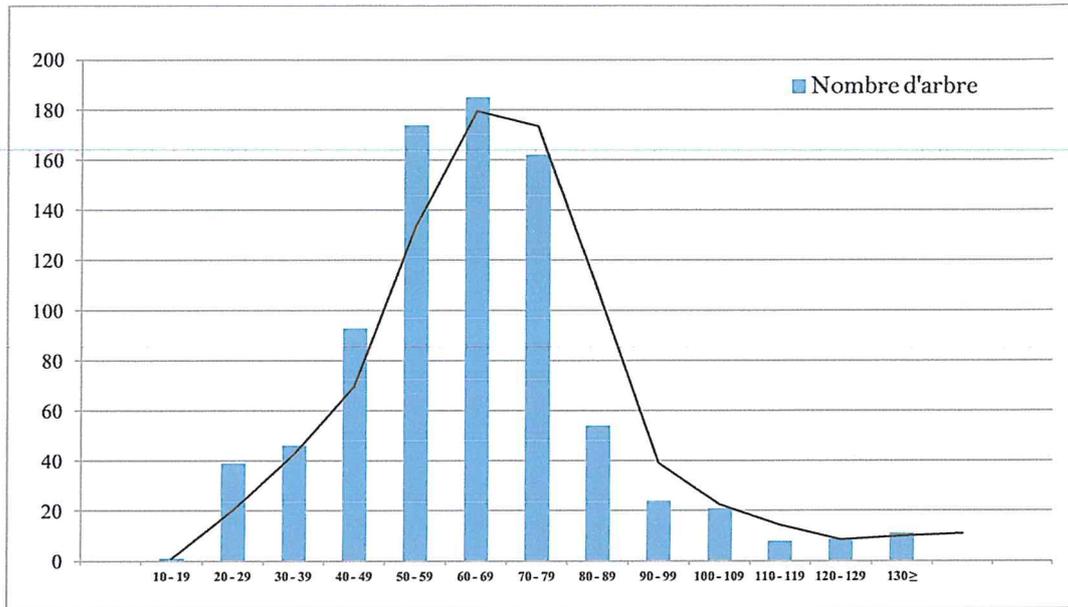
V.3.1.1. Analyse diamétrique

Les paramètres dendrométriques mesurés sur 1250 arbres entre arbres sains et dépérit (au niveau des 60 placettes) sont : le diamètre à 1.30 m et la hauteur dominante de la surface terrière moyenne.

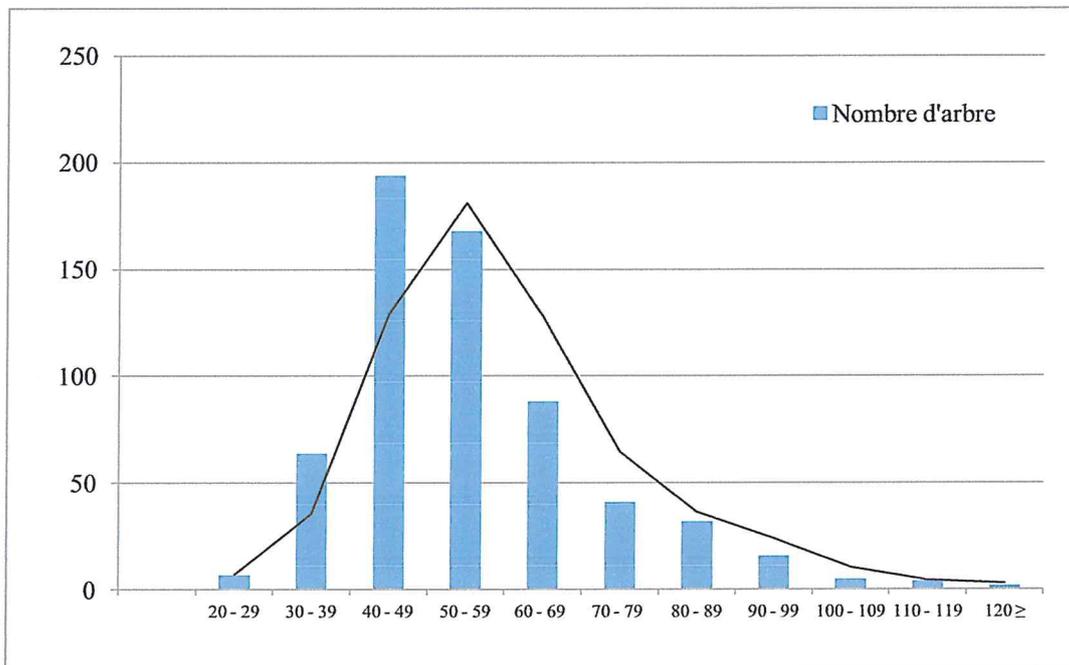
Les placettes échantillonnées sont réparties comme suit 30 placettes dépérit et 30 placettes saines. Au niveau du terrain, il est difficile de réaliser le plan (le terrain conditionne le choix des placettes).

La distribution des individus en fonction des classes de diamètre dans les Monts d'Aurès (Chelia "A" et Ouled Yagoub "B") (Figure V.2) aide à connaître la structure des peuplements. Selon Schütz (1997), on peut décrire la structure du peuplement forestier via les classes de diamètre.

La structure permet la connaissance des individus de toutes tailles et tous âges constituant le peuplement, ce qui conduit à la compréhension des interactions entre ses différents composants et le contrôle du fonctionnement de l'écosystème (Bourlière et Lamote, 1978). La description des structures et de leur évolution avec le temps permettra des progrès en matière d'inventaire et de conduite des peuplements forestiers (Bouchon, 1979).



A



B

Figure V.2 : Distribution des individus en fonction des classes de diamètre dans les Monts d'Aurès (Chelia "A" et OuledYagoub "B")

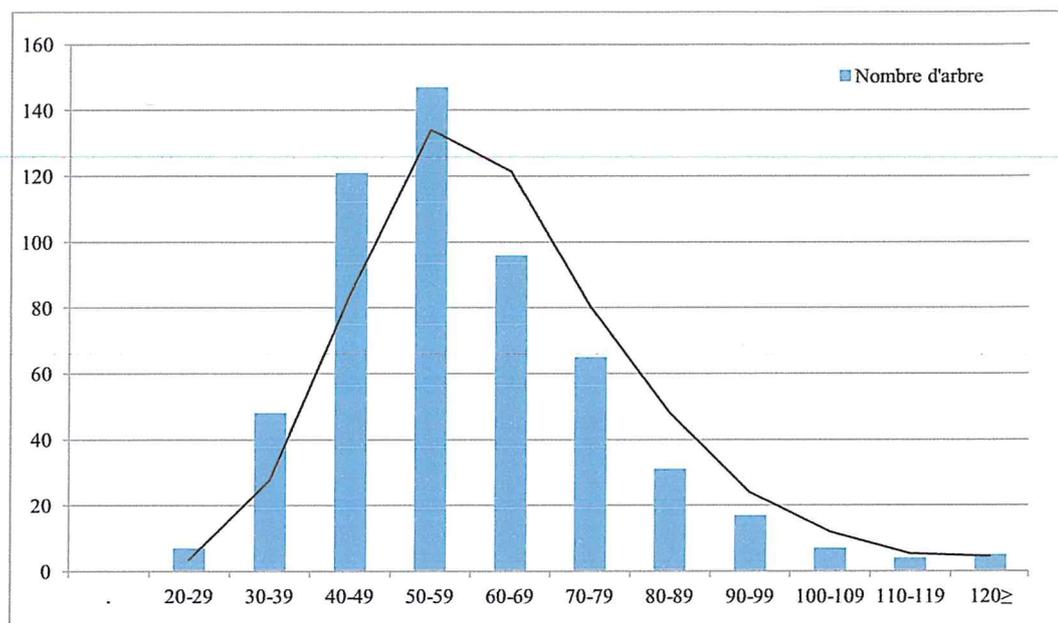


Figure V.3 : Structure du peuplement selon le diamètre des arbres dépérit.

La distribution des individus en fonction des classes de diamètre dans les Monts d'Aurès (Chelia et Ouled Yagoub) est présentée dans la figure (V.2). L'amplitude de chaque classe est fixée par 10 cm. La dernière classe des diamètres regroupe les tiges plus de 130 cm pour le peuplement du Chélia et 120 cm pour Ouled Yagoub.

L'analyse des histogrammes de la structure diamétrique du cèdre de l'Atlas, dans les deux zones, appartenant à la distribution gaussienne. Cette distribution fait ressortir que le peuplement est équienné.

Au niveau du peuplement (Mont de Chélia), la plupart des individus se présentent dans les classes où le diamètre varie entre 30 à 90cm avec un taux de 21,04%, 22,37% et 19,59% pour les classes (50-59), (60-69), (70-79) respectivement . Pour le peuplement d'Ouled Yagoub, les arbres ont des diamètres variés entre 26 à 130cm où la majorité se trouve dans les deux classes (40-49) (50-59) avec un taux de 31,24%et 27,05 % respectivement (Figure V.2).

La figure (V.3) montre une idée sur les diamètres des arbres dépérit. L'objectif de réaliser la distribution diamétrique des arbres dépérit c'est pour voir les grosseurs les plus touché par ce phénomène. Le grand nombre des arbres dépérit est compris dans les classes (40-49), (50-59) et (60-69) avec un taux de 22,08%, 26,82% et 17,52% respectivement (Figure V.3).

En examinant les classe diamétriques (Figure V.3) nous remarquons que tous les différents types de diamètre ont été touchés par le dépérissement.

V.3.1.2. Analyse statistique

Les données extraites du terrain ont fait l'objet d'une analyse statistique à l'aide du logiciel XLSTAT (2017). L'usage de l'analyse en composantes principales (ACP) est très répandu pour traiter des tableaux de relevés écologiques de type stations-variables environnementales (Baglinière *et al.*, 1987 ; Charraut *et al.*, 1996). Ainsi, la classification ascendante hiérarchique (CAH) pour la distinction des groupes d'homogénéité.

Les variables dendrométriques, édaphiques avec les variables du milieu ont été analysées en composantes principales (ACP) afin de connaître les corrélations existante entre les facteurs et les variables étudiés afin d'expliquer le dépérissement.

Les variables quantitatives sont reportées telles qu'elles, par contre les variables qualitatives ont été codées. Le codage disjonctif complet permet de les recoder en classe semi quantitatives c'est-à-dire qu'on associé à chacune de ses modalités un nombre réel (Casin, 1999 *in* Beghami, 2013).

V.3.1.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Tableau V.1 : Valeurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Valeur propre	2.98	1.60	1.47	1.33	1.07	0.90	0.83	0.67	0.53	0.46	0.439	0.387	0.30
Variabilité (%)	22.96	12.34	11.31	10.27	8.22	6.93	6.43	5.15	4.09	3.57	3.379	2.977	2.32
% cumulé	22.96	35.30	46.62	56.89	65.12	72.06	78.49	83.65	87.74	91.32	94.70	97.68	100

Le tableau (IV.1) des variables propres est utilisé pour déterminer le nombre d'axes principaux à conserver après l'ACP. Ce tableau montre l'inertie portée par chacun des axes de l'ACP. La variabilité est répartie sur 13 Axes. La première ligne « Valeurs propres » correspond à l'inertie portée par chacun des axes.

La deuxième ligne « Variabilité » correspond au pourcentage (%) d'inertie portée par chacun des axes. Le tableau montre que les deux premiers axes factoriels (F1, F2) contiennent 35.30% cumul d'information. Alors la représentation sur les deux premiers axes factoriels est la plus importante.

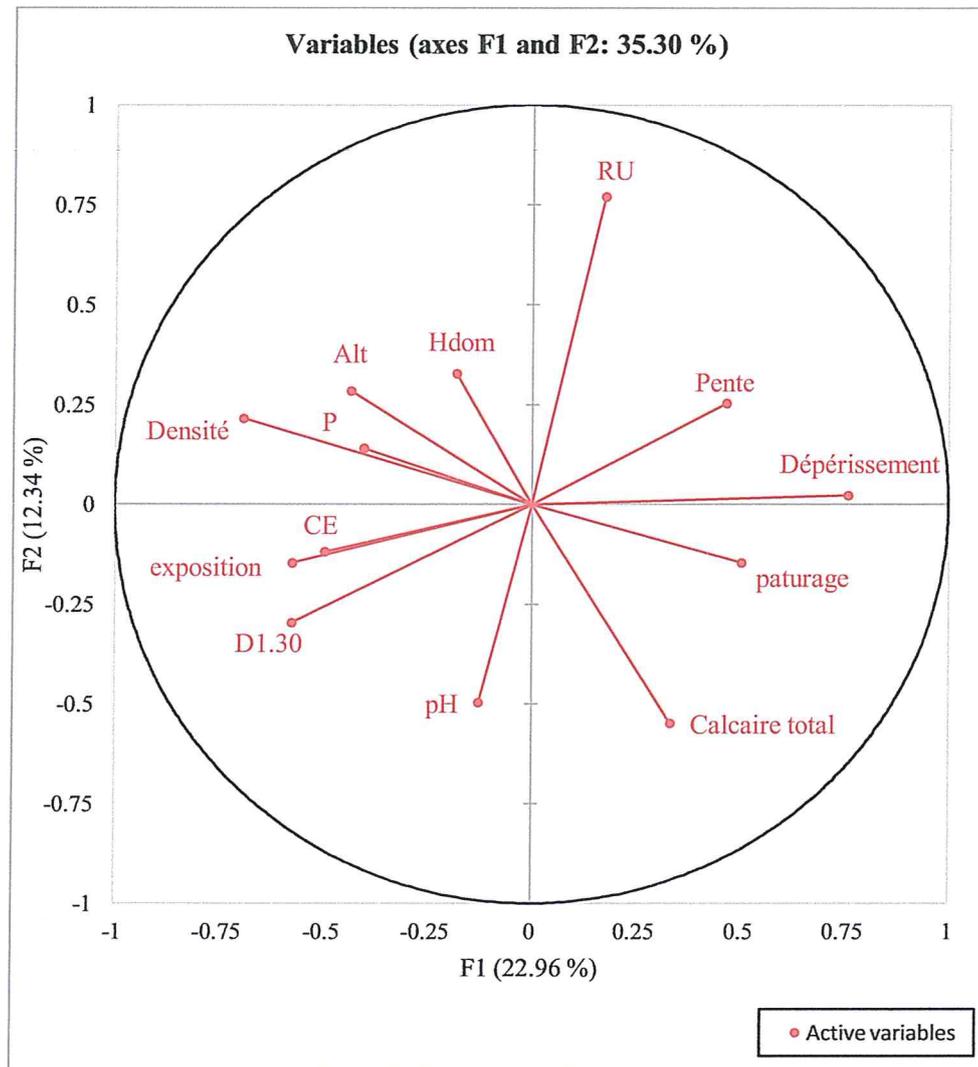


Figure V.4 : Cercle de corrélation

(Variables de la station ; données dendrométriques et les données du sol)

L'examen du cercle de corrélation (Figure IV.4) montre : Le premier axe F1 est mieux présenté par le dépérissement. Le dépérissement est corrélé positivement avec la pente, calcaire total, le pâturage et la réserve utile (RU). Cela signifie que le peuplement fortement dépérit est marqué par le surpâturage et une forte pente. Et il est corrélé négativement avec l'altitude, l'exposition, Hdom, D1.30, pH, CE, le phosphore (P) et la densité du peuplement. Cela signifie que le peuplement est marqué par une bonne fertilité phosphatée de la station.

Le deuxième axe F2 est mieux présenté par la réserve utile (RU). Il corrélé positivement avec l'altitude, la pente, le dépérissement, Hdom, le phosphore (P) et la densité. Cela signifie que ces peuplements sont présentés à haute altitude avec un bon réservoir en eau. Et il est corrélé négativement par l'exposition, D1.30m, pH, CE, calcaire total et le surpâturage.

Dans l'ensemble du cercle de corrélation, les facteurs les plus présentés et qui ont le grand influence sont la réserve utile, la densité du peuplement, D1.30m, l'exposition, la pente et le calcaire total.

L'observation de la corrélation entre les variables montre que le dépérissement est fortement corrélé avec la pente et le pâturage et lié négativement avec l'altitude, l'exposition, Hdom, la densité, le phosphore (P) et le CE.

V.3.1.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH sert à ressortir les groupes de placette issue de l'ACP et tracer des limites claires entre ceux-ci. Elle est réalisée sur les coordonnées des placettes et des variables dans le plan factoriel de l'ACP (Figure V.6).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a pour objectif de constituer des groupes homogènes d'objets (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables, ou à partir d'une matrice décrivant la similarité ou la dissimilarité entre les objet (Source: logiciel XLSTAT).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est représentée graphiquement par un dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données pour se faire une idée d'un nombre adéquat de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées (Source: logiciel XLSTAT).

La projection factorielle des placettes (Figure IV.5) présente trois groupes.

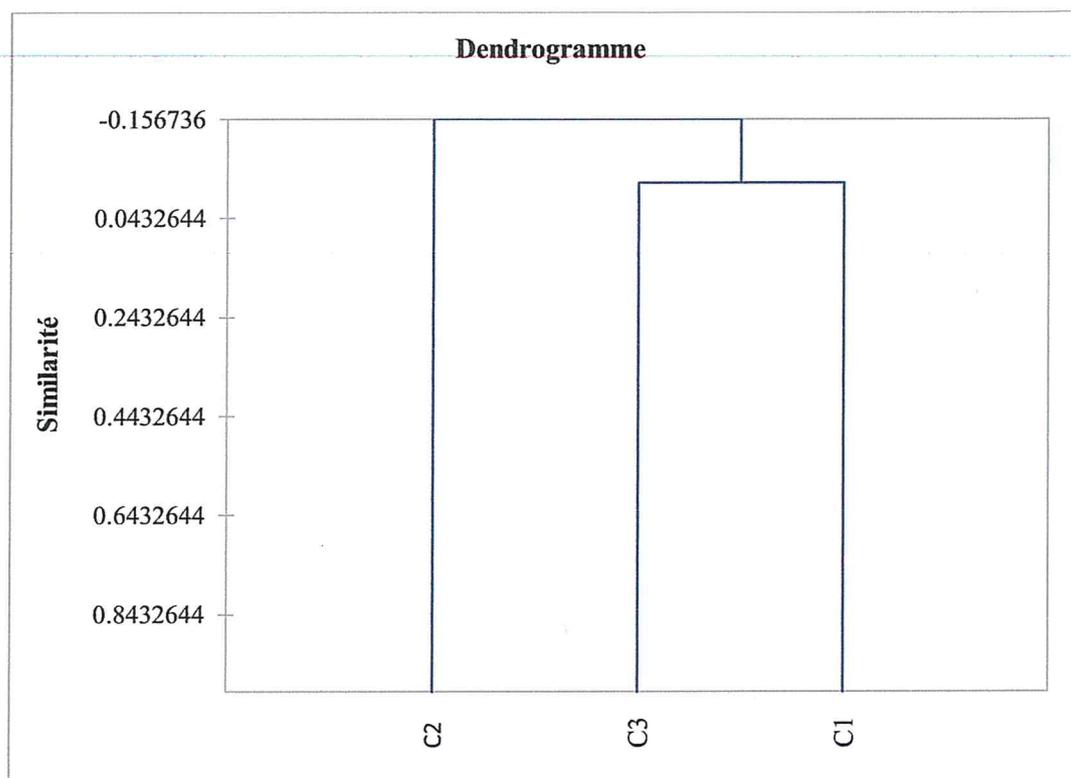


Figure V.6 : Dendrogramme des placettes

V.3.1.3. Description des groupes

Le dendrogramme (Figure V.6) révèle la présence de trois groupes. Ces trois groupes regroupent et classent les placettes par le principe de la similarité (figure V.7).

Le premier groupe : est présenté par 20 placettes.

L'ensemble de ces placettes se caractérisent par un terrain caillouteux avec des fortes pentes. Le cèdre de l'Atlas est présent avec le chêne-vert, l'oxycèdre avec un seul pied de frêne dimorphe. Ce groupe regroupe les placettes saines et les placettes dépérissantes au même temps. Des placettes possédantes un taux élevé en réserve utile (RU). Présence de la chenille processionnaire.

Les placettes les plus remarquantes, se localise en haut des axes F1 (P1, P38 et P39) (Figure V.5), elles sont des placettes saines avec un peuplement jeune. Et la présence d'une régénération remarquante.

Le deuxième groupe, il regroupe 23 placettes.

L'ensemble de ce groupe se sont des placettes saines avec la présence de quelques placettes dépérit. Elles sont localisées sur les expositions les plus arrosées. Elles se caractérisent par une faible pente ; de fortes densités. Les stations les plus fertiles avec des diamètres et des hauteurs remarquables. Ces placettes sont caractérisées aussi par la fertilité phosphatée et un taux élevé de la conductivité électrique (CE).

La végétation présente avec le cèdre de l'Atlas est le chêne-vert, l'oxycèdre avec un seul sujet de frêne dimorphe. Ces placettes ont subi des coupes d'assainissement et au même temps présente un taux élevé des coupes illicite et le surpâturage.

Les placettes les plus remarquantes, se localisent en haut des axes F1 (P21, P25 et P26) (Figure V.5).

Le troisième groupe, il regroupe 17 placettes

L'ensemble de ses placettes se caractérisent par une forte pente ; une grande intensité du surpâturage ; un taux bas en réserve utile (RU) ainsi que se sont les placettes qui ont un taux élevé du calcaire total. Ces placettes se caractérisent par un terrain caillouteux.

Présence du cèdre de l'Atlas avec un taux élevé de chêne-vert, l'oxycèdre, l'asphodèle et Diss. Ce groupe regroupe les placettes en état sanitaire dépérit ; présence de la chenille processionnaire ; surpâturage intense ; coupes illicite. Les placettes les plus représentatives se localisent à la droite de l'axe F2 (P9, P51 et P52) (Figure V.5).

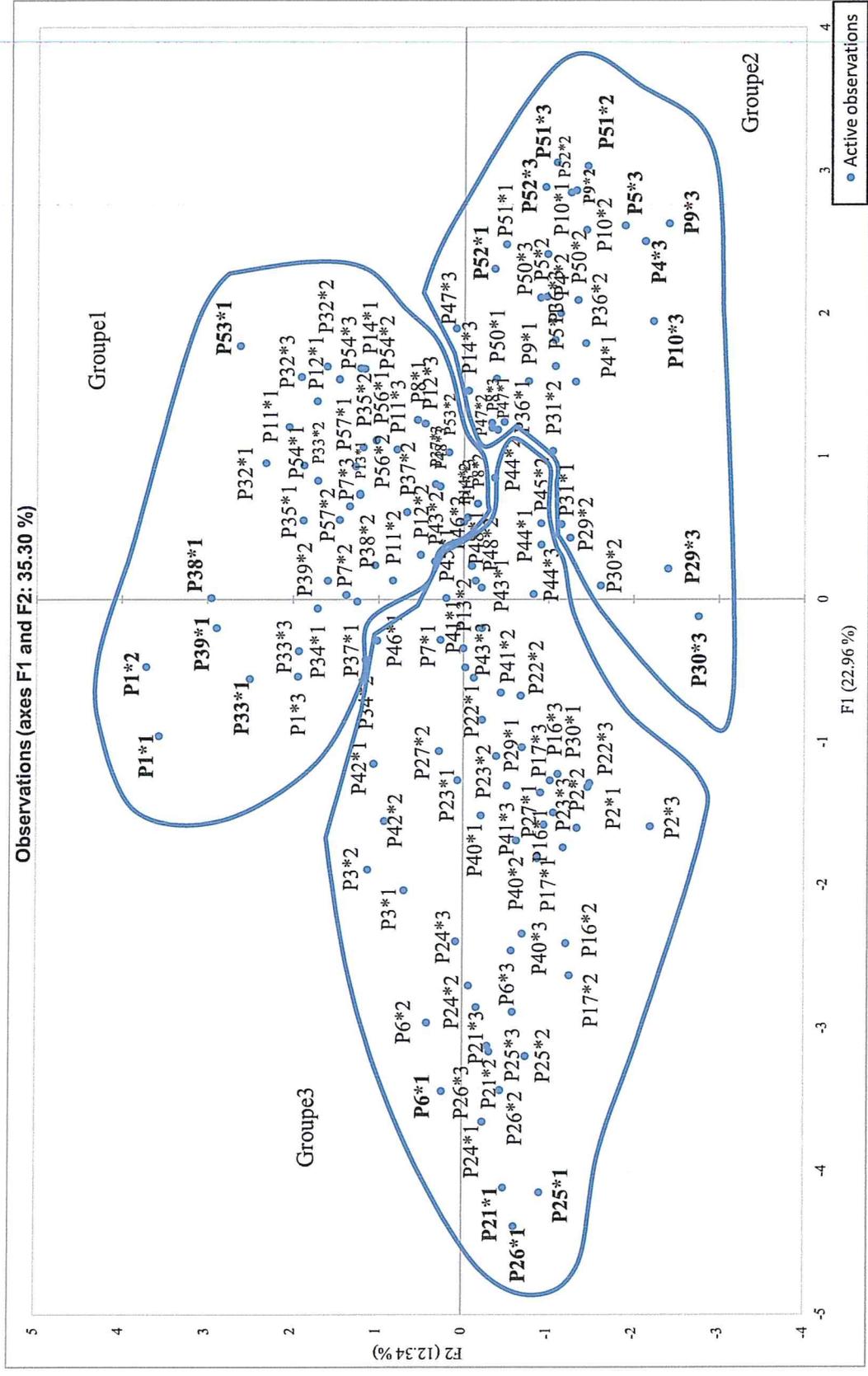


Figure V.7 : Projection factorielle des placettes.
(Variables de la station ; données dendrométriques et les données du sol)

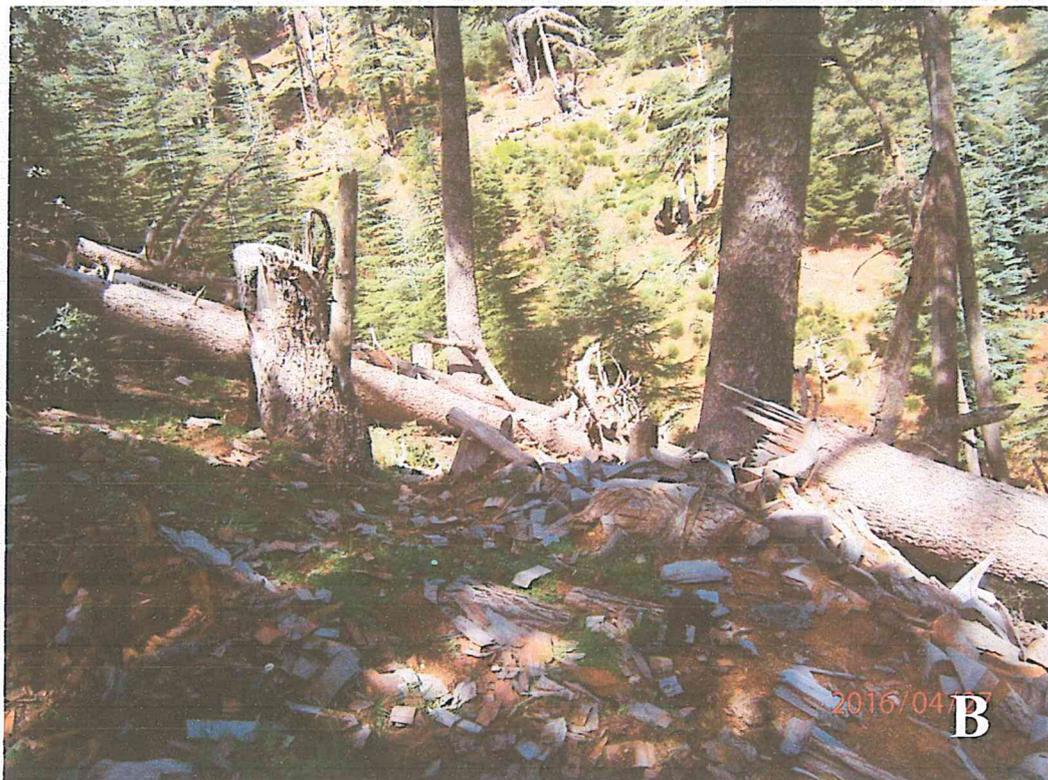
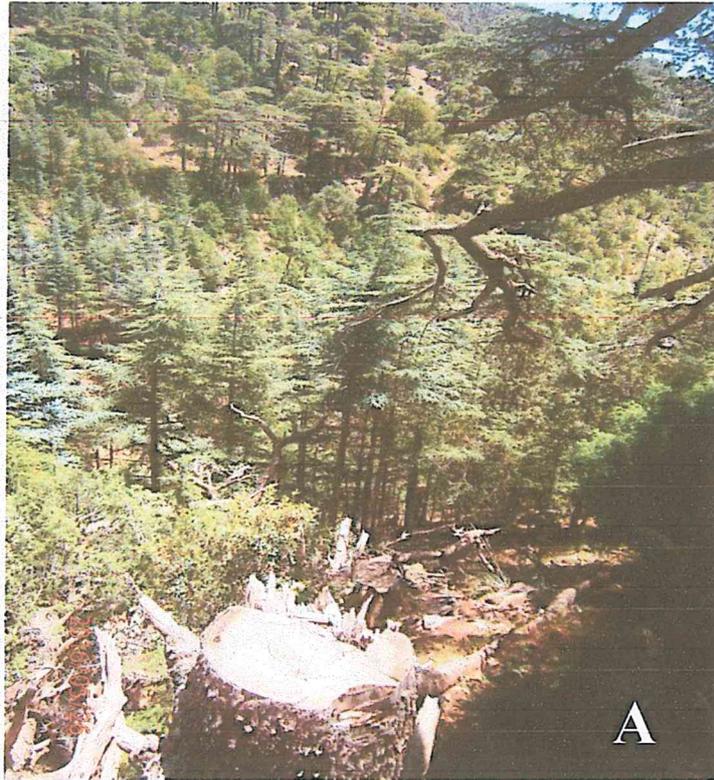


Figure V.8 : Coupes illicites dans la zone d'étude (A et B).

(S. Belloula, 2016)

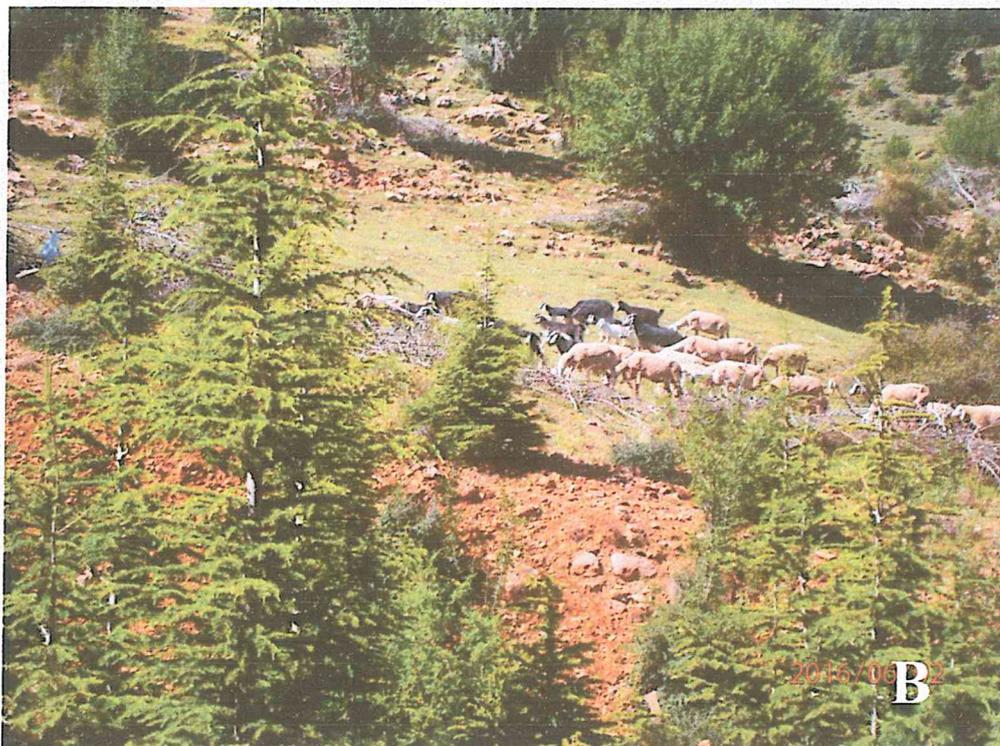
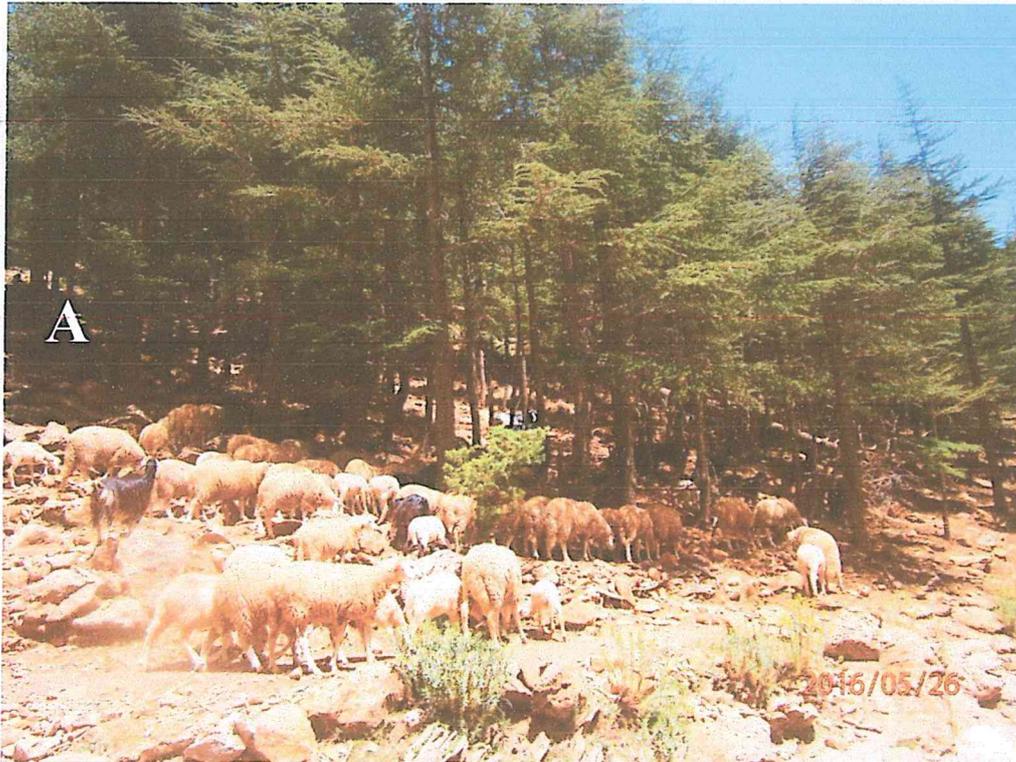


Figure V.9 : Surpâturage dans la zone d'étude (A et B).

(S. Belloula, 2016)

V.3.2. Discussion

Structure du peuplement :

En langage forestier classique, la structure d'un peuplement, c'est simplement l'histogramme du nombre de tiges par catégories de diamètres. Cet histogramme permet de déterminer : si le peuplement équienné, jardiné, ou à deux étages ; si on est proche de l'exploitabilité et si le peuplement est vieilli; si la station riche ou pauvre; si c'est un peuplement où la concurrence est active ou non (Bouchon, 1979 ; Bruciamacchie *et al.*, 1991 ; Dhôte, 1999). La connaissance de la distribution par classes de diamètre ou de hauteur est indispensable pour renseigner sur l'écologie des espèces, les contraintes sylvicoles éventuelles et l'état de la ressource (Herrero-Jáuregui *et al.*, 2012).

La distribution des diamètres à 1,30 m par classe (Figure V.2) montre qu'on est dans la présence d'un peuplement équienné. La plupart des tiges sont présentées dans les classes où le diamètre est entre 50cm et 79cm pour les monts de Chélia, et entre 40cm et 69cm pour les monts d'Ouled Yagoub.

Le nombre de tiges des gros arbres dans les deux monts Chélia et Ouled Yagoub, est largement faible. Cela, indique l'effet anthropique sur les deux monts (les coupes illicites, les travaux artisanats) (Figure V.8).

L'histogramme de la distribution des diamètres par classe des arbres dépérit (Figure V.3) est fait pour connaître les diamètres des arbres les plus touchés par le dépérissement. La figure (V.3) montre que tout le peuplement, sans préférence, est touché par le dépérissement avec des différents taux.

La hauteur dominante des arbres sains varie entre (8 et 21m) et pour les arbres dépérit varient entre (9 et 18m). Notant que La hauteur dominante est un bon indice de fertilité des stations forestière. Les valeurs des hauteurs mesurées montrent aussi que malgré que les stations soient fertiles, ces stations et ses arbres sont touchés par le dépérissement sans exception.

Il n'existe pas une différence significative entre les classes des diamètres des placettes saines et dépérit, ainsi que la hauteur dominante. Cela signifie qu'il existe d'autre facteur ont une influence sur les caractéristiques et le dépérissement du peuplement.

L'analyse de la relation entre peuplement, diamètre, hauteur et densité montre que la densité influence directement sur les diamètres des arbres et sur les hauteurs. Car, lorsque la densité est forte les arbres agissent d'une manière d'avoir l'ensoleillement. C'est pour ça le développement soit en grandeur et si la densité est petite l'accroissement des arbres soit en grosseur (Drénou, 1999).

Il est connu qu'un peuplement à forte densité, la concurrence sera très forte. Cette concurrence favorise la croissance en hauteur. Plus les peuplements sont denses, plus la croissance en hauteur est importante (Vennetier, 2001). Et les résultats de Bouchon (1979) soulignent que les arbres dominés ne concurrencent pas les arbres dominants. De manière générale, la densité conditionne une croissance en hauteur plus importante, et inversement, les faibles densités favorisent la croissance en diamètre (Vennetier, 2001 ; Keller *et al.*, (1976). Selon nos résultats, la Figure (V.4) montre que le dépérissement est insensible par la densité du peuplement.

Au vu de ces résultats, on peut dire que l'augmentation de la croissance en diamètre et en hauteur du cèdre des hautes altitudes, pourrait être expliquée par l'existence des conditions écologiques plus favorables (Neige fréquente, pluies, température minimale très basse), et une ambiance éco-pédologique plus favorable à l'activité biologique. L'étude dendrochronologique menée dans la même zone d'étude montre qu'il ya une relation positive entre la croissance radiale et le climat (Slimani *et al.*, 2014 ; Kherchouche, 2015 ; Navarro-Cerrillo *et al.*, 2019). Le déficit hydrique élevé et la forte évapotranspiration peuvent créer un dysfonctionnement de l'alimentation en eau dans l'arbre (sperry et terry, 1988 ; Cochard et Garnier, 1999). Ces facteurs agissent, aussi, sur le bilan hydrique du sol et donc sur la durée de la saison de croissance (Khatouri et Denis; 1990). Ceci favoriserait un meilleur comportement des peuplements présenté par l'existence d'une meilleure régénération. Aussi Malki (1992) et Nezarkebailli (2009) ont observé en haute altitude la régénération du cèdre de l'Atlas et ils l'ont attribuée à l'effet d'un microclimat plus humide dans cette tranche altitudinale.

Facteurs des stations

En effet, la pente influence fortement la potentialité et les limites d'utilisation du territoire. Elle contribue à la détermination des possibilités d'érosion, des possibilités de pâturage, de l'installation et le développement de la végétation de reforestation (Lopez Cadenas, 1976). Le terrain soit difficilement d'accès où la pente est relativement forte. Le terrain en pente faible et peu caillouteux sont évidemment les plus recherchés par les cédraies.

La pente à une grande influence sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas, cette influence se voit par la forte corrélation entre le dépérissement et la pente. Le dépérissement est fréquents sur des fortes pentes, et moins fréquent sur les terrains à pente moyenne à des terrains plats. Ces même résultats sont observés par Saemoum *et al.*, (2019). Il est connu que les terrains qui possèdent des faibles pentes, l'eau s'infiltra rapidement dans le sol à faible compaction du sol (Skeates, 2013). Et les terrains à forte pente éliminent le surplus de pluie et l'eau s'accumule en bas de la pente (M'seffar, 2009).

L'effet de l'exposition est particulièrement important et se traduit par la différence entre le versant nord et versant sud des montagnes (Ozenda, 1986). Les versants les plus touchés sont S, S/E, S/O, et cela n'empêche pas qu'il y-à des peuplements dépérit dans les versant Nord (nos placettes est un exemple). L'exposition à un effet sur la croissance en diamètre et en hauteur, il est signalé que la cédraie du versant Nord présente une légère supériorité de croissance comparativement à la cédraie du versant sud, cette différence est due principalement aux conditions climatiques en versant Nord.

Le cèdre de l'Atlas exige les hautes altitudes. Cela traduit par les meilleurs peuplements observés à hautes altitude contrairement aux peuplements dépérissants. En déduire que le dépérissement du cèdre de l'Atlas est lié principalement aux facteurs environnementaux (l'altitude, la pente, l'exposition). Ces variables sont les principaux facteurs de différenciation entre les cédraies saines et les cédraies dépérissants.

Nos résultats obtenus montrent que pour un peuplement localisé sur les hautes altitudes, la cédraie est en bonne état caractérisé par une hauteur dominante, diamètre important et une densité remarquante. Le peuplement le plus touché par le dépérissement se trouve dans des régions marqué par des fortes pentes, pâturage. Les forte pentes favorisant le ruissèlement, l'érosion et l'appauvrissent du sol. Le surpâturage, dans la région, est généralement toléré et entraîne la compaction des sols.

Il est noté que les arbres sont plus droits sur les sols riches et profonds que sur les sols pauvres et superficiels, surtout pour les espèces pivotantes (Hubert & Courraud, 2002). C'est le cas de nos cédraies (Figure V.11).

Malgré que la cédraie tolère les sols calcaires, son influence est marquée positivement sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (Figure V.4).

La diminution brutale des réserves hydriques du sol provoquée par les années sèches, elle expose les arbres à un risque de stress hydrique élevé qui trouve son paroxysme en

période estivale (Bréda *et al.*, 2002 ; Landman, 1994). Il faut noter que les faible taux en réserve utile (RU) du sol créent un déficit hydrique au niveau de la cédraie.

Dans notre étude, les résultats de la réserve utile (RU), est remarquable, malgré l'existence des exceptions (chapitre IV), sur le dépérissement. Cela due à l'interaction des facteurs entre eux sur notre phénomène. Mais cela n'empêche pas qu'il ya un effet qui reste a confirmé par d'autre travaux plus élargie dans l'espace et dans le temps.

Les activités humaines (pâturage, coupes illicites,), elles aussi constituent une menace réelle pour les cédraies (Figure V.8 et Figure V.9). L'homme est responsable de sa diminution.

L'écoulement de la résine observé sur terrain est présenté sur des sujets déjà morts ou due sous l'effet de l'homme. Et l'absence totale des attaques des insectes ou des champignons sur des sujets saines.

D'une façon générale, les paramètres des placettes (altitude, exposition, pente,...) s'assemblent d'une manière agissant directement sur l'état phytosanitaire des céderais positivement ou négativement. Cette influence des facteurs est plus remarquable, on l'explique par l'effet du micro-climat.



Figure V.10 : Présence de la régénération du cèdre de l'Atlas (A et B)
(S. Belloula, 2016)

V.4. CONCLUSION

L'Aurès est un milieu fragile (condition climatique sévères, période de sécheresse accentuée, et des limites marginale). L'Homme est considéré parmi les facteurs de perturbation des forêts par les coupes illicites ainsi l'intensité élevée du pâturage.

L'analyse en Composantes Principales (ACP), suivie d'une projection factorielle des placettes ont l'objectif d'évaluer les facteurs intervenant directement ou indirectement sur le dépérissement et leur relations. Elle, l'ACP, semble une solution intéressante pour une meilleure compréhension des relations et l'interprétation des données.

Ce phénomène s'observe dans les différentes classes d'âge, de diamètre et de hauteur. Mais ça n'empêche pas que le vieillissement des céderais, la marginalisées et le manques des travaux sylvicoles aggravent les situations de nos cédraies. La sensibilité du cèdre est, aussi, aggravée par certaines conditions du site, notamment les terrains à forte pente et les expositions orientées vers le Sud, plus chaudes et ensoleillées.

Bien que la région d'étude subit un effet néfaste sur le développement du cèdre de l'Atlas. Il aura de la régénération s'il trouve des conditions favorables à son développement (pente moyenne, une densité remarquable, un sol meublé, les versants les plus arrosées (Nord/ Nord-ouest/ Nord-est) et moyenne à haute altitude) (Figure V.10).

A partir de ces résultats, nous concluons que le dépérissement touche la majorité des peuplements et il n'est pas attaché seulement sur les individus âgés. Malgré cette réalité, on considère la céderais aurassienne la plus résistante à la sécheresse que celles de la céderais du Belezma.

On résume, l'évaluation du dépérissement du cèdre de l'Atlas a montré que, leurs vigueur sont étroitement liées en premier lieux avec les caractéristiques du milieu. Les facteurs qui ont une influence très significative et remarquante sur le dépérissement sont la pente, la réserve utile du sol et le pâturage.

CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

Ces dernières années, les forêts algériennes sont soumises à une forte perturbation et dégradation comme ceux des autres pays du pourtour méditerranéen.

Le cèdre de l'Atlas constitue, avec le pin d'Alep et chêne vert, la structure de base des peuplements des forêts aurassiennes. Les céderais des monts de Chélia et d'Ouled Yaagoub se situent dans des conditions écologiques marginales et fragiles où elles subissent une dégradation et un dépérissement irréversible. Le dysfonctionnement des facteurs écologiques entraîne une perte en quantité et en qualité de la forêt.

L'objectif général de ce travail est d'étudier quelques facteurs supposant ayant un lien direct avec le dépérissement du cèdre ainsi que d'évaluer sa réponse spatio-temporelle.

Dans le souci de mieux comprendre le dépérissement forestier du cèdre de l'Atlas. Soixante placettes ont été échantillonnées entre les monts de Chélia et les monts d'Ouled Yagoub, avec vingt sept profils pédologiques effectués au sein de ces placettes.

Ces placettes ont été l'objet de plusieurs relevés dendrométriques ($D_{1.30}$, hauteur dominante), relevés de la station (coordonnées géographique, pente, altitude et exposition), et une description générale des placettes (pâturage, écoulement de la résine, ..., etc) (Annexe 2). Les analyses physico-chimiques faites sur chaque horizon sont (pH, la conductivité électrique, phosphore, calcaire total et la réserve utile du sol).

Les observations et les relevées faites, l'application de la télédétection et SIG et l'analyse d'ACP (Analyse Composantes principales) ont révélé des liens et des relations entre les facteurs écologiques étudiés et le dépérissement. L'application de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a montré la répartition des différents variables en groupes écologiques de ressemblance influents le dépérissement du cèdre de l'Atlas.

Les cédraies de haute altitude, qui reçoivent plus de pluies semblent être en état sanitaire satisfaisant. C'est dans les placettes de basse altitude où on a enregistré les taux élevés de dépérissement. Les arbres dépérissant se sont des arbres affaiblis. Ils sont plus sensibles aux maladies et aux insectes ravageurs (résultant l'écoulement de la résine). Selon nos résultats, le phénomène de dépérissement de nos cédraies touche pratiquement toutes les catégories de diamètre, sans exception.

Le sol joue lui aussi un rôle non négligeable dans l'évolution des cédraies. Mais dans notre cas son influence est négligeable. Les résultats obtenus a partir des paramètres du sol

études (physico-chimique) n'ont aucune influence direct sur le dépérissement. Quant à la réserve utile (RU) du sol indique qu'il existe un déficit hydrique. Par conséquent, les stations en déficit hydrique coïncide vraisemblablement avec les facteurs des stations (forte pente, basse altitude et exposition Sud).

Les images satellitaires constituent un outil important dans la cartographie de l'occupation du sol ainsi que dans la planification et la gestion des ressources ; les surfaces de changement ont été déterminées à partir du traitement des images satellitaire. Grâce à cette étude, nous avons constaté que les techniques de la télédétection et de la cartographie se sont des outils indispensables permettant de comprendre les structures spatiales des forêts, la régression et/ou l'accroissement de la superficie. Dans notre cas, Les cartes réalisées montrent le recule et la remonte en altitude de l'aire de répartition du cèdre avec une réduction de la superficie. Le constat général du dépérissement c'est la régression progressive des massifs forestiers.

Comme perspective, L'utilisation des données de Télédétection à haute résolution augmente la précision de la surveillance des cédraies.

L'analyse de différents paramètres étudiés, nous a permis l'identification des variables explicatives de ce fléau. Les résultats obtenus (Cercles et graphes de corrélation) ont montré que l'état sanitaire du peuplement est influencé par les divers facteurs du milieu. Les fortes pentes, les basses altitudes, les expositions orientées vers le Sud (Sud, Sud-est, Sud-Ouest), calcaire total sont les variables les plus influençant sur le dépérissement. Mais les plus significatifs sont la pente, réserve utile du sol et le pâturage. Ces facteurs semblent jouer un rôle déterminant sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas.

L'état actuel de nos cédraies est très inquiétant : le climat présenté par la sécheresse qui persiste encore, l'irrégularité des pluies et l'attaques des ravageurs aux sujets dépérissantes restent les facteurs les plus aggravants du dépérissement du cèdre de l'Atlas.

Maintenant la question qui se pose c'est : que pouvons-nous faire pour le dépérissement du cèdre de l'Atlas ?

Des stratégies de gestion durable sont nécessaires divisées entre les administratifs forestiers concernés et les chercheurs universitaires, au risque de perdre complètement cette richesse forestière.

Un certain nombre de pratiques et recherches sont à entreprendre ou à approfondir:

- Une adaptation des traitements sylvicoles est conçue dans les zones déperit ;
- La stratégie de lutte conseillée vise non seulement à essayer d'éviter les pertes de croissance, mais a protégé les jeunes peuplements ;
- Les interventions précoces en phase de développement sont favorisées ;
- Une surveillance aux niveaux de la population de la processionnaire est conseillée ;
- Conservation d'un plus grand nombre des semences à partir des arbres résistants à la sécheresse et qui ne présente aucuns symptômes de dépérissement ;
- Tous les travaux de reboisement effectués restent inefficaces, il faut réaliser des reboisements bien étudiés avec une bonne planification aux conditions s'accommode au présent climat et éviter les techniques traditionnelles ;
- Utilisation des plants mycorhizés dans le reboisement du cèdre ;
- Installation des parcelles permanentes de recherche et faire un programme de surveillance à partir de ces placettes; Création une réserve forestière ;
- Faire des coupes d'assainissement et la réalisation d'un nouveau plan d'aménagement ;
- Faire des inventaires réguliers et périodiques ;
- Gestion du pâturage (par la sensibilisation des paysans) ;
- Une gestion intégrée des sols et des ressources en eau constitue un excellent moyen d'adaptation ;
- Crochetage du sol organisé dans les cédraies est souhaité ;
- L'étude approfondie sur l'écophysiologie du cèdre de l'Atlas en particulier sur leur comportement hydrique (résistance à la sécheresse) ;
- Chercher une stratégie pour l'adaptation du peuplement au changement climatique, et les risques de la sécheresse ;
- Elaboration un modèle climatique pour prévenir dans les cas extrêmes (pour une protection durable des cédraies) ;
- Les recherches génétiques sont suggérées afin de préserver les arbres semenciers qui ont fait une preuve d'une capacité d'adaptation aux changements climatiques ;

En général, le cèdre de l'Atlas des Aurès mérite une collaboration scientifique pluridisciplinaire et un suivi régulier du peuplement..

Le dépérissement est un phénomène difficile à maîtriser et difficile à cerner. Ce phénomène est renforcé par le contexte topographique. L'analyse du dépérissement du cèdre de l'Atlas nécessite une meilleure connaissance de ses caractéristiques écologiques, son évolution et son écophysiologie. Si le dépérissement persiste c'est une toute diversité biologique qui va disparaître non seulement le cèdre de l'Atlas. Et avec le changement climatique, ce phénomène devrait s'accroître dans le futur.

L'existence des individus sains et morts côte à côte crée une autre question. C'est quoi la différence ? Pourquoi ? Cela nous exige à une étude génétique bien développée. Et poser la question : «Est-ce que l'émergence d'un nouveaux gène de résistance? »

Enfin, il serait intéressant que cette recherche soit renforcée par d'autres études. Il est à envisager également que les recherches soient élargies dans l'espace et dans le temps.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abdessemed K., 1981. Le Cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma - Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement – Thèse. Doct. Ing. Fac. St. Jérôme, Marseille. 199 p.
2. Abdessemed K.H., 1984. Les relations climat-végétation dans le Sud Constantinois. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 131(2-4), 145-155.
3. Abel-Schaad D., Iriarte E., López-Sáez J.A., Pérez-Díaz S., Sabariego Ruiz S., Cheddadi R., & Alba-Sánchez F., 2018. Are Cedrus atlantica forests in the Rif Mountains of Morocco heading towards local extinction? *The Holocene*, 28(6), 1023-1037.
4. Abourouh M., 1994. Les ectomycorhizes du cèdre de l'Atlas : état des connaissances et perspectives. *Ann. Rech. Maroc*. 27. Vol. 2 338-346.
5. Achhal A., Akazbli O, Barbero M. *et al.*, 1980. A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia Mediterranea*. Pp : 11-49.
6. Adams H., Zeppel M., Anderegg W., Hartmann H., Landhäusser S., Tissue D., & *al.*, 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 1285–1291.
7. Adams H.D., Collins, A. D., Briggs S.P., Vennetier, M. Dickman, L.T., Sevanto, S. A., Garcia-Forner, N., McDowell, N.G., 2015. Experimental drought and heat can delay phenological development and reduce foliar and shoot growth in semiarid trees. *Global Change Biology* 21 (11):4210–4220.
8. Adams H.D., Macalady A.K., Breshears D.D., Allen C.D., Stephenson N.L., Saleska S.R., Huxman T.E., 2010. Climate-Induced Tree Mortality: Earth System Consequences. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 91(17), 153–154.
9. Addar A., Khedache Z., Righi H., & Dahmani-Megrerouche M., 2016. Suivi de la régénération naturelle du Cèdre de l'Atlas dans les premiers stades de développement dans quelques stations du massif forestier de Chréa (Atlas blidéen, Algérie). *Revue d'écologie*.
10. Agenjo R., 1941. Monographie de la famille des thaumetopoeidae (Lep.). *Eos. Rev. Esp. Ent.* XVII. Pp : 69-130.
11. Aitken S.N., Yeaman S., Holliday J.A., Wang T., & Curtis-McLane S., 2008. Adaptation, migration or extirpation : climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary applications*, 1(1), 95-111.
12. Alexandrian D., Gouiran M., 1992. Les causes des incendies. *Levons le voile !. Forêt méditerranéenne*, n° 1, p. 41-47.
13. Allan R.P., Liu C., Zahn M., Lavers D.A., Koukouvagias E., Bodas-Salcedo A., 2014. Physically consistent responses of the global atmospheric hydrological cycle in models and observations. In *The Earth's Hydrological Cycle*, 533–552. Springer Netherlands.

14. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., ... & Gonzalez P., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 259(4), 660-684.
15. Allred B.J., Daniels J.J. & Ehsani M.R., 2008. Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press (Taylor & Francis Group an informa business), New YORK.
16. Amoussou E., Totin Vodounon S.H., Hougni A., Vissin E.W., Houndénou C., Mahé G., Boko M., 2016. Changements environnementaux et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin-versant béninois du fleuve Niger, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(5): 2183-2201
17. An Y., Gao W. & Gao Z., 2014. Characterizing land condition variability in Northern China from 1982 to 2011. *Environmental earth sciences*, 72(3), 663-676.
18. Andre P. & Laudelout H., 1992. Le dépérissement du chêne. Etat de la question et bibliographie. *Forêt Wallonn*, 14 :16-20.
19. Andrea C. & Roberto M., 1994. Growth performances of a thinned atlas cedar (*Cedrus atlantica* Man.) Stand. Ann. Rech. For. Maroc, T(27) : 281-293.
20. Arbez M., Ferrandes P. & Uyar N., 1978. Contribution à l'étude de la variabilité géographique des cèdres. Ann. Sci. For. 35(4): 265-284.
21. Ash J.D., Givnish T.J. & Waller D.M., 2017. Tracking lags in historical plant species' shifts in relation to regional climate change. *Glob. Chang. Biol.* 23, 1305-1315.
22. Atzberger C., 2013. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sens.* 5 (2), 949-981.
23. Aussenac G. & Guehl J.-M., 1994. Dépérissements et accidents climatiques. *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, pp. 458-470.
24. Aussenac G., & Boulangeat C., 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), Ann. Sci. For. 37 : 91-107.
25. Aussenac G., & Valette J.C. 1982. Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 39, No. 1, pp. 41-62). EDP Sciences.
26. Aussenac G., 1984. Le cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écologique. *Bull. Soc. Bot. Fr., Actuel Bot.*, (2/3/4). Pp : 385-398.
27. Aussenac G., Granier A. & Goss P., 1981. Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. Et de divers pins du Mont-Ventoux. *Ann. Sci. For.*; 19 : 41-62.
28. Avakoudjo J., Mama A., Toko Imorou I., Valentin Kindomihou V., Sinsin B., 2014. Dynamique de l'occupation du sol dans le Parc National du W et sa périphérie au nord-ouest du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8 (6): 2608-2625.

29. Badeau V., Dupouey, J.L., Cluzeau, C., Drapier, J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100, Forêt Entreprise, (Dossier " la forêt face aux changements climatiques ") 162: 25-29.
30. Baglinière J.L., Maise G., Lebaill P.Y., Prévost E., 1987. Dynamique de la population de la truite commune *Salmo trutta* d'un ruisseau breton, France. *Acta Oecologica, Oecologia Generalis*, 8, 3, 201-215.
31. Baize D., 2000. Teneurs totales en «métaux lourds» dans les sols français: résultats généraux du programme ASPITET. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, (40), 39-54.
32. Baize D., 2018. Guide des analyses en pédologie: 3e édition revue et augmentée. Editions Quae.
33. Bakry M. & Abourouh M., 1995. Dépérissement du chêne liège au Maroc: état des connaissances et perspectives d'intervention. *IOBC/wprs Bull.*18,50-55.
34. Bamba I., 2010. Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en république démocratique du Congo. Thèse Doctorat en Sciences. Université libre de Bruxelles. Pp : 189.
35. Bariteau M., & Ferrandes P., 1992. Les cèdres. *Gallais A., Bannerot H.(Éd.), L'Amélioration des espèces végétales cultivées, Inra, Paris, 732-743.*
36. Bariteau M., 2003. Les ressources génétiques forestières dans le bassin Méditerranéen. *Forêt méditerranéenne*, 24(2), 148-158.
37. Barthod C., & Fournier P., 2019. Forêt et santé: discours et pratiques du XVIIIe au XXIe siècle. *Sante Publique*, 1(HS), 15-23.
38. Becker M., Geremia, F., & Schipfer R., 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 44, No. 4, pp. 379-402). EDP Sciences.
39. Becker M., picard J-F., & Timbal J., 1983. Les arbres. Ed. Masson. Paris, 141p.
40. Beghami R., 2010. Contribution à l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans la région des Aures: cas de la cédraie de Chélia. Thèse de magister, université de Batna (Algérie). 132 p.
41. Beghami Y., 2013. Écologie et dynamique de la végétation de l'Aurès: analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
42. Beghami Y., Kalla, M., Thinon M., & Benmessaoud H., 2012. Spatiotemporal Dynamics of Forest and Mountain Formations in Aurès Area, Algeria. *Journal of Life Sciences*, 6(6), 663.
43. Beghami Y., Véla E., De Belair G., & Thinon M., 2015. Contribution à la connaissance des orchidées de l'Aurès (N.-E. de l'Algérie): Inventaire, cartographie, taxinomie et écologie. *Revue d'écologie*.
44. Belkhiri S., 1993. Contribution de l'étude de la régénération naturelle du cèdre de l'atlas dans le massif de Belezma, cas de djebel M'hsseur. Thèse. Ing. INA., 82p.

45. Bellassen V., Crassous R., Dietzsch L. & Schwartzman S., 2008. Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone. *Etud. Climat*, 14, 43.
46. Belloula S., & Beghami Y., 2018. Assessment of the Dynamics of Atlas Cedar Decline (*Cedrus atlantica* Manetti) by Remote Sensing in the Aurès area, Algeria. *The Arab World Geographer*, 21(2-3), 154-167.
47. Beloula S., 2010. Étude sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc National de Belezma (wilaya de Batna). Apport de la télédétection et SIG. Thèse de magister, Université de Batna (Algérie).
48. Benabadji N., 1991. Etude phyto-écologique de la steppe A: *Artemisia herbra-alba* asso. au Sud de Sebdou (Oranie-Algérie) (Doctoral dissertation).
49. Benabid A., 1993. Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). *Silva Méditerranéa Actes du séminaire International sur le cèdre de l'Atlas*. Ifran (Maroc). 7-11 juin 1993. Pp : 62-69.
50. Benarab M., 1996. Caractérisation physico-chimique des sols des monts de Belezma : Essai sur les potentialités de quelques stations de cèdre (*Cedrus atlantica* M). Mem. Ing. Uni. Batna., 101p.
51. Benchekroun F., 1993. L'économie de la cédraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales. *Annales des Recherches Forestières du Maroc*
52. Benissad B., 1992. Contribution à l'étude de l'accroissement du pin d'Alep (*Pinus halpensis* Mill) en relation avec quelques variables du milieu dans la forêt de Beniimloul, série Ras-bignoun, versant (sud-est). Thèse ingénieur, université Batna. 66 p.
53. Benmessaoud H., 2010. Etude de la vulnérabilité a la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse de docteur en aménagement du territoire. Université de Batna, 227p.
54. Benoît T., 2005. Problématique du dépérissement du bouleau blanc en Estrie : revue de la littérature et avenues possibles pour son aménagement futur. *Association forestière des Cantons de l'Est*. Pp : 1-42.
55. Bentouati A. et Oudjehih B., 1999. Premières études de la croissance et de la productivité du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma (Aurès). *Ann. Rech. For. Algérie*. 2. Pp : 23-33.
56. Bentouati A., Bariteau M. 2006. Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie), *Forêt Méditerranéenne*, 27 (2), 203–208.
57. Bentouati, A. 2008. La situation du cèdre de l'Atlas en Algérie. *Forêt méditerranéenne*.
58. Bert G.D., Becker H.M. & Schipfer R., 1990. Vitalité actuelle et passée du sapin (*Abies alba* Mill) dans le Jura. Étude dendroécologique. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 47, No. 5, pp. 395-412). EDP Sciences.
59. Bertrand R., 2012. Réponse spatio-temporelle de la végétation forestière au réchauffement climatique - Evaluation du remaniement de la végétation et caractérisation de l'effet des facteurs

- écologiques et géographiques le modulant à l'échelle de l'espèce et des communautés- Thèse Doctorat. AgroParisTech. Pp : 314
60. Bhandari A.K., Kumar A. & Singh G.K., 2012. Feature extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): a case study of Jabalpur city. *Procedia Technology*, 6, 612–621.
 61. Biaou S., Houeto F., Gouwakinnou G., Biaou S.S.H., Awessou B., Tovihessi S., & Tete R., 2019. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol de la forêt classée de Ouénou-Bénou au Nord Bénin.
 62. BNEDER, 2001. Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural. Etude agro-pédologique des 07 fermes pilotes et des terres de ORVO
 63. BNEF, 1983. Bureau national d'études forestières
 64. Bogaert J., Barima Y.S.S., Ji J., Jiang H., Bamba I., Iyongo W.M.L., Mama A., Nyssen E., Dahdouh-Guebas F., Koedam N., 2011. A methodological framework to quantify anthropogenic effects on landscape pattern. In: *Landscape ecology in Asian cultures* (eds S.-K. Hong, J. Wu, J.-E. Kim & N. Nakagoshi), Springer, Verlag, New York, pp. 141-167.
 65. Boisvenue C. & Running S.W., 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12(5), 862-882.
 66. Bon Fils P., 1978. Le classement des sols en vue de la reforestation en zone méditerranéenne.
 67. Bouahmed A., Vessella F., Schirone B., Krouchi F., & Derridj A., 2019. Modeling *Cedrus atlantica* potential distribution in North Africa across time: new putative glacial refugia and future range shifts under climate change. *Regional Environmental Change*, 1-16.
 68. Bouazza M., 1991. Etude phyto-écologique de la steppe à *Stipa tenacissima* L. au sud de Sebdo (Oranie-Algérie) (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
 69. Bouchon J., 1979. Structure des peuplements forestiers. *Annales des Sciences forestières*, 36(3), 175-209.
 70. Boudy P. 1952. Guide du forestier en Afrique du Nord. Ed. La Maison Rustique. 505 p.
 71. Boudy P., 1950. Economie forestière Nord-Africaine : monographie et traitement des essences forestières. Ed. Larose, T2. Pp : 529-619.
 72. Boukcim H., Pages L., Plassard G. et Moussain D., 2001. Effects of N fertilization on root system architecture and receptivity to mycorrhizal infection of cedar seedlings. *Tree physiology*, 21. Pp : 109-115.
 73. Bourlière F. & Lamotte M., 1978. La notion d'écosystème. *Problèmes d'Écologie: Écosystèmes Terrestres*. Pp : 1-16.
 74. Bousson E., Lejeune P., & Rondeux J., 2002. L'inventaire par évaluation visuelle. Une nouvelle méthode adaptée à la description de peuplements hétérogènes (cahier technique n° 20). *Forêt. Nature*, (58), 6-12.
 75. Boutte B., 2007. Les dépérissements observés sont-ils tous dus au changement climatique ? Journées d'études « Changements climatiques et forêt méditerranéenne ». Forêt Méditerranéenne.
 76. Braque R., 1988. Biogéographie des continents. Masson. - 470p.

77. Brassel P., Brändli U.-B., 1999. Inventaire forestier national suisse. Résultats du deuxième inventaire 1993–1995, 2e éd., Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Berne, Stuttgart, Vienne, Haupt, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage.
78. Bréda N., Granier A., & Aussenac G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années: analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*.
79. Bréda N., Lefèvre Y., & Badeau V., 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés: spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, (3), 24-32.
80. Breshears D.D., López-Hoffman, L., & Graumlich, L. J., 2011. When ecosystem services crash : preparing for big, fast, patchy climate change. *Ambio*, 40(3), 256-263.
81. Bruciamacchie M., Groualle C. & Minot P., 1991. Modèle d'évolution des peuplements en futaie jardinée. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 48, No. 2, pp. 215-224). EDP Sciences.
82. Brunetti M., De Capua E.L., Macchioni N. & Monachello S., 2001. Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) wood from Southern Italy. *Annals of forest science*, 58(6), 607-613.
83. Cailleret M., 2011. Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence, Thèse de doctorat, Université d'Aix Marseille 3, 160 p.
84. Camarero J.J., Bigler C., Linares J.C., & Gil-Pelegrín E., 2011. Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. *Forest Ecology and Management*, 262(5), 759-769.
85. Camarero J.J., Gazol A., Sangüesa-Barreda G., Oliva J., & Vicente-Serrano S.M., 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*, 103(1), 44-57.
86. Camarero J.J., Gazol A., Sangüesa-Barreda G., Oliva J., Vicente-Serrano S.M., 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J. Ecol.* 103, 44–57.
87. Campbell J.B. & Wynne R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*, 5th ed. The Guilford Press, New York.
88. Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sanchez G., & Penuelas J., 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(4), 1474-1478.
89. Catton H.A., StGeorge S., & Remphrey W.R., 2007. An evaluation of bur oak (*Quercus macrocarpa*) decline in the urban forest of Winnipeg, Manitoba, Canada. *Arboriculture and Urban Forestry*, 33(1), 22.
90. Chapin FS, Matson PA, Mooney HA., 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York, 436 pp.
91. Charraut D., Courjon D., Bainier C., & Moulinier L., 1996. Analysis of optical near-field images by Karhunen–Loève transformation. *Applied optics*, 35(20), 3853-3861.

92. Chebil A., Mtimet N., & Tizaoui H., 2011. Impact du changement climatique sur la productivité des cultures céréalières dans la région de Béja (Tunisie). *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 6(311-2016-5583).
93. Cheddadi R., Henrot A. J., François L., Boyer F., Bush M., Carré M., ... & Huang K., 2017. Microrefugia, climate change, and conservation of *Cedrus atlantica* in the Rif Mountains, Morocco. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 114.
94. Cheddadi R., Nourelbait M., Bouaissa O., Tabel J., Rhoujjati A., López-Sáez J. A., ... & Lamb H. 2015. A history of human impact on Moroccan mountain landscapes. *African Archaeological Review*, 32(2), 233-248.
95. Chen X., Yang D., Chen J. & Cao X., 2015. An improved automated land cover updating approach by integrating with downscaled NDVI time series data. *Remote Sens. Lett.* 6(1):29–38.
96. Chéret V., 1987. La sapinière du Luchonnais (Pyrénées Hautes-Garonnaises): étude phytoécologique, recherches sur le phénomène de dépérissement forestier, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 287 p.
97. Choat B., Jansen S., Brodribb T. J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., ... & Jacobsen A.L., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752.
98. Chou C., Chiang J.C., Lan C.W., Chung C.H., Liao Y.C. & Lee C.J. 2013. Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nature Geoscience*, 6(4), 263–267.
99. Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., ... & Chevallier F., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529.
100. Ciesla W-M., 1993. Qu'arrive-t-il au Neem sahélien ? Unasylva. N°172 : sécurité des ouvriers forestiers. Archives des documents de la F.A.O. Département des forêts.
101. Colwell R.K., Brehm G., Cardelús C.L., Gilman A.C., & Longino J.T., 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322(5899), 258-261.
102. Corona C., & Stoffel M., 2013. Dendroécologie: principes, méthodes et applications.
103. CRPF Midi-Pyrénées, ONF, et EI-Purpan, 2008. Dépérissement des reboisements du Sud Massif Central -Etat des lieux et propositions d'analyse, 2ème tranche -Départements de l'Aveyron et du Tarn, Rapport de fin d'étude, 43 p.
104. CSABA M., 1994. Results of introduction trials with *Cedrus atlantica* in Hungary. In: Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 – 11 Juin 1993. Annales de la recherche forestière au Maroc 27 (spécial) : 220-222.
105. D'Eon S.P., Magasi L.P., Lachance D. & DesRochers P., 1995. Guide d'établissement et de la surveillance des parcelles. Réseau national de surveillance de l'état de forêts au Canada. Rapport d'information PI-X-117F. Ontario, Canada, 99p.
106. Dagnelie P., 1998. Statistique théorique et appliquée, Tome 2, Inférence statistique à une et à deux dimensions, De Boeck et Larcier, Paris et Bruxelles.

107. Dahman M. & Khouja M., 1994. Résultats des essais d'acclimatation du cèdre en Tunisie. Ann. Rech. For. Maroc T(27) (spécial). Pp : 129-137.
108. Danjon F., & Fourcaud T., 2009. L'arbre et son enracinement. *Innovations Agronomiques (6)*, 17-37.
109. Davis J.C., & Sampson R.J., 1986. *Statistics and data analysis in geology* (Vol. 646). New York et al.: Wiley.
110. De Vilmorin G.B., 2003. Histoires d'arbres. Ed. Jean-paul Gisserot. Paris, 280p.
111. Debazac E.F., 1964. Manuel des conifères. Nancy, École nationale des Eaux et Forêts, 1964. 172p.
112. Delatour C., 1990. Dépérissement des chênes et pathogènes Revue Forestière Française-Fascicule thématique "Chêne sessile, Chêne pédonculé et Chêne rouge d'Amérique en forêt française", 2, p. 182-185.
113. Delkov A. & Grozev O. 1994. Résultats de l'introduction du *Cedrus atlantica* Manetti en Bulgarie de Sud-Ouest. In : Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 – 11 Juin 1993. Ann. Rech. For. Maroc 27 (spécial). Pp : 174-185.
114. Demartean M., 2006. Réponse de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passée et futurs. Licence en sciences géologiques, Univ. Liège., 60 p.
115. Derridj A., 1990. Etudes des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse. Doc. Uni. Paul Sabatier. Toulouse. Pp : 112-122.
116. Desclée B., Bogaert P., Defourny P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment* 102(1):1–11.
117. Dhôte J.F., 1999. Compétition entre classes sociales chez le chêne sessile et le hêtre. *Rev. For. Fr.* LI, 2, 309-324.
118. Diederich P., 1991. Les forêts luxembourgeoises à longue continuité historique. *Bull. Soc. Nat. Luxemb.*, 92, 31-39.
119. Dobbertin M., 2006. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review (vol 124, pg 319, 2005), *European Journal of Forest Research*, 125(1), p. 89-89.
120. Drénou C., & Cantero A., 2019. Diagnostic sanitaire Des arbres: La méthode archi appliquée dans les pyrénées. *La Forêt Privée*, (365), 36-41.
121. Drénou C., 1999. *La taille des arbres d'ornement: du pourquoi au comment*. Forêt privée française.
122. DSF, 2007. Département de la santé des forêts.
123. Duby C., & Robin S., 2006. Analyse en composantes principales. *Institut National Agronomique, Paris-Grignon*, 80.
124. Ducrey M, 1993. Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen. Aspect écophysiological de sa réaction à la secheresse. *Silva Meditternea* Acte du séminaire International sur le cèdre de l'atlas. Ifran (Maroc) : 7-11 juin1993. Pp ; 140-150.
125. Durand J.H., 1983. Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.

126. El Yousfi M., 1994. La sante du cèdre de l'Atlas au Maroc. *In* : Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7 – 11 Juin 1993. *Annales de la recherche forestière au Maroc* 27 (spécial). Pp : 594-611.
127. El-Aziz A., 2013. Monitoring and change detection along the Eastern Side of Qena Bend, Nile Valley, Egypt using GIS and remote sensing. *Adv. RemoteSens.* 2 :276–281.
128. El-Tobi M., Mhirit O. & Benzyane M., 2009. Changements climatiques, dégradations et dépérissements : Arguments et nouveaux outils pour une réforme de la sylviculture des cédraies au Maroc. *In Annales de la Recherche Forestière au Maroc* 41:27–47.
129. Emberger L., 1935. La distribution géographique du cèdre au Maroc. *C.R. Soc. Biog.*, 12, 5-58.
130. Escofier B. & Pagès J., 2008. *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation*, Paris, Dunod.
131. Eviner V.T. et Chapin S.C., 2002. The influence of plant species, fertilization and elevated CO₂ on soil aggregate stability. *Plant and Soil*, 246. Pp. 211-219.
132. Fabre J.P., 1976. Extension du cèdre et risques d'attaques d'insectes. *R.F.F.* XXVIII-4-
133. FAO. 2009. Suivi et évaluation des ressources forestières nationales – manuel pour le relevé intégré de données sur le terrain. Version2.3. SERFN 37/F. Rome.
134. Faurel L., & Laffitte R., 1949. Facteurs de répartition des Cédraies dans les Massifs de l'Aurès et du Bézema. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. du nord*, 40(5-6), 178-186.
135. Faurel L., 1947. Note sur la Cédraie de l'Atlas de Blida (Algérie), ses sols et ses associations végétales. *C.R. Conf. Pédologie Médit.*, Alger-Montpellier. Pp : 474-477.
136. Fettig C.J., Reid M.L., Bentz B.J., Sevanto S., Spittlehouse D.L., and Wang T., 2013. Changing climates, changing forests: a western North American per-spective. *J. For.* 111(3): 214–228.
137. Filewod B., Thomas S.C. 2014. Impacts of a spring heat wave on canopy processes in a northern hardwood forest. *Global change biology* 20(2):360–371.
138. Fiot J-L., Carouille F. et Lucas S., 2007. Dépérissement et mortalité de quelques essences. *L'IF*. N°16, 3° trimestre.
139. Fisher J.I., & Mustard J.F., 2007. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109(3), 261-273.
140. Flot J.L., Carouille F. & Lucas S., 2007. Dépérissement et mortalité : un éclairage de la situation en France. *IF* 16 (3): 10p.
141. Forister M.L., McCall A.C., Sanders N.J. *et al.*, 2010. "Compounded Effects of Climate Change and Habitat Alteration Shift Patterns of Butterfly Diversity", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 107, No.5, 2088–92.
142. Friedman S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 45-70.
143. Gachi M., 1989. Eco-biologie de la processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani*

144. Gachi M., Khemici M., Zamoum M., 1986. Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre, *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Ann. Rech. For., Algérie*, 1(1), 53-63.
145. Gagnon G. & Roy G., 1994. Le dépérissement De l'érable à sucre (*acer saccharum* marsh.) Au Québec. *Rev. For. Fr.* XLVI -5- Pp : 512-521.
146. Gandolfo C. et Tessier L., 1994. Analyse dendroécologique sur le sapin (*Abies alba* Mill.) et des épicéas (*Picea abies* (L) Karst) de différentes classes de défoliation dans la forêt de Vigo di Ton (Trento, Italie). *Ann.For.Sci:* 51, 391-406.
147. Gao T., Hedblom M., Emilsson T., & Nielsen A. B., 2014. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. *Forest Ecology and Management*, 330, 82-93.
148. Garrec J.P., 1994. Les dépérissements littoraux d'arbres forestiers. *Revue Forestiere Francaise*.
149. Garrity S.R., Allen C.D., Brumby S.P., Gangodagamage C., McDowell N.G., & Cai D.M., 2013. Quantifying tree mortality in a mixed species woodland using multitemporal high spatial resolution satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 129, 54-65.
150. Gartner E., 1988. Maladie des forêts : un premier bilan. *Sylviculture*. Pp : 30-38.
151. Gauquelin X., 2011. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire, Forêt entreprise (196), p. 27-29.
152. Gaussen H., Legris P., Blasco F., & Barry J.P., 1967. *Bioclimats du sud-est asiatique*. Éditeur non identifié.
153. Gauthier S., Bernier P., Burton P.J., Edwards J., Isaac K., Isabel N., Jayen K., Le Goff H., and Nelson E.A., 2014. Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environ. Rev.*22(3): 256–285.
154. Gazonneau A., 2007. Pour la forêt méditerranéenne, le changement climatique est déjà à l'œuvre. <http://actsience.blogspot.com/2007/11/pour-la-fort-mditerranenne-le.html>
155. Gervy R., 1970. Phosphates et Agriculture. 298 pages.
156. Gillet P., Vermeulen C., Feintrenie L., Dessard H. & Garcia C., 2016. Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo? Synthèse bibliographique et études de cas. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20(2), 183-194.
157. Glèlè K.R. & Lykke A.M., 2016. Techniques d'échantillonnage en étude de végétation. *Annales des Sciences Agronomiques*, 20, 1-14.
158. Gobat J.M., Aragno M., & Matthey W., 2010. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. 817 pages.
159. Godron M., 1984. Écologie de la végétation terrestre. Édit. MASSON, 196 p.
160. Gonzalez P., Neilson R.P. & Drapek R.J., 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 755-768.
161. Gonzalez P., Tucker C.J., & Sy H., 2012. Tree density and species decline in the African Sahel attributable to climate. *Journal of Arid Environments*, 78, 55-64.
162. Goulet E. & Barbeau G., 2006. Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement hydrique du système sol/vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 40(2), 57-69.

163. Gounot M., 1969. Méthodes d'étude quantitative de la végétation.
164. Grami D., & Rejeb J.B., 2015. L'impact des changements climatiques sur le rendement de la céréaliculture dans la Région du Nord-Ouest de la Tunisie (Béja). *New Medit*, 4, 36-41.
165. Granier A., Bréda N., Biron P., ViUette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, p. 269-283.
166. GTZ, 1982. Bureau d'étude allemande.
167. Gunderson C.A., Edwards N.T., Walker A.V., O'hara K. H., Campion C.M., & Hanson P.J., 2012. Forest phenology and a warmer climate—growing season extension in relation to climatic provenance. *Global Change Biology*, 18(6), 2008-2025.
168. Guyon J.P., 1991. Dépérissement du pin maritime (*Pinus pinastre* Ait) en Vendée. Les causes écologiques. *Ann. Sci. For.* 48. Pp : 333-346.
169. Hajjar R. & Kozak R.A., 2015. Exploring public perceptions of forest adaptation strategies in western Canada: implications for policy-makers. *For. Policy Econ.* 61: 59–69.
170. Halitim A., 1988: Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p
171. Halitim S., 2006. Contribution à l'étude de la réserve utile en eau des sols de cédraines dans les Aures: influence des facteurs édaphiques. Thèse de magister, université de Batna (Algérie). 108 p + annexe.
172. Hamilton G.J., 1975. Forest mensuration hand book. Forestry commission, London, 275p.
173. Hansen M.C., & Loveland T.R., 2012. A review of large area monitoring of landcover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 122:66–74.
174. Harfouche A. & Nedjahi A., 2003. Prospections écologiques et sylvicoles dans les cédraines du Belezma et de l'Aurès à la recherche de peuplements semenciers et d'arbre. *Rev. For. Fr.* Vol. 55, n°2, Pp: 113-122
175. Harsch M.A., Phillips A., Zhou Y., Leung M.R., Rinnan D.S. & Kot M. 2017. Moving forward: Insights and applications of moving-habitat models for climate change ecology. *J. Ecol.*, 105, 1169–1181.
176. Hartman G., Nienhaus F., Butin H., & Winter K., 1991. Symptômes de dépérissement des arbres forestiers : Atlas de reconnaissance de symptômes. Institut pour le Développement Forestier (IDF). *Stuttgart. Francia.*
177. Heiri C., Bugmann H., Tinner W., Heiri O., & Lischke H., 2006. A model-based reconstruction of Holocene treeline dynamics in the Central Swiss Alps. *Journal of Ecology*, 94(1), 206-216.
178. Herrero-Jáuregui C., Sist P. & Casado M.A., 2012. Population structure of two low-density neotropical tree species under different management systems. *Forest ecology and management*, 280, 31-39.
179. Hoffmann A.A. & Sgrò C.M., 2011. Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*: 470-479.
180. Hu X.G., Mao J.F., El-Kassaby Y.A., Jia K.H., Jiao S.Q., Zhou S. S., ... & Wang T., 2019. Local Adaptation and Response of *Platycladus orientalis* (L.) Franco Populations to Climate Change. *Forests*, 10(8), 622.

181. Huart O., Lejeune P., Lemoine N., & Rondeux J., 2004. Proposition d'une méthode d'inventaire «sylvicole» pour le diagnostic post-perturbation des hêtraies wallonnes touchées par la «maladie du hêtre».
182. Hubert M., & Courraud R., 2002. *Élagage et taille de formation des arbres forestiers*. Forêt privée française.
183. Hughes W.R., 2000. Valuing a forest as a call option : The sale of Forestry Corporation of New Zealand. *Forest science*, 46(1), 32-39.
184. Hurlbert A.H., & Liang Z., 2012. "Spatiotemporal Variation in Avian Migration Phenology: Citizen Science Reveals Effects of Climate Change", *PloS One* vol. 7 No.2, 1-11.
185. IFN., 2003. Collectivité de l'Inventaire Forestier National (IFN). 2003. Inventaire forestier départemental - Massif des Landes de Gascogne : VIe inventaire 1998-1999-2000. Rapport technique de l'Inventaire Forestier National (IFN). pp. 72.
186. Imorou I.T., Arouna O., Zakari S., Djaouga M., Thomas O. & Kinmadon G., 2019. Évaluation de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les aires protégées et terroirs villageois du bassin cotonnier du Bénin.
187. IUCN, 2017. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017-1.
188. Jacob C., 1992. *L'empire des cartes : approche théorique de la cartographie à travers l'histoire*. Albin Michel.
189. Jia K., Liang, S., Zhang L., Wei X., Yao Y., & Xie X., 2014. Forest cover classification using Landsat ETM+ data and time series MODIS NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 32-38.
190. Jianya G., Haigang S., Guorui M., & Qiming Z., 2008. A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B7), 757-762.
191. Johnson J., & Jacob M., 2010. Monitoring the effects of air pollution on forest condition in Europe: is crown defoliation an adequate indicator?. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, 3(1), 86-88.
192. Julien J.L., & Turpin A., 1999. Surfaces réactives et raisonnement de quelques propriétés chimiques des sols acides. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 85(2), 25-35
193. Jump A.S., Hunt J.M. & Penuelas J., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12(11), 2163-2174.
194. Jump A.S., Mátyás C., & Peñuelas J., 2009. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in ecology & evolution*, 24(12), 694-701.
195. Jump A.S., Ruiz-Benito P., Greenwood S., Allen C.D., Kitzberger T., Fensham R., ... & Lloret F., 2017. Structural overshoot of tree growth with climate variability and the global spectrum of drought-induced forest dieback. *Global change biology*, 23(9), 3742-3757.
196. Kandler O., & Innes J. L., 1995. Air pollution and forest decline in Central Europe. *Environmental pollution*, 90(2), 171-180.

197. Kangas A. & Maltamo M. 2007. Forest inventory: methodology and applications, Springer, Dordrecht. 362 p.
198. Keller R., Le Tacon F., & Timbal J., 1976. La densité du bois de hêtre dans le Nord-Est de la France. Influence des caractéristiques du milieu et du type de sylviculture. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 33, No. 1, pp. 1-17). EDP Sciences.
199. Kelly A.E., & Goulden M.L., 2008. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11823-11826.
200. Khanfouci M.S., 2005. Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif du Belezma. Thèse. Mag. Uni. Batna. 249p.
201. Khatouri M., Dennis B., 1990. Growth and yield model for uneven-aged *Cedrus atlantica* stands in Morocco. *Forest Ecology and Management*, 36: 253- 266.
202. Kherchouche D., 2015. Approches sylvicole et paléoécologique pour l'étude des facteurs de dépérissement et la répartition spatio-temporelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Man) de l'Aurès. Thèse de doctorat, université de Batna1 (Algérie).
203. Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E. M., Attalah S., Bouzghaia M., 2012. Impact of droughts on *Cedrus atlantica* forests dieback in the Aurès (Algeria). *Journal of Life Sciences* 6(11):1262–1269.
204. Kherchouche D., Kalla M., Gutierrez E., Briki A., Hamchi A., 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Science et changements planétaires/Sécheresse* 24(2):129–137.
205. Klein T., DiMatteo G., Rotenberg E., Cohen S. & Yakir D., 2013. Differential ecophysiological response of a major Mediterranean pine species across a climatic gradient. *Tree Physiology* 33(1):26–36.
206. Ladjal M., 2001. Variabilité de l'adaptation à la sécheresse des cèdres méditerranéens (*Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* et *C. libani*); aspects éco-physiologiques. Thèse de Doctorat de l'Université NancyI, 212p.
207. Ladjal M., 2007. Etude de l'effet du stress hydrique sur la germination des graines de différentes provenances de *Cedrus libani* et de *Cedrus atlantica*. Mémoire de D.E.A. Univ. Nancy I, Fac sci, 24p + annexes.
208. Lafitte R., 1939. Structure et relief de l'Aurès (Algérie). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, N°119, 16e année, février 1939. pp. 34-40.
209. Lamhamedi M. & Chbouki N., 1994. Les principaux facteurs influençant la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.). *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27). Pp : 243-257.
210. Lamontagne J., 2000. Les conséquences du verglas sur les arbres. Conférences présentée dans le cadre du Congrès annuel de l'association forestière des Cantons de L'Est. 178p.
211. Landmann G., 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Rev. For . Fr.* XLVI - 5- Pp : 405-415.

212. Landmann G., Bonneau M. & Adrian M., 1987. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ? R.F.F. XXXIX -1-. Pp : 5-11.
213. Landmann G., et Bonneau M., 1995. Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains, Springer, 461 p.
214. Lanier L., 1976. Mycologie et pathologie forestières. Tome II. Pathologie forestière. Edition Masson. Paris. Pp : 16-26.
215. Latte N., Debruxelles J., Sohier C., Degré A. & Claessens H., 2012. La dendroécologie: un outil pour affiner nos connaissances sur l'autécologie des essences forestières. *Forêt. Nature*, (116).
216. Latte N., Kint V., Drouet T., Penninckx V., Lebourgeois F., Vanwijnsberghe S., & Claessens H., 2015. Dendroécologie du hêtre en forêt de Soignes: Les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs. *Forêt. Nature*, 137(Octobre-Novembre-Décembre), 24-37.
217. Laurent C., & Lecomte H., 2006. La composition, l'évolution et l'exploitation de la forêt. *État de l'environnement wallon. Rapport analytique, 2007*, 184-195.
218. Laurent S., Cockcroft J., Van Bortel L., Boutouyrie P., Giannattasio C., Hayoz D., ... & Struijker-Boudier H. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications. *European heart journal*, 27(21), 2588-2605.
219. Lawler J.J., Shafer S.L., White D., Kareiva P., Maurer E.P., Blaustein A.R., & Bartlein P.J., 2009. Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 90(3), 588-597.
220. Le Houérou H.N., 1980. L'impact de l'homme et de ses animaux sur la forêt méditerranéenne. 2ème partie. *Forêt méditerranéenne*.
221. Le Houérou H.N., 1992. Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride.
222. Le Houérou H.N., 1995. *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique*. Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes, Institut agronomique méditerranéen de Montpellier.
223. Le Houérou H.N., 2005. Problèmes écologiques du développement de l'élevage en région sèche. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 16(2), 89-96.
224. Le Houérou H.N., Claudin J., Haywood M., & Donadieu J., 1975. Etude phytoécologique du Hodna. *FAO, UNIP/SF ALG*, 9, 2.
225. Lebourgeois F., Levy C., Becker M., Lefevre Y., 1997. Rôle de la nutrition minérale et de l'approvisionnement en eau sur la croissance du pin laricio corse dans l'ouest de la France. *Annales des Sciences Forestières*, 54 : 279-300.
226. Leleux B., 1984. Contribution à l'étude dendrométrique de (*Pinus halepensis* Mill) en forêt d'Ain Zeddin (Monts de Daia Algérie). UCL ; unité des eaux et forêt, pp : 159 – 162. LELEUX. B (1984) .Contribution à l'étude dendrométrique de (*Pinus halepensis* Mill) en forêt d'Ain Zeddin (Monts de Daia Algérie). UCL ; unité des eaux et forêt, pp : 159 – 162.

227. Leleux B., 1984. Contribution à l'étude dendrométrique du pin d'Alep en fo rêt de Aïn-Zeddim. EFOR-UCL. Unité des Eaux et Forêts. Travail de fin d'étude. Louvain-La-Neuve.
228. Lemieux A., 2006. Biplot et analyse des correspondances multiples: théorie et analyse d'un ensemble de données.
229. Lenoir J., Gégout J.C., Guisan A., Vittoz P., Wohlgemuth T., Zimmermann N. E., ... & Svenning J. C., 2010. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. *Ecography*, 33(2), 295-303.
230. Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., De Ruffray P., & Brisse H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320(5884), 1768-1771.
231. Lenoir J., Gégout J.C., Pierrat J.C., Bontemps J. D., & Dhôte J.F., 2009. Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986–2006). *Ecography*, 32(5), 765-777.
232. Lepoutre B., 1963. Rôle des mycorhizes dans la biologie des jeunes cèdres. C.R. Soc. Des Sc. nat. et phys. au Maroc., t. XXIX, no 5-6, Rabat, 1963.
233. Lepoutre B., 1964. Premier essai de système sur le mécanisme de régénération du cèdre dans le moyen Atlas marocain. Ann. Rech. For. Au Maroc. Tome VII. Pp: 157-163.
234. Lepoutre B., 1965. *Écologie de la régénération naturelle du cèdre dans le Moyen Atlas marocain*. Université, Faculté des Sciences.
235. Levy G. & Becker M., 1987. Le dépérissement du sapin dans les Vosges : rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. *Ann. Sci. For.* 44. Pp : 403-416.
236. Levy G., Delatour C., & Becker M., 1994. Le dépérissement du chêne des années 1980 dans le centre de la France, point de départ d'une meilleure compréhension de l'équilibre et de la productivité de la chênaie. *Revue Forestière Française*.
237. Li T., Zheng X., Dai Y., Yang C., Chen Z., Zhang S., ... & Liao R., 2014. Mapping near surface air temperature, pressure, relative humidity and wind speed over Mainland China with high spatiotemporal resolution. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31(5), 1127-1135.
238. Linares J.C., & Camarero J.J., 2012. Growth patterns and sensitivity to climate predict silver fir decline in the Spanish Pyrenees. *European Journal of Forest Research*, 131(4), 1001-1012.
239. Linares J.C., Taïqui L., Camarero J.J. 2011. Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Forests* 2(3): 777–796.
240. Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Lexer M.J., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259(4):698–709.
241. Liu Z., Wu J., Zhou L., Lin Y., & Fu S., 2012. Effect of understory fern (*Dicranopteris dichotoma*) removal on substrate utilization patterns of culturable soil bacterial communities in subtropical Eucalyptus plantations. *Pedobiologia* 55, 7–13.
242. López Cadenas de Llano F., & Blanco Criado, M., 1976. *Hidrología forestal*.

243. Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogée J., Davi, H., François C., ... & Le Bas C., 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree physiology*, 25(7), 813-823.
244. M'hirit O., & Benzyane M., 2006. Le Cèdre de l'Atlas: *Mémoire du temps*. Casablanca: Editions Mardaga. Pp : 13-26.
245. M'hirit O., & Blerot P., 1999. Le grand livre de la forêt marocaine. Ed. Mardaga, 280p.
246. M'hirit O., 1982. Études écologiques et forestières des cédraies du Rif Marocaine : essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la production du cèdre de l'Atlas. Ann. Rech. For. Maroc. Vol. 2. 499 p.
247. M'hirit O., 1994. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva mediterranea "Le cèdre". Ann. Rech.For. Maroc, T (27). Pp : 3-21.
248. Ma W., Fang J., Yang Y., & Mohammad A., 2010. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982 e 2006. *Sci. China Life Sci.* 53(7), 841–850.
249. MADR, 2003. Ministère de l'agriculture et du développement rural.
250. Maire R., 1926. Principaux groupements végétaux de l'Algérie.
251. Malaisse F., Sclavo J.P., & Crosiers C., 1993. Recherches sur les Encephalartos Lehm. (Zamiaceae) d'Afrique centrale 2. Apport de la morphologie foliaire dans la différenciation spécifique. *Bulletin du Jardin botanique national de Belgique/Bulletin van de Nationale Plantentuin van België*, 205-219.
252. Malki H., 1992. Contribution à l'étude de l'influence du climat et des facteurs physiques sur la végétation naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans les monts du Belezma (Algérie). Thèse. Doc. Uni. De Paris- Sorbonne. 187p.
253. Manion P.D., 1991. Tree Disease Concepts Prentice-Hall Inc. *Tree Disease Concepts, 2nd edn. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc.–1991.–402 p.*
254. Manso R., Morneau F., Ningre F., & Fortin M., 2015. Effect of climate and intra- and inter-specific competition on diameter increment in beech and oak stands, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 88 (5), 540–551.
255. Marcon A.K., Longhi-Santos T., Galvão F., Martins K.G., Botosso P.C. & Blum C.T., 2019. Climatic Response of *Cedrela fissilis* Radial Growth in the Ombrophilous Mixed Forest, Paraná, Brazil. *Floresta e Ambiente*, 26(3).
256. Massoumi A.M., 1968. Caractérisation et amélioration des sols salés et à alcalis.
257. Mathieu C., & Pieltai N.F., 1998. Analyse physique des sols. Méthodes choisies. Coll. J. Asseline J.C. Chossat & C. Valentin Eds. Techniques et documentation, Paris.
258. Mc Roberts R., Tomppo E.O. & Czaplowski R.L., 1992. Plans d'échantillonnage pour les évaluations forestières nationales.
259. McDowell N., Coops N.C., Beck P.S., Chambers J.Q., Gangodagamage C., Hicke J.A., Meddens A.J., 2015. Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances. *Trends in plant science* 20(2):114– 123.

260. McDowell N., Oockman W.T., Allen C.D., Breshears D.D., Cobb N., Kolb T., Plaut J., Sperry J., West A., Williamson D.G. & Yezzer E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New Phytologist*, 178 : 719-739.
261. Mediouni K., & Yahi N. 1994. Phytodynamique et autoécologie du *Cedrus atlantica* dans le Djurdjura. *Ann. Rech. For. Maroc. T (27) (Spécial)*. Pp : 77-104.
262. Mei A., Manzo C., Fontinovo G., Bassani C., Allegrini A., & Petracchini F. 2015. Assessment of land cover changes in Lampedusa Island (Italy) using Landsat TM and OLI data. *Journal of African Earth Sciences* 122:15-24.
263. Menzel A., & Dose V., 2005. Analysis of long-term time series of the beginning of flowering by Bayesian function estimation. *Meteorol Z* 14:429–434.
264. Menzel A., & Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), 659.
265. Menzel A., Sparks T.H., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., ... & Chmielewski F. M., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global change biology*, 12(10), 1969-1976.
266. M'hirit O., 1994. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva mediterranea "Le cèdre". *Ann. Rech. For. Maroc, T (27)*. Pp : 3-21.
267. Micaux D., 2008. Le dépérissement du sapin sur le plateau de Sault (Aude), Forêt méditerranéenne, T. XXIX n°2, p. 189-194.
268. Michot D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intra-parcellaire. *Géophysique appliquée*. Pierre et Marie CURIE (Paris VI), Paris, p. 393.
269. Mokrim A., 2009. Dépérissement du cèdre de l'Atlas : Ambiance climatique et bilan de la croissance radiale. In *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*. Vol. 41, pp 48-68.
270. Mouna M., 1986. Possibilités et époque de lutte contre la tordeuse du cèdre *acleris undulana* a walsingham. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 1986, n° 10 p. 209 -210
271. Mouna M., 2005. Overview of entomological research on the forest ecosystems of the regions south of the Mediterranean Sea. *Entomological research in Mediterranean forest ecosystems*. INRA, Paris, 23-34.
272. Moussafir M., 2007. Le cèdre, emblème du moyen Atlas. *Quotidien Aujourd'hui le Maroc*. N° de parution 1371.
273. M'seffar J., 2009. *L'érosion des sols agricoles en Estrie, causes et conséquences* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke.).
274. 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(6626), 698.

275. Navarro-Cerrillo R.M., Sarmoum M., Gazol A., Abdoun F. & Camarero J.J., 2019. The decline of algerian *cedrus atlantica* forests is driven by a climate shift towards drier conditions. *Dendrochronologia*, 55, 60-70.
276. Nedjahi A., 1988. La cédraie de Chréa. (Atlas Blideen) : Phénologie, productivité, régénération. Thèse. Doc. Univ. de Nancy. 184p.
277. Nedjahi A., 1988. La croissance et la productivité de cèdre de l'Atlas à Chréa. Ann. Rech. Forest, Algérie. 208 p.
278. Nezar kebaili M., 2009 : Influence de quelques variables du milieu sur la régénération naturelle du cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma Batna. Thèse de magister. Université de Batna. P73.
279. Norby R.J., & Cotrufo M.F., 1998. Global change: a question of litter quality. *Nature*, 396(6706), 17.
280. Ongolo S., & Karsenty A., 2011. La lutte contre la déforestation en Afrique centrale: victime de l'oubli du politique? *Ecologie politique*, (2), 71-80.
281. Ooi M.K., 2012. Seed bank persistence and climate change. *Seed Science Research*, 22(S1), S53-S60.
282. Ooi M.K., Auld T.D., & Denham A.J., 2012. Projected soil temperature increase and seed dormancy response along an altitudinal gradient : implications for seed bank persistence under climate change. *Plant and Soil*, 353(1-2), 289-303.
283. Ooi MKJ., Auld TD. & Denham AJ., 2009. Climate change and bet-hedging: interactions between increased soil temperatures and seed bank persistence. *Global Change Biology*, 15, 2375-2386.
284. Ozenda P., 1986. *La cartographie@ Wecologique et ses applications*. Paris et al.: Masson.
285. Palm R., 1977. *Dendrométrie cours polycopies*. INA, El Harrach, Alger. Pp: 9-32.
286. Palm R., 1989. Construction de tables de production à partir de placettes temporaires : présentation d'une méthode. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 46, No. 4, pp. 387-396). EDP Sciences.
287. Parde J., & Bouchon J., 1988. *Dendrométrie*. 2ème édition, ENGREF. Nancy. 328pp.
288. Parde J., 1961. *La productivité du pin d'Alep en France*. E.N.E.F. 195p.
289. Parmesan C., & Yohe G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37.
290. Parmesan C., 2006. "Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change", *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 37, No.1, 637-669.
291. Parolo G., & Rossi G., 2008. Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps. *Basic and Applied Ecology*, 9(2), 100-107.
292. Pauli H., Gottfried M., & Grabherr G., 1996. Effects of climate change on mountain ecosystems--upward shifting of alpine plants. *World resource review*, 8(3).
293. Pauly H., & Belrose V., 2005. La santé des forêts françaises : actualités de l'année 2004 - Sécheresse et canicule de l'été 2003 : observation en 2004 des conséquences sur les peuplements forestiers

- adultes. Ministère de L'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et de la Ruralité, Département Santé des Forêts, Paris.
294. Peñuelas J., Filella I., & Comas P., 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology*, 8(6), 531-544.
295. Périé C., Ouimet R., & Duchesne L., 2006. Evolution Contemporaine des principales caractéristiques dendrométrique des stations du RESEF. Mémoire de recherche forestière n° 149. Pp 35
296. Piou D., 1979. Importance de la mycorhization dans la résistance au calcaire de diverses espèces forestières.
297. Pirotti F., Parraga M.A., Stuardo E., Dubbini M., Masiero A., Ramanzin M., 2014. NDVI from Landsat 8 vegetation indices to study movement dynamics of capra ibex in mountain areas. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7, ISPRS Technica Commission VII Symposium, 29 Septembere2 October 2014, Istanbul, Turkey.
298. Pons A., 1998. L'histoire du genre cedrus d'après les données paléobotaniques disponibles. Forêt méditerranéenne. t XIX, N°3.
299. Pouchin T., 2001. Elaboration d'un observatoire paysager, Application à l'estuaire de Seine. Centre Interdisciplinaire de Recherche en Transports et Affaires Internationales, Thèse de Doctorat, université du Havre, 316 p.
300. Pradal F., 1979. Variabilité génétique et écophysologique du cèdre. Résumé. INRA département Forêt. Nancy.
301. Pujos A., 1964. *Les milieux de la cédraie marociane: étude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et du Rif en fonction des facteurs du sol et du climat et de la régénération naturelle actuelle dans ces peuplements.*
302. Pujos A., 1966. Les milieux de la cédraie marocaine. Etude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et du Rif en fonction du sol et du climat de la régénération actuelle dans les peuplements. Ann. Rech. For. Maroc. 8: Rabat 283.
303. Putod R., 1979. Le cèdre de l'Atlas en France. Bull. de vulgarisation For. 75 pp.
304. Quézel P., & Médail F., 2017. Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen.
305. Quezel P., 1976. Les forêts du pourtour méditerranéen. In *Forêts et maquis méditerranéens : écologie, conservation et aménagement. Note technique MAB, 2.* Pp : 9-33. UNESCO, Paris.
306. Quezel P., 1980. Le peuplement végétal des hautes montagnes d'Afrique du nord. Ed. Le chevalier. Pp : 205-256.
307. Quezel P., 1998. Cèdre et cédraies du pourtour méditerranéenne : signification bioclimatique et phytogéographiques. Forêt méditerranéenne. T.XIX, n°3.
308. Rabhi K., Akli A., Djouhri A., Yahi N., Boudedja S. & Messaoudene M., 2018. Bilan et croissance des reboisements de cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière, en Algérie: cas du Djurdjura et de l'Atlas blidéen. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 337, 3-15.

309. Rached-Kanouni M., Alatou D. & Soulaïman S., 2012. Responses of cork oak seedlings to short-term exposures to low temperatures. *American Journal of Scientific Research*, 59, 28-41.
310. Ragazzi E., Chinellato A., De Biasi M., Pandolfo L., Prosdocimi M., Norido F., ... & Fassina G., 1989. Endothelium-dependent relaxation, cholesterol content and high energy metabolite balance in Watanabe hyperlipemic rabbit aorta. *Atherosclerosis*, 80(2), 125-134.
311. Rakotondrasoa O.L., Malaisse F., Rajoelison G., Gaye J., Razafimanantsoa T.M., Rabearisoa M., ... & Haubruge E., 2013. Identification des indicateurs de dégradation de la forêt de tapia (*Uapaca bojeri*) par une analyse sylvicole. *Tropicultura*, 31(1), 10-19.
312. Ramade F., 1991. Eléments d'écologie, écologie appliquée, action de l'homme sur la biosphère.
313. Rehfeldt G. E., Jaquish B. C., Sáenz-Romero C., Joyce D. G., Leites L.P., StClair J. B., & López Upton J., 2014. Comparative genetic responses to climate in the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudo tsugamenziesii*: reforestation. *Forest Ecology and Management* 324:147–157.
314. Rembold F., Atzberger C., Savin I., & Rojas O., 2013. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. *Remote Sensing*, 5(4), 1704-1733.
315. Requardt A., Poker J., & Kohl M., 2007. Etude de faisabilité sur les moyens de lutte contre le dépérissement forestier. Rapport technique. Décembre 2007.
316. Rhafour R., Strani B., Zair T., Ghanmi M., Aafi A., El Omari M., & Bentayeb A., 2014. Chemical composition, antibacterial and antifungal activities of the *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière seeds essential oil. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 3(5), 1034-1043.
317. Ridremont F., Degré A., & Claessens H., 2012. Mieux comprendre et évaluer la réserve en eau des sols forestiers. *Forêt. Nature*, 116, 18-29.
318. Riou-Nivert P., 2005. Les résineux. Tome II : Ecologie et pathologie. Ed. I.D.F, 356 p.
319. Riou-Nivert P., 2007. Fiche extraite de la Flore forestière française. T (III) région méditerranéenne. Forêt-entreprise, n°174. Pp : 14-16. Ripert, 2007.
320. Ripert C., & Boisseau B., 1994. Écologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence. CMAGREF. Pp : 156-171.
321. Ripert C., 2007. Autoécologie du cèdre de l'Atlas. Forêt-entreprise. N°174. Pp : 17-20.
322. Roche E. 2006. Palynologie de la région méditerranéenne. Université de Liège. Notes de cours, inédit.
323. Rondeux J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Les presses agronomiques de Gembloux. Pp : 3-520.
324. Rondeux J., 1999. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Les presses agronomiques de Gembloux.
325. Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S. H., Rosenzweig C., & Pounds J.A., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57.
326. Rouse Jr, J., Haas R.H., Schell J.A., & Deering D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.

327. Saïd L., & Bakhyi B., 2016. Dynamique et accroissement radial du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) -Cas de la forêt d'Azrou (Maroc). *Nature & Technology*, (14), 19.
328. Salas-Gonzales R., Houllier F., Lemoine B., Pignard G., 2001. Forecasting wood resources on the basis of national forest inventory data. Application to *Pinus pinaster* Ait. in southwestern France, *Ann. For. Sci.* 58 : 785–802.
329. Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R.M., Guibal F., & Abdoun F., 2018. Structure, tree growth dynamics and management of *Cedrus atlantica* Manetti forests in Theniet El Had National Park (N-W Algeria). *Open J. Ecol.* 8, 432–446.
330. Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R., & Guibal F., 2019. Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*. Volume 342. 4e trimestre. octobre 2019. P: 29-40
331. Schneider S., 2008. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une inversion jointe de données d'infiltration et de résistivité électrique *Sciences de la Terre et de l'univers*. Université Paris-Sud 11, Paris, p. 144.
332. Schoenberger A., 1970. Etude de la végétation de l'Aurès oriental. FAO. Projet Algérie 15. 20 p.
333. Schultz C., Jedd T., & Beam R., 2012. The Collaborative Forest Landscape Restoration Act: A history and overview of the first projects. *J. For.*110(7):381–391.
334. Schütz J-P., 1997. *Sylviculture 2: La gestion des forêts irrégulières et mélangées*. Lausanne: Presses polytechnique et universitaires romandes. 178 p.
335. Seltzer P., 1946. *Le climat de l'Algérie*. Institut Météo et Physique du Globe. Uni. Alger. 129 p.
336. SFEA, 2008. Que peut faire le forestier par rapport à ces changements ? Fiche n° 2.5.
337. Sinclair J.D., & Senter R.J., 1967. Increased preference for ethanol in rats following alcohol deprivation. *Psychonomic Science*, 8(1), 11-12.
338. Sinclair W.A., 1964. Comparisons of recent declines of white ash, oak, and sugar maple in northeastern wood lands. *Cornell Plant.*, vol. 20, pp. 62-67.
339. Skeates A., 2013. Application du principe de ruissellement pré-développement dans un nouveau développement de la ville de granby.
340. Slimani S., Derridj A., & Gutiérrez E., 2014. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria). *Forestry Systems* 23, 448–460.
341. Sodhi N.S., Brook B.W., & Bradshaw C.J., 2009. Causes and consequences of species extinctions. *The Princeton guide to ecology*, 1, 514-520.
342. Stegner M.A., Turner M.G., Iglesias V., & Whitlock C. 2019. Post-fire vegetation and climate dynamics in low-elevation forests over the last three millennia in Yellowstone National Park. *Ecography*, 42(6), 1226-1236.
343. Stow C., Allen C.R., & Garmestani A.S., 2007. Evaluating discontinuities in complex systems: toward quantitative measures of resilience. *Ecology and Society*12(1): 26.

344. Talbi Y., 2010. Contribution a l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans la région de Batna: cas de la cédraie de Belezma. These de magister, université de Batna (Algérie). 114 p.
345. Tchatchou B., Sonwa D. J., Ifo S., & Tiani A.M., 2015. *Déforestation et dégradation des forêts dans le Bassin du Congo: état des lieux, causes actuelles et perspectives* (Vol. 120). CIFOR.
346. Terrab A., Paun O., Talavera S., Tremetsberger K., Arista M., & Stuessy T.F., 2006. Genetic diversity and population structure in natural populations of Moroccan Atlas cedar (*Cedrus atlantica*; Pinacea) determined with cpSSR markers. *American Journal of Botany* 93(9). Pp: 1274-1280.
347. Tewkesbury A.P., Comber A.J., Tate N.J., Lamb A., & Fisher P.F., 2015. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. *Remote Sensing of Environment*, 160, 1-14.
348. Thomas A.L., Gégout J.C., Landmann G., Dambrine C., & King D., 2002. Relation between ecological condition and fir decline in a standstone region of the Vosges mountains (northeastern France). *Ann.For.Sci.* 59, 265-273.
349. Thuiller W., Albert C., Araújo M.B., Berry P.M., Cabeza M., Guisan A., Hickler T., Midgley G.F., Paterson J., Schurr F.M. *et al.*, 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 9, 137-152.
350. Till C., 1985. Recherches dendrochronologiques sur le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Endl. carrière) au Maroc. Thèse. Doc. Fac des sciences. Uni. Catholique de Louvain. LaNeuve. 231 p et annexes.
351. Tinner W., & Theurillat J.P., 2003. Uppermost limit, extent, and fluctuations of the timberline and treeline ecocline in the Swiss Central Alps during the past 11,500 years. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(2), 158-169.
352. Tinner W., & Theurillat J.P., 2003. Uppermost limit, extent, and fluctuations of the timberline and treeline ecocline in the Swiss Central Alps during the past 11,500 years. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(2), 158-169.
353. Toth J., 1970. Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France. *Rev. For. Fr.*, vol . 22, n° 3. Pp : 355-364.
354. Toth J., 1971. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* en France). *Bulletin de la vulgarisation forestière*. N° 4. Pp : 5-19.
355. Toth J., 1978. Contribution à L'études de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le sud de la France. Thèse. Doc. Ing. Fac. St. Marseille, France. 136p.
356. Toth J., 1980. Le cèdre III. La graine des plants en pépinière, reboisement, régénération naturelle. *Forêt privée*. *Rev. For; Europe*. N° 132. Pp : 41-47.
357. Toth J., 1981. Contribution à l'étude monographique du cèdre méditerranéen. INRA. Station d'Avignon : 25p.

358. Toth J., 1982-1984. Quelques éléments nouveaux pour mieux situer et caractériser le cèdre de l'Himalaya en France vis-à-vis du cèdre de l'Atlas et du cèdre du Liban en France méridionale. INRA. Bull. Soc. et Sci. Nat. Vaucluse. Pp : 41-49.
359. Toth J., 1984. La prévision des possibilités de récoltes de cônes de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Bull. Tech. N° 15 O.N.F. Pp: 39-51.
360. Toth J., 1987. Effet des facteurs d'environnement sur l'accroissement du cèdre de l'Atlas. *Bull. Soc. et Nat. Vaucluse*, 13-49.
361. Toth J., 1990. Le cèdre III. Intérêt paysage. Cédraie touristique. Forêt privée. N° 195. 8p.
362. Toth J., 1994. Le cèdre de l'atlas en France : Croissance et production dans les dispositifs anciens. *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27) : 321-335.
363. Toth J., 2005. Le cèdre de France - Etude approfondie de l'espèce. Ed. L'harmattan. Paris 207p.
364. Tucker C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
365. Tuhkanen S., 1980. *Climatic parameters and indices in plant geography*. Édité.
366. Vannini A., Valentini R., & Luisi N., 1996. Impact of drought and *Hypoxylon mediterraneum* on oak decline in the Mediterranean region. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 53, No. 2-3, pp. 753-760). EDP Sciences.
367. Vanpeene-Bruhier S, 2003. Evaluation des risques environnementaux pour la gestion durable des espaces : synthèse des concepts de l'écologie du paysage. *Evaluation des risques environnementaux pour une gestion durable des espaces. Journées 2003 de l'Association Internationale pour l'Ecologie du Paysage IALE France*, 9-19.
368. Vauthier Q., 2011. *Estimation des réserves utiles des sols de Seine-et-Marne* (Doctoral dissertation, UHP-Université Henri Poincaré). 54p.
369. Vedrenne G., 1982. L'analyse multivariable et la mise en évidence d'indicateurs biologiques : application à l'étage méditerranéen de Provence calcaire (Doctoral dissertation).
370. Vennetier M., 2001. Influence de la densité des peuplements sur la croissance en hauteur et radiale de *Pinus sylvestris* L. en région méditerranéenne française. *Forêt méditerranéenne*.
371. Vennetier M., 2012. Changement climatique et dépérissements forestiers. In Corvol A. (éd.) *Changement climatique et modification forestière*, CNRS, Paris, p.50-60
372. Verbesselt J., Somers B., Lhermitte S., Jonckheere I., Van Aardt J., & Coppin P., 2007. Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 357-368.
373. Virkkala R., Heikkinen R.K., Leikola N., & Luoto M., 2008. Projected Large-Scale Range Reductions of Northern-Boreal Land Bird Species Due to Climate Change. *Biological Conservation*, vol. 141, No.5, 1343-1353.
374. Visser M.E., 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 275, 649-659.

375. Vitousek P.M., D'antonio C.M., Loope L.L., Rejmanek M., & Westbrooks R., 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology*, 21(1), 1-16.
376. Walck J.L., Hidayati S.N., Dixon K.W., Thompson K.E.N., & Poschlod P., 2011. Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology*, 17(6), 2145-2161.
377. Walther B.A., 2002. Vertical stratification and use of vegetation and light habitats by Neotropical forest birds. *Journal für Ornithologie*, 143(1), 64-81.
378. Walther G.R., Post E., Convey P *et al.*, 2002. Ecological responses to recent climate change, *Nature*, vol. 416, 389-395.
379. Walther G.R., Beißner S., & Burga C.A., 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, 16(5), 541-548.
380. Wargo P.M., 1996. Consequences of environmental stress on oak: predisposition to pathogens. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 53, No. 2-3, pp. 359-368). EDP Sciences.
381. Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F. & Smol J.P., 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6 part2), 2273-2282.
382. Williamson G.B., Laurance W.F., Oliveira A.A., Delamonica P., Gascon C., Lovejoy T.E., Pohl L., 1997. Amazonia tree mortality during the El Niño drought. *Conserv. Biol.*, 2000, 14, 1538-1542.
383. Yves M., 2005. La forêt face au changement de climat. Exposé lors de la réunion d'information sur « La sylviculture et les changements climatiques ». CRPF. Florac.
384. Zhang G.L., Dong J.W., Xiao X.L., Hu Z.M., Sheldon S., 2012. Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China based on SPOT-VGT NDVI data. *Ecol. Eng.* 38(1):20-29.
385. Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., et al., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475.
386. Zhao X., Hu H., Shen H., Zhou D., Zhou L., Myneni R.B., Fang J., 2014. Satellite indicated long-term vegetation changes and their drivers on the Mongolian Plateau. *Landsc. Ecol.* 30(9):1599-1611.
387. Zhu Z., Woodcock C.E., & Olofsson P., 2012. Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 122, 75-91.
388. Zine El Abidine A., & Aadel T., 2009. Analyse écophysiological du dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le Moyen Atlas Tabulaire. In *Annales de la Recherche Forestière au Maroc* 41:110-122.
389. Zufferey V., 2019. Gestion de l'eau. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 51(1), 16-17.
390. Zurita-Milla R., Kaiser G., Clevers J.G.P.W., Schneider W., & Schaepman M.E., 2009. Downscaling time series of MERIS full resolution data to monitor vegetation seasonal dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1874-1885.

ANNEXES



Annexe 1: Données des analyses physico-chimiques des sols étudiés
(placettes saine et déperit).

Placette	Altitude	Pente	exposition	Taux Déperissement	pH	CE	P	Calcaire tot	RU
P1*1	2009	25	S	18.60%	6.16	2.18	24.37	0	15.81
P1*2	2009	25	S	18.60%	5.86	1.85	15.05	0	15.43
P1*3	2009	25	S	18.60%	6.38	1.76	10.75	4	10.29
P2*1	1840	25	S	13.64%	7.29	1.85	19.35	9.5	7.97
P2*2	1840	25	S	13.64%	6.93	2.77	22.22	16.5	7.89
P2*3	1840	25	S	13.64%	7.63	2.35	24.37	23	7.72
P3*1	1794	20	SO	16.67%	6.18	1.13	12.18	0	7.92
P3*2	1794	20	SO	16.67%	6.68	1.18	9.32	0	12.89
P4*1	1660	25	S	100.00%	6.7	1.93	23.65	17	7.17
P4*2	1660	25	S	100.00%	6.27	1.85	13.62	21	6.89
P4*3	1660	25	S	100.00%	6.39	1.85	7.17	53	6.72
P5*1	1620	25	S	100.00%	6.7	1.93	23.65	17	7.17
P5*2	1620	25	S	100.00%	6.27	1.85	13.62	21	6.89
P5*3	1620	25	S	100.00%	6.39	1.85	7.17	53	6.72
P6*1	2062	10	SO	10.00%	6.7	1.93	23.65	17	7.17
P6*2	2062	10	SO	10.00%	6.27	1.85	13.62	21	6.89
P6*3	2062	10	SO	10.00%	6.39	1.85	7.17	53	6.72
P7*1	2036	45	S	36.84%	6.93	2.77	12.18	0	7.17
P7*2	2036	45	S	36.84%	6.24	1.18	25.8	0	6.89
P7*3	2036	45	S	36.84%	6.06	0.92	10.75	0	6.72
P8*1	1779	45	S	100.00%	6.28	1.51	10.03	0	7.17
P8*2	1779	45	S	100.00%	7.08	1.43	23.65	0	6.89
P8*3	1779	45	S	100.00%	7.05	1.15	10.75	0	6.72
P9*1	1650	35	S	100.00%	6.83	2.27	18.63	0	7.17
P9*2	1650	35	S	100.00%	6.22	1.18	10.03	49	6.89
P9*3	1650	35	S	100.00%	6.87	1.22	19.35	73	6.72
P10*1	1610	35	S	100.00%	6.57	1.6	9.32	14	7.17
P10*2	1610	35	S	100.00%	6.54	1.68	8.6	32	6.89
P10*3	1610	35	S	100.00%	7.54	1.76	17.92	23	6.72
P11*1	1890	25	SE	76.19%	6.27	1.43	10.75	0	16.18
P11*2	1890	25	SE	76.19%	6.77	2.18	27.23	0	12.13
P11*3	1890	25	SE	76.19%	6.86	1.18	11.47	0	12.94
P12*1	1790	25	SE	70.00%	6.27	1.43	10.75	0	16.18
P12*2	1790	25	SE	70.00%	6.77	2.18	27.23	0	12.13
P12*3	1790	25	SE	70.00%	6.86	1.18	11.47	0	12.94
P13*1	1743	25	SE	66.67%	6.27	1.43	10.75	0	16.18
P13*2	1743	25	SE	66.67%	6.77	2.18	27.23	0	12.13
P13*3	1743	25	SE	66.67%	6.86	1.18	11.47	0	12.94
P14*1	1700	25	SE	70.59%	6.27	1.43	10.75	0	16.18
P14*2	1700	25	SE	70.59%	6.77	2.18	27.23	0	12.13
P14*3	1700	25	SE	70.59%	6.86	1.18	11.47	0	12.94
P16*1	1581	15	N	11.54%	6.63	2.35	12.18	0	7.48
P16*2	1581	15	N	11.54%	6.91	3.61	27.23	0	7.12
P16*3	1581	15	N	11.54%	6.51	2.35	9.32	0	6.51
P17*1	1576	25	NO	10.00%	6.63	2.35	12.18	0	7.48
P17*2	1576	25	NO	10.00%	6.91	3.61	27.23	0	7.12
P17*3	1576	25	NO	10.00%	6.51	2.35	9.32	0	6.51
P21*1	1954	20	NO	2.44%	6.71	3.78	30.1	0	7.17
P21*2	1954	20	NO	2.44%	6.61	1.97	22.93	0	6.89
P21*3	1954	20	NO	2.44%	6.27	2.1	14.33	1.5	6.72
P22*1	1910	35	SO	6.25%	6.57	1.6	9.32	14	7.17
P22*2	1910	35	SO	6.25%	6.54	1.68	8.6	32	6.89
P22*3	1910	35	SO	6.25%	7.54	1.76	17.92	23	6.72
P23*1	1900	35	SO	5.41%	6.57	1.6	9.32	14	7.17
P23*2	1900	35	SO	5.41%	6.54	1.68	8.6	32	6.89
P23*3	1900	35	SO	5.41%	7.54	1.76	17.92	23	6.72

P24*1	1940	35	NO	36.11%	6.71	3.78	30.1	0	7.17
P24*2	1940	35	NO	36.11%	6.61	1.97	22.93	0	6.89
P24*3	1940	35	NO	36.11%	6.27	2.1	14.33	1.5	6.72
P25*1	1930	20	NO	8.33%	6.71	3.78	30.1	0	7.17
P25*2	1930	20	NO	8.33%	6.61	1.97	22.93	0	6.89
P25*3	1930	20	NO	8.33%	6.27	2.1	14.33	1.5	6.72
P26*1	1913	25	NO	6.06%	6.71	3.78	30.1	0	7.17
P26*2	1913	25	NO	6.06%	6.61	1.97	22.93	0	6.89
P26*3	1913	25	NO	6.06%	6.27	2.1	14.33	1.5	6.72
P27*1	1913	30	SO	3.03%	6.93	2.27	8.6	6	7.92
P27*2	1913	30	SO	3.03%	6.3	1.76	9.32	33.5	12.89
P29*1	1885	35	SO	3.33%	6.83	2.27	18.63	0	7.17
P29*2	1885	35	SO	3.33%	6.22	1.18	10.03	49	6.89
P29*3	1885	35	SO	3.33%	6.87	1.22	19.35	73	6.72
P30*1	1878	30	SO	9.38%	6.83	2.27	18.63	0	7.17
P30*2	1878	30	SO	9.38%	6.22	1.18	10.03	49	6.89
P30*3	1878	30	SO	9.38%	6.87	1.22	19.35	73	6.72
P31*1	1835	25	N	78.26%	7.49	2.94	17.2	7	7.17
P31*2	1835	25	N	78.26%	6.75	2.1	28.67	48	6.89
P32*1	1800	45	SE	66.67%	6.23	2.02	25.8	0	13.83
P32*2	1800	45	SE	66.67%	6.61	1.34	10.03	0	13.16
P32*3	1800	45	SE	66.67%	6.09	1.85	8.6	0	12.28
P33*1	1852	45	SE	76.67%	6.23	2.94	35.83	0	13.83
P33*2	1852	45	SE	76.67%	6.52	1.43	10.75	6	13.16
P33*3	1852	45	SE	76.67%	6.41	2.69	30.1	0	12.28
P34*1	1692	35	NO	76.67%	6.05	0.45	23.65	0	10.33
P34*2	1692	35	NO	76.67%	5.92	1.6	21.5	6	8.4
P35*1	1666	35	SE	86.49%	6.95	1.51	27.95	0	16.59
P35*2	1666	35	SE	86.49%	6.18	1.64	9.32	0	10.56
P36*1	1640	35	S	88.89%	6.67	1.76	9.32	5	7.59
P36*2	1640	35	S	88.89%	6.55	1.43	8.6	45	6.56
P36*3	1640	35	S	88.89%	6.17	1.51	12.18	53	6.97
P37*1	1753	35	N	10.00%	6.64	2.27	9.32	0	12.98
P37*2	1753	35	N	10.00%	6.28	1.51	10.03	33	11.36
P37*3	1753	35	NE	10.00%	6.37	1.43	10.03	49	11.93
P38*1	1924	45	NE	40.00%	6.1	1.6	25.8	0	15.98
P38*2	1924	45	NE	40.00%	6.72	1.68	9.32	1	11.36
P39*1	1942	35	NE	4.00%	6.1	1.6	25.8	0	15.98
P39*2	1942	35	NE	4.00%	6.72	1.68	9.32	1	14.36
P40*1	1685	25	NO	15.38%	6.37	1.13	21.5	0	7.48
P40*2	1685	25	NO	15.38%	6.58	1.68	18.63	0	7.12
P40*3	1685	25	NO	15.38%	6.26	3.7	15.77	0	6.51
P41*1	1693	30	NO	12.50%	6.37	1.13	21.5	0	7.48
P41*2	1693	30	NO	12.50%	6.58	1.68	18.63	0	7.12
P41*3	1693	30	NO	12.50%	6.26	3.7	15.77	0	6.51
P42*1	1550	35	NE	10.81%	5.92	2.27	24.37	0	7.48
P42*2	1550	35	NE	10.81%	6.03	2.6	31.53	0	7.12
P43*1	1500	35	NE	3.70%	6.68	0.48	16.48	0	7.48
P43*2	1500	35	NE	3.70%	6.06	0.12	10.03	0	7.12
P43*3	1500	35	NE	3.70%	6.48	0.79	23.65	0	6.51
P44*1	1536	45	NO	4.35%	6.68	0.48	16.48	0	7.48
P44*2	1536	45	NO	4.35%	6.06	0.12	10.03	0	7.12
P44*3	1536	45	NO	4.35%	6.48	0.79	23.65	0	6.51
P45*1	1570	35	SE	31.25%	5.76	1.43	19.35	0	7.59
P45*2	1570	35	SE	31.25%	6.56	0.42	9.32	0	6.56
P46*1	1533	40	SO	83.33%	5.76	1.43	19.35	0	7.59
P46*2	1533	40	SO	83.33%	6.56	0.42	9.32	0	6.56
P47*1	1708	25	SE	80.00%	6.64	1.43	17.92	0	7.59
P47*2	1708	25	SE	80.00%	6.57	1.26	20.78	0	6.56
P47*3	1708	25	SE	80.00%	6.07	0.76	8.6	0	6.89
P48*1	1671	25	SO	25.00%	6.64	1.43	17.92	0	7.59

P48*2	1671	25	SO	25.00%	6.57	1.26	20.78	0	6.56
P48*3	1671	25	SO	25.00%	6.07	0.76	8.6	0	6.89
P50*1	1678	30	SE	95.83%	6.67	1.76	9.32	5	7.59
P50*2	1678	30	SE	95.83%	6.55	1.43	8.6	45	6.56
P50*3	1678	30	SE	95.83%	6.17	1.51	12.18	53	6.97
P51*1	1686	40	SE	100.00%	6.67	1.76	9.32	5	7.59
P51*2	1686	40	SE	100.00%	6.55	1.43	8.6	45	6.56
P51*3	1686	40	SE	100.00%	6.17	1.51	12.18	53	6.97
P52*1	1664	45	SE	81.25%	6.67	1.76	9.32	5	7.59
P52*2	1664	45	SE	81.25%	6.55	1.43	8.6	45	6.56
P52*3	1664	45	SE	81.25%	6.17	1.51	12.18	53	6.97
P53*1	1815	40	S	76.47%	5.65	0.52	30.1	0	12.88
P53*2	1815	40	S	76.47%	6.74	3.19	10.75	0	9.83
P54*1	1804	40	SE	100.00%	6.23	2.02	25.8	0	13.83
P54*2	1804	40	SE	100.00%	6.61	1.34	10.03	0	13.16
P54*3	1804	40	SE	100.00%	6.09	1.85	8.6	0	12.28
P56*1	1737	40	SO	78.26%	6.51	1.26	8.6	0	10.98
P56*2	1737	40	SO	78.26%	6.21	1.22	20.78	0	9.36
P57*1	1728	45	S	5.88%	6.51	1.26	8.6	0	10.98
P57*2	1728	45	S	5.88%	6.21	1.22	20.78	0	9.36

Annexe 2: Statistiques descriptives

➤ Données pédologiques

Statistique	Alt	Pente	Dépérissement	pH	CE	P	Calcaire tot	RU
Minimum	1500,00	10,00	0,02	5,65	0,12	7,167	0,00	6,51
Maximum	2062,00	45,00	1,00	7,63	3,78	35,833	73,00	16,58
Médiane	1753,00	35,00	0,36	6,55	1,68	14,333	0,00	7,17
Moyenne	1766,25	31,78	0,46	6,51	1,75	16,290	11,00	8,86
Variance	20437,58	76,00	0,14	0,13	0,54	52,234	366,86	8,84
Ecart-type	142,96	8,71	0,37	0,36	0,74	7,227	19,15	2,97

➤ Données dendroécologiques :

Statistique	Alt	Pente	Dépérissement	Hdom	D1.30	RU	pâturage	Densité
Minimum	1500,00	10,00	0,02	8,00	27,00	6,51	1,00	13,00
Maximum	2062,00	45,00	1,00	21,00	85,00	16,58	10,00	43,00
Médiane	1753,00	35,00	0,36	13,00	54,00	7,17	10,00	25,00
Moyenne	1766,24	31,78	0,46	12,52	57,02	8,86	5,93	25,58
Variance	20437,58	76,00	0,14	4,16	154,91	8,84	20,21	66,98
Ecart-type	142,96	8,71	0,37	2,04	12,44	2,97	4,49	8,18

Annexe 3 : Fiche d'inventaire

Forêt :

Essence :	Date :
Série :	Altitude :
Pente :	Exposition :
Coordonnées : X :	Y :

N° Arbre	D _{1.30} (cm)	H _{dom} (m)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		

Observations
Classe de dépérissement :
N ^{bre} d'arbre total :
N ^{bre} d'A sain : N ^{bre} d'A déperit :
L'état sanitaire :
défauts sur les troncs
% d'élagage naturel
% de branches mortes
% d'écoulement de résine
L'aspect des houppiers : Normal /Comprimé
<u>Sol</u>
Compacité :
Pâturage :
Relevée floristique
Recouvrement
Arborescentes :
Arbustives :
Herbacées :
Les autres essences :

Autre Observation :

.....

.....

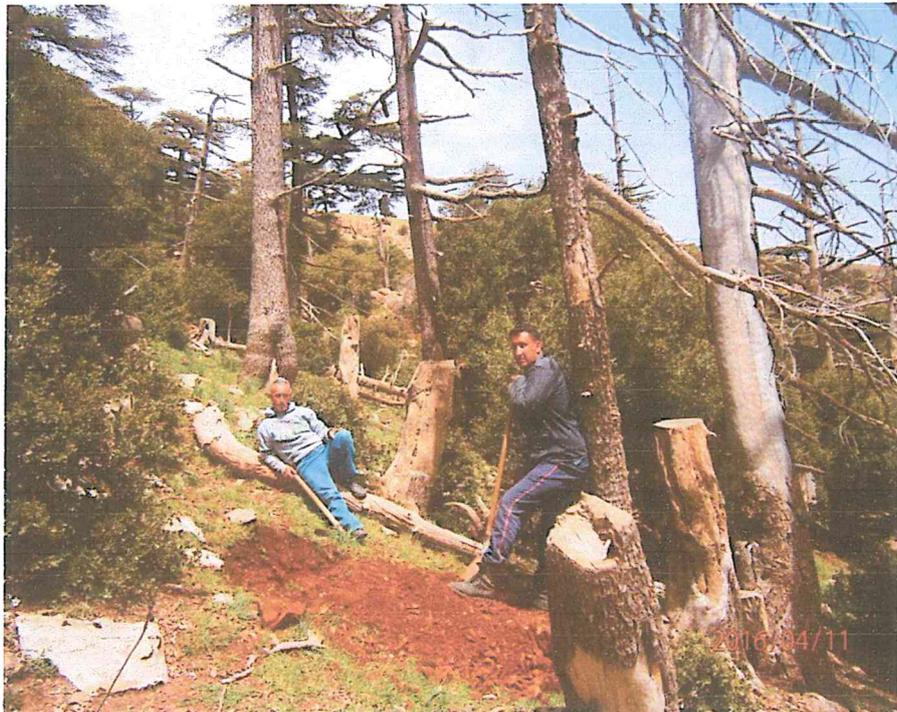
.....

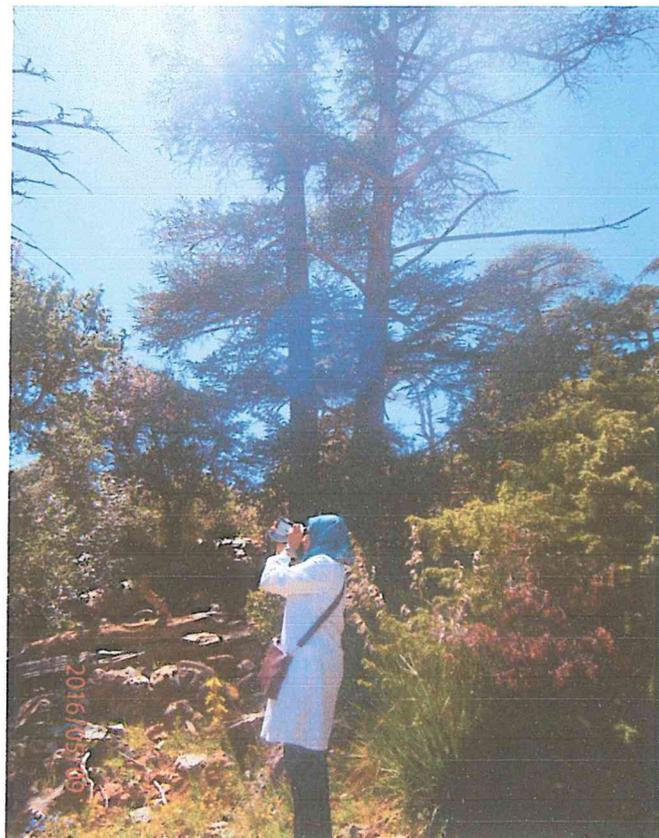
.....

.....

.....

Annexe 4: Photo des sorties sur le terrain et l'équipe des deux régions d'étude.
(S. Belloula, 2016)





Annexe 5: Effet du vent sur le cèdre de l'Atlas a haut altitude (A et B)
(S. Belloula, 2016)



Caractérisation des facteurs écologiques influents sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas Cas des cédraies du massif de l'Aurès

Résumé

Ce travail de recherche est consacré à l'étude des caractéristiques des facteurs écologiques influençant sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas dans les Monts de Chélia et Ouled Yagoub (Aurès, Algérie). Afin de mettre en évidence les relations, des facteurs écologiques particulièrement les variables de la station, les variables pédologiques et des variables dendrométriques, avec le phénomène de dépérissement, des placettes d'échantillonnage ont été installées. Sur celles-ci, une étude spatio-temporelle par les techniques géomatiques a été également effectuée.

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a montré la répartition des variables en 3 groupes homogènes. De même l'analyse en composantes principales (ACP) a montré les corrélations entre les facteurs étudiés.

L'interprétation de l'analyse multivariée des données dendro-écologiques a suggéré que le dépérissement est largement marqué au niveau des basses altitudes, à des expositions où le déficit hydrique est élevé ; il s'agit des expositions (Sud) et des sols localisés sur les pentes abruptes. A cela s'ajoutant l'influence du pâturage qui aggrave le cas et menace toutes espérances de régénération. A ce sujet, on note que l'ensemble des catégories de diamètres sont touchés par le dépérissement, sans exception.

L'analyse de la dynamique des peuplements par des images satellitaires a montré une régression dans la superficie de la cédraie et une migration vers les hautes altitudes.

L'analyse physico-chimique du sol montre une différence négligeable entre les cédraies saines et dépérit. Les taux du réserve utile les plus faible et les taux les plus élevé de calcaire total se coïncide dans les placettes dépérit.

Mots-clés : Aurès ; Chélia ; Ouled Yagoub ; *Cedrus atlantica* ; dépérissement ; facteurs écologique ; Réserve utile ; dendrométrie ; analyse physicochimique du sol ; Télédétection ; SIG.

توصيف العوامل البيئية المؤثرة في تدهور الأرز الأطلسي حالة الأرز في سلسلة جبال الأوراس

ملخص

هذا العمل البحثي مكرس لدراسة خصائص العوامل البيئية التي تؤثر على تدهور أرز الأطلس في جبال شيليا وأولاد يعقوب (أوراس، الجزائر). ومن أجل تسليط الضوء على العلاقات، تم تثبيت العوامل البيئية، لا سيما متغيرات المنطقة، متغيرات التربة ومتغيرات قياس الأشجار، مع ظاهرة الذبول بالقياس بعينات قطع أرضية. تم إجراء دراسة مكانية زمانية بواسطة التقنيات الجيوماتيكية.

أظهر التصنيف التصاعدي الهرمي (CAH) توزيع المتغيرات في 3 مجموعات متجانسة. وبالمثل، أظهر تحليل المكون الرئيسي (PCA) الارتباط بين العوامل المدروسة. يوحي تفسير تحليل متعدد المتغيرات للبيانات البيئية الشجرية أن الذبول يميز على نطاق واسع في الارتفاعات المنخفضة وفي حالة الواجحات التي يكون فيها عجز المياه مرتفعا وتركزت في الواجحات الجنوبية ذات تربة واقعة على المنحدرات الحادة. يضاف إلى ذلك تأثير الرعي الذي يؤدي إلى تفاقم الحالة ويهدد كل أمل في التجديد. وفي هذا الصدد، نلاحظ أن جميع فئات العرض / قطر الأشجار أصيبت بالذبول، بدون استثناء.

أظهر تحليل ديناميكية الغابة بواسطة صور الأقمار الصناعية انحدازا في مساحة غابة الارز والهجرة نحو المرتفعات العالية. يظهر التحليل الفيزيائي والكيميائي للتربة فرقا ضئيلا بين أشجار الأرز في المناطق الصحية والذابلة. أدنى معدلات الاحتياطي المفيدة للماء وأعلى معدلات إجمالي الخير يتزامن في قطع ذات الأشجار النابالة.

كلمات مفتاحية: الأوراس، شيليا، أولاد يعقوب، الأرز الأطلسي، الذبول، العوامل البيئية، قياس الأشجار، احتياطي مفيد، التحليل الفيزيائي الكيميائي للتربة، الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية.

Characterization of influential ecological factors on the decline of Atlas cedar Case of cedar graves of the Aurès massif

Abstract

This research is devoted to the study of characteristics of the ecological factors influencing the decline of Atlas cedar in the Monts of Chélia and Ouled Yagoub (Aurès, Algeria). In order to highlight the relationships, ecological factors, particularly station variables, soil variables and dendrometric variables, with the decline phenomenon, sample plots were installed. A spatio-temporal study by geomatic techniques was also carried out.

The Ascending Hierarchical Classification (AHC) showed the distribution of the variables in 3 homogeneous groups. Likewise, the principal component analysis (PCA) has shown the correlations between the factors studied.

The interpretation of the multivariate analysis of the dendro-ecological data suggested that the decline is largely marked at low altitudes, at exposures where the water deficit is high; these are the exposures (South) and the soils located on the steep slopes. Added to this is the influence of grazing which aggravates the case and threatens all hopes of regeneration. In this regard, it should be noted that all the categories of diameters are affected by dieback, without exception.

Analysis of the stand dynamics by satellite images showed a regression in the area of the cedar forest and a migration towards high altitudes.

The physicochemical analysis of the soil shows a negligible difference between healthy and decaying cedar trees. The lowest useful reserve rates and the highest total limestone rates coincide in the wasting plots.

Keywords: Aurès ; Chélia ; Ouled Yagoub ; *Cedrus atlantica* ; decline ; ecological factors; dendrometry ; useful reserve ; physicochemical analysis of the soil ; Remote sensing ; GIS.